



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

**PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA POLIMÉRICA A PARTIR DE POLIETILENO
TEREFTALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN**

Ana Gloria Montes Peña

Asesorado por el Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Guatemala, enero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA POLIMÉRICA A PARTIR DE POLIETILENO
TEREFTALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA GLORIA MONTES PEÑA

ASESORADO POR EL ING. RENATO GIOVANNI PONCIANO SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADORA	Dra. Casta Petrona Zezeña Zezeña
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
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 POLIMÉRICA A PARTIR DE POLIETILENO
TEREFTALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha el 19 de marzo de 2013.



Ana Gloria Montes Peña



Guatemala, 14 de octubre de 2014

Ingeniero
Victor 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 de la estudiante Ana Gloria Montes Peña, carné universitario No. 200815347, denominado **"PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA POLIMÉRICA A PARTIR DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN"**. 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"


Renato Giovanni Ponciano Sandoval
INGENIERO QUÍMICO
Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
Asesor de Tesis
Profesor Titular VI





Guatemala, 11 de noviembre de 2014
Ref. EIQ.TG-IF.052.2014

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 008-2013 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 la estudiante universitaria: **Ana Gloria Montes Peña.**
Identificada con número de carné: **2008-15347.**
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA.**

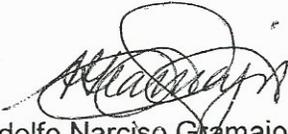
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA POLIMÉRICA A PARTIR DE
POLIETILENO TEREFALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y
TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN**

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. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.008.2015

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 la estudiante, **ANA GLORIA MONTES PEÑA** titulado: **"PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA POLIMÉRICA A PARTIR DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN"**. 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. Victor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, Enero 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale



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 POLIMÉRICA A PARTIR DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE SINTERIZACIÓN**, presentado por la estudiante universitaria: **Ana Gloria Montes Peña**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, enero de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Tres divinas personas

Honra y gloria a las 3 divinas personas: el Padre, el Hijo y el Espíritu Santo, por su infinita misericordia conmigo y brindarme todos sus dones, por ser fuente de amor y sabiduría.

Virgen María

Madre Santísima por ser la intercesora ante Dios Padre, por cubrirme siempre con su divino manto, protegiéndome y dándome el consuelo en mis momentos difíciles.

Mis padres

Luis Antonio Montes González y Ana Leticia Peña, por ser mi mayor ejemplo de superación, estoy orgullosa de ustedes, por brindarme su amor incondicional y educarme con valores éticos y morales que me permitieron ser una persona de bien.

Mis hermanos

Augusto Fernando Santiso Peña y Samanda Leticia Montes Peña, por darme su consejo como hermanos mayores e influir positivamente en mi vida, dándome su amor y paciencia siempre. Jennifer Montes Peña (q.e.p.d), por ser mi ejemplo de lucha en la vida y mostrarme que aunque existan impedimentos, no hay excusas para ser felices y mostrar una sonrisa.

Mis abuelas

Blanca Gloria Ayala Solares (mamá Yoyita), por inculcarme el amor a las tres divinas personas y a la Virgen María. Por darme su amor incondicional, brindarme sus sabios consejos y estar pendiente de mí en todas las etapas de mi vida. Adelaida González (mamá Dela, q.e.p.d), la llevo presente en mi corazón por ser una fuente de enseñanzas y alegría en mi vida.

Mi abuelo

Fernando Peña Gatica, por su apoyo y consejos de vida y académicos.

Mi familia

A mis tíos, primos y sobrinos por estar siempre pendiente de mí y apoyarme en el transcurso de mi vida, principalmente a Blanca Ligia Peña Ayala que ha sido como una madre y a sus hijos Ligia Rossana López Peña, Carlos Aguilera Peña, Javier Aguilera Peña.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y darme el privilegio de formarme bajo su techo.
Facultad de Ingeniería	Por formarme profesionalmente, brindándome el conocimiento necesario para que ejerza mi profesión con valores éticos.
Mis padres	Luis Antonio Montes González y Ana Leticia Peña, por su constante apoyo emocional y económico.
Departamento de Matemática	Por darme la oportunidad de formar parte del Departamento y tener mi primera experiencia laboral. Principalmente al ingeniero Arturo Samayoa por su paciencia y comprensión.
Mis amigos de la Facultad	A mis amigos de la carrera, gracias por recorrer juntos este camino universitario, apoyarme incondicionalmente y hacer que el recorrido fuera ameno y alegre.
Mis amigos del Departamento de Matemática	Por su recibimiento, apoyo, ayuda y enseñanza, por ser además de compañeros de trabajo, amigos incondicionales

Mi asesor

Ingeniero Renato Ponciano, por sus consejos, colaboración, apoyo, tiempo y orientación en todo el transcurso de mi trabajo de investigación desde la concepción de la idea, la ejecución y la elaboración del informe. Por ser mi mentor en los últimos años de mi carrera de Ingeniería, el presente informe es resultado de nuestro trabajo en conjunto, muchas gracias.

Lic. José Carlos Bonilla

Por su colaboración, apoyo y consejos en mi trabajo de graduación, principalmente en el área de la matemática y programas de cómputo especializados.

Ing. Pablo Morales

Por su colaboración en el préstamo e inducción en el uso de equipo especializado de microscopía.

Ing. Luis Reyes

Por su valiosa ayuda y colaboración en el análisis estadístico.

William Pedroza

Por facilitarme el proceso para la obtención de la materia prima.

Personal de la sección de concretos y del laboratorio de química

Por su colaboración en el préstamo de equipo e instalaciones para realizar mi investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
<u> </u> Hipótesis.....	XXII
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Membranas.....	3
2.1.1. Generalidades y conceptos principales	3
2.1.2. Procesos de separación con membranas.....	3
2.1.2.1. Procesos de separación conducidos por presión.....	5
2.1.3. Materiales de las membranas.....	7
2.1.4. Clasificación de las membranas	8
2.2. Polímeros	8
2.2.1. Conceptos generales.....	9
2.2.2. Clasificación de los polímeros	9
2.2.2.1. Clasificación de acuerdo a su comportamiento térmico	10
2.2.3. Membranas poliméricas.....	11
2.2.4. Polímeros para membranas.....	12

	2.2.4.1.	Polietileno tereftalato (PET).....	13
	2.2.5.	Reciclado de plásticos.....	15
	2.2.6.	Aspectos importantes en la fusión y cristalización del PET.....	16
2.3.		Sinterización.....	20
	2.3.1.	Preparación de membranas por sinterización	20
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.		Variables	23
	3.1.1.	Variables de control.....	23
3.2.		Delimitación de campo de estudio	25
	3.2.1.	Campo de estudio	25
	3.2.2.	Procesos que conforman la investigación	26
	3.2.3.	Material de estudio	26
	3.2.4.	Material que conforma la membrana selectiva	26
	3.2.5.	Material de control de la investigación	26
3.3.		Recursos humanos disponibles	27
	3.3.1.	Investigador.....	27
	3.3.2.	Asesor de investigación	27
3.4.		Recursos materiales disponibles.....	27
	3.4.1.	Recursos físicos disponibles	28
	3.4.2.	Recursos materiales disponibles.....	28
		3.4.2.1. Materia prima	28
		3.4.2.2. Materiales y equipo	29
3.5.		Técnica cualitativa o cuantitativa.....	29
	3.5.1.	Técnica cuantitativa.....	30
	3.5.2.	Técnica cualitativa.....	31
3.6.		Recolección y ordenamiento de la información.....	31

3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	33
3.7.1.	Tamaño del muestreo	34
3.7.2.	Tabulación y ordenamiento de los datos	35
3.8.	Análisis estadístico	38
3.8.1.	Sumatoria	39
3.8.2.	Media	39
3.8.3.	Desviación estándar	40
3.8.4.	Histogramas de frecuencia	40
3.8.5.	Frecuencia acumulada	40
3.8.6.	Curtosis	41
3.8.7.	Análisis de varianza (ANOVA)	41
3.8.8.	Diseño factorial 2^k	42
4.	RESULTADOS	43
4.1.	Preparación de la resina de polietileno tereftalato a partir de material reciclado	43
4.1.1.	Descripción del procedimiento	43
4.2.	Preparación de la membrana de microfiltración a partir de polietileno tereftalato por medio del método de sinterización ..	49
4.2.1.	Descripción del procedimiento	49
4.2.2.	Membranas preparadas por sinterización a diferentes tiempos y temperaturas	55
4.3.	Distribución de poros en la membrana preparada a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	58
4.4.	Porosidad de las membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	71
4.4.1.	Cálculo de porosidad	71
4.4.1.1.	Muestra de cálculo	71

4.5.	Diámetro de poro promedio de las membranas preparada a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	76
4.5.1.	Cálculo de diámetro de poro	76
4.5.1.1.	Muestra de cálculo	77
4.5.2.	Histogramas de frecuencia de diámetro de poro	81
4.5.3.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro	86
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	91
5.1.	Análisis de la preparación de las membranas.....	91
5.2.	Análisis de la porosidad de las membranas	93
5.3.	Análisis del tamaño de poro	94
5.3.1.	Análisis estadístico para el tamaño de poro	95
5.3.1.1.	Interpretación de datos estadísticos para parte superior de la membrana	99
5.3.1.2.	Interpretación de los datos estadísticos para la parte inferior de la membrana	103
5.4.	Tiempo y temperaturas óptimos de sinterización para la preparación de membranas de PET.....	105
5.5.	Análisis de distribución de poro en las membranas	110
5.6.	Análisis de selección de la mejor membrana	111
CONCLUSIONES.....		117
RECOMENDACIONES		119
BIBLIOGRAFÍA.....		121
APÉNDICES.....		123
ANEXOS.....		201

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Procesos de membrana conducidos por presión	7
2.	Clasificación de las membranas	8
3.	Representación química del poliéster termoplástico común.	13
4.	Zona de cristalización.....	17
5.	Hidrólisis del PET	19
6.	Secado al sol del PET	44
7.	Batería de tamices y comparación de tamaños.....	45
8.	Tamizaje y clasificación por tamaño del PET	45
9.	Recolección y almacenamiento de materia prima	46
10.	Remoción de partículas metálicas.....	47
11.	Diagrama de flujo de procedimiento para preparar la materia prima	48
12.	Mezcla del PET con NaCl.....	50
13.	Resina compactada en los moldes para hornear	50
14.	Sinterización de las membranas	51
15.	Enfriamiento de las membranas dentro del horno.....	52
16.	Enfriamiento de las membranas a temperatura ambiente	52
17.	Remoción del papel de las membranas	53
18.	Diagrama de flujo para preparar las membranas	54
19.	Membranas 1 A y 1 B.....	56
20.	Membranas 2 A y 2 B.....	56
21.	Membranas 3 A y 3 B.....	57
22.	Membranas 4 A y 4 B.....	57

23.	Distribución de poros membrana 1 parte superior	59
24.	Distribución de poros membrana 1 parte inferior	60
25.	Distribución de poros membrana 2 parte superior	62
26.	Distribución de poros membrana 2 A parte inferior 1	63
27.	Distribución de poros membrana 3 parte superior	65
28.	Distribución de poros membrana 3 parte inferior	66
29.	Distribución de poros membrana 4 parte superior	68
30.	Distribución de poros membrana 4 parte inferior	69
31.	Membrana 1 A, parte superior 1	72
32.	Áreas de poros obtenidos por GeoGebra	73
33.	Comparación de poros de la membrana con polígonos realizados con GeoGebra	74
34.	Escala micrométrica.....	77
35.	Medición de escala micrométrica con GeoGebra	78
36.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte superior	82
37.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte superior	82
38.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte superior	83
39.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 4 A, parte superior	83
40.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte inferior	84
41.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte inferior	84
42.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte inferior	85

43.	Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 4 A, parte inferior.....	85
44.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte superior.....	86
45.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte superior.....	87
46.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte superior.....	87
47.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 4 A, parte superior.....	88
48.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte inferior.....	88
49.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte inferior.....	89
50.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte inferior.....	89
51.	Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte inferior.....	90
52.	Análisis de varianza para la parte superior de la membrana.....	96
53.	Medias y número de datos para cada factor en la parte superior de la membrana	97
54.	Relación y diferencias significativas entre factores para la parte superior de la membrana	98
55.	Análisis de varianza para la parte inferior de la membrana.....	100
56.	Medias y número de datos para cada factor en la parte inferior de la membrana	101
57.	Relación y diferencias significativas entre factores para la parte inferior de la membrana.....	102

58.	Gráfica de porosidad de la parte superior de las membranas diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	106
59.	Gráfica de porosidad de la parte superior de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	107
60.	Gráfica del tamaño de poro de la parte superior de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	108
61.	Gráfica del tamaño de poro de la parte inferior de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	109

TABLAS

I.	Características de los procesos conducidos por presión	6
II.	Tipo de membrana para polímeros	12
III.	Datos técnicos	14
IV.	Valores de permeabilidad	15
V.	Definición operacional de las variables de la elaboración de la resina de PET	24
VI.	Definición operacional de las variables de la sinterización de la membrana.....	24
VII.	Definición operacional de las variables de la caracterización visual de la membrana.....	25
VIII.	Técnica cuantitativa	30
IX.	Datos obtenidos en la preparación de la materia prima.....	35
X.	Magnitudes constantes en la preparación de la membrana por sinterización.....	35
XI.	Obtención de membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.....	36

XII.	Obtención de fotos de las membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	36
XIII.	Porosidad de las membranas.....	37
XIV.	Diámetros de poro	37
XV.	Distribución de poro para membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.....	38
XVI.	Nombres de las membranas a diferentes temperaturas y tiempos.....	55
XVII.	Distribución de poro para membranas 1 a 250 °C y 10 minutos ...	61
XXVIII.	Distribución de poro para membranas 2 a 245 °C y 15 minutos ...	64
XIX.	Distribución de poro para membranas 3 a 240 °C y 20 minutos ...	67
XX.	Distribución de poro para membranas 4 a 240 °C y 15 minutos ...	70
XXI.	Áreas de poros de la membrana 1 A, parte superior 1	74
XXII.	Factor de conversión de escala GeoGebra a escala real	79
XXIII.	Diámetros de poro de la membrana 1 A, parte superior 1	80
XXIV.	Porosidad promedio de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.....	94
XXV.	Diámetro de poro promedio de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización	95
XXVI.	Datos para la gráfica de la porosidad de la parte superior de las membranas.....	105
XXVII.	Datos para la gráfica de la porosidad de la parte inferior de las membranas.....	106
XXVIII.	Datos para la gráfica del tamaño de poro de la parte superior de las membranas	107
XXIX.	Datos para la gráfica del tamaño de poro de la parte inferior de las membranas.....	108
XXX.	Calificación de las membranas según distribución de poro.....	111

XXXI.	Recopilación de datos de los parámetros medidos a las membranas	112
XXXII.	Calificación de las membranas según valor óptimo de cada parámetro.....	114
XXXIII.	Calificación final de las membranas	115

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
NaCl	Cloruro de sodio
°C	Grados Celsius
g	Gramo
NaOH	Hidróxido de sodio
h	Hora
µm	Micrómetro
mm	Milímetro
min	Minuto
%	Porcentaje
PET	Potietileno tereftalato

GLOSARIO

Acetaldehído	Es un compuesto orgánico volátil e incoloro que tiene un olor característico ligeramente afrutado. Es 20 veces más tóxico que el alcohol y posiblemente cancerígeno.
Barrera semipermeable	Superficie de separación entre dos compuestos líquidos o gaseosos que deja pasar a través de ella moléculas de algunos de sus compuestos, pero no de otros.
Cloruro de sodio	Es un compuesto iónico hidrosoluble formado por un catión sodio y un anión cloruro. Es el mayor componente de la sal comestible.
Compresibilidad	Propiedad de la materia en la que un cuerpo disminuye su volumen cuando se somete a presión o compresión.
Cristalización	Es un proceso mediante el cual las moléculas se ordenan de una manera natural formando un retículo repetitivo denominado cristal.
Densidad	Es una magnitud de medida que se refiere a la cantidad de masa que se encuentra en un determinado volumen.

Difusión molecular	Es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio donde antes no estaba, aumentando la entropía del sistema.
Estereoscopio	Es un tipo de microscopio óptico que utiliza dos objetivos y dos oculares que permiten ver el espécimen bajo ángulos por los ojos humanos formando una visión óptica de tercera dimensión.
<i>Fouling</i>	Son todos los fenómenos relacionados con el ensuciamiento de las membranas.
GeoGebra	Programa interactivo diseñado especialmente para la enseñanza y aprendizaje de álgebra y geometría dinámicamente.
Hidrófilas	Comportamiento de las moléculas que tiene afinidad por el agua.
Hidrófobas	Comportamiento de las moléculas cuando no tienen afinidad por el agua.
Hidróxido de sodio	Es conocido como soda cáustica y es usado en la industria en la fabricación de papel, tejidos y detergentes.
Membrana	Una membrana es una barrera permeoselectiva entre dos fases.

Mesh	Representa el número de tamiz o número de mallas dentro de una pulgada inglesa, equivalente a 25,4 milímetros.
Microfiltración	Proceso de separación conducido por presión que se utiliza para la separación de partículas con un tamaño comprendido entre 0.05 y 10 micrómetros.
Monómero	Compuesto de bajo peso molecular el cual es capaz de reaccionar con otras moléculas para formar un polímero.
Nanofiltración	Proceso de separación conducido por presión que se utiliza para retener moléculas de bajo peso molecular. El tamaño del poro está comprendido entre 0,005 y 0,0005 micrómetros.
Ósmosis inversa	Proceso de separación conducido por presión en que se puede retener moléculas de muy bajo peso molecular, siendo su mecanismo fundamental la difusión. El tamaño del poro es menor a 0,0005 micrómetros.
Poliéster	Son los polímeros cuya cadena está formada por monómeros unidos por funciones éster. Se utilizan principalmente en la producción de fibras artificiales.

Polietileno tereftalato	Es un polímero termoplástico que se fabrica con derivados del petróleo, gas y aire. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.
Polimerización	Es el proceso de construcción de una molécula polimérica para obtener un material plástico, resulta de la adición de monómeros insaturados a la cadena creciente.
Polímero	Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas.
Porosidad	Es el volumen de espacios vacíos en el volumen total de un material.
Punto de fusión	Es la temperatura a la cual se encuentre en equilibrio las fases sólida y líquida de la materia.
Selectividad	Proceso en el que se permite el paso de algunas sustancias y se restringe el paso de otras.
Sinterización	Consiste en aglutinar, por efecto de la temperatura un material granular o polvoriento, con objeto de conseguir un lámina sólida más o menos porosa.

Tamizado	Es un proceso que consiste en separar las distintas fracciones que componen un sólido granulado o polvoriento por diferencia en su tamaño de partículas.
Termoestables	Son plásticos cuyas cadenas poliméricas están químicamente unidos por enlaces covalentes fuertes. No pueden ser reprocesados ni remodelado por medio de calor.
Termoplásticos	Son plásticos que se someten a un ablandamiento cuando se calientan a una temperatura en particular.
Ultrafiltración	Proceso de separación conducido por presión que utiliza para retener moléculas comprendidas en el rango de 2 a 100 nanómetros (proteínas y polimeros)
Viscosidad	Medida de la resistencia de un líquido a fluir.
Wolfram mathematica	Programa computacional de cálculo simbólico que incluye funciones de lenguaje de programación, proporciona un amplio abanico de posibilidades y funciones muy utilizadas en determinadas áreas matemáticas, científicas, computacionales o de ingeniería.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la preparación de una membrana polimérica a partir de polietileno tereftalato (PET) por medio de la técnica de sinterización. Un parámetro importante en las membranas es el tamaño de poro y su distribución, por lo que se determinó visualmente la variación de tales parámetros a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.

Con el estudio se determinó la temperatura y tiempo de sinterización óptimos para la preparación de la membrana polimérica de PET con las mejores características de porosidad, distribución de poros y diámetro de poro .

Para ello se utilizó PET molido proveniente de una recicladora, el cual es considerado de desecho por no cumplir con el tamaño requerido para la fabricación de pellets. El PET se secó al sol y se tamizó para que el tamaño de partícula fuera uniforme, obteniendo así un polvo fino.

El proceso de sinterización se realizó a 4 diferentes combinaciones de temperaturas y tiempos de sinterización, por lo que se prepararon 8 membranas, 2 por cada condición. Se utilizó el estereoscopio para observar los poros de cada membrana y su distribución, se tomaron fotografías y se analizaron en un programa de matemática para determinar el área de cada poro y así obtener valores promedio de porosidad y diámetro de poro.

Por medio de un análisis estadístico de histogramas de frecuencia y curtosis se determinó la membrana que poseía mayor uniformidad en el tamaño de poro y mediante los resultados de porosidad, distribución de poro y diámetro de poro se seleccionó la membrana que tuviera las mejores características de calidad, determinando así que la membrana que tuvo un tamaño de poro más pequeño, mayor porosidad y uniformidad fue la N° 3, la cual se preparó a 240 grados Celsius durante 20 minutos en el proceso de sinterización.

Con la investigación realizada se pudo determinar que sí se pueden preparar membranas por el método de sinterización a partir de un material de desecho del reciclaje del PET, las cuales tienen consecuencias positivas al reúso de material polimérico que ya no tienen una utilidad, ayudando así a la disminución de desechos sólidos y por ende al medio ambiente. Además se contribuye con una nueva forma de separación de sustancias que es sencilla, de bajo costo y que mantiene las características de la tecnología de membranas.

OBJETIVOS

General

Preparar membranas de polietileno tereftalato (PET) por sinterización a diferentes tiempos y temperaturas, para determinar la combinación más apropiada para producir una membrana con distribución de poros adecuada y con propiedades mecánicas aceptables.

Específicos

1. Preparar la resina de polietileno tereftalato a partir de material reciclado.
2. Preparar de una membrana de microfiltración a partir de polietileno tereftalato por medio del método de sinterización.
3. Determinar el tamaño aproximado de poro de la membrana preparada a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.
4. Describir visualmente la distribución de poros en la membrana preparada a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.
5. Determinar el tiempo y temperaturas óptimos de sinterización para obtener la membrana con las mejores características de porosidad.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

Existe diferencia significativa en el tamaño y distribución del poro de la membrana preparada a partir de polietileno tereftalato (PET) con diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.

Hipótesis Nula (H₀):

No existe diferencia significativa en el tamaño y distribución del poro de la membrana preparada a partir de polietileno tereftalato (PET) con diferentes tiempos de sinterización.

No existe diferencia significativa en el tamaño y distribución del poro de la membrana preparada a partir de polietileno tereftalato (PET) con diferentes temperaturas de sinterización.

Hipótesis Alternativa (H₁):

Existe diferencia significativa en el tamaño y distribución del poro de la membrana preparada a partir de polietileno tereftalato (PET) con diferentes tiempos de sinterización.

Existe diferencia significativa en el tamaño y distribución del poro de la membrana preparada a partir de polietileno tereftalato (PET) con diferentes temperaturas de sinterización.

INTRODUCCIÓN

Una membrana es una región material que actúa de barrera permeoselectiva entre dos fluidos, que restringe o favorece el movimiento de uno o más componentes de los fluidos a través de ella. Para completar esta definición general, comúnmente se opta por escoger ciertos criterios de clasificación como la naturaleza, la estructura o el mecanismo de transferencia.

Las membranas poliméricas constituyen el campo más amplio y desarrollado de las membranas, tanto desde el punto de vista de fabricación como desde el campo de las posibles aplicaciones. El motivo principal que ha llevado a esa situación tiene que ver con las características versátiles de los polímeros, que los ha hecho también imprescindibles en otras aplicaciones tecnológicas e industriales, ya que existe la posibilidad de ejercer cierto control sobre las configuraciones moleculares de los polímeros.

El fabricar la membrana con un material reciclable como lo es el PET, es mucho más rentable que utilizar el polímero sintetizado y vírgen, ya que se encuentra fácilmente en los residuos cotidianos de la población. El PET es un material que se recicla pero hay una parte que se desecha y almacena por no cumplir con el tamaño apropiado para la fabricación de *Pellets*, el utilizar dicho material de desecho es un aporte adicional para colaborar con el medio ambiente.

Actualmente es muy importante la búsqueda de nuevos métodos de separación en la industria, que sean fáciles de implementar, menos costosos, tolerante a variaciones de temperatura, resistentes al ensuciamiento y

amigables con el medio ambiente, es por ello que la tecnología de membranas está creciendo muy ampliamente.

Existen diversos métodos de preparación de membranas, pero algunos son muy complicados y necesitan ciertos reactivos que aumentan los costos. Uno de los métodos más sencillos es la sinterización que tiene como variables importantes la temperatura y el tiempo.

El método de sinterización es un proceso en el que se ven afectados los cambios geométricos que sufren las partículas al ser llevadas a temperaturas cercanas al punto de fusión del polímero, creando así un puente entre moléculas que forma una red cristalina y que proporciona la porosidad a las membranas. Es así como un material polvoriento compactado puede dar lugar a un material denso luego de ser sinterizado.

Es importante ampliar el estudio de la preparación de la membrana con otros polímeros y métodos que no han sido estudiados e investigados con anterioridad y tal es el caso del polietileno tereftalato, del cual no se han hecho membranas por el método de sinterización. La presente investigación se enfoca en la posibilidad y factibilidad de preparar una membrana de polietileno tereftalato por el método de sinterización, encontrando la temperatura y tiempo óptimos para obtener una membrana con las mejores características de porosidad y tamaño de poro.

1. ANTECEDENTES

Las primeras investigaciones en el campo de los polímeros fueron realizadas con la finalidad de obtener materiales sintéticos no reactivos o inertes, los cuales fueron obtenidos por polimerización de monómeros del tipo vinílico, con uno o más centros insaturados. Si bien, en los últimos veinte años, ha continuado la producción de los plásticos con fines comerciales, en la actualidad ha crecido el interés por nuevos materiales con propiedades de aplicación que sean una consecuencia de una estructura molecular definida.

En 1941, los científicos británicos Whinfield y Dickson produjeron por primera vez el polietileno tereftalato (PET), el cual lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se comenzó a emplear en forma de láminas delgadas para envasar alimentos, pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, en la década del 70. Pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para la fabricación de envases de bebidas poco sensibles al oxígeno como el agua mineral.

Desde principios de 1960, membranas sintéticas han sido usadas exitosamente en una gran variedad de aplicaciones a gran escala industrial. La rápida adopción de membranas en la industria resulta del progreso en el desarrollo de los materiales de las membranas, estructuras de las membranas y los métodos de producción a gran escala.

En 1965 se comercializaron con éxito las membranas formuladas por Loeb y Sourirajan, abriendo el camino hacia posteriores investigaciones para la obtención de membranas ultrafinas. Las membranas poliméricas sintéticas han evolucionado rápidamente en los últimos años y de ser un material útil en el laboratorio, se convirtieron en un producto industrial de gran importancia.

No se han encontrado estudios que abarquen la preparación de una membrana a partir de polietileno tereftalato por el método de sinterización, sin embargo, existen algunos estudios acerca de membranas en las que se mencionan algunas variables importantes a ser medidas y controladas que se relacionan con el tema de estudio.

En 2006, Barcelona, España, Jorge Mecnás de Benito, presenta los resultados de su investigación de trabajo de graduación a nivel doctoral: Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas.

En 2011, Guatemala, USAC, Wendy Susana García, realizó la presentación de resultados de su investigación de trabajo de graduación: Separación de propano y propileno por medio de la membrana de poli (óxido de etileno-co-epiclorhidrina) facilitada por ión plata.

El tema de investigación fue de tipo exploratorio, por lo que necesitó pruebas preliminares para poder definir ciertos parámetros para que sea técnicamente factible la preparación de la membrana por dicho método.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Membranas

Las membranas han ganado un lugar muy importante en la tecnología, debido a que se pueden utilizar en amplias gamas de aplicaciones. A continuación se presentan generalidades del concepto de membranas, poniendo énfasis en las sintéticas y en los procesos de separación con membranas conducidos por presión.

2.1.1. Generalidades y conceptos principales

“Una membrana es una barrera semipermeable entre dos fases. Si un componente de una mezcla se mueve a través de la membrana más rápido que otro componente de la mezcla, la separación se puede lograr”¹. Las propiedades básicas de la operación de las membranas las hacen ideales para la producción industrial. La membrana permite el paso de ciertas sustancias pero restringe el de otras por medio de sus dos parámetros importantes que son la permeabilidad y la selectividad.

2.1.2. Procesos de separación con membranas

Los procesos que utilizan membranas son teóricamente simples ya que idealmente solo incluyen dos fluidos (uno en la alimentación y otro en el

¹ KISLIK VLADIMIR, “Liquid Membranes”.

permeato y un elemento separador. Pero lo que hace complicados los procesos a membranas es que se utilizan en operaciones complejas que utilizan un tratamiento de separación.

Algunas de las principales ventajas de los procesos que emplean membranas son:

- En el proceso la separación se realiza de manera continua.
- No requiere altos costos por el uso de energía.
- Se puede combinar fácilmente con otros procesos de separación.
- Se puede pasar a un nivel de producción mayor (escalado) de una manera sencilla.
- Las propiedades de las membranas son ajustables.
- No siempre es necesario agregar aditivos para que se lleve a cabo la separación.

No obstante, las virtudes expuestas en la lista anterior son generales pero no son estrictamente compartidas por todos y cada uno de los procesos que utilizan membranas. Así, existen casos en que los procesos necesitan energía para llevar a cabo la separación y esto es una limitante para una extensión industrial del proceso. En algunos procesos se necesita la adición de aditivos para mejorar el proceso de separación o para evitar el ensuciamiento de la membrana (*fouling*), esto podría disminuir las propiedades separadoras de las membranas.

Para utilizar la tecnología de membranas a nivel industrial, se tiene como ventaja la facilidad de combinar los procesos de membrana con otros procesos de separación así como la relativa facilidad de tratar volúmenes diferentes sin

variar demasiado el equipamiento necesario para la separación, además de poseer un fácil escalamiento. Desde el punto de vista científico y de investigación, su ventaja más significativa es la posibilidad de diseñar membranas con nuevos materiales y procesos que sean creados para una aplicación concreta, jugando con la amplia variedad de configuraciones y materias primas disponibles.

Sin embargo, los procesos de membranas tiene una serie desventajas, algunas de las principales dificultades son: bloqueo de la membrana por polarización por concentración o ensuciamiento, algunas tienen baja selectividad y una vida media corta. Además aunque tengan muchas ventajas y debido a que la variedad de membranas existentes es muy amplia y su modificación es sencilla, todavía no se dispone de las membranas ideales para determinados procesos. Lo que implica la necesidad de investigar en ese campo.

2.1.2.1. Procesos de separación conducidos por presión

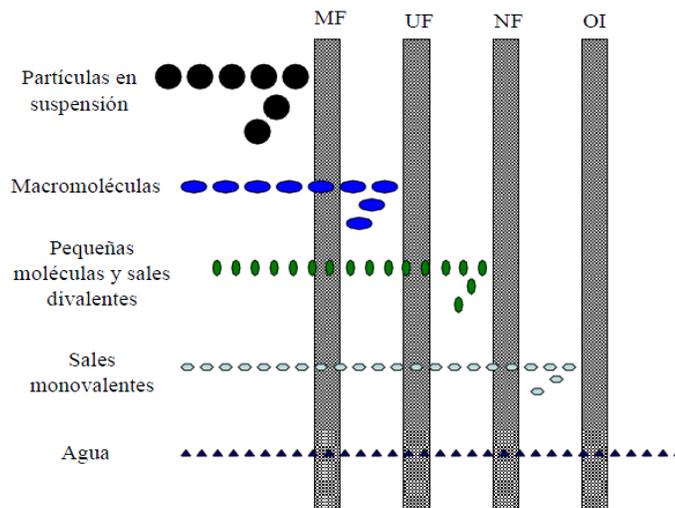
Dentro de los procesos de separación con membranas destacan los procesos que tienen como fuerza impulsora una diferencia de presión. Estos procesos se pueden agrupar en cuatro categorías, teniendo como base el tamaño de las moléculas o partículas que se quieren separar, lo que incide en la selectividad de la membrana y su tamaño de poro.

Tabla I. **Características de los procesos conducidos por presión**

Proceso de separación	Tamaño de poro (µm)	Presiones de trabajo (bar)	Tamaño de partículas a separar	Aplicación
Microfiltración	0,05-10	0,5 - 3	0,05-10 µm	Separación de bacterias agua, aclaramiento de zumos de frutas, vinos y cerveza.
Ultrafiltración	0,01 - 0.1	1 - 10	2 - 100 nm.	Separación de proteínas y polímeros.
Nanofiltración	0,005 – 0,0005	3 - 20	0.005 y 0.0005 µm. Moléculas bajo peso molecular como iones multivalentes	Eliminación de pequeñas moléculas como proteínas, antibióticos, pesticidas y en el tratamiento de aguas residuales.
Ósmosis Inversa	menor a 0,0005	10 - 50	Tamaño de moléculas de muy bajo peso molecular como las sales.	Desalinización del agua de mar, producción de agua ultra pura, concentración de leche y en tratamiento de aguas residuales.

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. **Procesos de membrana conducidos por presión**



Fuente: tesis doctoral “Estudio de la Ultrafiltración de proteínas modelo con Membranas cerámicas.” <http://hera.ugr.es/tesisugr/16712183.pdf>. Consulta: 10 de enero de 2013.

2.1.3. **Materiales de las membranas**

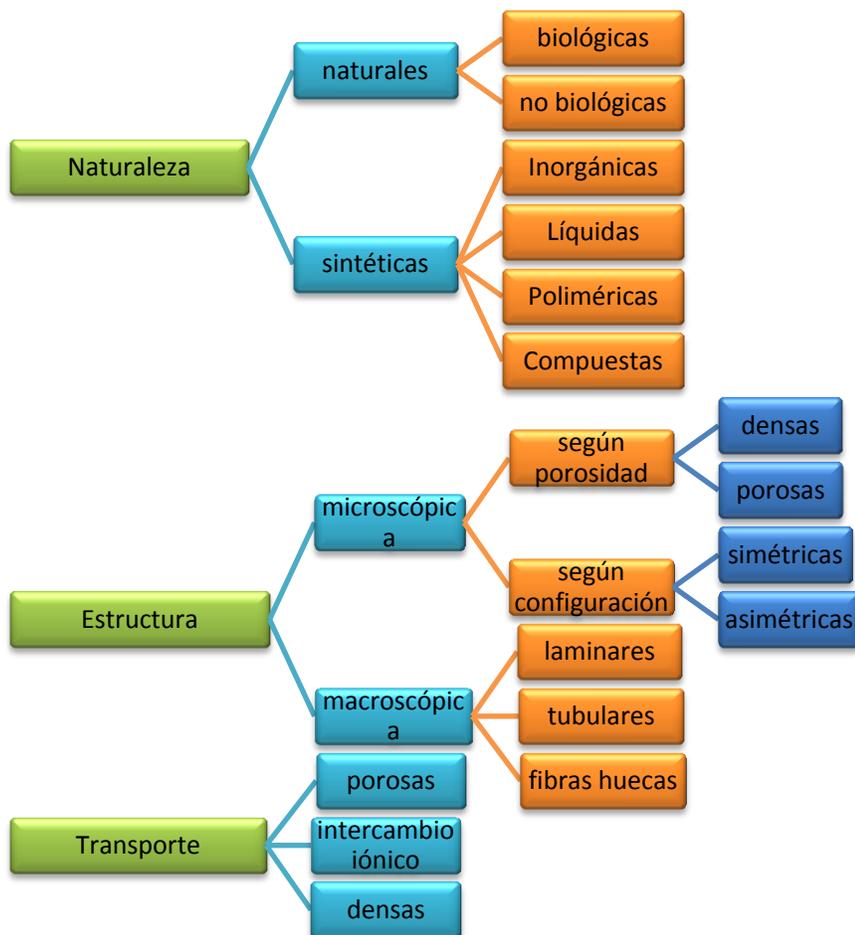
Hay una amplia gama de materiales usados para las membranas, desde materiales de polímeros orgánicos a materiales inorgánicos. Los materiales tienen estructuras físicas y químicas con sus respectivas propiedades. La estructura química del material es su fórmula química y la estructura física se define por la manera en que las moléculas se ensamblan en el material.

Las propiedades químicas describen como la estructura química del material cambia bajo ciertas circunstancias. Por otro lado, las propiedades físicas incluyen parámetros físicos como la densidad, punto de fusión, temperatura de transición vítrea, compresibilidad, otros. Tanto las propiedades químicas como las físicas del material elegido tienen que ser examinadas para la preparación de la membrana.

2.1.4. Clasificación de las membranas

Las membranas se clasifican según factores tales como: el tipo de material utilizado, la estructura, su modo de preparación y el modo de transporte de la materia dentro de ella. A continuación se muestra un esquema de la clasificación según su naturaleza, estructura y transporte.

Figura 2. Clasificación de las membranas



Fuente: elaboración propia.

2.2. Polímeros

Son comúnmente llamados plásticos, su uso industrial es extenso por sus características versátiles. Existen diferentes tipos de polímeros que se clasifican principalmente por su comportamiento térmico.

2.2.1. Conceptos generales

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a las altas fuerzas intermoleculares de las grandes cadenas poliméricas. Dichas fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

2.2.2. Clasificación de los polímeros

Los polímeros son comúnmente clasificados de acuerdo a dos criterios: su comportamiento térmico y su mecanismo de polimerización. Estas clasificaciones son importantes desde el punto de vista del reciclado de polímeros porque los métodos de degradación de un polímero dado dependen de estos criterios.

2.2.2.1. Clasificación de acuerdo a su comportamiento térmico

Los polímeros se clasifican en dos grandes grupos, dependiendo de su comportamiento cuando son calentados. Existen los llamados termoplásticos y los termoestables, los cuales se describen a continuación:

- **Termoplásticos:** son plásticos que se someten a un ablandamiento cuando se calientan a una temperatura en particular. Este comportamiento es una consecuencia de la ausencia de enlaces covalentes entre las cadenas poliméricas. Por lo tanto, los termoplásticos de desecho pueden ser fácilmente reprocesados por calentamiento y formado en una forma nueva. Los más importantes son polietileno de alta y baja densidad, polipropileno, poliestireno, cloruro de polivinilo, polietileno de tereftalato y poliamida.
- **Termoestables:** son plásticos cuyas cadenas poliméricas están químicamente unidos por enlaces covalentes fuertes. No pueden ser reprocesados ni remodelado por medio de calor. Algunos ejemplos de termoestables con una significativa aplicación comercial son el poliuretano, resinas de epóxidos, poliésteres insaturados y resinas de fenol-formaldehído.

2.2.3. Membranas poliméricas

“Las membranas poliméricas son las que tienen su capa activa fabricada con un material polimérico. El polímero a utilizar tiene que estar disponible y tiene que ser químicamente estable a las condiciones de operación”.²

Las membranas orgánicas o poliméricas constituyen el campo más amplio y desarrollado de las membranas, tanto desde el punto de vista de fabricación como desde el campo de las posibles aplicaciones. El motivo principal que ha llevado a esa situación tiene que ver con las características versátiles de los polímeros que los ha hecho también imprescindibles en otras aplicaciones tecnológicas e industriales y que se puede resumir en estas tres aportaciones básicas:

- Existe la posibilidad de ejercer cierto control sobre las configuraciones moleculares de los polímeros.
- Los polímeros pueden adoptar con facilidad diferentes formas físicas lo cual presenta una ventaja en el plano tecnológico.
- La gran variedad de polímeros existentes permite escoger aquellos más interesantes para diseñar una membrana determinada.

Las membranas poliméricas se dividen en dos grupos haciendo referencia a su estructura interna: membranas porosas y membranas no porosas (densas). Las técnicas de caracterización de materiales porosos es la que determina la categoría a la que pertenece la membrana.

² (Scott y Hughes, 1996).

Para las membranas porosas, son los parámetros característicos definidos por la estructura porosa y no la naturaleza del polímero los que determinan principalmente el tipo de transporte que pueden ejercer y los que decidirán su grado de selectividad. Algunos de estos parámetros son la medida de los poros, su distribución y su estructura.

Las membranas poliméricas también se pueden clasificar dependiendo su afinidad con el agua, pueden ser hidrofílicas o hidrófobas. Las membranas hidrofílicas están hechas de materiales altamente polares con alta afinidad por el agua, por ejemplo los ésteres celulósicos y poliamidas alifáticas. Las membranas hidrófobas se componen de materiales apolares con baja afinidad por el agua, por ejemplo el polietileno y el polipropileno.

2.2.4. Polímeros para membranas

Las membranas poliméricas son las más estudiadas y desarrolladas por las grandes ventajas de selectividad y versatilidad que aportan los polímeros. Los polímeros utilizados más comúnmente para la fabricación de membranas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla II. Tipo de membrana para polímeros

Polímero	Abreviatura	Tipo de membrana
Acetato de celulosa	CA	RO, NF, UF, MF
Triacetato de celulosa	TCA	RO, NF, UF, MF
Nitrato de Celulosa	CN	MF
Polímeros acrílicos	PAN	UF
Poliamidas alifáticas		UF

Continuación de la tabla.

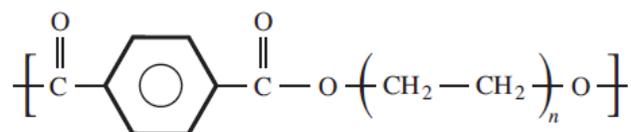
Poliamidas aromáticas		NF, RO
Polibenzimidazol	PBI	NF, RO
Policarbonato	PC	MF
Poliéster	PET	MF
Polipropileno	PP	MF
Polisulfona	PS	UF, MF
Polisulfonasulfonada	PSS	UF, RO
Politetrafluoroetileno	PTFE	MF

Fuente: BOTTINO, Aldo. Departamento de Química e Química Industrial – Universidad de Génova.
Traducción: Renato Ponciano.

2.2.4.1. Polietileno tereftalato (PET)

El PET es un polímero termoplástico que se fabrica con derivados del petróleo, gas y aire. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres y su representación química se puede ver en la figura siguiente.

Figura 3. **Representación química del poliéster termoplástico común**



Fuente: Tereftalato de Polietileno. http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno.
Consulta: 10 de enero de 2013.

Este polímero tiene la cadena polimérica más rígida posible para un termoplástico con una excepcional combinación de propiedades mecánicas y térmicas. Es altamente resistente a soluciones acuosas, ácidos débiles, bases, grasas, sales, productos de limpieza, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. Adicionalmente, posee buenas propiedades eléctricas, incluyendo alta resistencia dieléctrica, constante dieléctrica consistente y bajo factor de disipación, entre otras.

Su estructura varía de amorfo a cristalino. Puede ser muy transparente e incoloro pero en secciones gruesas suele ser opaco y blanquecino. Por otro lado, este polímero es sensible a los oxidantes alcalinos, bases fuertes a altas temperaturas, solventes halogenados, aromáticos y cetonas de bajo peso molecular.

Tabla III. **Datos técnicos**

Punto de fusión °C	aprox. 252/260
Acetaldehído	ppm < 1
Contenido en grupos carboxílicos	mval/kg 20
Densidad aparente [g/cm ³] aprox.	0,85

Fuente: Tereftalato de Polietileno. http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno.

Consulta: 10 de enero de 2013

Tabla IV. **Valores de permeabilidad**

Oxígeno23°C, 100% RF	2
Nitrógeno23°C , 100% RF	9
Permeabilidad al vapor de agua	0,9
Dióxido de carbono	5,1

Fuente: Tereftalato de Polietileno. http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno.
Consulta: enero de 2013

2.2.5. Reciclado de plásticos

El reciclado permite que los desechos puedan ser reintroducidos en el ciclo de consumo, generalmente en aplicaciones secundarias porque en muchos casos los productos reciclados son de menor calidad que los vírgenes.

La mayoría de los polímeros sufren cierta degradación durante su uso debido al efecto de una serie de factores tales como la temperatura, la radiación ultravioleta, oxígeno y ozono. Esta degradación conduce a una reducción progresiva de longitud y a una oxidación parcial de las cadenas de polímero. Por lo tanto, los polímeros reciclados generalmente exhiben menores propiedades y rendimiento que el material virgen, y sólo son útiles para aplicaciones poco exigentes. En este caso de los plásticos reciclados no pueden ser utilizados en envases de alimentos, a menos que el contenido directo con el alimento puede ser evitado.

2.2.6. Aspectos importantes en la fusión y cristalización del PET

En el reciclado del PET existen factores importantes a tomar en cuenta en el proceso, ya que afectan la calidad del producto, estos factores son: la generación de acetaldehído, transparencia y secado del polímero.

- Generación mínima de acetaldehído

El acetaldehído (CH_3CHO) es un líquido volátil, con punto de ebullición de 20,8 grados Celsius, que se caracteriza por su olor a frutas. Se genera en pequeñas cantidades durante el proceso de fusión de PET, dicha producción de acetaldehído no se ve influenciada por la cantidad de agua presente pero sí con su historial térmico ya que se genera por la degradación térmica de las moléculas de PET mientras se encuentra en estado de fusión.

Este producto generado de la fusión del PET debe ser controlado cuidadosamente para que no se difunda hacia la atmósfera.

- Transparencia máxima

La transparencia de la preforma está relacionada directamente con el grado de cristalinidad del polímero (el PET es transparente cuando tiene una estructura molecular amorfa y será opaco cuando esté cristalizado). Las moléculas del PET cuando llegan a una temperatura entre los 85 y 250 grados Celsius tienden a formar una estructura cristalina debido a la alineación de las moléculas.

En la curva de cristalización se muestra la relación existente entre la temperatura y la velocidad para formar diferentes estados físicos del PET. En la figura 4 se observa que la velocidad de cristalización es muy lenta en ambos extremos del rango en el que ocurre la formación de la estructura cristalina del polímero (entre los 85°C y los 250°C), mientras que la velocidad máxima de cristalización se presenta en el centro del rango de temperaturas, aproximadamente entre 140 y 180 grados Celsius. Alrededor de los 175 grados Celsius se observa el punto más alto que muestra que en menos de un minuto el PET alcanza un grado visible de cristalinidad, este tiempo tan bajo indica la rapidez en que tiene que ser enfriado el PET dentro del molde. “Debido a que la conductividad térmica del PET es relativamente baja, el contenido de calor en el centro de la pared de la preforma es el principal contribuyente para tener una determinada cristalinidad en la pieza”³.

Figura 4. **Zona de cristalización**



Fuente: Automatismo Industrial, Información técnica del PET. http://www.st-1.com.ar/info/Informacion_de_PET.pdf. Consulta: 12 de enero de 2013.

³ Automatismo Industrial, Información técnica del PET.

http://www.st1.com.ar/info/Informacionde_PET.pdf. Consulta: 12 de enero de 2013.

La transparencia de la preforma en el proceso de reciclado del PET depende significativamente de la temperatura de la masa durante el proceso de inyección. A mayor temperatura se tendrá mayor cantidad de cristales fundidos. Sin embargo, si la temperatura es muy alta se puede generar una cantidad indeseable de acetaldehído, es por ello que la temperatura es un punto crítico en la fabricación de preformas y se debe controlar haciendo un balance transparencia y generación de vapores no deseados.

Otro parámetro importante en la cristalización de los polímeros la viscosidad intrínseca, cuando el polímero tiene un alto el peso molecular existe una menor tendencia a la cristalización porque se requiere una mayor temperatura de fusión para la formación de la red cristalina, dicha temperatura no se puede elevar por el problema de generación de acetaldehído.

- Secado del polímero

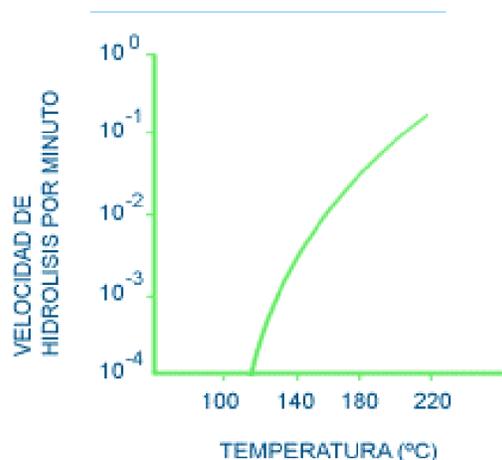
“Debido a que la resina PET absorbe humedad, requiere de un proceso de secado antes de ser moldeado por inyección. El PET, en forma sólida, absorbe humedad del medio ambiente (semejante a un desecante). Así, durante el almacenaje, la resina absorberá humedad hasta alcanzar el equilibrio. Este valor puede ser tan alto como 0,6 por ciento en peso, dependiendo de las condiciones del lugar donde sea almacenado. En la práctica, la resina no absorbe niveles de humedad mayores a 0,2 por ciento en peso si se mantiene en un lugar cubierto y durante periodos cortos de tiempo. Sin embargo, para fabricar un buen producto de PET, se requiere reducir la humedad antes de inyectar el material.”⁴

⁴ Automatismo Industrial, Información técnica del PET. http://www.st1.com.ar/info/Informacion_de_PET.pdf. Consulta: 12 de enero de 2013.

La razón por la cual se debe eliminar la humedad es que puede darse una reacción de hidrólisis, en el que el agua presente puede reducir el peso molecular del polímero así como sus propiedades características.

Esto ocurre cuando la temperatura sobrepasa al punto de fusión del polímero. En el caso del PET, la hidrólisis puede ocurrir desde temperaturas tan bajas como 150 grados Celsius, aunque a poca velocidad, a medida que se incrementa la temperatura, la tasa de crecimiento de la velocidad de hidrólisis aumenta.

Figura 5. **Hidrólisis del PET**



Fuente: Industrial, Información técnica del PET. http://www.st1.com.ar/info/Informacion_de_PET.pdf. Consulta: 15 de enero de 2013.

Según la práctica ha demostrado, que las mejores condiciones de secado del PET se alcanzan entre 165 y 170 grados Celsius desde el punto de vista técnico y económico y al cual no se causa una caída excesiva de la viscosidad intrínseca del material.

2.3. Sinterización

“La sinterización es el proceso de calentar comprimidos crudos en un horno con atmósfera controlada, hasta una temperatura menor al punto de fusión, pero lo suficientemente alta como para permitir la adhesión (fusión) de las partículas individuales. La resistencia del material comprimido es baja, esta resistencia es llamada en verde. La naturaleza y la resistencia de la unión entre las partículas dependen del compactado del material, los mecanismos de difusión, flujo plástico, evaporación de materiales volátiles del comprimido, recristalización, crecimiento de granos y contracción de poros”⁵.

El proceso de sinterización depende de los factores de temperatura y tiempo a la cual es sometido el material dentro del horno, así como de la atmósfera dentro del mismo. La temperatura debe estar entre 70 y 90 por ciento del punto de fusión del material. En el caso de los metales, los tiempos de sinterización varían en un rango muy amplio, van desde 10 minutos hasta 8 horas.

2.3.1. Preparación de membranas por sinterización

El proceso de sinterización consiste en aglutinar, por efecto de la temperatura un material granular o polvoriento, con objeto de conseguir un lámina sólida más o menos porosa.

Previamente al calentamiento o en el transcurso del mismo, es frecuente que los gránulos sean sometidos a una fuerte compresión. Con todo esto se pretende inducir modificaciones químicas en las partículas que favorecen la

⁵ TORRES, NICOLÁS. “Sinterizado”. <http://es.scribd.com/doc/31422648/sinterizado>. Consulta: 15 de enero de 2013.

formación de puentes y enlaces entre las mismas, hasta formar verdaderos agregados que proporcionan resistencia mecánica al conjunto.

Por sinterización se obtienen membranas cerámicas y también las de vidrio de los tipos Pyrex y Vycor, con tamaños nominales de poro de hasta 0,005 micrómetros. Suelen ser gruesas y frágiles, por lo que su utilidad queda restringida casi exclusivamente a la microfiltración y a la filtración ordinaria.

En un comprimido sinterizado se pueden obtener distintas estructuras y porosidades al modificar la temperatura, el tiempo y la historia de procesamiento. No se puede eliminar por completo la porosidad, porque quedan huecos después de la compactación y porque durante el sinterizado se desprenden gases. Los poros pueden formar una red de interconexiones, o pueden ser huecos cerrados. En general, si la densidad del material es menor que el 80 por ciento de su densidad teórica, los poros están interconectados.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación, fue necesario el análisis de las variables dependientes e independientes en cada una de las etapas que comprende la investigación. Estas etapas comprendieron la preparación y caracterización visual de la membrana, ya que es un estudio de tipo exploratorio se debieron realizar pruebas preliminares para definir la magnitud de algunas variables.

3.1.1. Variables de control

Son las variables que deben ser medidas y controladas en el proceso de preparación de las membranas por sinterización. Las partes del proceso en las cuales se realiza su definición operacional de las variables, incluyen la preparación de la materia prima, la preparación de las membranas y su caracterización visual. Para cada una de dichas variables se hace una pequeña descripción de su función en el proceso.

Tabla V. **Definición operacional de las variables de la elaboración de la resina de PET**

Nombre	Dimensional	Constante	Variable	Característica	Descripción
Tamaño de partícula PET	mm	x		controlable	Tamaño después de tamizar el PET molido
Tiempo de secado	h	x		controlable	Tiempo necesario para disminuir la humedad del PET molido
Proporción PET/ sal	%	x		controlable	Proporción de sal que se le agrega al PET en polvo

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Definición operacional de las variables de la sinterización de la membrana**

Nombre	Dimensional	Constante	Variable	Característica	Descripción
Masa de PET molido	g	x		controlable	Cantidad de PET utilizado en cada membrana
Masa de sal (NaCl)	g	x		controlable	Cantidad de sal utilizada en cada membrana
Tiempo de sinterización	min		x	controlable	Tiempo de permanencia de resina de PET en el horno.
Temperatura de sinterización	°C		x	controlable	Temperatura para sinterizar el PET, en un rango poco menor a su temperatura de fusión.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Definición operacional de las variables de la caracterización visual de la membrana**

Nombre	Dimensional	Constante	Variable	Característica	Descripción
Área de poro	μm		x	No controlable	Área de poro medida en programa matemático mediante imágenes tomadas en el estereoscopio.
Tamaño de poro	μm		x	No controlable	Diámetro equivalente obtenido mediante áreas.
Distribución de poro	adimensional		x	No controlable	Ubicación de los poros en la membrana por medio de microscopía

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El campo de estudio de la investigación se debe delimitar definiendo: el lugar en el que se realiza, los procesos que conforman la investigación, el material de estudio y de la membrana preparada, definiendo también su material de control.

3.2.1. Campo de estudio

Es la rama de la ingeniería a la cual se enfoca la investigación, se llevó a cabo un proceso de separación por medio de membranas selectivas. Más específicamente enfocado a la preparación de membranas con procedimientos y materiales nuevos.

3.2.2. Procesos que conforman la investigación

La investigación se dividió en varias etapas, las cuales son: preparación de la resina de PET, preparación de las membranas por el método de sinterización y la determinación visual de la porosidad, tamaño de poro y distribución de poro de la membrana.

3.2.3. Material de estudio

En el proceso de preparación de membranas por sinterización, son materia de estudio la temperatura y tiempo de sinterización óptimo para preparar la membrana con las mejores características visuales de porosidad.

3.2.4. Material que conforma la membrana selectiva

La membrana preparada está conformada de polímero de polietileno tereftalato molido. El PET utilizado estaba en forma de polvo y poseía un tamaño de partícula menor a 0,15 milímetros.

3.2.5. Material de control de la investigación

En la investigación se requiere controlar la temperatura y el tiempo de sinterización y determinar si la calidad de las membranas se veía afectada por dichos parámetros y así determinar las condiciones óptimas del proceso.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para la realización de la investigación se requería la disponibilidad de la investigadora Ana Gloria Montes Peña y del asesor de la investigación Renato Ponciano. Sin embargo, a lo largo del proceso se requirió el apoyo de otro personal especializado en la matemática y estadística que colaboraron con la investigación.

3.3.1. Investigador

Nombre: Ana Gloria Montes Peña
Correo electrónico: agmontes9@gmail.com
Fecha de nacimiento: 10 de abril de 1990
Nacionalidad: guatemalteca
Profesión: Estudiante de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

3.3.2. Asesor de investigación

Nombre: Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
Correo electrónico: iq7membranas@gmail.com
Colegiado No. 826

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos materiales necesarios para la elaboración de la investigación se encontraban dentro de la Facultad de Ingeniería de Universidad de San Carlos de Guatemala en diferentes laboratorios. Estos se describen a continuación.

3.4.1. Recursos físicos disponibles

El estudio se realizó en la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para la preparación de la materia prima se utilizará PET molido proveniente de una recicladora, el cual es considerado de desecho por no cumplir con el tamaño requerido para la fabricación de *pellets*. Para la parte de sinterización se utilizó el horno del laboratorio de Química trabajando a temperaturas y tiempos diferentes y por último para caracterizar la membrana de manera visual se utilizó el estereoscopio del laboratorio de microbiología. Antes de definir las temperaturas y tiempos de sinterización se realizaron pruebas preliminares en el Laboratorio de Química.

3.4.2. Recursos materiales disponibles

Uno de los objetivos de la investigación es utilizar la tecnología de membranas de bajo costo, es por ello que se utiliza material disponible de los desechos de plástico y métodos sencillos que no requieran equipo especializado.

3.4.2.1. Materia prima

La principal materia prima para la fabricación de las membranas es el PET. Se aprovechó el material perteneciente a una recicladora, el cual ya estaba molido y no era utilizado por no pasar con las especificaciones técnicas. La materia prima estaba conformada por:

- Residuos de plástico PET molido que no se utilizan para el reciclaje en la fabricación de *pellets*.
- Cloruro de sodio tipo reactivo.

- Hidróxido de sodio.

3.4.2.2. Materiales y equipo

Los equipos utilizados se encontraban disponibles en los laboratorios de química, microbiología y concretos, al igual que el material de laboratorio. El resto del material tuvo que ser comprado, siendo de fácil acceso y costo reducido.

- Balanza analítica
- Tamizador de bandejas
- Set de tamices de diferentes mesh
- Recipientes plásticos
- Horno
- Bandejas para hornear
- Cronómetro
- Espátula
- Trapo de tela
- Papel encerado
- Estereoscopio
- Vasos de precipitado

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Según las variables que se trataron en la investigación, la técnica a utilizar es cuantitativa y cualitativa. El tamaño del poro y la porosidad, son variables cuantitativas ya que se puede determinar su tamaño promedio por medio de fotografías tomadas en el estereoscopio y con un programa de cómputo. La

distribución de los poros es una variable cualitativa ya que al observarla en el estereoscopio solamente se puede hacer una descripción de las regiones o uniformidad de los poros.

Es importante mencionar que previo a empezar con la parte experimental de la investigación se necesitaron hacer pruebas preliminares, principalmente del tiempo de sinterización, temperatura de sinterización y proporción de mezcla con cloruro de sodio con PET.

3.5.1. Técnica cuantitativa

Para la preparación y caracterización del tamaño de poro de la membrana se tomaron en cuenta parámetros medibles, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla VIII. Técnica cuantitativa

Técnica cuantitativa	Instrumento / Método	Cuantitativa	
		Continua	Discreta
Tamaño de partícula PET	Molino y tamizador	x	
Tiempo de secado	bandejas para secar al sol	x	
Masa de PET molido	Balanza analítica	x	
Masa de sal	Balanza analítica	x	
Temperatura sinterización	Termómetro del horno	x	
Tiempo de sinterización	Cronómetro	x	
Porosidad y diámetro de poro	Estereoscopio/Programa GeoGebra	x	

Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Técnica cualitativa

Mediante las fotos tomadas a las membranas en el estereoscopio se analiza la distribución del poro para cada par de condiciones de temperatura y tiempo, para determinar la uniformidad de los poros dentro de la membrana.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos obtenidos en la investigación se recopilaron en cada una de las partes del proceso.

Para la parte de la preparación de la materia prima para las membranas de polietileno tereftalato se compraron 5 kilogramos de PET molido, que es el material de descarte en el reciclado de Pellets debido a que no cumple con un tamaño de partícula adecuado, es por ello que este PET se considera de desecho. Para la preparación de la resina el PET se secó al sol durante algunas horas y así quitarle la humedad que proviene de la molienda con agua en la recicladora.

Un factor muy importante es el tamaño de partícula, el cual debe ser pequeño y uniforme, para lograr esto se tamizó el PET con una batería de tamices y se obtuvo un polvo muy fino con un *mesh* número 100. El motivo principal del tamaño mínimo de partícula es que se pueda mezclar con facilidad con una sal de tipo reactivo.

En esta parte del proceso se recolectaron los datos de tamaño de partícula, número de *mesh* y horas de secado.

En el proceso de preparación de las membranas por método de sinterización se debió hacer un trabajo exploratorio con pruebas preliminares para poder definir proporciones de PET/NaCl, masa de PET, masa de NaCl, rangos de temperatura, rangos de tiempo, la estructura y forma de la membrana. Se anotaron los valores de estas variables para las 10 pruebas preliminares que se realizaron indicando observaciones y cambios entre pruebas.

Una vez definidos los valores se mantuvieron constantes la proporción PET/NaCl de 1:1, que incide en la masa de la membrana, también se obtuvieron mejores resultados de membranas sin malla como soporte, ya que esta hacía que la membrana se curveara al enfriarse el metal de la malla. Los parámetros que se fueron modificando fueron las temperaturas y tiempos, que variaron en rangos de 5 minutos y 5 grados Celsius. Se empezó desde el primer par de condiciones centrales de 245 grados Celsius y 15 minutos, para cada condición se prepararon dos membranas.

Al observar el éxito de preparación de membranas bajo estas condiciones, se realizaron las membranas a las condiciones extremas de máxima temperatura y menor tiempo (250 °C y 15 min) y de mínima temperatura al máximo tiempo (240 °C y 20 min). En función de las características observadas a simple vista se realizó una condición más, ya que no se presentaban diferencias significativas.

Los poros de la membrana se forman al retirar el NaCl con agua por medio del lavado, ya que es una sal hidrosoluble. Para que las membranas no se quedaran pegadas al molde se utilizó papel encerado que posteriormente fue retirado con una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH). Se ingresaron en un recipiente con la solución al 10 por ciento durante determinado tiempo y con la

ayuda de una espátula se removió el papel, por último se lavaron de nuevo para retirar los restos de hidróxido de sodio.

En esta parte del proceso se recolectaron los datos de temperaturas y tiempos de sinterización, tiempos de lavado, concentración de solución de NaOH y tiempo de remojo en dicha solución. Se tomaron fotos del proceso de preparación y de las membranas resultantes. Además se obtuvieron 8 membranas, dos por cada par de condiciones.

La caracterización visual de las membranas consistió en observarlas en el estereoscopio, que es capaz de aumentar 30 veces el tamaño normal, y tomar fotografías para analizarlas posteriormente en un programa de cómputo de matemática capaz de determinar las áreas de poro. Para cada membrana se tomaron 6 fotos que se distribuyeron de la siguiente manera: 3 fotos en la parte superior y 3 fotos en la parte inferior de la membrana, se tomó una en el centro y las otras dos en cada uno de los extremos.

Como se prepararon 8 membranas, en total se obtuvieron 48 fotografías que se analizaron en GeoGebra, determinando el área de cada poro para cada una de éstas y con la ayuda de una escala micrométrica se pudo determinar el diámetro de cada poro.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para un ordenamiento de la información obtenida se hizo uso de tablas para cada uno de los procesos que conforman la investigación. Principalmente en la parte de caracterización visual de las membranas se obtuvieron muchos datos, por lo que un correcto ordenamiento fue necesario para procesar la información.

Para el ordenamiento de la información se utilizó Microsoft Excel, ingresando todos los valores de áreas, determinados por GeoGebra, para cada una de las 48 fotografías analizadas de las membranas, con los datos de áreas se obtuvieron también diámetros equivalentes. La información se agrupó y clasificó por cada par de condiciones, llamándoles membranas 1, 2, 3 y 4. Como existían dos membranas por condición se les nombró membranas 1 A, 1B, 2 A, 2 B, 3 A, 3B, 4 A y 4B. La porosidad y diámetro de poro eran diferentes en la parte superior e inferior por lo que fue necesario hacer el análisis para ambos lados. Para todos los valores ingresados se obtuvieron valores promedio, con base a ellos y la ayuda de un análisis estadístico se determinaron los resultados.

3.7.1. Tamaño del muestreo

Para lograr una mayor confiabilidad en los resultados del experimento, se debe determinar el número de corridas adecuadas para disminuir los errores. Pero debido al estudio que se realizó conlleva la preparación de una nueva membrana para cada corrida, no es técnicamente factible preparar tantas membranas, por lo que sólo se prepararon dos membranas para cada tiempo y temperatura de sinterización, para observar su variación, dando un total de ocho membranas.

Para cada membrana se observó desde 3 puntos diferentes tanto en la parte superior como inferior y se tomaron las fotografías. Como se definieron 4 pares de condiciones y dos membranas por cada par de condición, se tiene un total de 6 regiones de membrana en la parte superior y 6 regiones de membrana en la parte inferior por cada par de condiciones. A estas se les analizó su porosidad, diámetro de poro y uniformidad de distribución que para cada una de ellas.

3.7.2. Tabulación y ordenamiento de los datos

En cada una de las etapas que conforman el proceso, se deben registrar y ordenar los datos para su posterior tratamiento. En las tablas se registran los datos importantes para que el procedimiento se estandarice.

Tabla IX. **Datos obtenidos en la preparación de la materia prima**

Masa de PET molido	5 kg
Tiempo de secado al sol	10 h
No de mesh	100
Tamaño de partícula de PET	0,15 mm

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Magnitudes constantes en la preparación de la membrana por sinterización**

Proporción PET/NaCl	1:1
Masa de resina de PET con sal	20 g
Masa de PET	10 g
Masa cloruro de sodio (NaCl)	10 g
Tiempo de lavado	5 min
Concentración de solución de hidróxido de sodio (NaOH)	10 % p/p

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Obtención de membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**

Temperatura /Tiempo	10 min	15 min	20 min
240 °C		Membrana 4 A Membrana 4 B	Membrana 3 A Membrana 3 B
245 °C		Membrana 2 A Membrana 2 B	
250 °C	Membrana 1 A Membrana 1 B		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Obtención de fotos de las membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**

Membrana	Parte superior			Parte inferior		
	Foto arriba 1	Foto arriba 2	Foto arriba 3	Foto abajo 1	Foto abajo 2	Foto abajo 3
1A						
1B						
2 A						
2 B						
3 A						
3 B						
4 A						
4 B						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Porosidad de las membranas**

Membrana	Parte superior			Parte inferior		
	Porosidad 1 (%)	Porosidad 2 (%)	Porosidad 3(%)	Porosidad 1 (%)	Porosidad 2 (%)	Porosidad 3 (%)
1A	Porosidad promedio membranas 1 arriba a 250 °C y 10 min			Porosidad promedio membranas 1 abajo a 250 °C y 10 min		
1B						
2 A	Porosidad promedio membranas 2 arriba a 245 °C y 15 min			Porosidad promedio membranas 2 abajo a 245 °C y 15 min		
2 B						
3 A	Porosidad promedio membranas 3 arriba a 240 °C y 20 min			Porosidad promedio membranas 3 abajo a 240 °C y 20 min		
3 B						
4 A	Porosidad promedio membranas 4 arriba a 240 °C y 15 min			Porosidad promedio membranas 4 abajo a 240 °C y 15 min		
4 B						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Diámetros de poro**

Membrana	Diámetros poro (µm) , Parte superior			Diámetros poro (µm) , Parte inferior		
	Diámetros arriba 1	Diámetros arriba 2	Diámetros arriba 3	Diámetros abajo 1	Diámetros abajo 2	Diámetros abajo 3
1A	Diámetro promedio membranas 1 arriba a 250 °C y 10 min			Diámetro promedio membranas 1 abajo a 250 °C y 10 min		
1B						
2 A	Diámetro promedio membranas 2 arriba a 245 °C y 15 min			Diámetro promedio membranas 2 abajo a 245 °C y 15 min		
2 B						
3 A	Diámetro promedio membranas 3 arriba a 240 °C y 20 min			Diámetro promedio membranas 3 abajo a 240 °C y 20 min		
3 B						
4 A	Diámetro promedio membranas 4 arriba a 240 °C y 15 min			Diámetro promedio membranas 4 abajo a 240 °C y 15 min		
4 B						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Distribución de poro para membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**

Parte superior			
Membrana	Uniforme	No uniforme	Observación
1			
2			
3			
4			
Parte Inferior			
1			
2			
3			
4			

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Los cálculos estadísticos que se realizaron una vez terminada la preparación de las membranas, consistió en el análisis de las fotografías tomadas en el estereoscopio. Una vez determinadas todas las porosidades y diámetros de poro se realizaron diferentes pruebas estadísticas para determinar promedios y determinar las condiciones de temperaturas y tiempos que dan a la membrana las mejores características. Los análisis a realizados fueron los siguientes:

- Sumatoria
- Media
- Desviación estándar

- Histogramas de frecuencia
- Frecuencia acumulada
- Curtosis
- Análisis ANOVA
- Diseño factorial

3.8.1. Sumatoria

La sumatoria es una operación matemática que se emplea para calcular la suma de muchos o infinitos sumandos. En la caracterización visual de la membrana, se cuenta con una serie grande de datos de áreas, obtenidas mediante el programa GeoGebra, para cada foto analizada se cuentan con muchos poros los cuales tienen un área y también se tiene el área de la membrana fotografiada.

Para determinar la porosidad se necesita la sumatoria de todos los valores de área de poros dividido dentro del área de membrana, para saber qué porcentaje de la membrana está cubierto por poros. Este procedimiento de cálculo se realizó para las 8 membranas, tanto de la parte superior como inferior.

3.8.2. Media

La media muestra el valor promedio de una serie de datos. Para el análisis de la caracterización visual de la membrana se tiene una alta cantidad de datos de diámetros equivalente de poro, obtenidos mediante el área. Se hizo un promedio de los datos de diámetros por membrana de la parte superior e inferior. De la misma manera también se obtuvo la media de las porosidades de cada una de las fotos.

3.8.3. Desviación estándar

La desviación estándar es un índice numérico de la dispersión de un conjunto de datos, es un promedio de las desviaciones individuales de cada observación. Mientras mayor es la desviación estándar, mayor es la dispersión de la población. Se utilizó la desviación estándar para medir que tan alejados están los datos de porosidad y diámetro de poro del valor promedio, este fue uno de los parámetros que sirvió para la elección de la mejor membrana ya que se necesita que el tamaño de poro no varíe tanto respecto a la media.

3.8.4. Histogramas de frecuencia

Un histograma de frecuencia es una herramienta gráfica en la que se observa la distribución de datos de un estudio realizado. Cada una de las barras que conforman el histograma refleja en su ancho un intervalo y en su altura las veces que aparecen los valores en cada uno de los intervalos. Con los histogramas de frecuencia se analizó el comportamiento del tamaño del poro en rangos, obteniendo la cantidad de datos que se encontraban en dicho rango; el que presentara una mayor concentración o frecuencia de datos en rangos bajos de diámetro de poro es la membrana con mejor característica de porosidad.

3.8.5. Frecuencia acumulada

La frecuencia acumulada es la suma de las frecuencias absolutas de todos los valores. Este análisis estadístico sirvió para observar como cambiaba la probabilidad de que existiera determinado tamaño de poro.

3.8.6. Curtosis

“La curtosis es una medida estadística usada para describir la distribución de datos observados alrededor de la media. Una mayor curtosis implica una mayor concentración de datos muy cerca de la media de la distribución coexistiendo al mismo tiempo con una relativamente elevada frecuencia de datos muy alejados de la misma. Esto explica una forma de la distribución de frecuencias con colas muy elevadas y con un centro muy apuntado”.⁶

3.8.7. Analisis de varianza (ANOVA)

La técnica de análisis de varianza se aplica para un factor, es decir un tratamiento, y el factor se halla en dos niveles. Si en el proceso de muestreo se utilizaran varios tratamientos en competencia, se necesitarían más muestras, en este caso el problema implicaría un factor con más de dos niveles, por lo tanto, con más de dos muestras.

En el problema de $k > 2$ muestras se supone que k muestras provenientes de k poblaciones. Un procedimiento muy común que se utiliza cuando se prueban medias de la población se denomina análisis de varianza o ANOVA. Este análisis se realiza en experimentos con un solo factor, pero con la preparación de las membranas por el método de sinterización estaban influidas por dos factores, la temperatura y el tiempo, lo que requiere un caso más avanzado de ANOVA el cual es llamado diseño factorial, que involucra dos o más factores.

⁶ Curtosis. <http://es.wikipedia.org/wiki/Curtosis>. Consulta: 20 de agosto de 2014.

3.8.8. Diseño factorial 2^k

El término factor se utiliza en un sentido general para denotar cualquier característica del experimento que pueda variar de un ensayo a otro, como la temperatura, el tiempo o la presión. Los niveles de un factor se definen como los valores reales que se utilizan en el experimento.

Para cada uno de estos casos es importante determinar no solo si cada uno de los dos factores influye en la respuesta, sino también si hay una interacción significativa entre ellos.

En diseños industriales es frecuente considerar dos niveles para cada uno de los factores que pueden intervenir en el diseño experimental. Un diseño con k factores que tienen dos niveles requiere un número de replicaciones igual a 2^k observaciones. En este tipo de modelos se asume que los efectos son fijos y la aleatorización completa y se consideran las mismas restricciones que en el caso de los diseños factoriales típicos.

4. RESULTADOS

4.1. Preparación de la resina de polietileno tereftalato a partir de material reciclado

La preparación de la materia prima consistió en llevar a condiciones específicas de tamaño de partícula al PET molido que se compró de una recicladora, por medio de procesos físicos.

4.1.1. Descripción del procedimiento

En el proceso de reciclaje del PET, después de la molienda de las botellas, se tamiza y los tamaños de partícula que no cumple con las condiciones requeridas para poder reciclarlo y convertirlo en pellets son descartados y almacenados. El material de PET de desecho posee tamaños muy grandes o muy pequeños. Para la preparación de las membranas se aprovechó el potencial de dicho material de desecho ya que existen partículas pequeñas, se encuentra en grandes cantidades, no tiene otro uso y su precio de venta es bajo.

El material comprado poseía cierta humedad la cual fue necesaria removerla, ya que en el proceso de sinterización podría ocurrir hidrólisis, para ello se utilizó una bandeja grande, se distribuyó el PET en toda su superficie y se secó al sol durante 10 horas, moviéndolo constantemente para que el secado fuera uniforme.

Figura 6. **Secado al sol del PET**



Fuente: fotografía tomada por la autora en edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Luego de secar el PET, se procedió a clasificarlo por su tamaño por medio el tamizaje. Se utilizó una batería de tamices de iban desde un número de *mesh* de 3/8 hasta 100, entere más grande es el número de *mesh* más pequeño es el tamaño de partícula que se retiene. Con la batería de tamices se pudo clasificar partículas que iban desde los 9,5 milímetros hasta menores que 0,15 milímetros. Para la sinterización se necesitaban partículas muy pequeñas, así que el PET con tamaño mayor de 0,15 milímetros fue descartado, solo se utilizó el PET del último tamiz y el del fondo de la batería.

Figura 7. **Batería de tamices y comparación de tamaños**



Fuente: fotografía tomada por la autora. Laboratorio de Agregados y Concretos, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

La batería de tamices se colocó y se aseguró en la tamizadora que por medio de movimientos facilita el paso del material que se encuentra en tamices superiores hacia los inferiores, durante un tiempo determinado. Se sacó la batería de tamices y se clasificó el PET por su tamaño en diferentes contenedores.

Figura 8. **Tamizaje y clasificación por tamaño del PET**



Fuente: fotografía tomada por la autora. Laboratorio de Agregados y Concretos, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

El PET necesario para la sinterización tiene que ser pequeño y de tamaño similar al cloruro de sodio (NaCl) porque luego se iban a mezclar. El material recolectado del fondo de la batería de tamices cumplía con estas características pero la cantidad recolectada era limitada y se necesitaban hacer pruebas preliminares para determinar porcentajes de proporción PET/NaCl, rangos de temperaturas y tiempo. Por lo tanto se utilizó el PET con un tamaño de partícula más grande para dichas pruebas.

Figura 9. **Recolección y almacenamiento de materia prima**



Fuente: fotografía tomada por la autora. Laboratorio de Agregados y Concretos, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

El PET en polvo poseía partículas metálicas provenientes de la molienda en la recicladora que podían interferir en la preparación de membranas por lo que se removieron utilizando un imán.

Figura 10. **Remoción de partículas metálicas**

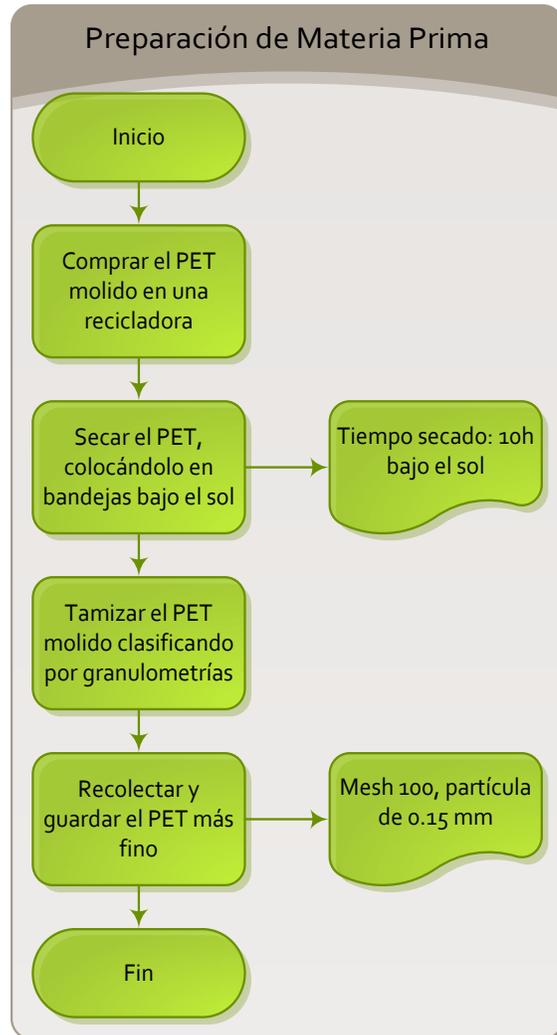


Fuente: fotografía tomada por la autora. Laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

La resina de PET consistió en la mezcla del PET en polvo con NaCl tipo reactivo, a una proporción de 1:1, dicha resina fue preparada para cada una de las membranas a fabricar, para que existiera una homogeneidad en la cantidad de PET y sal destinada a cada membrana.

En la siguiente figura se muestra un esquema del procedimiento para la preparación de la materia prima, para poder observar de manera sencilla sus pasos y variables involucradas en el proceso.

Figura 11. Diagrama de flujo de procedimiento para preparar la materia prima



Fuente: elaboración propia.

4.2. Preparación de la membrana de microfiltración a partir de polietileno tereftalato por medio del método de sinterización

Una vez teniendo la materia prima lista, se procedió a la preparación de las membranas por el método de sinterización que tiene como variables importantes la temperatura y el tiempo. Posterior a esto se realizaron 10 pruebas preliminares variando proporción de PET/NaCl, temperaturas y tiempos.

4.2.1. Descripción del procedimiento

Como primer paso al Laboratorio se encendió el horno para que se precalentara mientras se preparaban las membranas y así optimizar el tiempo de trabajo.

Para preparar una membrana se requiere un grosor pequeño, para ello se colocó una capa del material en el molde que cubriera por completo, para el molde utilizado se pesaron 10 gramos de PET y 10 gramos de NaCl que tienen una proporción 1:1. Si se quisieran preparar membranas con otra forma y otro tamaño los pesos de PET y NaCl cambiarían, solamente se debe mantener la proporción y el hecho de cumplir con un mínimo grosor.

Los dos compuestos se mezclaron en un Beacker y se agitaron con una espátula durante algunos minutos para lograr una mezcla homogénea. Luego se pasó a un mortero y se siguió mezclando y compactando con el pistilo, obteniendo así la resina de PET con sal. Este procedimiento se realizó simultáneamente para dos membranas.

Figura 12. **Mezcla del PET con NaCl**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

En un molde para hornear se colocó papel encerado para que la membrana se pudiera retirar del molde y se colocó la resina dentro de él; seguidamente se compactó con el pistilo, se realizó lo mismo para la otra membrana.

Figura 13. **Resina compactada en los moldes para hornear**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Cuando el horno llegó a la temperatura indicada se ingresaron los dos moldes, y permanecieron en el horno durante un tiempo determinado (de 10 a 20 minutos). El hecho que se colocaran dos membranas para cada condición de temperatura y tiempo fue para observar variaciones en los resultados finales.

Figura 14. **Sinterización de las membranas**



Fuente: fotografía tomada por la autora. Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Pasado el tiempo a la temperatura cercana a la temperatura de fusión del PET, se apagó el horno y se dejó enfriar la membrana sinterizada dentro del horno con la puerta cerrada y luego dejando entrar el aire. Por último se sacaron las membranas y se dejaron enfriar a temperatura ambiente, todo esto para que un cambio brusco en la temperatura no afectara a las membranas.

Figura 15. **Enfriamiento de las membranas dentro del horno**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 16. **Enfriamiento de las membranas a temperatura ambiente**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

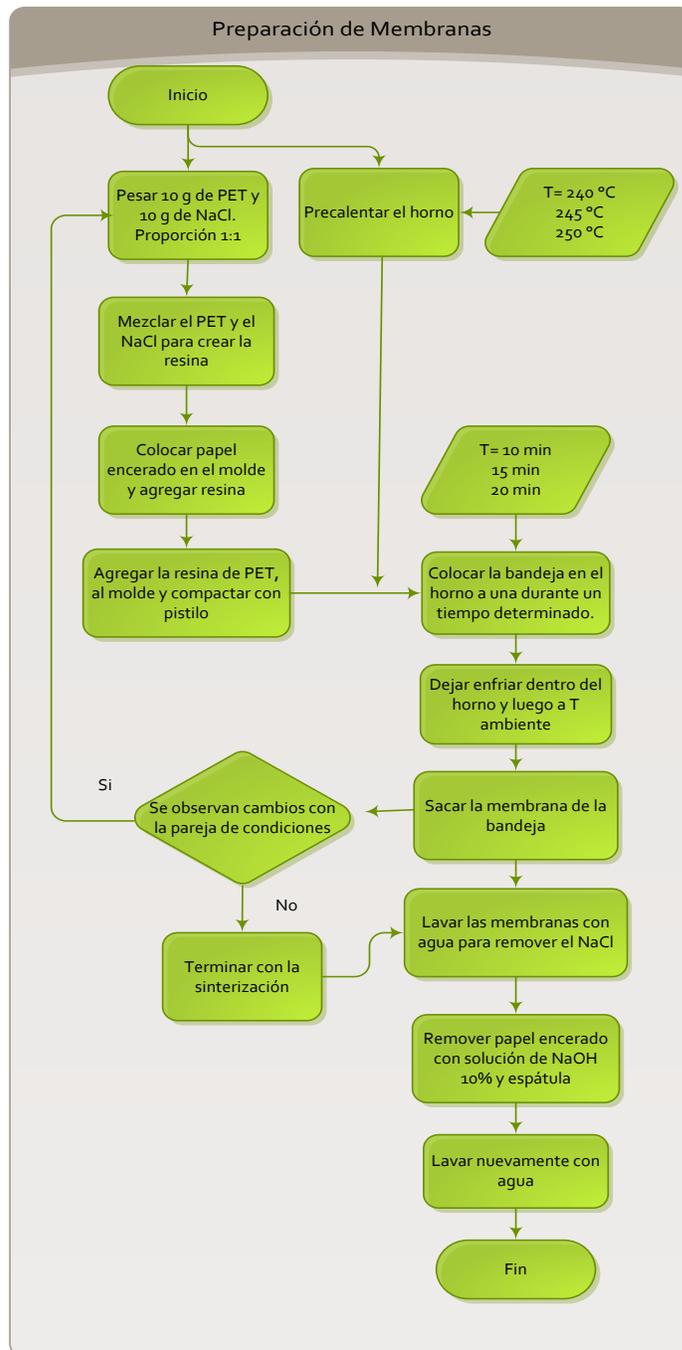
Luego que se enfriaron las membranas, se sacaron del molde y se lavaron con agua, posterior a eso se introdujeron a un recipiente que contenía hidróxido de sodio a 10 por ciento durante 5 minutos para remover el papel encerado y se volvieron a lavar.

Figura 17. **Remoción del papel de las membranas**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 18. Diagrama de flujo para preparar las membranas



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Membranas preparadas por sinterización a diferentes tiempos y temperaturas

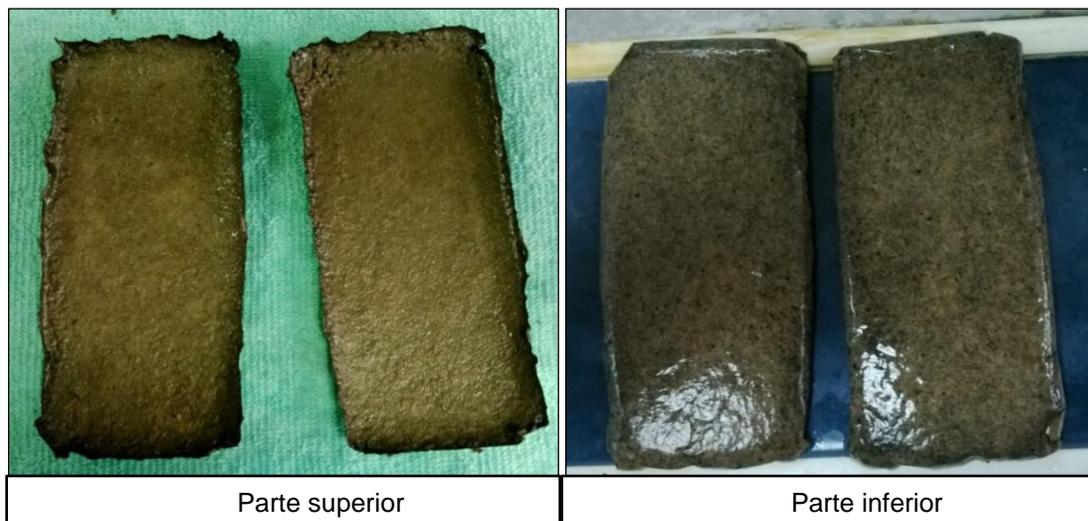
Se tomaron fotografías de las membranas preparadas en su parte superior luego de sacarlas del molde y en la parte inferior luego de remover el papel. Se nombraron de la siguiente manera:

Tabla XVI. **Nombres de las membranas a diferentes temperaturas y tiempos**

Nombre Membrana	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1 A	250	10
1 B	250	10
2 A	245	15
2 B	245	15
3 A	240	20
3 B	240	20
4 A	240	15
4 B	240	15

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Membranas 1 A y 1 B**



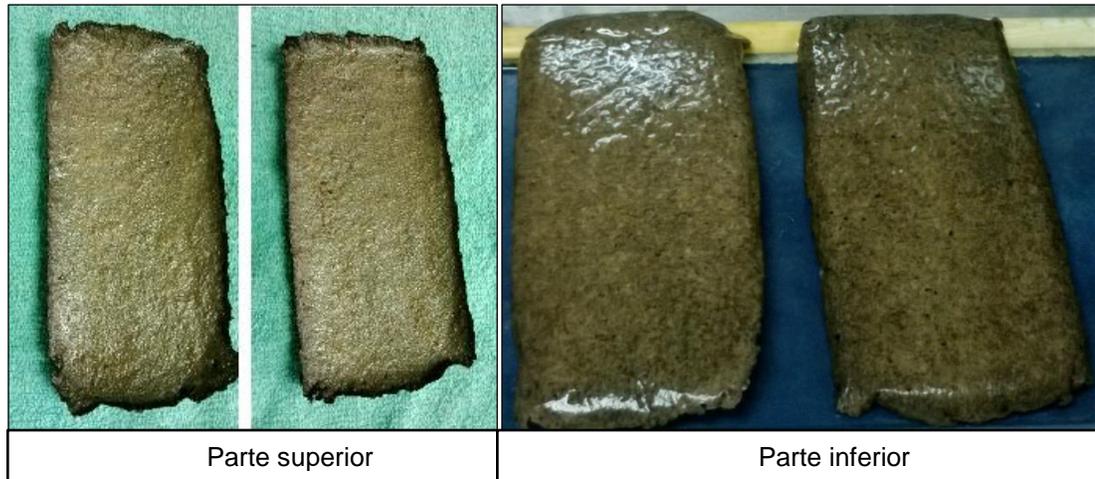
Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 20. **Membranas 2 A y 2 B**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 21. **Membranas 3 A y 3 B**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 22. **Membranas 4 A y 4 B**



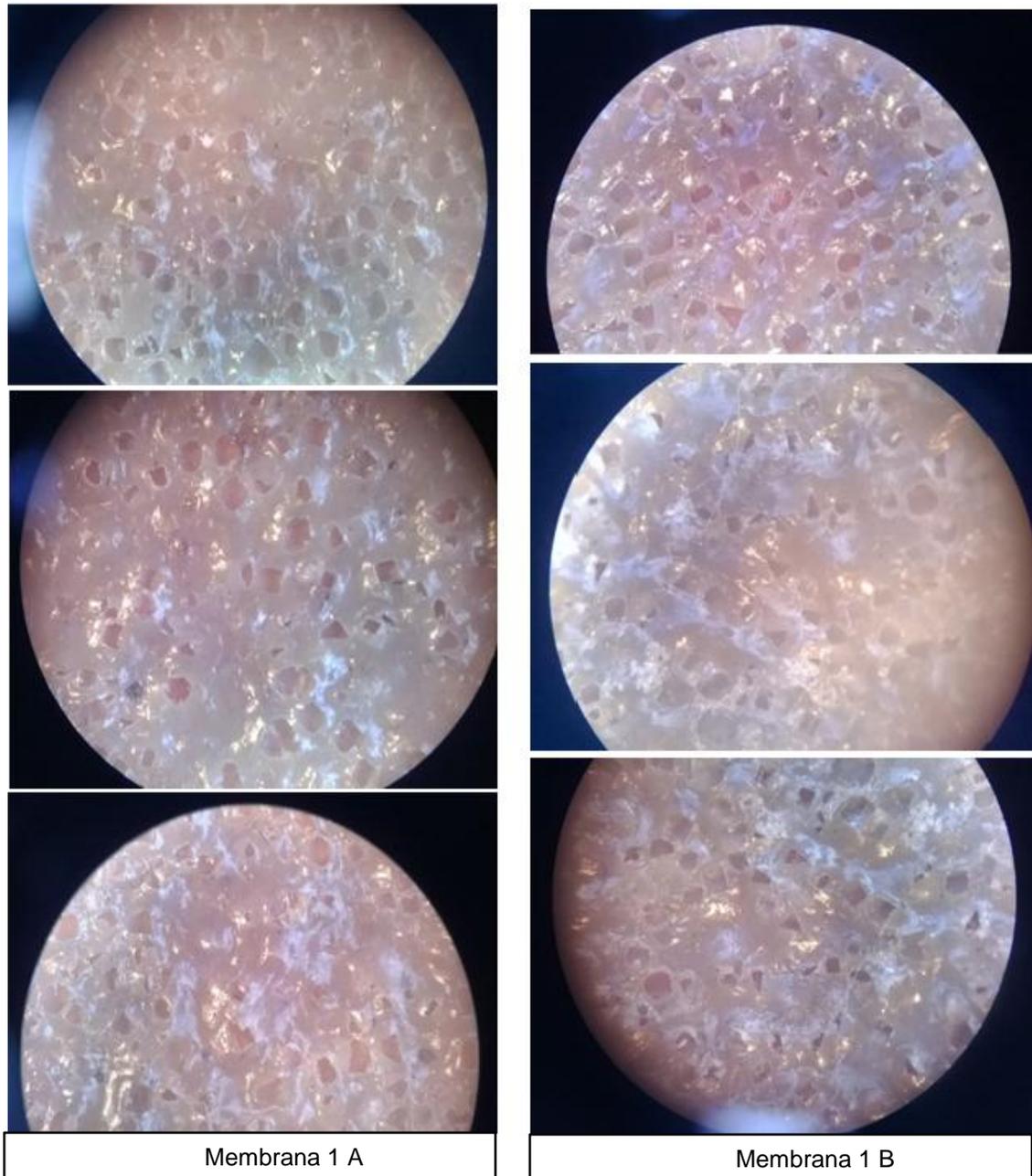
Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

4.3. Distribución de poros en la membrana preparada a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización

Para determinar la membrana que posea las mejores características es importante su distribución de poro dentro de la membrana, es así que aparte de evaluar porosidad y diámetro de poro, también fue necesario observar si existía una distribución uniforme dentro del área de la membrana. Es así como se analizó cada fotografía de las membranas indicando si era uniforme o no y describiendo si había alguna observación significativa. Se realizó este análisis cualitativo para las 8 membranas (A y B) en la parte central y extremos, tanto en la parte superior como en la inferior.

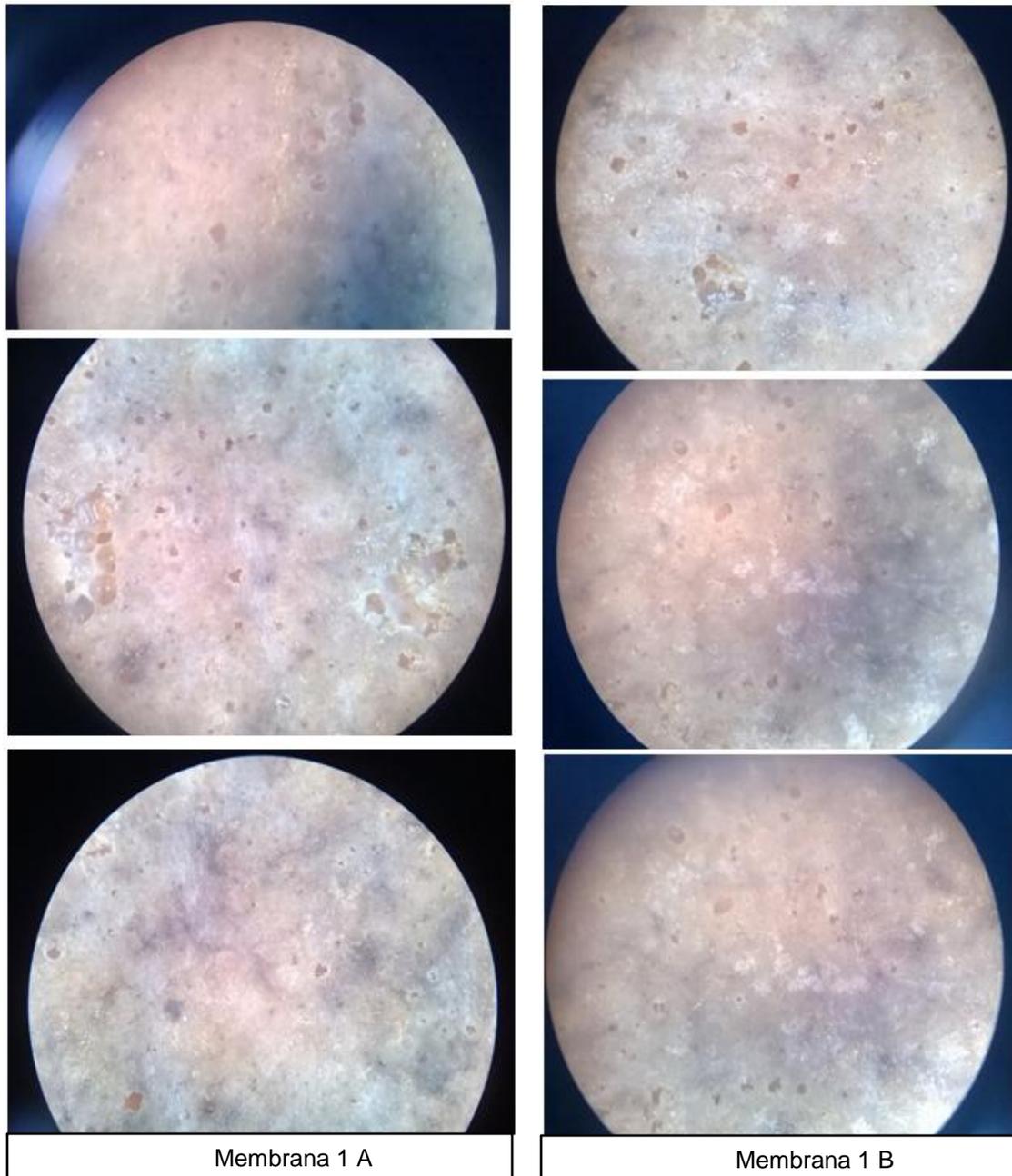
A continuación se muestran las imágenes de las membranas con un aumento de 30 veces y al final una tabla que contiene los resultados de uniformidad de cada parte de la membrana fotografiada.

Figura 23. **Distribución de poros membrana 1 parte superior**



Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 24. **Distribución de poros membrana 1 parte inferior**



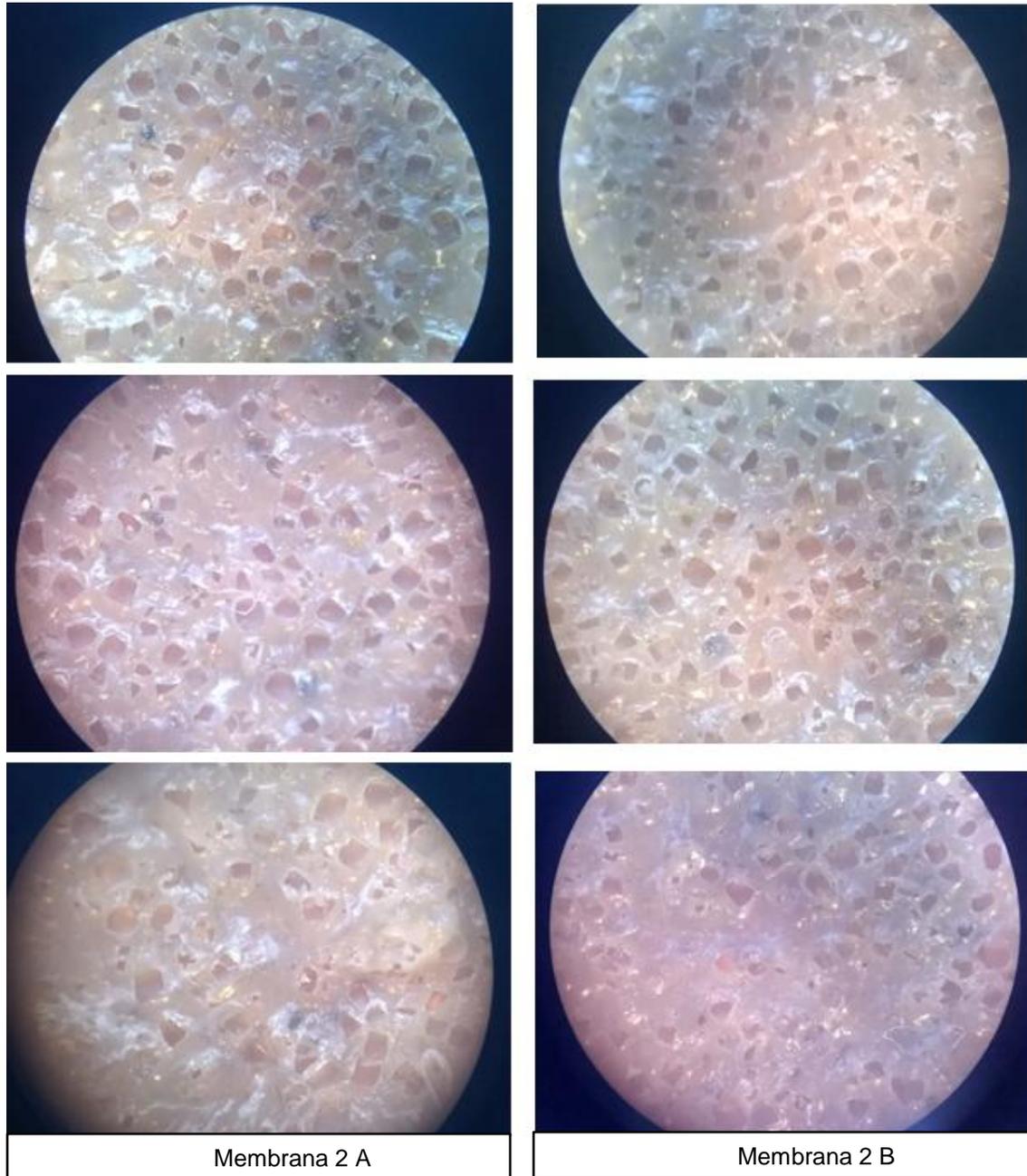
Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Tabla XVII. **Distribución de poro para membranas 1 a 250 °C y 10 minutos**

Parte superior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1	x		1	
A parte 2		x	0	
A parte 3		x	0	
B parte 1	x		1	
B parte 2		x	0	
B parte 3	x		1	
Parte Inferior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1	x		1	
A parte 2	x		0	Poros muy grandes a los extremos
A parte 3	x		1	
B parte 1	x		0	Defecto poro grande
B parte 2	x		1	
B parte 3	x		1	

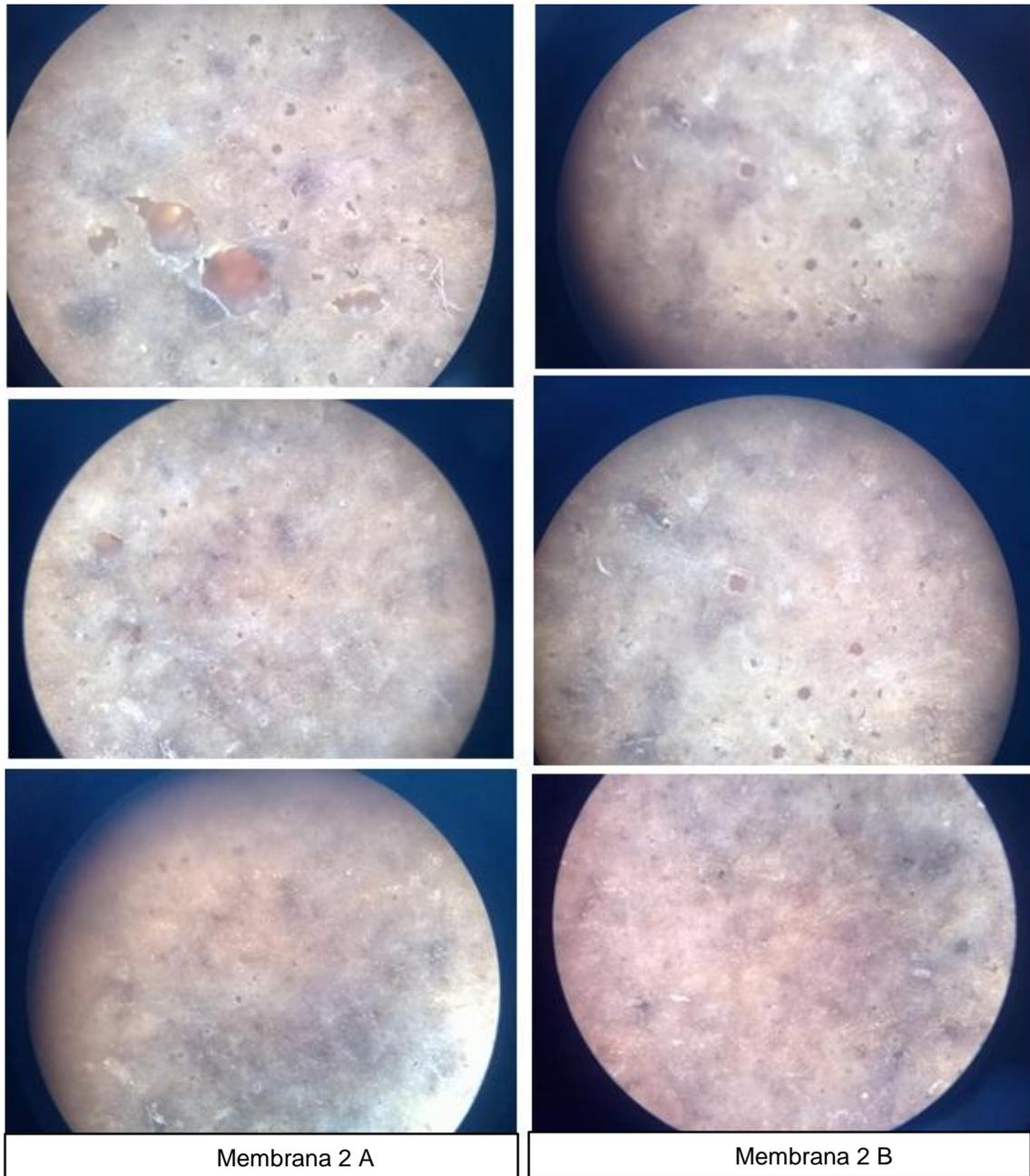
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Distribución de poros membrana 2 parte superior**



Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 26. **Distribución de poros membrana 2 A parte inferior 1**



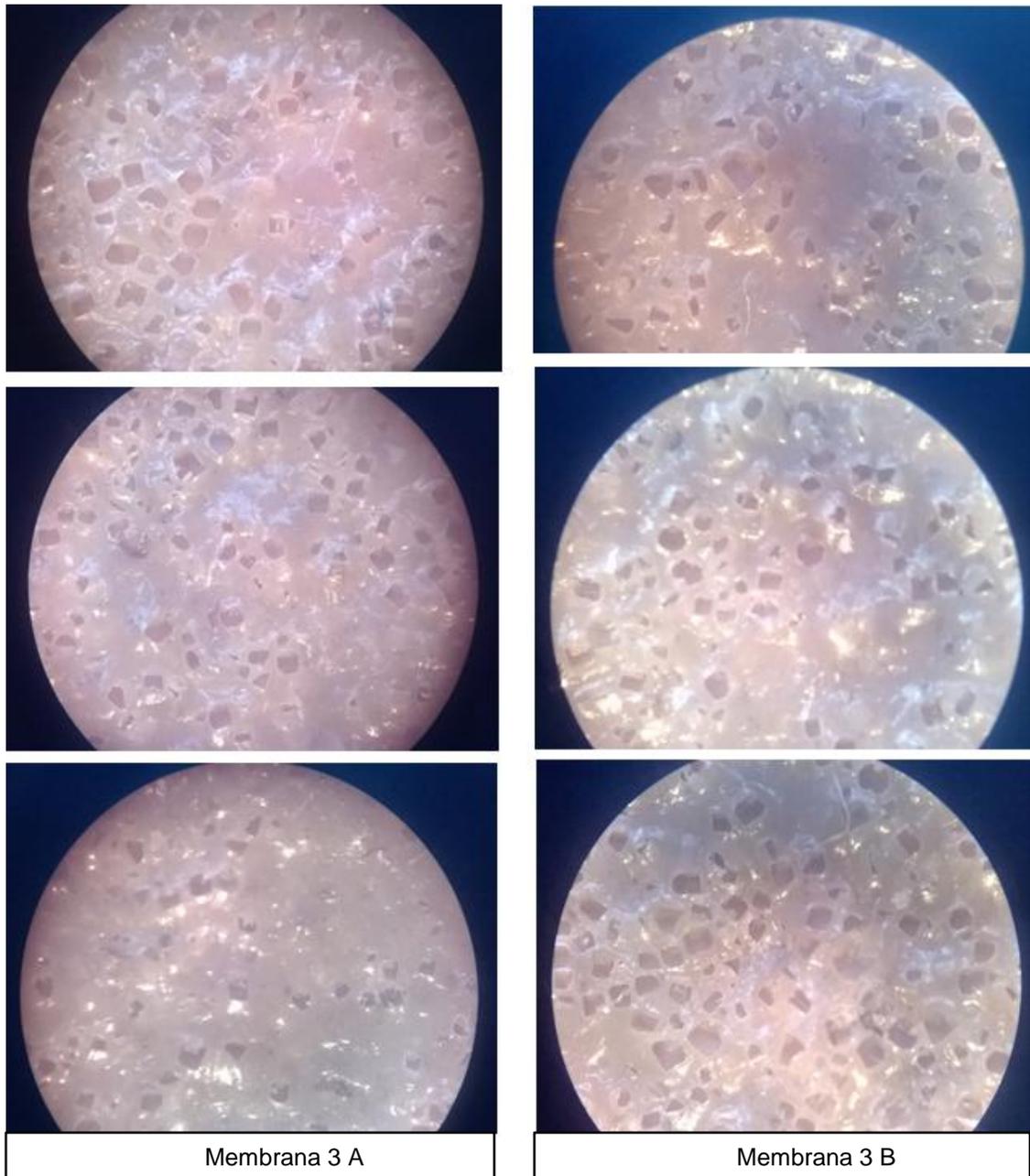
Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Tabla XVIII. **Distribución de poro para membranas 2 a 245 °C y 15 minutos**

Parte superior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1		x	0	
A parte 2	x		1	
A parte 3		x	0	
B parte 1	x		1	
B parte 2	x		1	
B parte 3		x	0	
Parte Inferior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1		x	0	Dos Poros muy grandes
A parte 2	x		1	
A parte 3	x		1	
B parte 1		x	0	
B parte 2		x	0	
B parte 3	x		1	

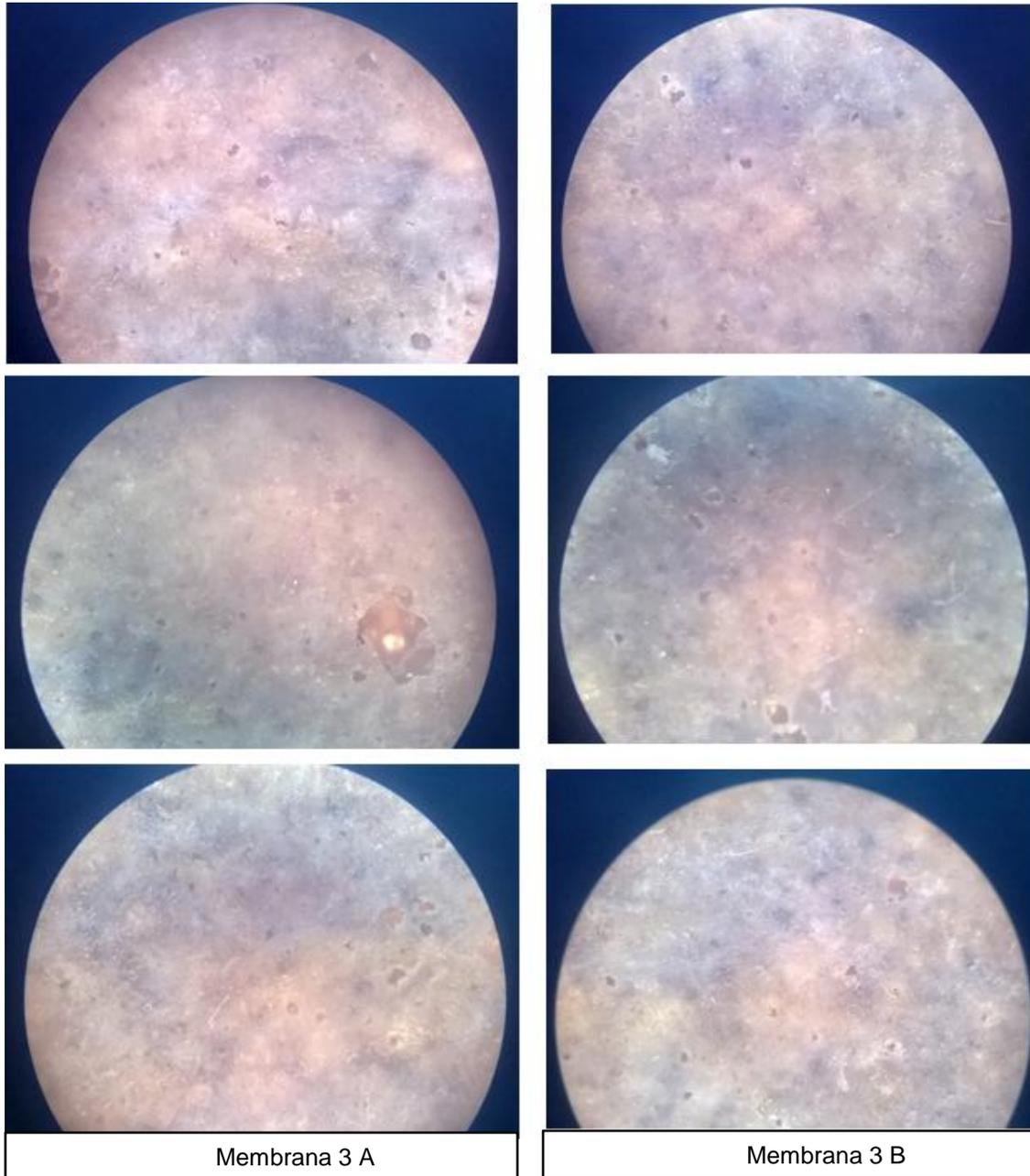
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Distribución de poros membrana 3 parte superior**



Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 28. **Distribución de poros membrana 3 parte inferior**



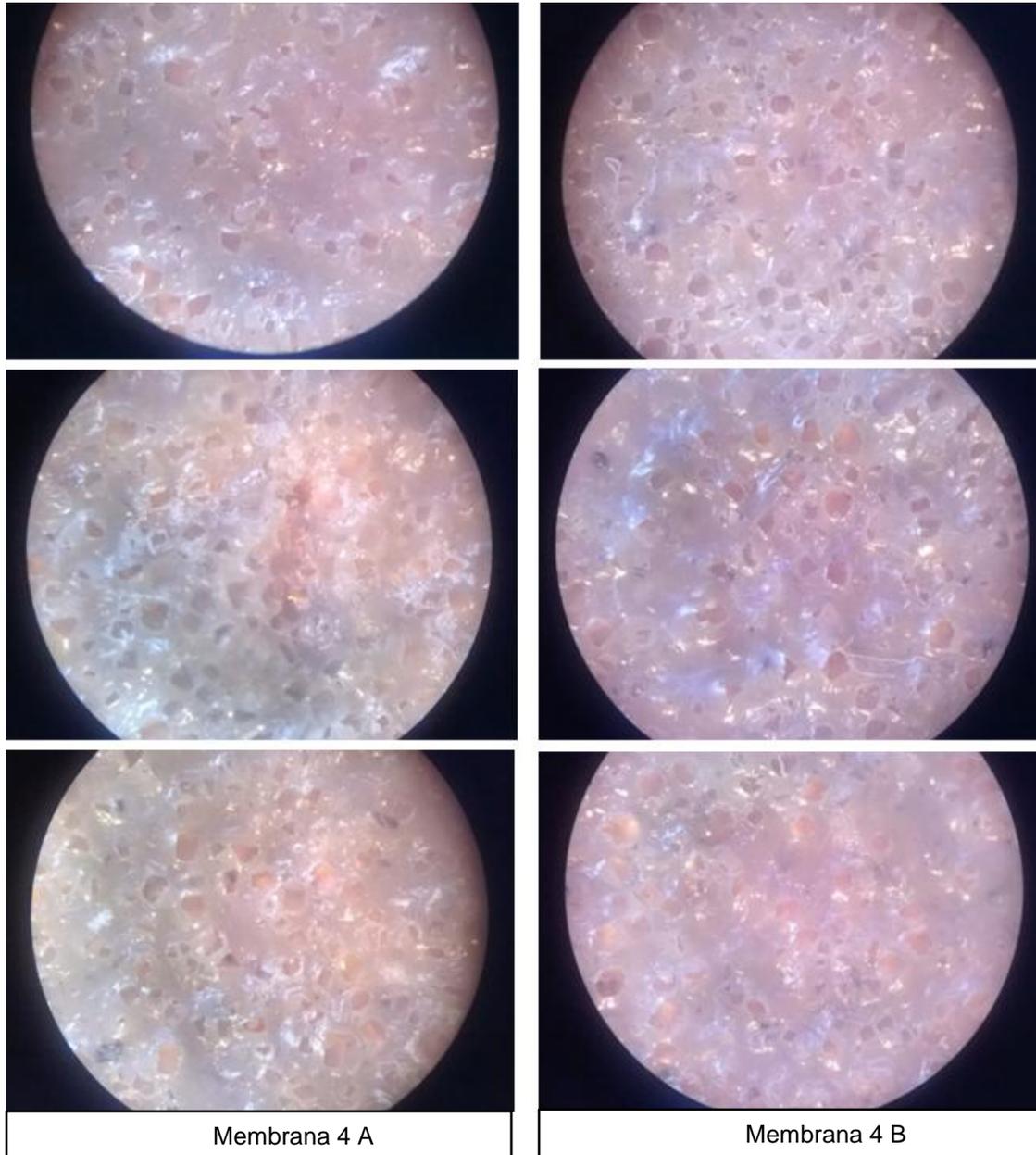
Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Tabla XIX. **Distribución de poro para membranas 3 a 240 °C y 20 minutos**

Parte superior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1		x	0	
A parte 2		x	0	
A parte 3		x	0	
B parte 1		x	0	
B parte 2		x	0	
B parte 3	x		1	
Parte Inferior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1		x	0	Diferentes tamaños
A parte 2	x		0	Un poro muy grande
A parte 3	x		1	
B parte 1	x		1	
B parte 2	x		1	
B parte 3	x		1	

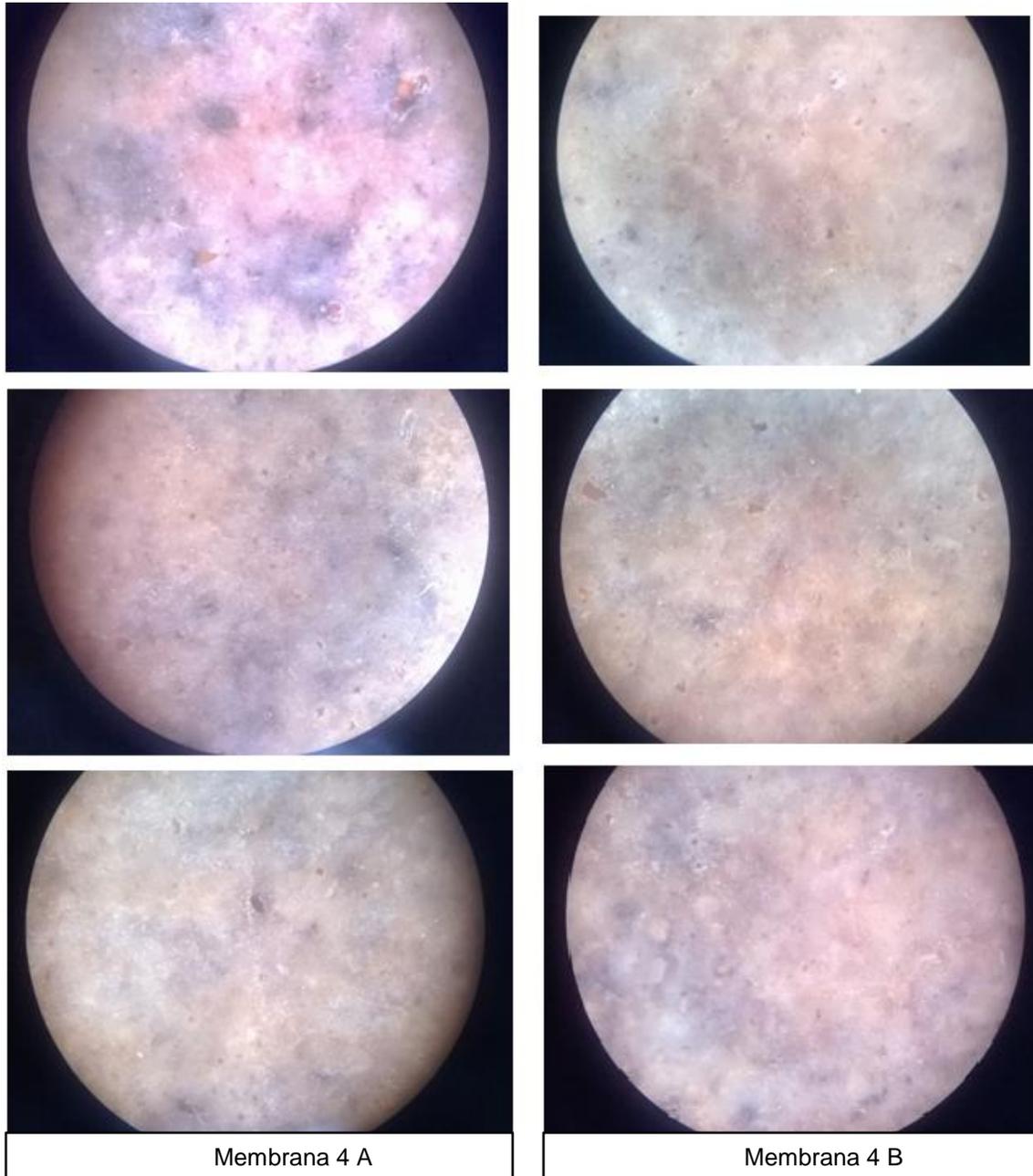
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Distribución de poros membrana 4 parte superior**



Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 30. **Distribución de poros membrana 4 parte inferior**



Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Tabla XX. **Distribución de poro para membranas 4 a 240 °C y 15 minutos**

Parte superior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1		x	0	
A parte 2	x		1	
A parte 3	x		1	
B parte 1		x	0	
B parte 2		x	0	
B parte 3		x	0	
Parte Inferior				
Membrana	Uniforme	No uniforme	Ponderación	Observación
A parte 1	x		1	2 poros mediano tamaño
A parte 2	x		1	
A parte 3		x	0	
B parte 1	x		1	
B parte 2	x		1	3 poros mediano tamaño
B parte 3		x	0	

Fuente: elaboración propia.

4.4. Porosidad de las membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización

La porosidad es una medida que afecta directamente a la cantidad de flujo que atraviesa una membrana. Para que la membrana sea adecuada se requiere que posea una alta porosidad, lo que permite que se recolecte una mayor cantidad de permeato en la salida.

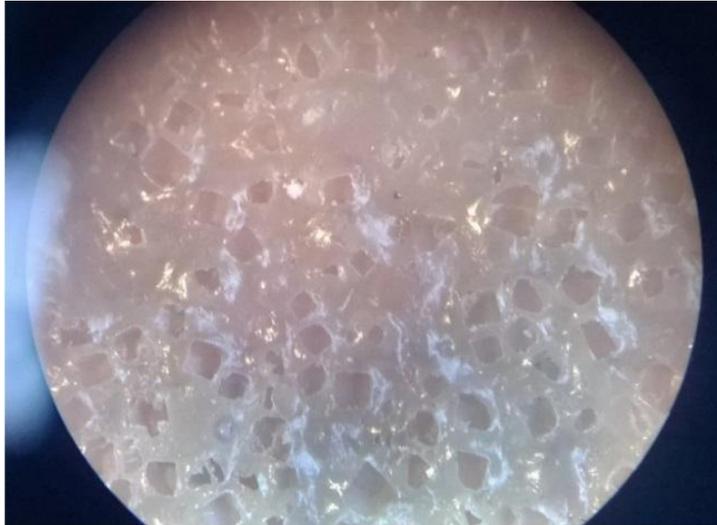
4.4.1. Cálculo de porosidad

Las membranas preparadas no tienen poros de forma circular, sino que tienen formas irregulares. Por medio del programa GeoGebra se pudo determinar el área de estos poros dibujando polígonos sobre las fotografías tomadas. Este proceso se realizó para determinar las áreas de cada uno de los poros que conformaban cada región fotografiada de la membrana, así como del área total.

4.4.1.1. Muestra de cálculo

A continuación se describe el procedimiento de cálculo con un ejemplo de análisis que se le realizó a todas las membranas. Para fines ilustrativos se muestra el cálculo de porosidad para la primera región de la membrana 1 en su parte superior, para ello se cuenta con la siguiente fotografía tomada en el estereoscopio.

Figura 31. **Membrana 1 A, parte superior 1**

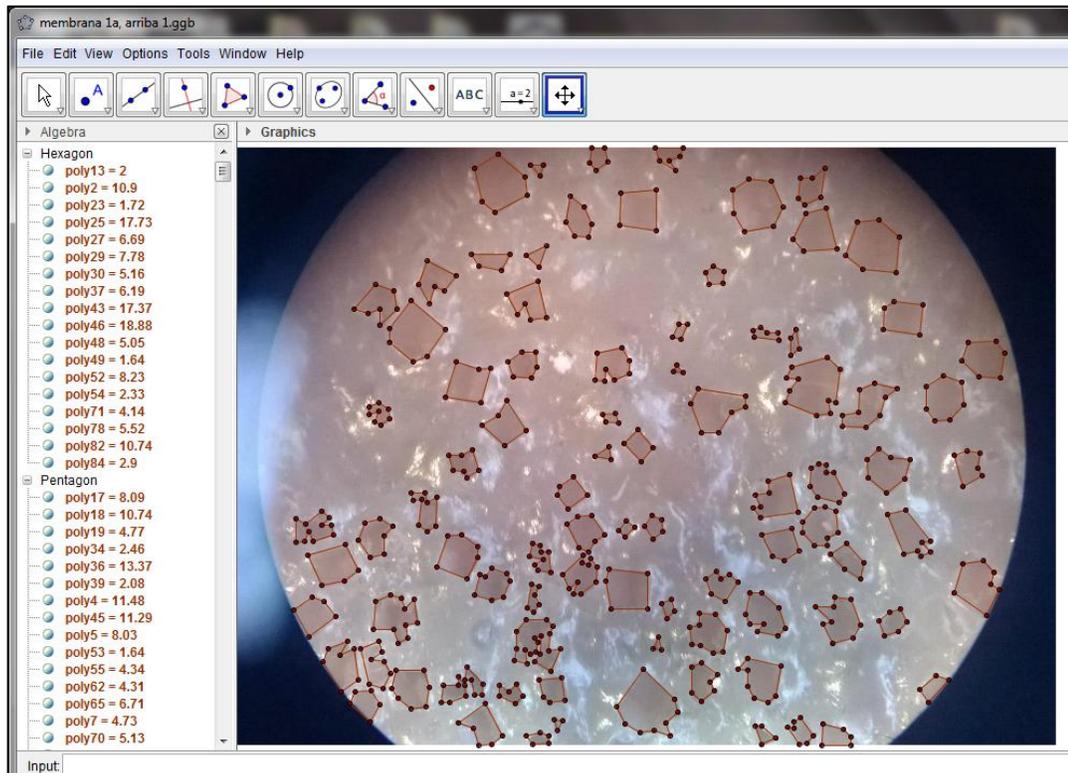


Fuente: Laboratorio de Microbiología, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

La imagen se insertó en el programa GeoGebra y se amplió, de modo que el extremo inferior izquierdo quedara en el origen del plano cartesiano y el extremo inferior derecho en el número 100 de eje de las abscisas.

Se dibujaron los polígonos encima de cada poro observado dentro de la región y también para toda la circunferencia de la membrana. Para cada uno de dichos polígonos realizados en GeoGebra determina su área.

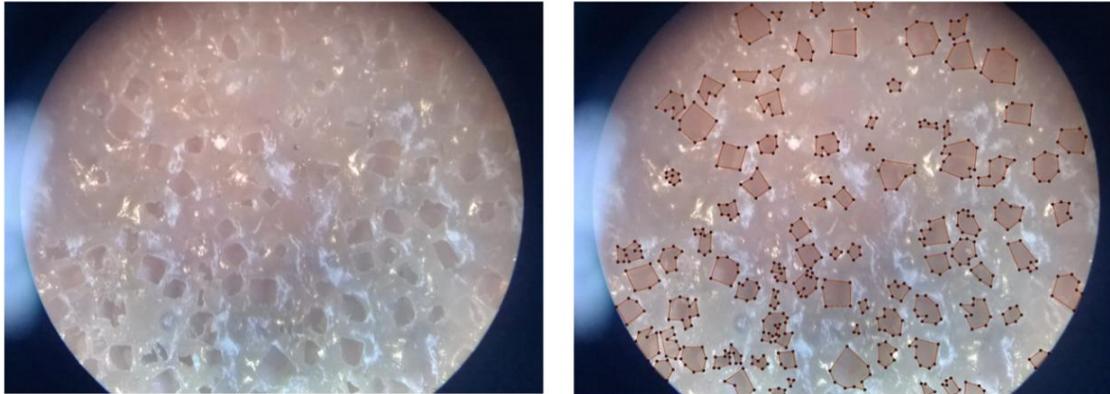
Figura 32. Áreas de poros obtenidos por GeoGebra



Fuente: elaboración propia, con programa GeoGebra.

Los valores de las áreas se muestran en una ventana localizada a la izquierda, los cuales se transcribieron a Microsoft Excel para poder realizar el cálculo de porosidad.

Figura 33. **Comparación de poros de la membrana con polígonos realizados con GeoGebra**



Fuente: elaboración propia, con programa GeoGebra.

Tabla XXI. **Áreas de poros de la membrana 1 A, parte superior 1**

No de poro	Área	No de poro	Área
1	2,00	20	10,74
2	10,90	21	4,77
3	1,72	22	2,46
4	17,73	23	13,37
5	6,69	24	2,08
6	7,78	25	11,48
7	5,16	26	11,29
8	6,19	27	8,03
9	17,37	28	1,64
10	18,88	29	4,34
11	5,05	30	4,31
12	1,64	31	6,71
13	8,23	32	4,73
14	2,33	33	5,13
15	4,14	34	9,31
16	5,52	35	2,60
17	10,74	36	11,64
18	2,90	37	6,27
19	8,09	38	4,96

Continuación de la tabla XXI.

No de poro	Área	No de poro	Área
39	6,78	64	7,55
40	3,26	65	9,54
41	2,41	66	4,74
42	4,15	67	13,73
43	3,02	68	11,56
44	7,09	69	9,90
45	6,95	70	10,54
46	12,29	71	6,90
47	7,56	72	3,71
48	7,24	73	4,15
49	7,68	74	1,14
50	20,08	75	1,16
51	17,66	76	11,44
52	13,98	77	1,68
53	10,46	78	1,25
54	21,15	79	3,15
55	5,95	80	1,24
56	9,16	81	0,94
57	10,01	82	0,88
58	9,32	83	0,32
59	10,43	84	1,62
60	3,25	85	0,41
61	10,81	86	0,36
62	10,52	87	0,65
63	9,14		

Fuente: elaboración propia.

La porosidad se expresa como la relación que existe entre el área de los poros y el área de la membrana, para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{\sum \text{Áreas de poros}}{\text{Área de la membrana}} * 100$$

La primera región superior de la membrana 1 A tiene un área de 3585,58 unidades cuadradas de GeoGebra y la sumatoria de poros que la conforman es de 607,83 unidades. Debido a que se cuentan con las mismas unidades en el numerador y denominador no fue necesaria una conversión a escala real para obtener el valor de la porosidad.

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{607,83}{3585,58} * 100 = 17 \%$$

Se realizó el mismo cálculo de porosidad para las tres regiones fotografiadas para cada membrana, tanto de la parte superior como de la parte inferior. Lo cual se muestra en la sección de apéndices.

4.5. Diámetro de poro promedio de las membranas preparada a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización

La selectividad de una membrana se ve afectado directamente con el diámetro de poro, se requiere un diámetro de poro pequeño, alrededor de 10 micrómetros para obtener membranas de microfiltración. A mayor selectividad, la eficiencia del proceso para separar sustancias es más efectiva.

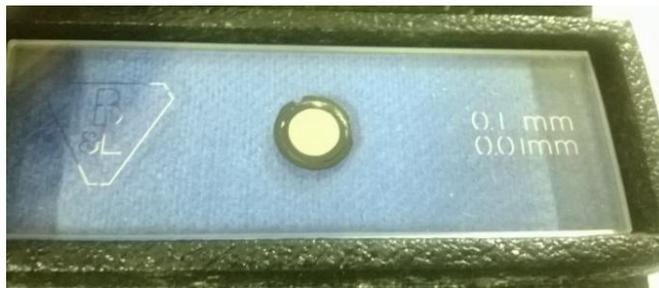
4.5.1. Cálculo de diámetro de poro

Por medio de GeoGebra se determinaron las áreas de los poros que conformaban cada región de membrana fotografiada, la relación del diámetro de poro con su área se ve determinada el llamado diámetro equivalente, el cuál es utilizado para secciones geométricas irregulares que no tienen una circunferencia bien definida. Para este cálculo fue necesaria una previa conversión a escala real de los valores de área obtenidos mediante GeoGebra.

4.5.1.1. Muestra de cálculo

El primer paso para determinar el diámetro de los poros fue convertirlo a la escala real, para ello fue necesaria una escala micrométrica, la cual fue observada y fotografiada en el estereoscopio con la misma ampliación a las que fueron observadas las membranas (30X).

Figura 34. Escala micrométrica

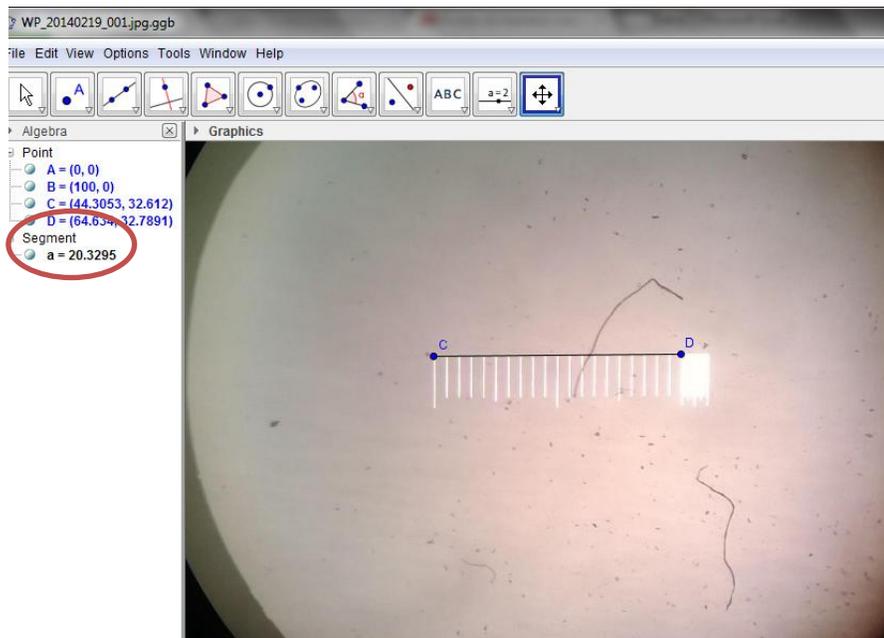


Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria, Dr. Alba Tabarini Molina. Edificio T-5. Facultad de Ingeniería.

La escala utilizada tiene una longitud de 2 milímetros con espaciamentos de 0,1 milímetros como se especifica en la placa de vidrio que la contiene.

La fotografía de la escala fue insertada en GeoGebra, ampliándola de 0 a 100 en el eje de las abscisas. El factor de conversión se obtuvo al trazar un segmento de línea de longitud igual que la escala micrométrica, la cual tiene un valor conocido.

Figura 35. Medición de escala micrométrica con GeoGebra



Fuente: elaboración propia, con programa GeoGebra.

El valor en escala real se comparó con el obtenido con GeoGebra, el cual se encuentra en la ventana del lado izquierdo del programa, para determinar el factor de conversión de escala.

Tabla XXII. **Factor de conversión de escala GeoGebra a escala real**

Escala micrométrica		
Longitud de escala micrométrica	Longitud de la escala en unidades de GeoGebra	Factor de conversión a micrómetros
2000 μm	20,3295	98,38

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenido el factor de conversión se determina el diámetro del poro por medio del despeje de la ecuación del área de la circunferencia.

$$A_{\text{poro}} = \pi \left(\frac{D^2}{4} \right)$$

Donde:

A= área del poro

D= Diámetro equivalente del poro

Despejando el diámetro se tiene:

$$\sqrt{\frac{A_{\text{poro}}}{\pi} * 4} = D_{\text{eq}}$$

Para obtener el diámetro de poro en micrómetros, se debe multiplicar por el factor de conversión

$$\sqrt{\frac{A_{\text{poro}}}{\pi} * 4 * 98,38} = D_{\text{eq}}$$

Por medio de la ecuación anterior, se obtuvieron los valores de diámetro equivalente de la membrana 1 A, parte superior 1. Dicha región fotografiada contaba con 87 poros visibles y sus diámetros respectivos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XXIII. **Diámetros de poro de la membrana 1 A, parte superior 1**

No de poro	Diámetro (µm)	No de poro	Diámetro (µm)	No de poro	Diámetro (µm)
1	156,99	31	287,55	61	364,98
2	366,50	32	241,43	62	360,05
3	145,59	33	251,43	63	335,61
4	467,43	34	338,71	64	305,02
5	287,13	35	179,00	65	342,87
6	309,63	36	378,73	66	241,68
7	252,16	37	277,97	67	411,33
8	276,19	38	247,23	68	377,43
9	462,66	39	289,05	69	349,28
10	482,35	40	200,43	70	360,39
11	249,46	41	172,33	71	291,60
12	142,16	42	226,14	72	213,82
13	318,46	43	192,91	73	226,14
14	169,45	44	295,58	74	118,53
15	225,87	45	292,65	75	119,56
16	260,81	46	389,17	76	375,47
17	363,80	47	305,22	77	143,88
18	189,04	48	298,69	78	124,11
19	315,74	49	307,64	79	197,02
20	363,80	50	497,44	80	123,61
21	242,45	51	466,50	81	107,63
22	174,11	52	415,06	82	104,14
23	405,90	53	359,02	83	62,80
24	160,10	54	510,52	84	141,29
25	376,12	55	270,78	85	71,08
26	373,00	56	335,97	86	66,61
27	314,57	57	351,22	87	89,50
28	142,16	58	338,90		
29	231,26	59	358,51		
30	230,46	60	200,12		

Fuente: elaboración propia.

Se realizó el mismo cálculo de diámetro de poro para las tres regiones fotografiadas para cada membrana, tanto de la parte superior como de la parte inferior. Lo cual se muestra en la sección de apéndices.

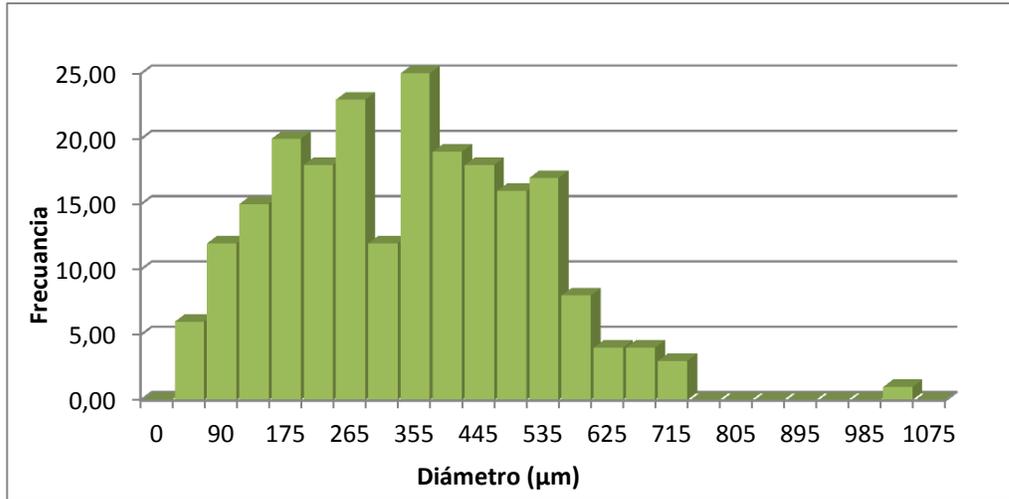
4.5.2. Histogramas de frecuencia de diámetro de poro

Los histogramas de frecuencia se utilizaron como medio de observación de la concentración de tamaños de poros en determinados rangos, así como también los valores extremos de muy baja probabilidad de ocurrencia que se pueden asumir como defectos en la membrana preparada.

Para que una membrana sea eficiente para una aplicación en particular, los poros se deben concentrar en un rango pequeño de tamaño de poros, evitando los valores extremos; siendo este influyente en la selección de la mejor membrana. Por medio de los histogramas de frecuencia también se pudo determinar un comportamiento normal de los valores de diámetro de poro.

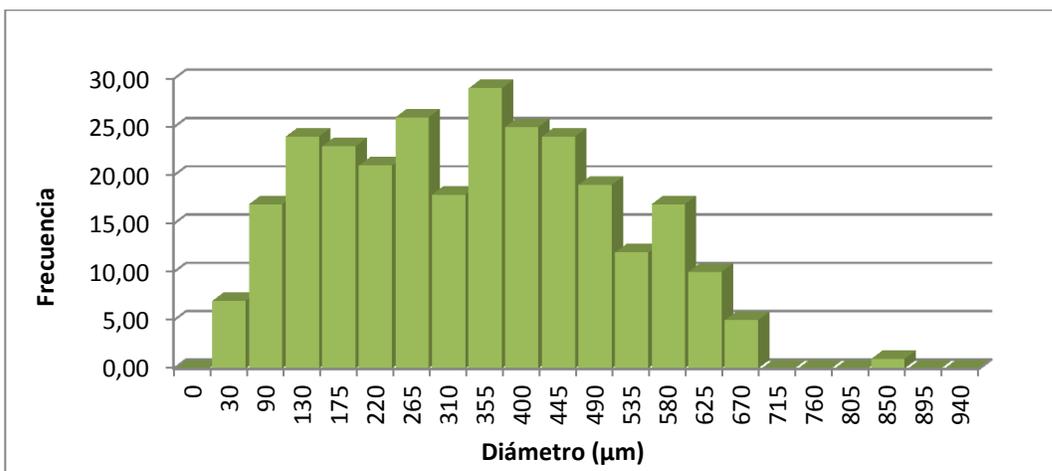
Los histogramas de frecuencia se realizaron solo para una membrana de cada condición, denominadas por la letra A.

Figura 36. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte superior**



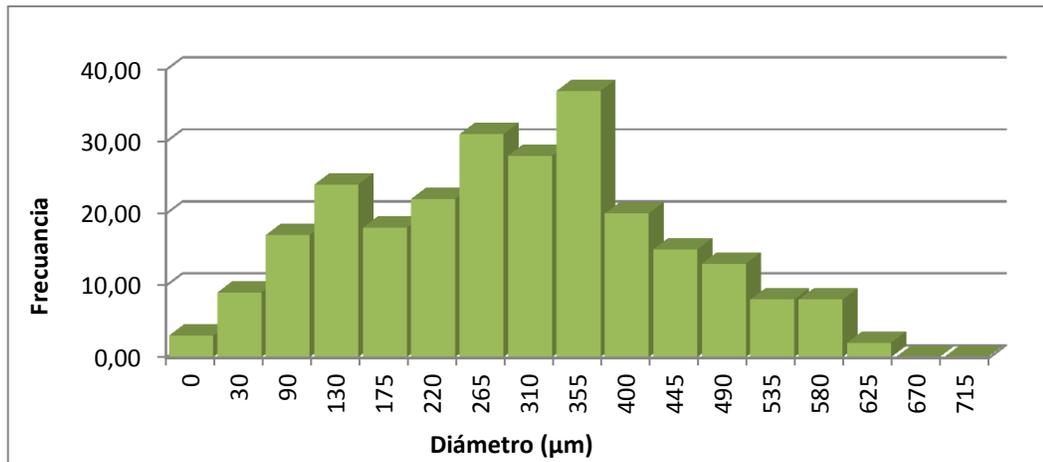
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte superior**



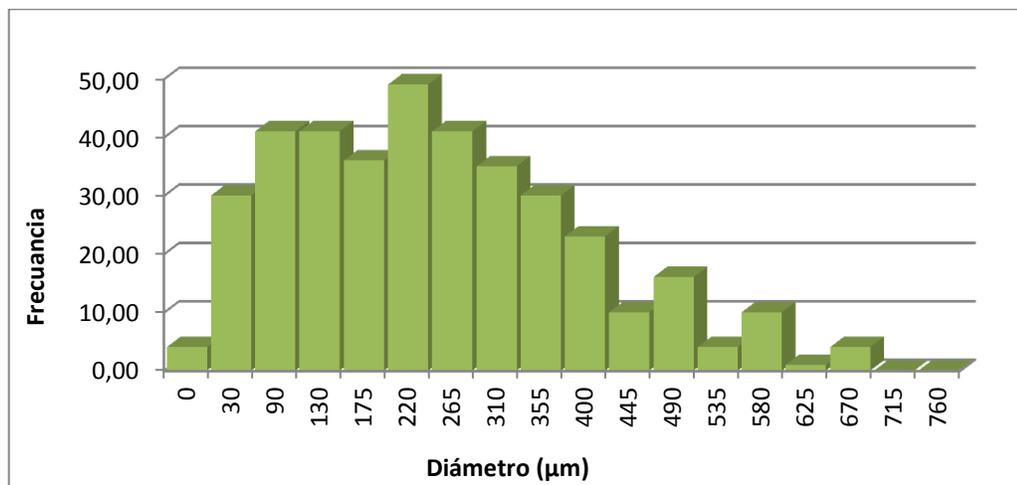
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte superior**



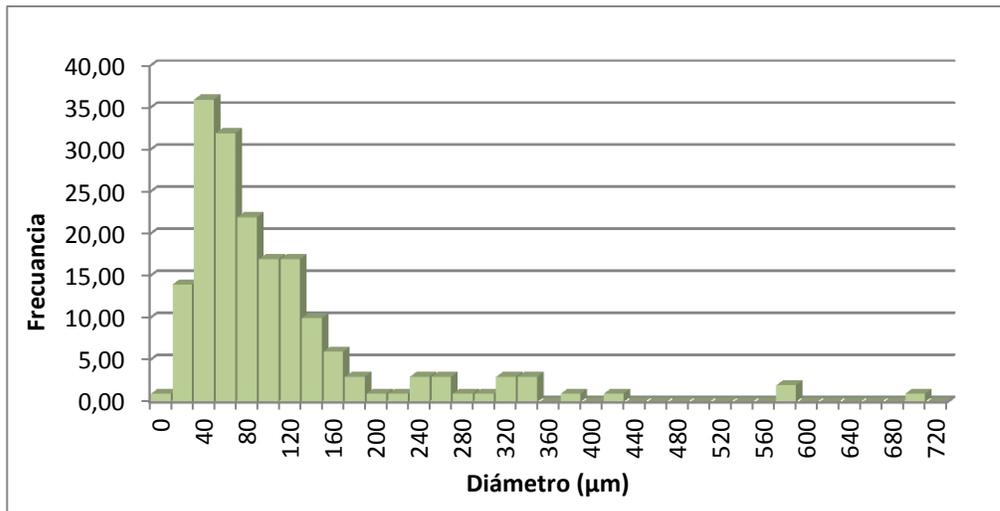
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 4 A, parte superior**



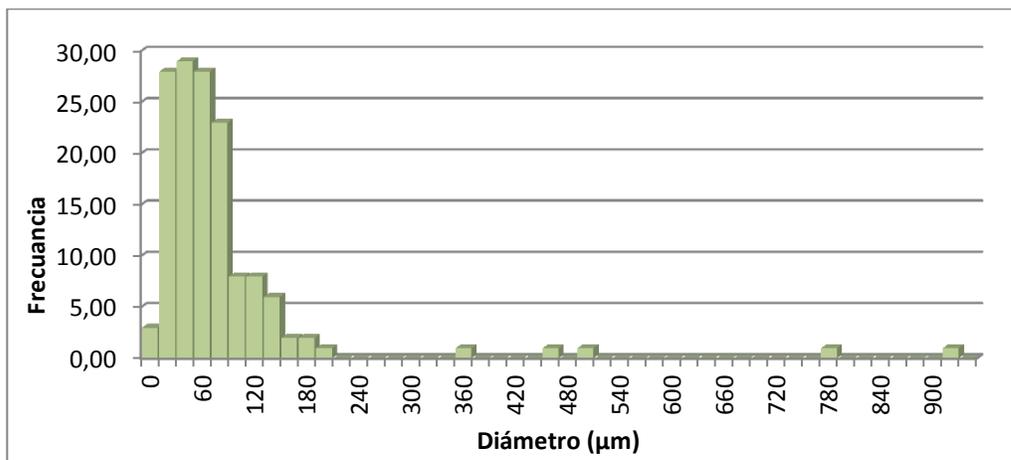
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte inferior**



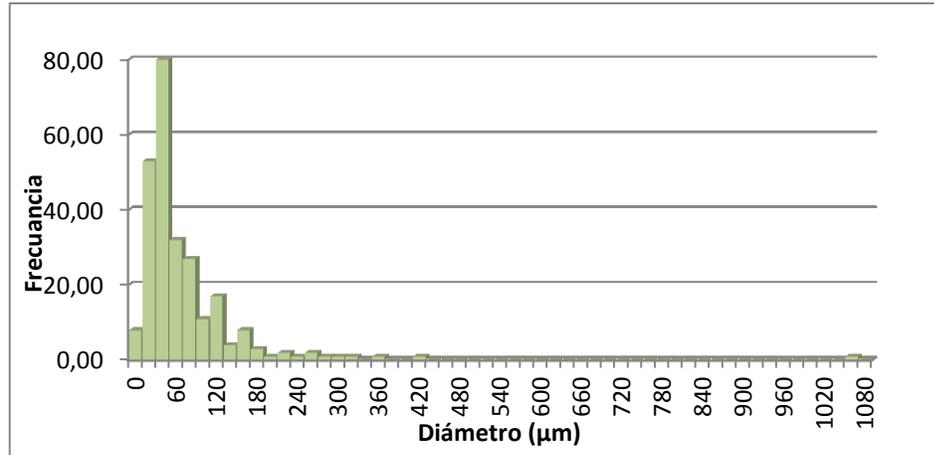
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte inferior**



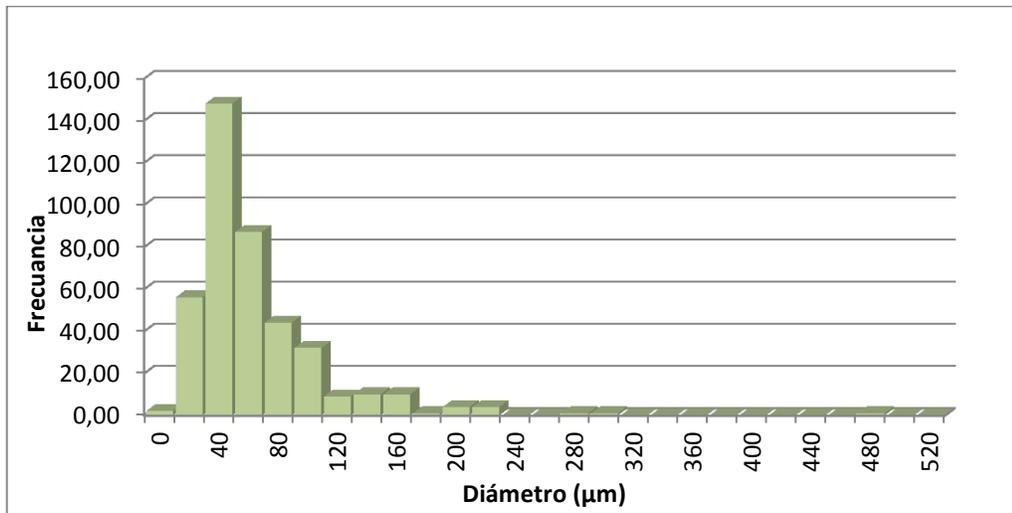
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte inferior**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Histograma de frecuencia de diámetro de poro para la membrana 4 A, parte inferior**

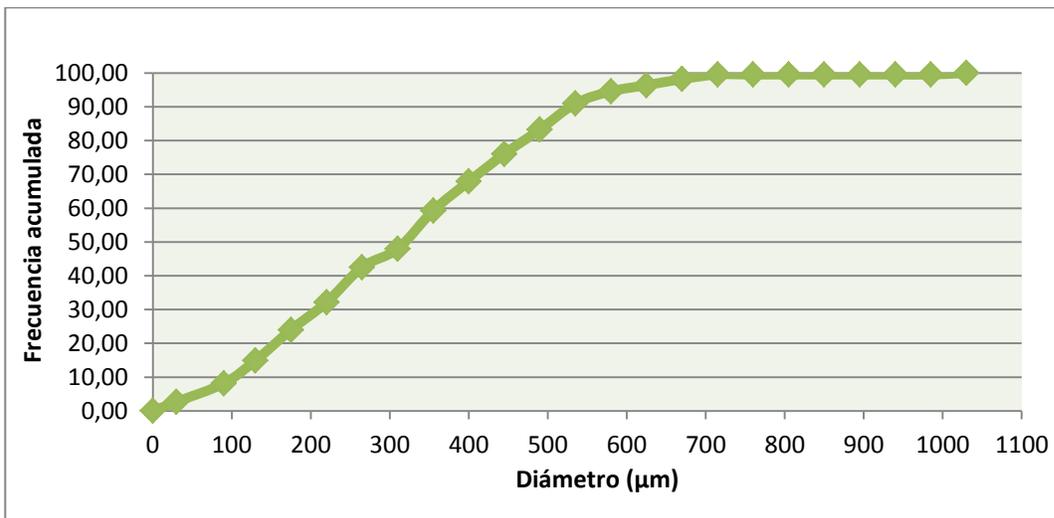


Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Frecuencia acumulada de diámetro de poro

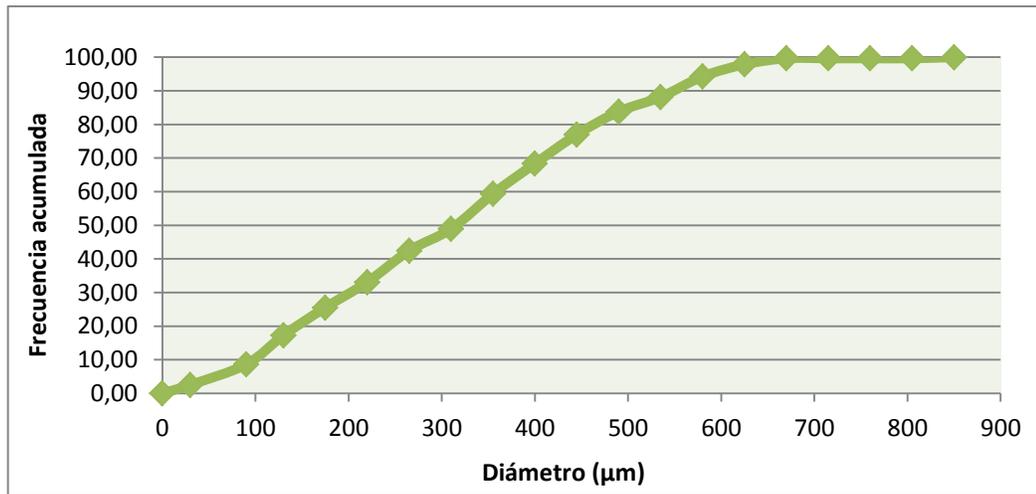
Este análisis estadístico sirvió para observar como cambiaba la probabilidad de que existieran determinado tamaño de poro, así se logró observar que hay un punto en el que no hay un crecimiento significativo del número de poros cuando estos presentan un diámetro grande.

Figura 44. Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte superior



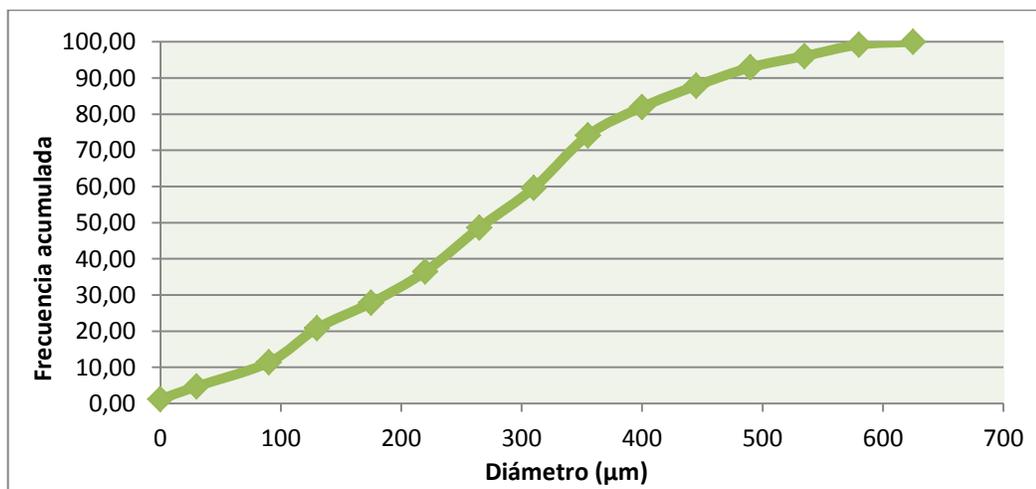
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte superior**



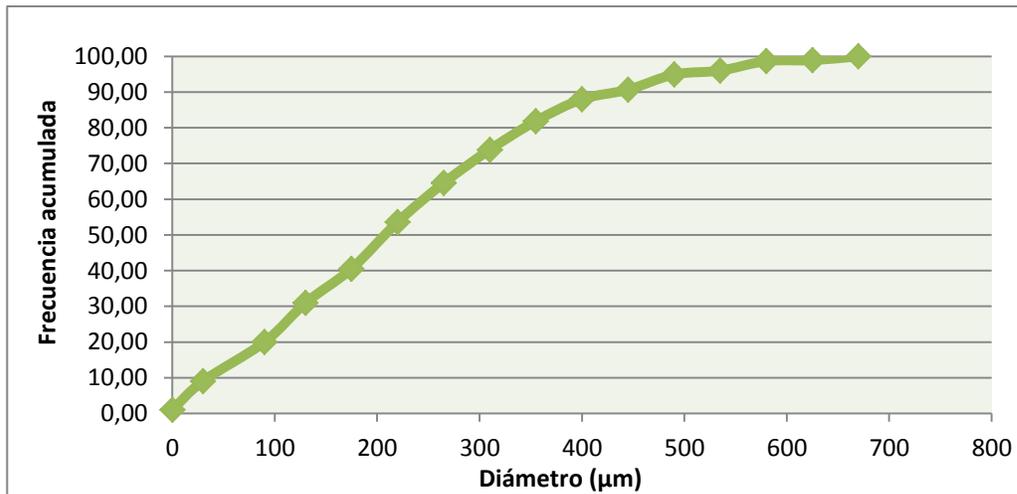
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte superior**



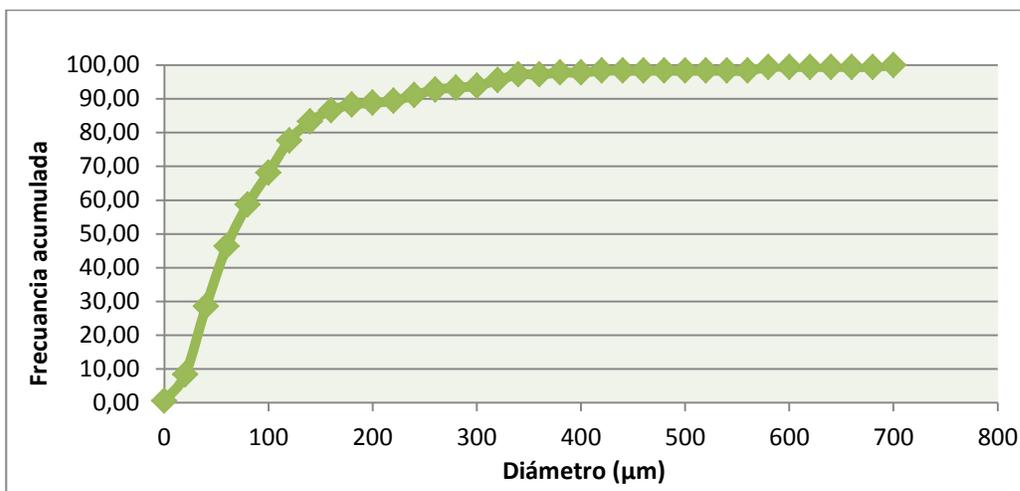
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 4 A, parte superior**



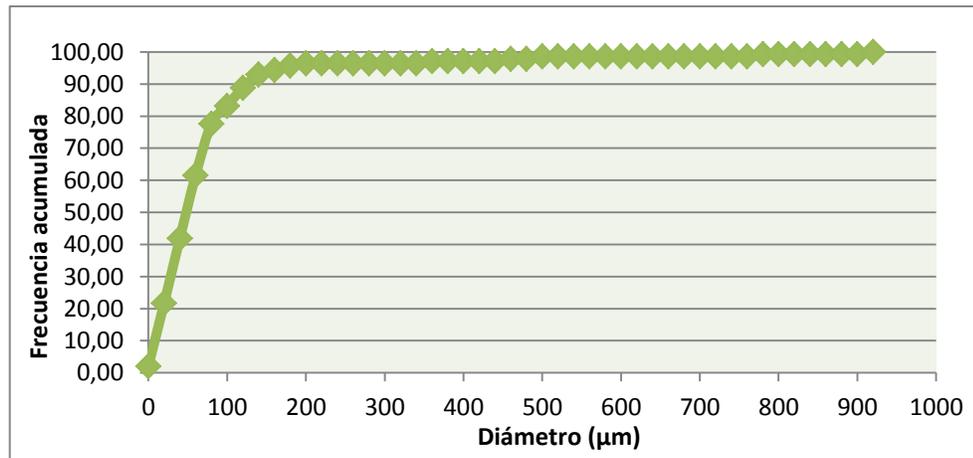
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 1 A, parte inferior**



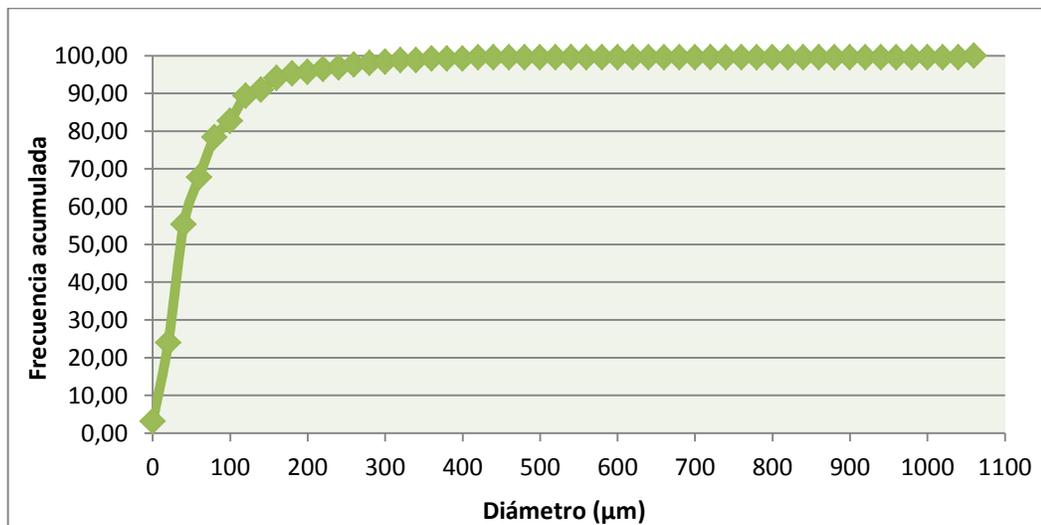
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 2 A, parte inferior**



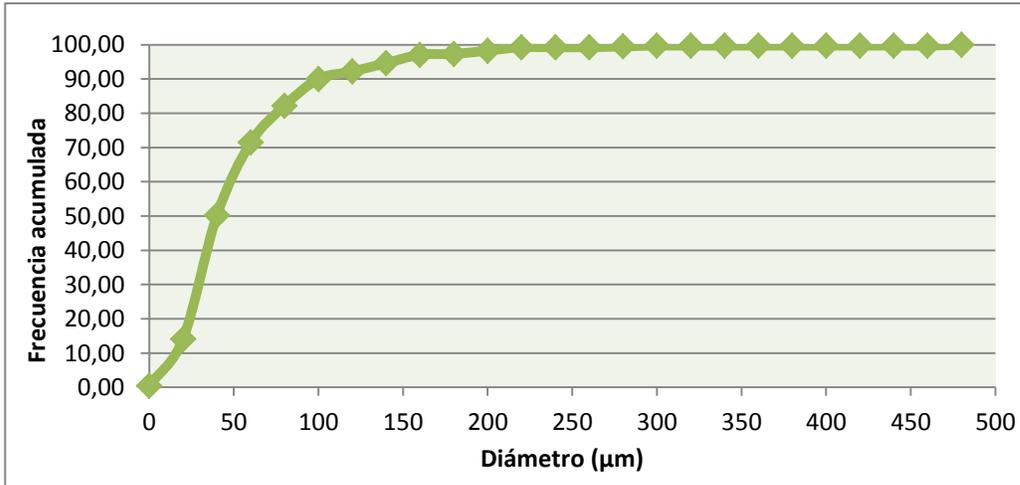
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte inferior**



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Frecuencia acumulada de diámetro de poro para la membrana 3 A, parte inferior



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis de la preparación de las membranas

La preparación de las membranas de polietileno tereftalato por el método de sinterización requería que la materia prima estuviera en un estado polvoriento, por lo que se adquirió el material directamente de una recicladora en el que por medios mecánicos se disminuye el tamaño de partícula del PET, proveniente de botellas plásticas. Sin embargo, se debió clasificar el tamaño de partícula por medio del tamizado, así se obtuvo un polvo con tamaño de partícula menor de 0,5 milímetros utilizando el material del fondo de la batería de tamizado. Un tamaño de partícula pequeño es necesario para la preparación de la resina, ya que al ser mezclado con la sal (NaCl) existe una mayor homogeneidad en la distribución de ambos materiales dentro de la resina.

Debido a que el PET en estado sólido absorbe humedad del medio ambiente, requiere de un proceso de secado antes de ser sinterizado, ya que cuando es almacenado, la resina absorbe humedad hasta alcanzar el equilibrio. Sin embargo, para fabricar un buen producto de PET, se requiere reducir la humedad antes de la sinterización. Un método sencillo y de ningún costo es el secado bajo el sol. En el proceso de preparación de la materia prima se utilizó este método de secado aprovechando el calor generado por las radiaciones solares.

La investigación realizada fue de tipo exploratorio, lo que requirió pruebas preliminares en la parte de sinterización, es así como se determinaron rangos

de temperatura, rangos de tiempo, proporciones de NaCl y PET, la estructura y forma de la membrana.

Son factores claves en la sinterización la temperatura a la que se coloca el horno y el tiempo de permanencia de la resina. Se empezaron las pruebas a una temperatura de 240 debido a que la sinterización se da entre 70 y 90 por ciento de la temperatura de fusión del material. El PET tiene un punto de fusión de 255 grados Celsius aproximadamente.

La razón por la cual no se puede sobrepasar esta temperatura es que a temperaturas superiores al punto de fusión, el agua presente hidroliza rápidamente al polímero, reduciendo su peso molecular así como sus propiedades características. La hidrólisis puede ocurrir en el PET desde temperaturas tan bajas como 150 grados Celsius, aunque a poca velocidad. A medida que la temperatura se incrementa, la velocidad de hidrólisis también aumenta, por ello se debió controlar esta variable.

Además la temperatura influye en la generación de acetaldehído, que se genera por la degradación térmica de las moléculas de PET mientras se encuentra en estado de fusión, por lo que tiene una relación directa con la historia térmica del polímero.

Las membranas preparadas eran opacas de color café, la transparencia del PET está relacionada con el grado de cristalinidad del polímero y su estructura molecular, es así que cuando es transparente tiene una estructura molecular amorfa y en el caso de las membranas su estructura estaba cristalizada y por ello eran opacas. Dicha estructura depende de la temperatura, que afecta la alineación de las moléculas para formar una estructura cristalina.

La resina utilizada estaba conformada de una mezcla de PET y cloruro de sodio, ésta última es una sal hidrosoluble que tiene gran afinidad por el agua y un alto punto de fusión. Es así que cuando se eleva la temperatura el PET pasa a su estado fundido creando una red cristalina en donde se quedan retenidos los granos de sal, que son los formadores de poros luego de lavar las membranas con agua.

5.2. Análisis de la porosidad de las membranas

A simple vista las membranas presentaban las mismas características, fue necesario una ampliación para un análisis minucioso de los poros que la conformaban. Se utilizó el estereoscopio que es capaz de enfocar y ampliar 30 veces el tamaño de objetos opacos, con dicho instrumento se observaron los poros de las membranas, sin embargo la resolución no fue suficiente para observar poros de menor tamaño que era muy probable que existiera, esta limitante de no poder utilizar un microscopio óptico se debió a que la membrana era opaca y relativamente gruesa que no permite el paso de la luz a través de ella.

También se observó en el estereoscopio que en la parte superior de la membrana, expuesta al ambiente dentro del horno, los tamaños de poro eran mucho más grandes que en la parte inferior que era la que estaba en contacto con el molde, se puede decir entonces que la membrana es de tipo compuesta y la parte de menor tamaño de poro se coloca en la parte de la alimentación del fluido para facilitar su transporte y disminuir el bloqueo por ensuciamiento.

Por medio de la caracterización visual solamente se puede determinar los tamaños de los poros en sus partes superficiales, suponiendo que el poro es tortuoso y que atraviesa toda la membrana. Sin embargo, debido a la posible

existencia de poros de menor tamaño y que no todos estén interconectados en ambos extremos, es recomendable una determinación de porosidad utilizando soluciones con diferentes tamaños de partículas.

Para cada una de las condiciones de temperatura y tiempo se determinaron sus promedios de porosidades con ayuda de programas de cómputo. Dichos valores se muestran a continuación:

Tabla XXIV. **Porosidad promedio de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**

Condición	Membrana	Parte superior		Parte inferior	
		Porosidad	Desviación	Porosidad	Desviación
250°C y 10 min	1	12,6%	1,0%	2,9%	0,6%
245°C y 15 min	2	17,0%	1,1%	2,2%	0,1%
240°C y 20 min	3	12,6%	1,4%	2,5%	0,3%
240°C y 15 min	4	12,2%	1,0%	2,0%	0,4%

Fuente: elaboración propia.

La porosidad tuvo un máximo valor en la membrana 2 en un lado de la membrana (parte superior) y la membrana 1 en la parte inferior. Sin embargo en la parte inferior la porosidad se mantuvo en un rango muy cerrado con máxima diferencia de 1 por ciento.

5.3. Análisis del tamaño de poro

Los parámetros importantes para una buena membrana es su flujo y selectividad, el flujo se traduce a la porosidad de la membrana y la selectividad al tamaño del poro. Se busca una membrana que posea mayor porosidad y menor diámetro de poro, para calificarla como la que tiene mejor calidad. El

tamaño de poro se traduce como el diámetro equivalente y sus valores promedio para cada condición se recopilan en la siguiente tabla:

Tabla XXV. **Diámetro de poro promedio de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**

Condición	Membrana	Parte superior		Parte inferior	
		Diámetro (μm)	Desviación	Diámetro (μm)	Desviación
250°C y 10 min	1	226,26	97,16	93,93	56,99
245°C y 15 min	2	227,53	94,14	67,57	35,82
240°C y 20 min	3	228,59	99,30	86,88	46,06
240°C y 15 min	4	167,95	84,37	61,93	27,11

Fuente: elaboración propia.

Los mínimos valores de diámetro se poro se obtuvieron en la membrana 4, tanto para la parte superior como la parte inferior de la membrana. Sin embargo, debido a que los valores se encuentran en un rango cercano se debió comprobar si realmente existe una diferencia significativa de estos datos por medio de un análisis estadístico.

5.3.1. Análisis estadístico para el tamaño de poro

Para la prueba de hipótesis se utilizó un programa para análisis estadístico llamado InfoStat en su versión libre para estudiantes. Este programa cubre tanto las necesidades elementales para la obtención de estadísticas descriptivas y gráficos para en análisis exploratorio, como métodos avanzados de modelación estadística con análisis multivariado.

Se realizó un análisis de varianza para determinar si existía interacción y diferencias significativas en los datos de diámetros de las membranas, para ello se ordenó la información con base al nombre de la membrana, corrida y condición. La palabra corrida representa a las membranas preparadas a las mismas condiciones de temperatura y tiempo (A y B), la palabra condición representa a la región de la membrana a la cual se le midió su diámetro de poro mediante las fotografías (arriba 1, arriba 2, arriba 3 o abajo 1, abajo 2, abajo 3). Se utilizó la prueba de Duncan con un grado de confiabilidad del 95 por ciento.

Los resultados obtenidos para determinar la interacción de los factores en la parte superior e inferior de la membrana se muestran a continuación.

Figura 52. **Análisis de varianza para la parte superior de la membrana**

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
DIAMETRO	2675	0.11	0.10	52.97	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3972490.09	23	172716.96	14.14	<0.0001
MEMBRANA	1888182.78	3	629394.26	51.53	<0.0001
CORRIDA	144764.33	1	144764.33	11.85	0.0006
CONDICION	94053.35	2	47026.67	3.85	0.0214
MEMBRANA*CORRIDA	423182.00	3	141060.67	11.55	<0.0001
MEMBRANA*CONDICION	384729.11	6	64121.52	5.25	<0.0001
CORRIDA*CONDICION	194284.33	2	97142.16	7.95	0.0004
MEMBRANA*CORRIDA*CONDICION..	535450.48	6	89241.75	7.31	<0.0001
Error	32377933.32	2651	12213.48		
Total	36350423.41	2674			

Fuente: elaboración propia, con programa InfoStat.

Figura 53. **Medias y número de datos para cada factor en la parte superior de la membrana**

Test:Duncan Alfa=0.05			
Error: 12213.4792 gl: 2651			
<u>MEMBRANA Medias n</u>			
4.00	170.06	850	A
3.00	224.80	649	B
1.00	228.85	482	B
2.00	229.58	694	B
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)			
Test:Duncan Alfa=0.05			
Error: 12213.4792 gl: 2651			
<u>CORRIDA Medias n</u>			
B	205.71	1494	A
A	220.94	1181	B
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)			
Test:Duncan Alfa=0.05			
Error: 12213.4792 gl: 2651			
<u>CONDICION Medias n</u>			
arriba 1	205.12	960	A
arriba 3	215.31	866	A B
arriba 2	219.54	849	B
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)			

Fuente: elaboración propia, con programa InfoStat.

Figura 54. **Relación y diferencias significativas entre factores para la parte superior de la membrana**

Test:Duncan Alfa=0.05						
Error: 12213.4792 gl: 2651						
MEMBRANA	CORRIDA	CONDICION	Medias	n		
4.00	B	arriba 1	139.41	194	A	
4.00	A	arriba 1	144.44	126	A	
4.00	B	arriba 2	159.41	135	A B	
4.00	B	arriba 3	171.55	131	A B C	
1.00	B	arriba 1	178.77	104	B C D	
2.00	B	arriba 3	193.51	130	C D E	
3.00	A	arriba 3	197.05	80	C D E	
4.00	A	arriba 3	198.05	134	C D E F	
3.00	A	arriba 2	207.07	93	D E F G	
4.00	A	arriba 2	207.52	130	D E F G	
3.00	B	arriba 1	210.38	125	D E F G	
2.00	B	arriba 1	215.52	135	E F G H	
1.00	B	arriba 3	218.51	81	E F G H I	
1.00	A	arriba 3	219.16	77	E F G H I	
3.00	B	arriba 2	223.79	116	E F G H I	
3.00	A	arriba 1	225.76	99	E F G H I	
1.00	B	arriba 2	232.98	68	F G H I	
2.00	A	arriba 2	235.02	103	G H I	
2.00	A	arriba 3	239.89	97	G H I J	
2.00	B	arriba 2	239.95	139	G H I J	
1.00	A	arriba 2	250.60	65	H I J	
2.00	A	arriba 1	253.62	90	I J K	
1.00	A	arriba 1	273.07	87	J K	
3.00	B	arriba 3	284.76	136	K	

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Fuente: elaboración propia, con programa InfoStat.

5.3.1.1. Interpretación de datos estadísticos para parte superior de la membrana

Mediante la observación de las letras y la relación entre varios factores se determinaron las diferencias significativas entre membranas y por ende entre las condiciones de temperatura y tiempo a las que fueron preparadas. A continuación se muestra la interpretación de los datos estadísticos de las tablas.

- Existen diferencias significativas al 1 por ciento entre las membranas. Según la prueba de medias la que tiene menos diámetro es la 4, y el resto son estadísticamente iguales.
- Existen diferencias significativas al 1 por ciento entre las corridas. La que tiene menos diámetro de poro es la B y la que tiene más diámetro de poro es la A.
- Existen diferencias significativas solamente al 5 por ciento entre la región de la membrana observada en el estereoscopio. La que tiene menos diámetro es la región 1 (un extremo de la membrana) y la que tiene más diámetro es la región 2 (centro de la membrana).
- Todas las interacciones de primer orden son significativas al 1 por ciento de significancia.
- La interacción de segundo orden es significativa al 1 por ciento, por lo que tiene prioridad para el análisis. La prueba de medias indica que todas las combinaciones donde aparece la membrana cuatro son las que tienen menor diámetro, mientras que de membrana 1 A, 2 A y 3 B en una

región del extremo (combinaciones 2-A-1, 1-A-1 y 3-B-3) son iguales y tienen los mayores diámetros.

Figura 55. **Análisis de varianza para la parte inferior de la membrana**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DIAMETRO	2683	0.11	0.10	82.77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	1278969.47	23	55607.37	14.48	<0.0001	
MEMBRANA	413629.70	3	137876.57	35.91	<0.0001	
CORRIDA	106590.75	1	106590.75	27.76	<0.0001	
CONDICION	116804.74	2	58402.37	15.21	<0.0001	
MEMBRANA*CORRIDA	172382.28	3	57460.76	14.96	<0.0001	
MEMBRANA*CONDICION	191087.41	6	31847.90	8.29	<0.0001	
CORRIDA*CONDICION	10514.03	2	5257.01	1.37	0.2545	
MEMBRANA*CORRIDA*CONDICION..	89942.99	6	14990.50	3.90	0.0007	
Error	10210497.77	2659	3839.98			
Total	11489467.24	2682				

Fuente: elaboración propia, con programa InfoStat.

Figura 56. **Medias y número de datos para cada factor en la parte inferior de la membrana**

```

Test:Duncan Alfa=0.05
Error: 3839.9766 gl: 2659
MEMBRANA Medias n
-----
4.00      63.19 952 A
2.00      73.69 610 B
3.00      89.13 652 C
1.00      96.07 469 D
-----
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Test:Duncan Alfa=0.05
Error: 3839.9766 gl: 2659
CORRIDA Medias n
-----
B          73.30 1696 A
A          87.74 987 B
-----
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Test:Duncan Alfa=0.05
Error: 3839.9766 gl: 2659
CONDICION Medias n
-----
abajo 3    70.40 921 A
abajo 1    81.72 960 B
abajo 2    89.45 802 C
-----
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

```

Fuente: elaboración propia, con programa InfoStat.

Figura 57. Relación y diferencias significativas entre factores para la parte inferior de la membrana

Test:Duncan Alfa=0.05												
Error: 3839.9766 gl: 2659												
MEMBRANA	CORRIDA	CONDICION	Medias	n								
2.00	B	abajo 3	47.89	176	A							
4.00	B	abajo 3	50.84	187	A	B						
4.00	B	abajo 1	53.30	200	A	B	C					
4.00	B	abajo 2	57.28	155	A	B	C	D				
2.00	B	abajo 2	58.43	157	A	B	C	D				
4.00	A	abajo 3	67.45	114	A	B	C	D	E			
3.00	A	abajo 1	70.50	89		B	C	D	E	F		
1.00	B	abajo 1	71.47	109			C	D	E	F	G	
3.00	B	abajo 3	71.71	150			C	D	E	F	G	
4.00	A	abajo 2	72.34	151			C	D	E	F	G	
2.00	A	abajo 2	74.89	36				D	E	F	G	
2.00	A	abajo 3	75.97	31				D	E	F	G	
2.00	B	abajo 1	77.61	134				D	E	F	G	
4.00	A	abajo 1	77.95	145				D	E	F	G	
1.00	B	abajo 3	79.83	116					E	F	G	
3.00	A	abajo 3	82.54	104					E	F	G	
3.00	B	abajo 1	85.99	159					E	F	G	
1.00	A	abajo 3	86.99	43					E	F	G	
3.00	A	abajo 2	90.64	62						F	G	H
1.00	B	abajo 2	91.87	65							G	H
2.00	A	abajo 1	107.37	76								H
1.00	A	abajo 1	109.54	48								H
3.00	B	abajo 2	133.39	88								I
1.00	A	abajo 2	136.74	88								I

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Fuente: elaboración propia, con programa InfoStat.

5.3.1.2. Interpretación de los datos estadísticos para la parte inferior de la membrana

Mediante la observación de las letras y la relación entre varios factores se determinaron las diferencias significativas entre membranas y por ende entre las condiciones de temperatura y tiempo a las que fueron preparadas. A continuación se muestra la interpretación de los datos estadísticos de las tablas.

- Existen diferencias significativas al 1 por ciento entre las membranas. Según la prueba de medias la que tiene menos diámetro es la 4, y la que más diámetro tiene es la 1.
- Existen diferencias significativas al 1 por ciento entre las corridas. La que tiene menos diámetro es la B y la que tiene más diámetro es la condición A.
- Existen diferencias significativas al 1 por ciento entre la región de la membrana observada en el estereoscopio. La que tiene menos diámetro es la región 3 (un extremo) y la que tiene más diámetro es la región 2 (centro de la membrana).
- Todas las interacciones de primer orden son significativas al 1 por ciento de significancia, excepto la de corrida por región de membrana observada.
- La interacción de segundo orden es significativa al 1 por ciento, por lo que tiene prioridad para el análisis. La prueba de medias indica que todas las combinaciones donde aparecen la membranas 2 y 4 y corrida B son las que tienen menor diámetro, mientras que las membranas 1 A y 3

B en la región del centro (combinaciones 3-B-2 y 1-A-2) son iguales y tienen los mayores diámetros.

Resumiendo los datos de diámetro de poro obtenidos con GeoGebra e InfoStat, se puede decir que la membrana 4 que se preparó a 240 grados Celsius y 15 minutos es la que presenta las mejores características de tamaño de poro, que según el análisis estadístico con el programa InfoStat mostró que solamente habían diferencias significativas con el diámetro de poro de para dicha membrana, mostrando que para las membranas preparadas a las otras condiciones eran estadísticamente iguales.

El diámetro de poro variaba entre las membranas preparadas a las mismas condiciones e incluso entre regiones de área de una misma membrana, en los extremos el tamaño de poro era más pequeño que en el centro. Con toda esta variabilidad de tamaños de poro se manifiesta que el tiempo y temperatura no son tan influyentes como la distribución de la sal dentro de la masa del PET, que es el que juega el papel más importante.

La membrana 4, de menor diámetro de poro, presentaba un valor promedio de diámetro de 69 micrómetros en un lado de la membrana. Sin embargo ese es un valor alto si se habla de membranas de microfiltración que tienen un máximo de 10 micrómetros, es así como se lograron preparar membranas, definiéndolas como una barrera permeoselectiva, pero su aplicación en separación de sustancias no abarca la retención de partículas que una microfiltración removería.

5.4. Tiempo y temperaturas óptimos de sinterización para la preparación de membranas de PET

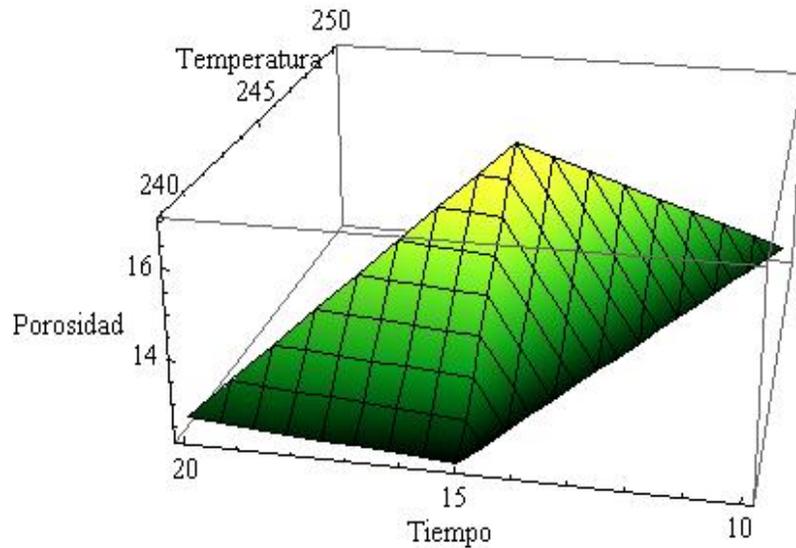
Para determinar los tiempos y temperaturas óptimos para preparar las membranas con las mejores características de porosidad y diámetro de poro se observaron mediante gráficas de los valores promedios para cada una de las membranas que pertenecen a una condición específica de tiempo y temperatura. Una membrana con las mejores características es aquella que presenta mayor porosidad y menor diámetro de poro. Estas gráficas se realizaron tanto para la parte superior como inferior de la membrana.

Tabla XXVI. **Datos para la gráfica de la porosidad de la parte superior de las membranas**

Membrana	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Porosidad
1	250	10	12,6%
2	245	15	17,0%
3	240	20	12,6%
4	240	15	12,2%

Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Gráfica de porosidad de la parte superior de las membranas diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**



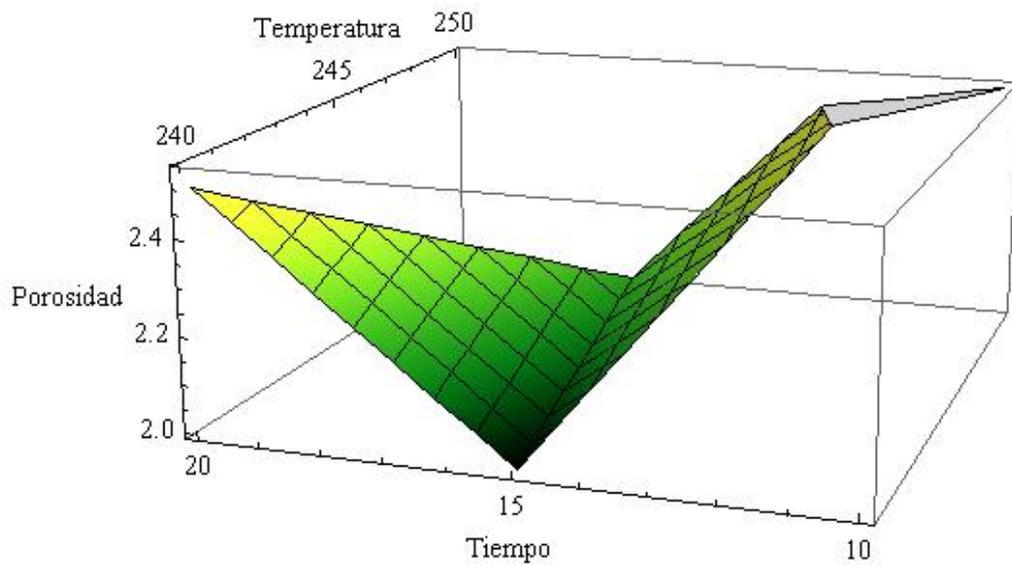
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Tabla XXVII. **Datos para la gráfica de la porosidad de la parte inferior de las membranas**

Membrana	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Porosidad
1	250	10	2,9%
2	245	15	2,2%
3	240	20	2,5%
4	240	15	2,0%

Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Gráfica de porosidad de la parte superior de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**



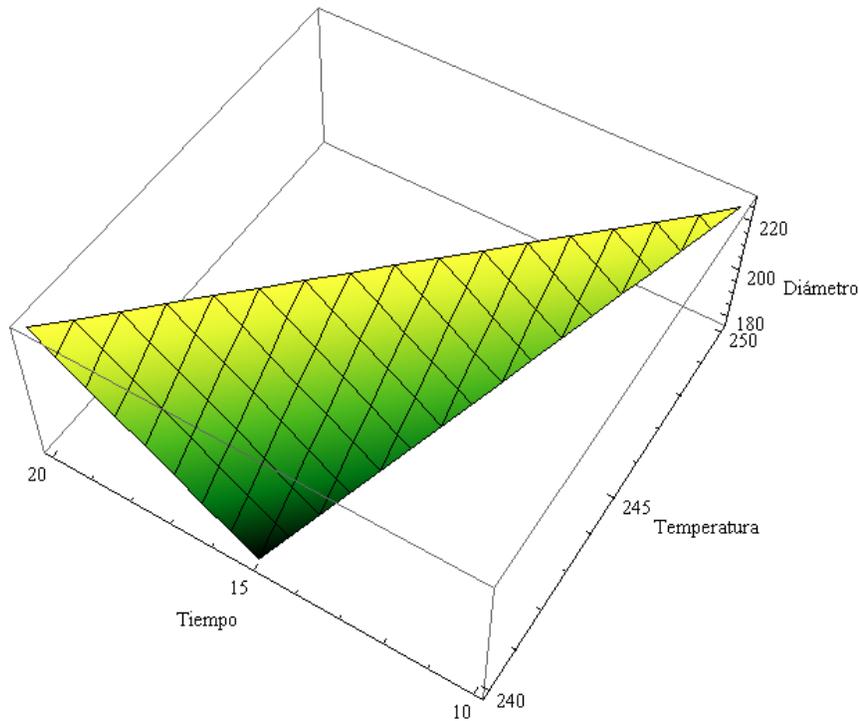
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Tabla XXVIII. **Datos para la gráfica del tamaño de poro de la parte superior de las membranas**

Membrana	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Diámetro (µm)
1	250	10	226,26
2	245	15	227,53
3	240	20	228,59
4	240	15	167,95

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Gráfica del tamaño de poro de la parte superior de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**



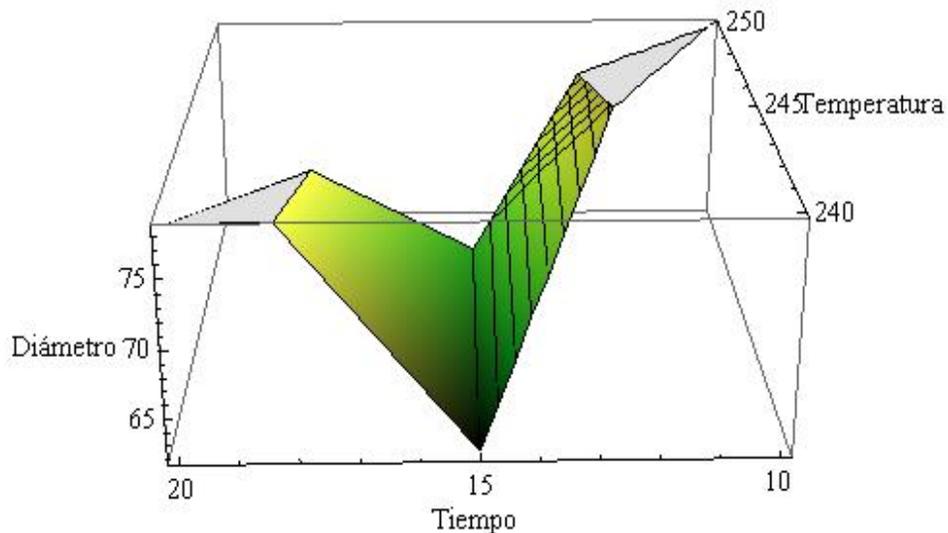
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Tabla XXIX. **Datos para la gráfica del tamaño de poro de la parte inferior de las membranas**

Membrana	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Diámetro (µm)
1	250	10	93,93
2	245	15	67,57
3	240	20	86,88
4	240	15	61,93

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Gráfica del tamaño de poro de la parte inferior de las membranas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización**



Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Las gráficas realizadas en Wolfram Mathematica se muestran la relación de promedio de porosidad y diámetro de poro en función de temperatura y tiempo. Es así como se puede determinar los tiempos y temperaturas óptimos para que las membranas tengan una alta porosidad y bajo tamaño de poro.

En el caso de la porosidad el punto más alto de la gráfica representa el conjunto de condiciones que presentan la membrana con mayor porosidad. Una temperatura de 245 grados Celsius y 15 minutos de sinterización dan a la membrana una mayor porosidad en su parte superior y en la parte inferior las óptimas condiciones son 250 grados Celsius y 10 minutos. La parte de la membrana que en realidad importa para la separación es la inferior ya que se colocaría en la alimentación.

En las gráficas de diámetro de poro promedio, el punto más bajo de la gráficas representa el conjunto de condiciones de temperatura y tiempo con menor tamaño de poro. Tanto en la parte superior de la membrana como en la inferior apuntan al mismo par de condiciones de 240 grados Celsius y 15 minutos, siendo estas las que le dan a la membrana un menor diámetro de poro. Esto se puede reforzar con el análisis estadístico de InfoStat que presenta como la mejor membrana con base a su diámetro a la 4 que está preparada a dichas condiciones.

5.5. Análisis de distribución de poro en las membranas

La manera en que se distribuyen los poros en la membrana se analizó cualitativamente, observando si era o no uniforme y asignándole una calificación para poder medir este factor. Para que una membrana sea efectiva no sólo se requiere que tenga alta porosidad y pequeño tamaño de poro, sino que los poros estén distribuidos uniformemente para que el proceso de separación sea eficiente.

Se consideró como mejor membrana, a la que presentó mayor uniformidad en la distribución del poro y que tuviera menos defectos, se le considera como defecto a poros de tamaños grandes que cambian la calidad de la membrana, tanto en tamaño como en distribución de poro, ya que indican que existió una alta concentración de sal en ese punto. Se le colocó una ponderación de 0 a 6, donde 6 representa que la membrana es totalmente uniforme en su distribución de poro.

Como se analizaron 6 fotos por membrana tanto de la parte superior como la parte inferior, se le asignó una ponderación de 1 a la membrana con distribución uniforme y 0 a la membrana no uniforme para cada una de las

fotos, es así como se obtiene el valor de ponderación máxima de 6 por membrana. A continuación se muestra una tabla con el resumen de la calificación de distribución de poros, de las fotografías de la sección de resultados.

Tabla XXX. **Calificación de las membranas según distribución de poro**

Membrana	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Parte superior		Parte inferior	
			Ponderación	Calificación sobre 100	Ponderación	Calificación sobre 100
1	250	10	3	50,00	3	50,00
2	245	15	3	50,00	3	50,00
3	240	20	1	16,67	4	66,67
4	240	15	2	33,33	4	66,67

Fuente: elaboración propia.

Según los resultados de calificación, las membranas 3 y 4 son relativamente más uniformes que la 1 y la 2, observando así que para 240 grados Celsius (la menor temperatura) existe una mayor uniformidad. Aunque ésta se encuentra directamente relacionada con la distribución de la sal dentro del polímero también existe una relación con la temperatura.

5.6. Análisis de selección de la mejor membrana

Para elegir la membrana que presentara las mejores características de calidad, se hizo un análisis con los datos obtenidos con la medición de varios parámetros, los cuales determinaron la porosidad, diámetro de poro, distribución de poro y concentración de tamaños de poros. Cada uno de estos influye en diferente magnitud a la calidad de una membrana para la separación de sustancias; es así como se ponderaron los parámetros según nivel de

importancia y se propuso un valor óptimo para cada parámetro con base en la observación de los resultados.

Como la membrana posee diferente tamaño de poro en la parte superior e inferior, se realizó solamente el análisis de la selección de la membrana con la parte inferior ya que ésta se colocaría de frente a la alimentación por poseer menor tamaño de poro; siendo así el lado de interés por ser el que restringe el paso de sustancias.

Tabla XXXI. **Recopilación de datos de los parámetros medidos a las membranas**

Parámetro de medición	Membrana 1	Membrana 2	Membrana 3	Membrana 4
Curtosis	10,00	31,29	67,79	18,58
Diámetro de poro (μm)	93,93	67,57	86,88	61,93
Porosidad (%)	2,92	2,16	2,52	2,01
Distribución de poro	50,00	50,00	66,67	66,67

Fuente: elaboración propia.

Después de analizar varios parámetros de manera independiente se observó que para cada uno de ellos la mejor membrana no era la misma, en función de su porosidad, distribución de poro y diámetro de poro.

Para seleccionar la membrana con mejor calidad y que presente las mejores características de porosidad, tamaño de poro y distribución de poro se hizo un análisis global que abarque a las membranas en función de todos los parámetros por medio de una calificación ponderada. Cada uno de los parámetros influye en diferente magnitud a la calidad de una membrana para la separación de sustancias, es así como se ponderaron los parámetros según nivel de importancia.

En la aplicación de tecnología de membranas se separan sustancias en función del tamaño de partículas, es así como el tamaño de poro debe ser lo más uniforme posible y estar en un rango cerrado para que exista una separación eficiente, por lo que es de suma importancia la curtosis como parámetro evaluador principal. Una manera gráfica de observar la curtosis es por medio de los histogramas de frecuencia, que también ayudaron al análisis de datos extremos de muy poca frecuencia que indican la existencia de poros demasiado grandes que se asocian a defectos en el proceso de mezclado y distribución de la sal, esto indica que hay que mejorar esta parte del proceso para reducir los defectos en las membranas que las hacen inutilizables.

También en los procesos a membranas se pretende obtener un tamaño pequeño de poro para la retención de partículas pequeñas y una mejor selectividad. En el caso de la porosidad es levemente menos importante porque se ve reflejada en el flujo que deja pasar, entre más porosa sea la membrana hay un mayor paso de flujo a través de ella. Por último en el nivel de importancia está la distribución de poros que afecta en un paso no uniforme del flujo sobre el área de la membrana.

Los resultados obtenidos individualmente, se propusieron valores óptimos para cada parámetro y se calificó sobre 100 cada uno de ellos.

Tabla XXXII. **Calificación de las membranas según valor óptimo de cada parámetro**

		Calificación por parámetro (100 pts)			
Parámetro de medición	Valor Optimo	Membrana 1	Membrana 2	Membrana 3	Membrana 4
Curtosis	70	14,28	44,70	96,84	26,54
Diámetro de poro (μm)	60 μm	15,17	81,09	32,80	95,17
Porosidad (%)	3%	97,33	72,00	84,00	67,00
Distribución de poro	100	50,00	50,00	66,67	66,67

Fuente: elaboración propia.

Según el nivel de importancia de cada parámetro medido, se propuso una ponderación y se determinó la mejor membrana como la que tuviera una calificación global mayor.

Tabla XXXIII. **Calificación final de las membranas**

Parámetro de medición	Ponderación	Membrana 1	Membrana 2	Membrana 3	Membrana 4
Curtosis	35	5,00	15,64	33,89	9,29
Diámetro de poro (μm)	30	4,55	24,33	9,84	28,55
Porosidad (%)	25	24,33	18,00	21,00	16,75
Distribución de poro	10	5,00	5,00	6,67	6,67
Calificación	100	38,88	62,97	71,40	61,26

Fuente: elaboración propia.

Por medio de la calificación total se determinó que la mejor membrana es la 3 que fue preparada a una temperatura de sinterización de 240 grados Celsius durante 20 minutos en el horno, este par de condiciones es el de más baja temperatura con un mayor tiempo de sinterización.

Con la investigación realizada se pudo determinar que sí se pueden preparar membranas por el método de sinterización a partir de un material de desecho del reciclaje del PET. Aunque se tuvieron algunos problemas con las membranas, principalmente con el tamaño de los poros, se pueden utilizar en una filtración convencional y realizarle mejoras que requieren posteriores investigaciones que busquen métodos que aumenten la calidad de las membranas para una aplicación en específico.

Las membranas preparadas tienen consecuencias positivas al reúso de material polimérico que ya no tienen una utilidad, ayudando así a la disminución de desechos sólidos y por ende al medio ambiente. Además se contribuye con una nueva forma de separación de sustancias que es sencilla, de bajo costo y que mantiene las características de la tecnología de membranas. Con todo esto se puede decir que la investigación fue un éxito y es una base para nuevos estudios en la separación por medio de membranas selectivas.

CONCLUSIONES

1. Existen diferencias significativas al 1 por ciento entre las membranas preparadas a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización. Según la prueba de medias la que tiene menos diámetro es la membrana 4, y el resto son estadísticamente iguales.
2. Se obtuvo una resina del material molido de polietileno tereftalato, con tamaño de partícula pequeño y uniforme que permitió una mezcla homogénea con el cloruro de sodio.
3. Se prepararon membranas de polietileno tereftalato que presentaron características aceptables de porosidad, diámetro de poro y distribución de poro, determinadas por medio de una caracterización visual y un análisis matemático y estadístico.
4. Para cada membrana preparada se obtuvo un tamaño de poro mayor en la parte superior de la membrana (expuesta a las condiciones dentro del horno) que en la parte inferior (pegada al molde). Los tamaños de poro se encontraban entre 167 y 227 micrómetros para la parte superior y entre 60 y 90 micrómetros para la parte inferior.
5. Al observar las membranas en el estereoscopio en diferentes regiones se determinó que las membranas que tienen mayor uniformidad en su distribución de poro dentro de la membrana, fueron las que se prepararon a una temperatura de sinterización de 240 grados Celsius con tiempos de 15 y 20 minutos.

6. Un análisis global de diferentes parámetros de calidad de membranas mostraron que a una temperatura de 240 grados Celsius y un tiempo de 20 minutos se tiene una combinación óptima para preparar membranas de PET, las cuales presentan menor diámetro de poro concentrados en un rango limitado, mayor porosidad y una distribución de por más uniforme.
7. Sí fue posible preparar membranas de PET por el método de sinterización, que es una manera sencilla de preparar membranas de bajo costo y que mantiene las características de las membranas.

RECOMENDACIONES

1. Reducir los defectos de las membranas producidos por errores del procedimiento, específicamente en el mezclado de la sal, utilizar un método mecánico para obtener un mezclado uniforme y que no se acumule la sal en un solo punto.
2. Fabricar el módulo de membranas y adaptarlo a la estación experimental para membranas localizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, para poder realizar pruebas de caracterización de membranas y determinar realmente el tamaño de partículas que retiene y las posibles soluciones que puede separar.
3. Proponer una práctica de laboratorio para el curso separación por medio de membranas selectivas utilizando un módulo con membranas preparadas con PET para determinar su permeabilidad y selectividad
4. Utilizar las membranas de PET preparadas artesanalmente para una aplicación específica, con el fin de utilizar la tecnología de membranas a bajo costo.
5. Preparar membranas con otros materiales y procedimientos para comparar los resultados e ir mejorando la investigación en el campo de las membranas.

BIBLIOGRAFÍA

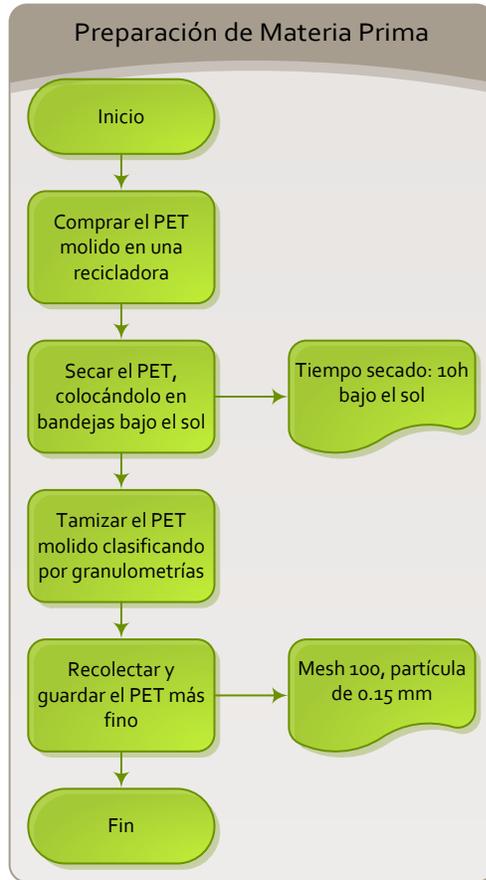
1. AGUADO, Serrano. *Feedstock recycling of plastic wastes*. España: Royal Society of Chemistry, 1999. 200 p.
2. ARRIBAS J., HERNÁNDEZ A., MARTÍNEZ L., TEJERINA F. *Microfiltración, Ultrafiltración y Ósmosis inversa*. España: Universidad de Murcia, 1990. 146 p. Vol. 4.
3. BAKER, Richard. *Membrane technology and applications*. 2a ed. Estados Unidos: Wiley, 2004. 592 p.
4. CHANDA MANAS, ROY SALIL. *Plastics technology handbook*. 4a ed. Estados Unidos: CRC Press, 2007. 352 p.
5. GARCÍA, Wendy. *Separación de propano y propileno por medio de la membrana de Poli (Óxido de Etileno-co-Epiclorhidrina) facilitada por ión plata*. Trabajo de Graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 78p.
6. KALPAKJIAN, Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2002. 1155 p.
7. KISLIK, Vladimir. *Liquid membranes, principles & applications in chemical separations & wastewater treatment*. Inglaterra: Elsevier, 2010. 445 p.

8. MATSUURA, Takeshi. *Synthetic membranes and membrane separation processes*. Estados Unidos: CRC Press, 1993. 471 p.
9. MACANÁS, Jorge. *Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas*. Doctorado en Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Barcelona, 2006. 246 p.
10. PEACOCK, Andrew; CALHOUN, Allison. *Polymer chemistry*. Estados Unidos: HANSER, 2006. 420 p.
11. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MEYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Pearson Prentice - Hall, 20012. 752 p.

APÉNDICES

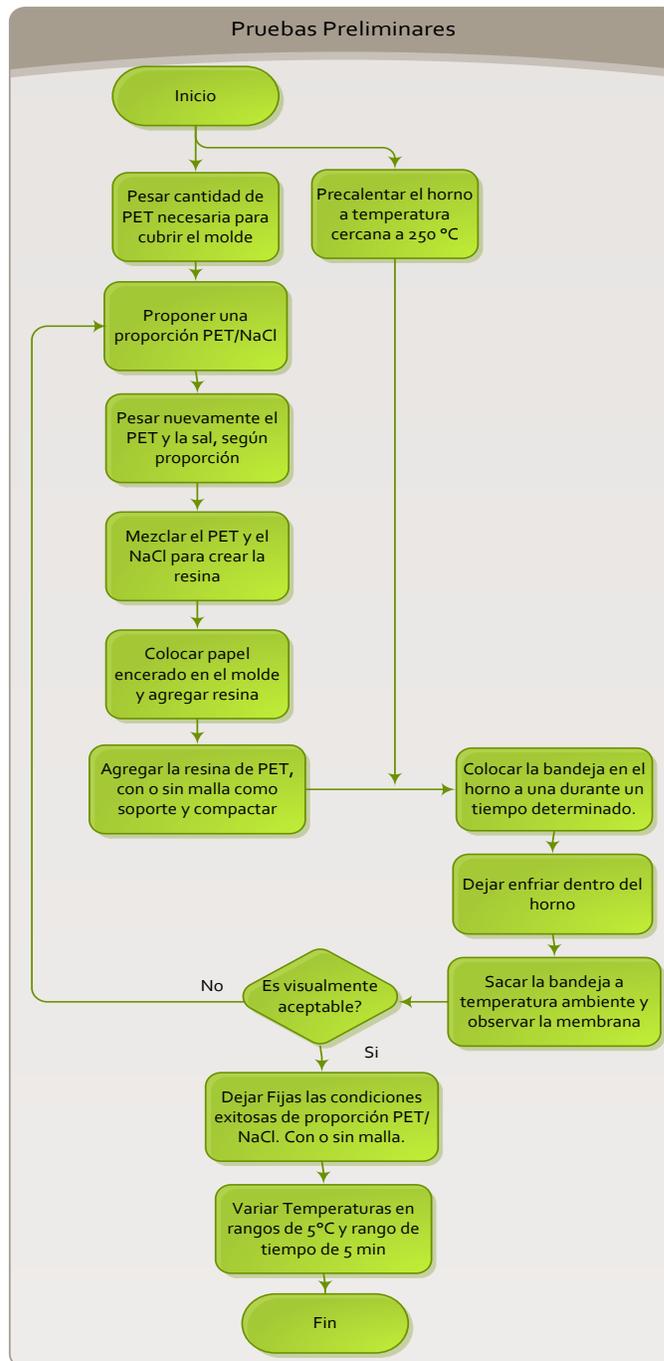
A- 1. PROCEDIMIENTO

Apéndice 1. Diagrama de flujo de la preparación de materia prima



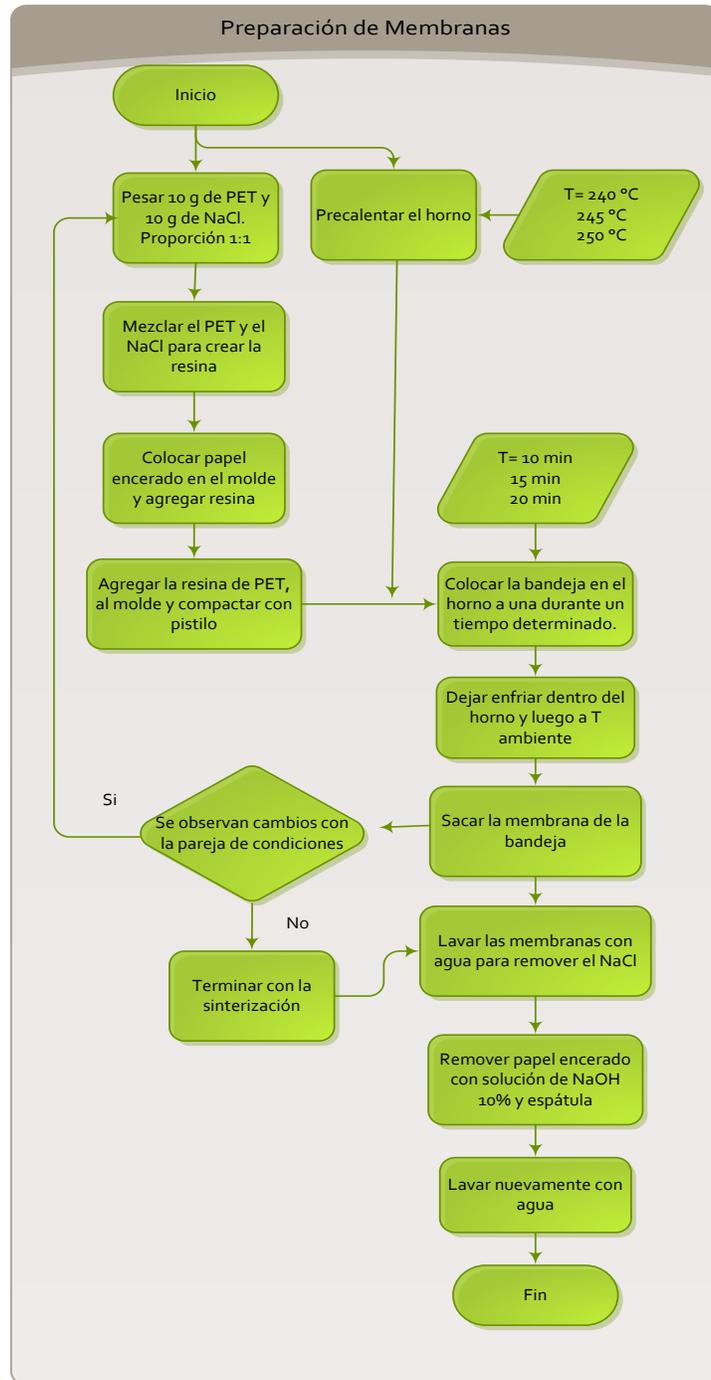
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de flujo de pruebas preliminares



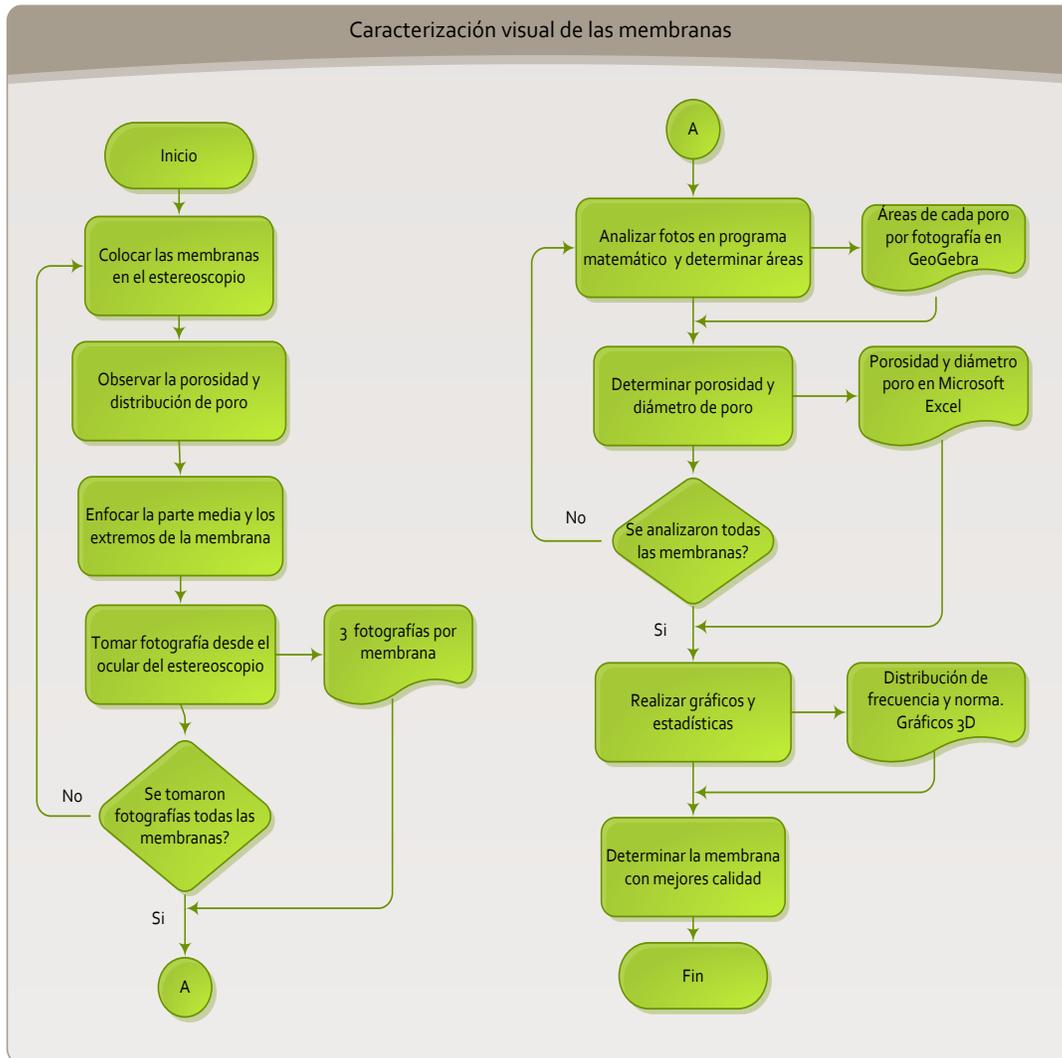
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Diagrama de flujo de preparación de membranas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Diagrama de flujo de caracterización visual de las membranas



Fuente: elaboración propia.

A- 2. PRUEBAS PRELIMINARES

Apéndice 5. Recolección de datos de pruebas preliminares

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatura (°C)	238	242	243	243	243	243	242	242	242	237
Tiempo (min)	20	15	20	20	20	10	10	15	10	15
Proporción PET/NaCl	40/60	40/60	40/60	50/50	45/55	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50
Masa mezcla (g)	30	30	30	20	20	10	16	16	20	20
Masa Pet (g)	12	12,01	11,99	10,00	8,99	4,99	8,04	8,00	10,0	9,99
Masa NaCl (g)	18	18,00	18,14	10,04	11,00	4,99	7,99	7,99	10,0	9,99
Estructura: Con/Sin malla	Sin	Con	Con	Con	Con	Sin	Sin	Sin	Sin	Sin

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Observaciones en las pruebas preliminares**

Prueba	Observación
1	Se logró la sinterización, pero no se pudo despegar del molde.
2	La membrana se separó del molde, pero no se sinterizó bien.
3	Cambio de tiempo y de molde.
4	Cambio de masa y proporción PET/ NaCl.
5	Se cambió la proporción de sal y se determinó que la mejor proporción PET/NaCl es 50/50
6	Se cambió la masa de mezcla, el tiempo de sinterización y no se utilizó malla.
7	Se aumentó la masa de la mezcla.
8	Se aumentó el tiempo de sinterización.
9	Se aumentó la masa, determinando que la mejor cantidad es 20g.
10	Se disminuyó la temperatura y se aumentó el tiempo de sinterización.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Prueba preliminar 1 a 5**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 8. **Prueba preliminar 1 y 2**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 9 **Prueba preliminar 3**



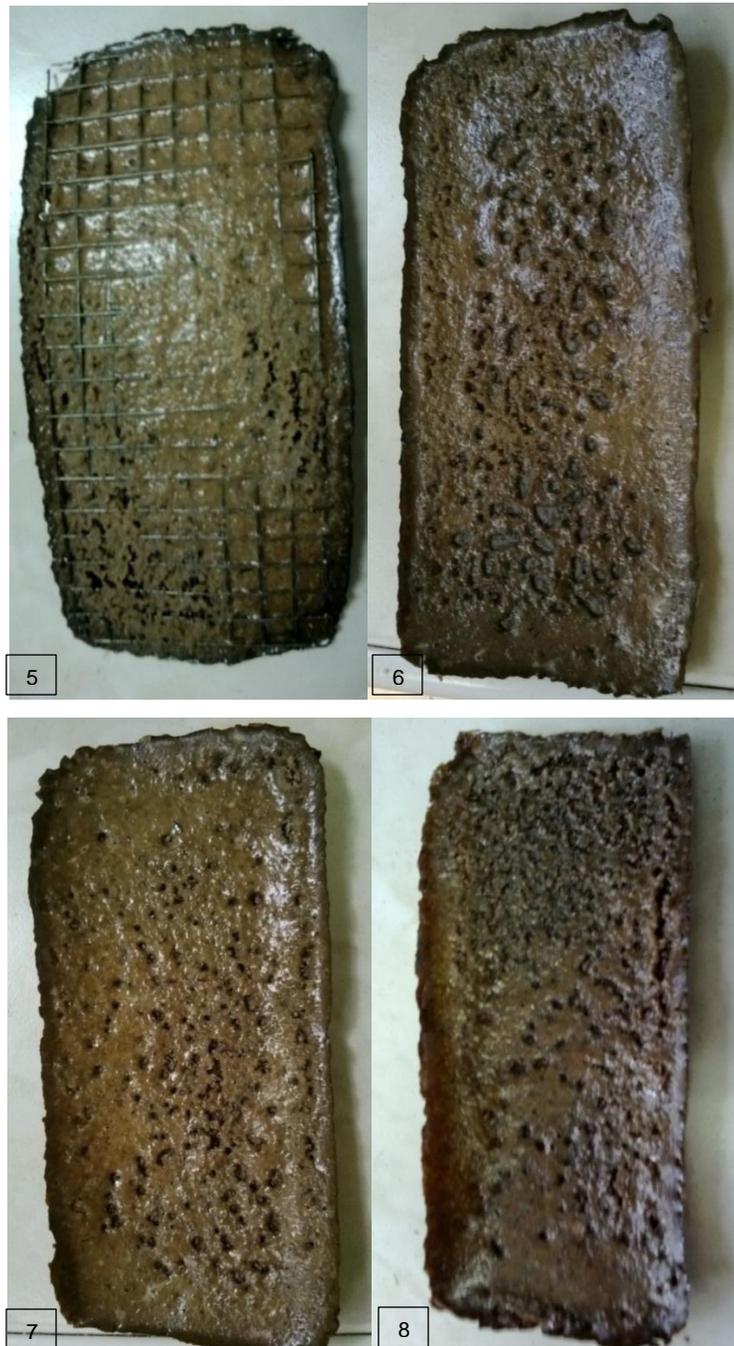
Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 10. **Prueba preliminar 4**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 11. Prueba preliminar 5 a 8



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 12. **Prueba preliminar 9**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

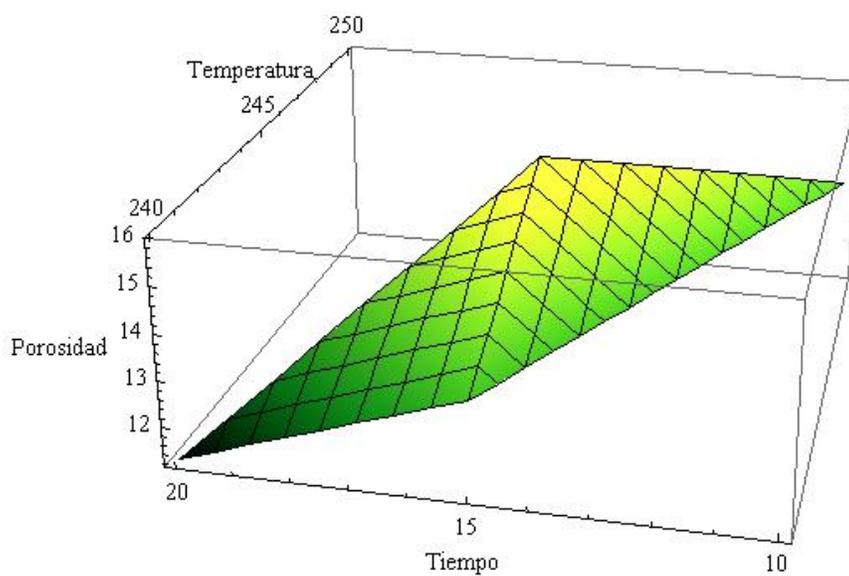
Apéndice 13. **Prueba preliminar 10**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

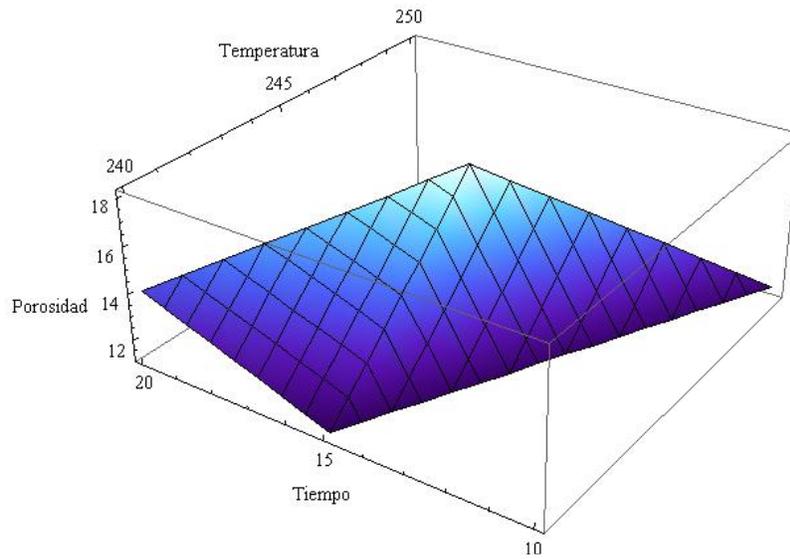
A-3. GRÁFICAS DE POROSIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO Y TEMPERATURA PARA LAS MEMBRANAS A Y B

Apéndice 14. Porosidad de la parte superior de las membranas A



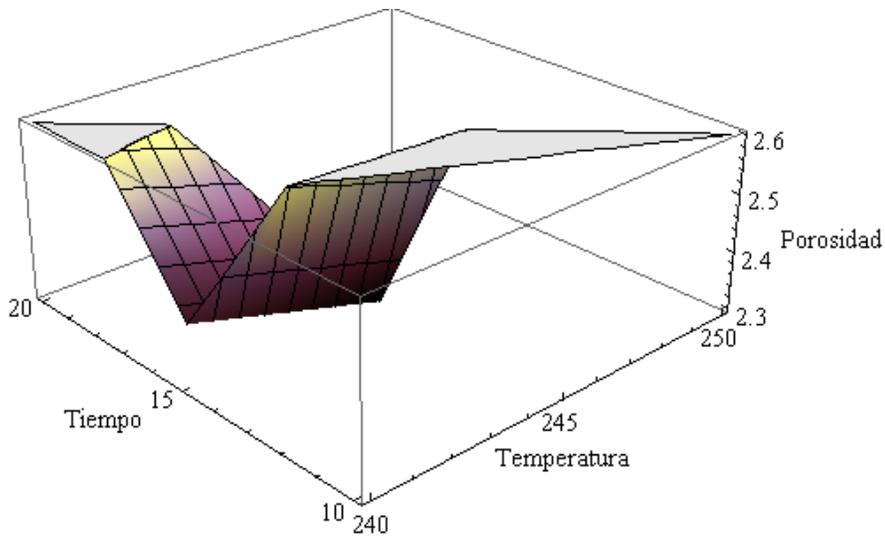
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Apéndice 15. **Porosidad la parte superior de las membranas B**



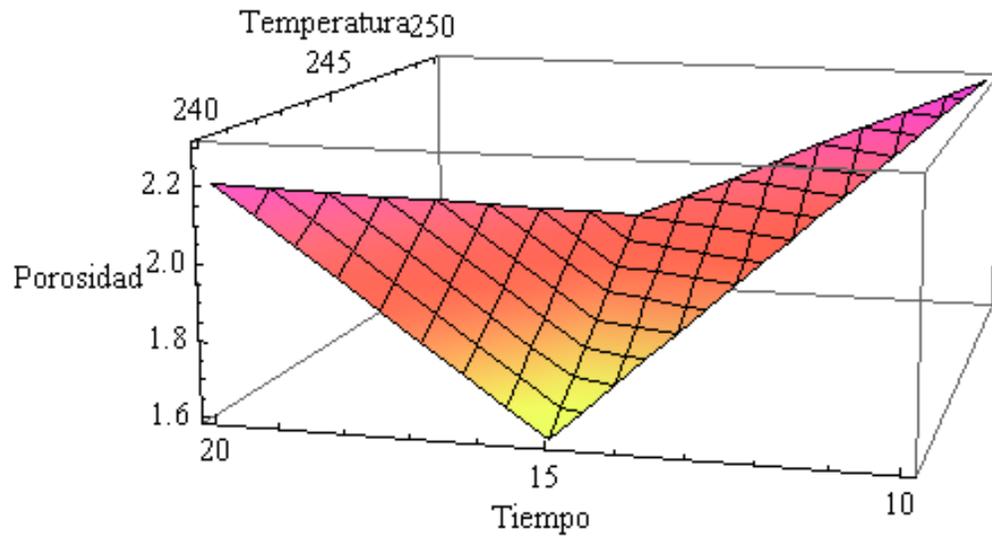
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Apéndice 16. **Porosidad de la parte inferior de las membranas A**



Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

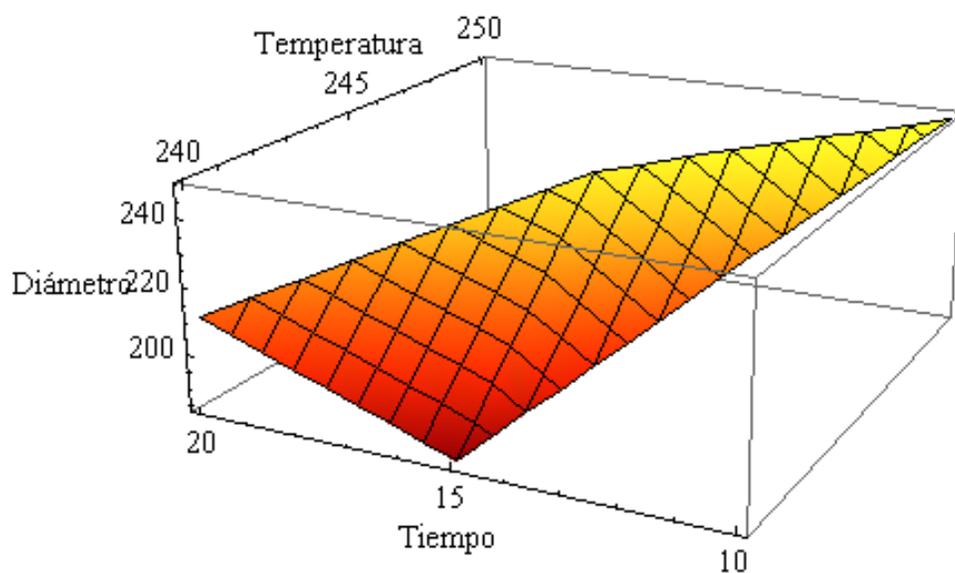
Apéndice 17. **Porosidad de la parte inferior de las membranas B**



Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

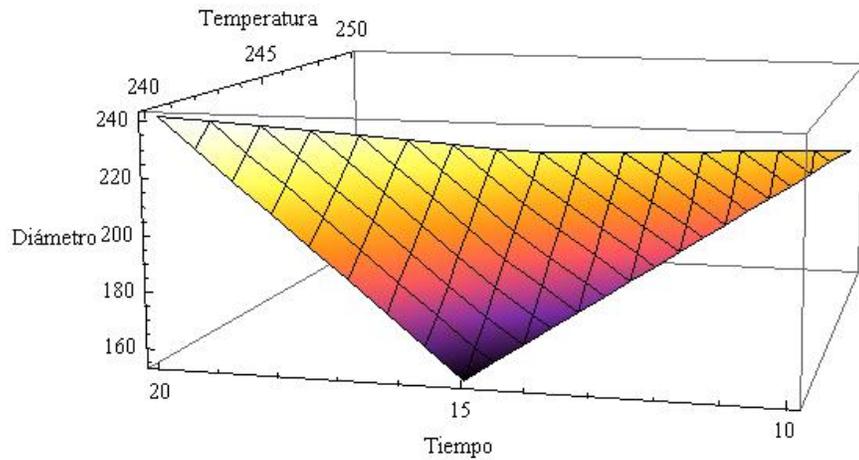
A-4. GRÁFICAS DE DIÁMETRO DE PORO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO Y TEMPERATURA PARA LAS MEMBRANAS A Y B

Apéndice 18. Diámetro de poro promedio de la parte superior de las membranas A



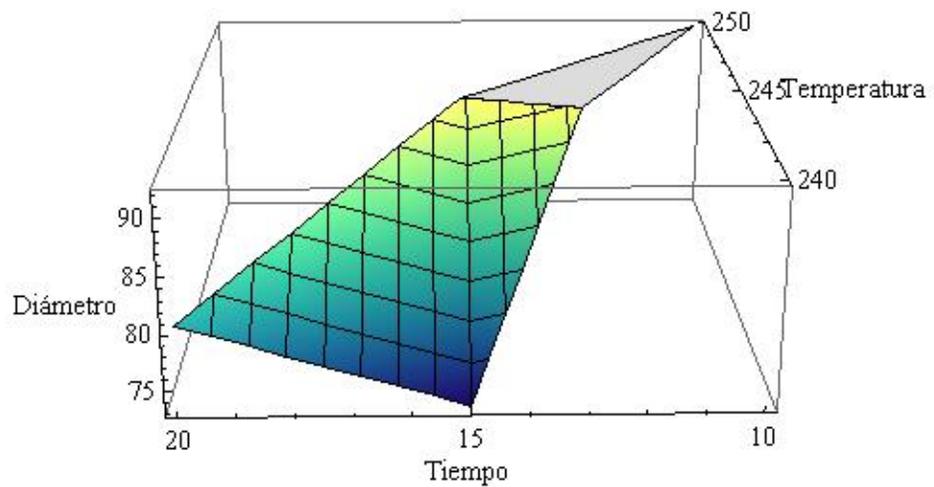
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Apéndice 19. **Diámetro de poro promedio de la parte superior de las membranas B**



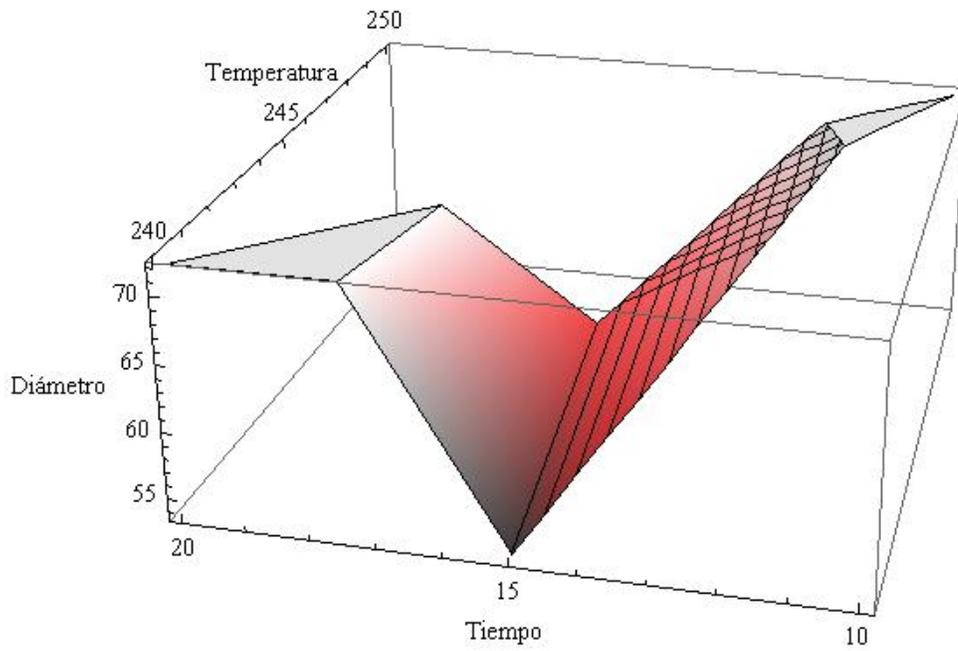
Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Apéndice 20. **Diámetro de poro promedio de la parte inferior de las membranas A**



Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

Apéndice 21. **Diámetro de poro promedio de la parte inferior de las membranas B**



Fuente: elaboración propia, con programa Wolfram mathematica.

A-4. ÁREAS DE POROS

Apéndice 22. Áreas de poros de la membrana 1 A obtenidos por GeoGebra

Membrana 1 A					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
2,00	4,73	7,52	2,58	1,23	0,54
10,90	9,67	11,98	4,76	1,51	0,27
1,72	3,79	1,51	1,49	1,05	0,50
17,73	1,91	3,32	1,37	0,79	0,31
6,69	1,65	2,77	1,11	0,65	0,16
7,78	1,46	10,45	1,94	3,08	0,34
5,16	4,09	10,66	6,14	2,08	0,44
6,19	4,69	0,89	5,13	0,80	0,42
17,37	5,22	4,75	7,56	1,62	1,65
18,88	2,54	12,53	8,45	1,31	9,20
5,05	5,40	5,43	0,66	0,32	0,19
1,64	2,68	1,71	1,13	1,12	6,10
8,23	8,77	0,45	2,06	2,11	0,68
2,33	10,06	1,58	1,25	0,44	1,52
4,14	1,82	2,26	1,16	1,57	0,36
5,52	0,91	1,39	0,88	1,49	0,29
10,74	3,15	4,31	1,21	1,14	0,51
2,90	2,09	2,53	0,59	1,72	2,37
8,09	2,30	2,17	0,45	1,90	1,12
10,74	7,39	2,87	0,63	1,94	1,56
4,77	5,52	7,96	0,62	9,57	0,29
2,46	20,37	2,46	0,47	9,20	0,34
13,37	11,75	5,97	0,41	27,97	2,84
2,08	3,23	7,11	1,22	14,82	0,39
11,48	8,72	6,49	0,42	2,20	4,40
11,29	17,25	3,24	0,68	1,54	1,13
8,03	12,35	11,53	0,34	1,88	0,14
1,64	12,60	5,31	0,72	7,10	0,11
4,34	7,36	16,07	0,95	3,71	0,21
4,31	5,15	3,00	1,24	27,53	0,17
6,71	6,80	8,52	0,95	1,87	0,51
4,73	2,32	5,83	0,37	40,16	0,12
5,13	10,43	15,08	0,70	5,63	0,62
9,31	13,10	1,81	0,22	2,38	0,40
2,60	14,21	8,59	0,38	9,57	0,24
11,64	12,18	13,83	0,61	1,48	0,06
6,27	5,09	9,75	0,33	3,00	0,08
4,96	3,37	6,25	0,16	10,18	0,11

Continuación del apéndice 22.

6,78	14,69	2,02	0,26	12,09	0,33
3,26	29,24	2,80	0,26	5,36	0,23
2,41	12,15	9,73	0,75	0,51	0,07
4,15	4,80	5,35	0,56	0,10	0,15
3,02	7,96	3,84	0,24	0,13	0,04
7,09	5,00	4,02	0,11	0,07	
6,95	39,88	11,32	0,06	0,97	
12,29	8,03	2,80	0,04	0,85	
7,56	2,92	7,06	0,48	0,53	
7,24	0,90	3,38	0,25	0,31	
7,68	7,56	6,47		0,14	
20,08	5,86	4,81		0,17	
17,66	3,30	3,44		0,34	
13,98	4,16	3,11		0,43	
10,46	0,72	5,79		0,35	
21,15	1,02	6,47		0,71	
5,95	1,54	1,81		1,25	
9,16	1,90	4,96		0,47	
10,01	0,43	1,93		1,12	
9,32	6,19	6,79		1,13	
10,43	1,54	14,53		1,02	
3,25	0,36	1,82		0,68	
10,81	0,89	0,48		1,62	
10,52	1,18	0,62		1,57	
9,14	0,26	0,31		0,59	
7,55	0,25	1,61		0,15	
9,54	0,69	0,90		0,13	
4,74		0,75		0,51	
13,73		0,47		0,16	
11,56		0,71		0,07	
9,90		0,33		0,29	
10,54		3,32		0,26	
6,90		0,28		0,03	
3,71		0,09		0,24	
4,15		0,22		0,84	
1,14		3,48		0,36	
1,16		0,10		0,74	
11,44		0,96		0,17	
1,68		10,06		0,64	
1,25				0,33	
3,15				0,21	
1,24				0,28	
0,94				0,13	
0,88				0,22	
0,32				0,18	
1,62				0,14	
0,41				0,19	
0,36				0,12	
0,65				0,24	
				0,14	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Porosidad de la membrana 1 A**

MEMBRANA 1 A						
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	607,83	419,54	368,82	64,35	246,94	41,51
Área Membrana	3585,58	3564,79	3059,93	2546,65	3593,22	3389,71
Porosidad	17,0%	11,8%	12,1%	2,5%	6,9%	1,2%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Áreas de poros de la membrana 1 B obtenidos por GeoGebra**

Membrana 1 B					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
9,53	3,37	2,22	1,00	1,80	1,36
1,97	4,57	11,50	1,19	0,93	0,60
2,11	1,37	2,94	0,27	1,47	0,90
1,42	7,71	2,47	0,30	2,66	0,46
2,26	2,76	1,59	0,58	3,29	1,77
0,53	2,25	4,32	2,51	1,31	0,21
3,99	3,24	5,59	0,25	0,89	0,44
4,47	3,42	1,31	1,11	1,40	1,20
1,58	1,15	18,85	1,33	0,82	0,50
1,55	0,47	7,71	0,32	0,94	0,35
5,99	9,93	2,33	0,19	0,48	0,82
5,70	1,97	6,23	0,51	0,40	0,10
14,36	3,30	3,36	0,24	1,33	0,29
2,86	2,42	1,20	0,47	4,59	0,33
4,16	1,84	3,57	0,42	2,08	0,24
2,27	4,82	0,66	0,30	2,60	0,42
0,34	9,86	1,06	0,22	1,44	0,39
0,54	1,37	0,61	0,12	4,73	0,36
0,95	6,44	0,23	2,11	4,69	0,13
3,64	5,00	3,33	0,24	4,62	0,17
0,29	4,57	3,86	0,24	1,49	0,34
1,19	16,97	4,26	0,39	5,46	0,11
5,96	2,84	7,87	0,33	0,65	0,22
7,29	7,32	4,97	0,78	1,39	0,41
10,47	3,21	3,78	3,64	0,58	0,31
4,43	1,71	10,58	2,20	0,27	0,13
17,15	9,05	5,54	4,06	0,27	1,53
1,12	6,60	1,20	4,80	0,75	1,35
13,61	4,79	3,33	1,45	0,33	1,00

Continuación del apéndice 24.

7,65	1,21	4,22	1,86	0,60	0,31
11,22	6,62	4,73	2,24	0,33	0,16
7,07	16,81	7,73	1,48	0,33	0,30
3,64	6,98	12,87	1,69	2,97	3,05
8,11	9,31	10,06	18,50	4,04	3,75
1,29	15,69	9,88	0,65	0,20	1,30
7,56	1,90	2,54	7,93	0,16	0,70
9,69	4,61	4,91	5,48	0,17	1,44
3,49	18,61	5,32	4,17	1,39	2,68
4,54	8,21	4,25	7,49	0,68	1,09
10,40	4,55	6,79	0,17	0,30	0,55
3,92	4,48	4,92	0,34	0,15	5,72
5,15	2,58	3,28	0,11	0,26	5,44
5,05	7,97	2,20	0,34	0,43	1,04
7,84	23,91	13,53	0,11	0,08	1,13
6,71	1,22	1,66	1,32	0,06	0,42
7,57	6,52	11,46	0,10	0,13	0,57
3,27	5,71	6,69	0,08	0,04	2,15
9,74	7,52	9,71	0,11	0,19	0,39
6,36	6,23	6,36	0,22	0,05	0,40
3,93	24,09	7,75	0,19	0,09	1,35
7,27	1,74	3,64	0,15	0,08	1,43
5,78	1,95	8,12	0,18	0,15	1,53
5,98	0,81	6,24	0,14	0,15	3,00
6,32	0,30	6,38	0,06	0,05	0,75
5,15	5,31	2,13	0,06	0,12	0,66
5,26	3,11	18,61	0,10	0,20	2,37
9,97	4,63	21,68	0,18	0,07	1,94
10,85	7,04	6,39	0,72	0,06	0,39
15,61	6,96	10,80	0,13	0,07	1,77
5,03	21,30	2,42	0,37	0,07	6,74
4,41	0,47	5,75	0,31	0,03	3,31
3,52	0,81	3,68	0,16	0,06	2,91
1,61	0,74	3,45	0,15	0,04	0,22
6,04	0,29	3,69	0,04	0,05	0,41
11,88	0,13	0,44	0,08	0,26	0,32
2,07	2,09	1,65	0,03		0,25
0,64	0,06	0,30	0,16		0,43
1,56	0,86	5,69	0,20		0,32
0,41		3,27	0,14		0,29
0,72		7,42	0,22		0,10
0,59		1,25	0,04		0,07
2,09		0,11	0,05		0,06
0,59		0,11	0,02		0,13
0,21		2,18	0,07		0,08
0,22		0,08	0,17		0,13
0,13		0,41	0,11		0,34
0,26		0,14	0,04		0,17
0,19		0,09	0,04		0,10
0,21		0,53	0,07		0,07
0,12		0,25	0,03		0,06
6,40		0,07	0,07		0,13
0,28			0,05		0,08
0,11			0,15		0,13

Continuación del apéndice 24.

0,72			0,19		0,34
0,09			0,06		0,17
0,12			0,05		0,10
0,11			0,07		0,07
0,46			0,05		0,12
,39			0,07		0,28
0,13			0,03		0,08
0,05			0,03		0,16
0,06			0,05		0,09
0,07			0,03		0,06
0,30			0,03		0,14
0,09			0,04		0,16
0,02			0,02		0,42
0,05			0,04		0,26
0,06			0,11		0,22
0,07			0,03		0,32
0,09			0,04		0,16
0,03			0,05		0,12
0,30			0,13		0,64
0,16			0,07		0,62
0,20			0,11		0,27
			0,10		0,10
			0,47		0,09
			0,18		0,20
			0,06		0,07
			0,05		0,07
					0,07
					0,04
					0,34
					0,22
					0,14
					0,29
					0,12

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Porosidad de la membrana 1 B**

MEMBRANA 1 B						
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	390,98	377,65	394,30	92,80	67,77	87,62
Área Membrana	3079,92	3577,08	3407,94	3720,74	3548,65	3538,51
Porosidad	12,7%	10,6%	11,6%	2,5%	1,9%	2,5%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Áreas de poros de la membrana 2 A obtenidos por GeoGebra**

Membrana 2 A					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
1,19	0,63	2,01	1,61	0,38	0,24
2,21	0,61	6,50	0,87	0,81	0,49
8,85	0,35	10,98	0,77	0,18	0,12
2,34	0,19	18,73	0,42	0,17	0,20
2,03	0,41	6,70	0,84	0,63	0,22
4,18	1,44	7,44	0,68	0,38	0,35
5,61	0,43	1,06	1,20	0,60	0,46
4,37	0,58	4,76	2,02	0,71	1,11
1,17	0,83	6,15	0,30	0,30	0,42
0,87	0,55	1,42	0,37	1,44	0,20
1,42	6,17	0,78	0,77	0,32	1,76
4,92	7,43	1,62	0,16	0,17	0,49
3,33	2,20	1,88	0,11	0,13	0,26
3,32	2,08	6,32	0,08	0,12	0,07
1,70	4,59	7,84	2,10	0,72	0,83
0,83	8,70	13,28	0,81	0,32	0,06
0,68	12,58	4,52	0,30	0,34	0,26
0,98	12,34	5,93	0,46	0,78	0,95
1,12	1,43	4,80	0,49	17,57	0,46
1,08	4,51	2,81	0,28	0,71	0,75
0,72	14,62	2,28	0,72	0,78	0,20
12,93	15,29	1,50	0,37	0,71	0,56
4,37	6,51	2,88	1,84	2,96	0,95
14,87	5,96	6,39	0,17	0,20	0,39
7,34	2,12	0,93	0,17	0,28	1,24
5,86	12,58	2,68	0,47	0,12	3,38
13,79	10,60	2,66	2,12	0,18	0,21
10,35	12,43	2,52	1,22	0,06	0,35
5,66	8,69	0,18	0,14	0,11	0,39
12,44	5,56	0,36	51,41	0,03	0,41

Continuación del apéndice 26.

6,82	6,09	0,39	1,92	0,15	0,09
5,80	3,20	3,05	1,25	0,14	
3,01	1,16	7,03	11,31	0,07	
6,37	1,16	7,68	71,12	0,05	
8,34	4,35	5,14	21,51	0,05	
8,04	1,12	12,17	2,93	0,02	
6,65	5,72	15,37	1,33		
4,96	0,73	10,41	1,44		
3,72	4,03	13,14	1,55		
10,28	6,81	6,86	0,02		
5,03	2,14	8,67	0,13		
8,21	1,37	12,44	0,43		
15,29	0,77	2,09	0,17		
0,76	2,84	6,87	0,06		
0,73	1,14	11,05	0,07		
3,41	10,28	7,46	1,00		
7,48	1,83	8,73	0,92		
12,65	1,44	9,15	0,22		
7,95	4,83	4,89	0,54		
8,72	16,81	5,76	0,60		
4,68	7,02	2,16	0,47		
9,90	9,05	9,80	0,77		
5,17	7,01	5,02	0,63		
13,42	4,17	11,58	0,10		
4,59	8,23	12,62	1,79		
8,12	10,29	14,10	0,63		
4,68	1,75	16,25	0,67		
4,90	1,38	7,44	0,12		
6,02	0,89	10,47	0,14		
6,64	4,13	2,72	0,29		
26,43	5,87	10,01	0,44		
2,82	9,42	3,77	0,08		
16,31	5,10	13,18	0,17		
14,03	5,89	6,19	0,10		
7,35	9,81	3,12	0,10		
3,51	0,37	3,18	0,10		
6,27	5,76	1,87	0,65		
3,33	4,72	0,93	0,09		
12,14	0,92	0,64	0,11		
7,66	9,55	1,47	0,47		
10,44	1,92	8,02	0,08		
2,45	12,36	3,37	0,11		
4,82	3,58	3,59	0,13		
11,85	1,82	18,07	0,06		
13,30	10,92	8,01	0,06		
3,88	10,10	17,44	0,04		
2,37	6,23	7,06			
4,15	4,21	8,93			
7,49	12,02	3,04			
10,35	2,82	1,00			
2,57	5,87	2,57			
17,95	15,20	8,28			
1,44	10,65	10,68			
3,82	3,26	1,57			

Continuación del apéndice 26.

9,32	5,24	1,28			
3,22	6,23	1,93			
0,41	14,84	1,27			
0,63	3,10	0,43			
0,36	16,66	0,68			
0,34	4,83	1,61			
	3,34	7,36			
	5,38	1,32			
	14,15	0,29			
	15,19	0,14			
	1,76	0,18			
	4,27	1,43			
	3,11	0,42			
	5,84				
	1,39				
	2,66				
	2,09				
	0,20				
	0,23				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Porosidad de la membrana 2 A**

	MEMBRANA 2 A					
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	553,88	563,03	552,75	200,19	32,69	17,87
Área Membrana	3393,21	3473,12	3629,96	3664,77	3618,51	3605,36
Porosidad	16,3%	16,2%	15,2%	5,5%	0,9%	0,5%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. **Áreas de poros de la membrana 2 B obtenidos por GeoGebra**

Membrana 2 B					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
6,74	1,06	0,51	0,29	0,23	0,40
7,72	0,66	0,29	0,53	0,15	1,99
1,58	1,31	0,20	1,11	0,06	0,71
2,80	0,65	0,19	2,98	0,47	0,10
0,73	1,69	1,05	4,58	0,09	0,35
0,98	1,84	1,09	2,06	0,62	1,35
0,90	1,32	1,11	0,58	0,14	0,21
1,39	1,43	7,29	0,50	0,19	0,18
4,08	0,78	2,24	0,29	0,27	0,24
1,49	0,84	1,05	0,24	0,13	0,14
2,74	0,30	4,32	0,20	0,08	0,23
5,33	0,46	5,07	0,28	0,35	0,35
2,10	0,58	2,71	0,39	1,31	0,23
2,10	0,26	5,97	0,26	0,45	0,40
5,74	1,60	0,74	0,87	0,23	0,36
1,52	0,60	9,14	0,31	0,16	0,10
3,74	3,98	1,56	1,41	0,19	0,14
0,47	8,15	1,14	0,33	0,64	0,08
0,31	2,21	0,21	0,16	0,10	0,17
0,21	5,39	0,27	0,13	0,16	0,04
0,15	3,14	0,14	0,12	1,27	0,23
0,11	0,39	0,19	0,20	0,08	1,01
1,21	1,38	1,49	0,28	0,11	0,16
0,93	3,81	0,71	0,17	0,19	0,39
1,11	3,16	3,46	0,37	0,45	0,49
3,61	17,10	1,26	0,25	0,30	0,66
0,88	2,83	1,32	0,28	0,08	0,36
3,70	17,00	0,41	0,15	0,09	0,41
2,90	6,47	0,81	2,11	0,06	0,05
0,36	0,26	0,96	0,61	0,24	0,09
1,52	22,41	3,53	0,47	0,14	0,09
4,21	4,56	0,59	0,19	0,07	0,29
5,09	4,64	0,41	0,78	0,15	0,38
2,21	7,54	0,67	1,28	0,59	0,42
1,15	8,32	0,44	0,79	0,61	0,20
0,50	7,71	0,27	0,31	0,36	0,31
9,72	6,29	1,01	0,28	0,59	0,22
6,92	5,33	19,65	0,84	0,05	0,04
1,43	16,53	7,09	0,72	0,09	0,05
0,98	12,17	0,48	0,36	0,08	0,17
1,58	8,33	5,92	0,35	0,09	0,09
1,41	3,35	5,50	0,12	0,07	0,13
0,68	7,39	3,21	0,06	0,12	0,34
0,66	7,35	8,12	0,06	0,15	0,16
0,58	10,96	8,79	0,19	0,06	0,24

Continuación del apéndice 28.

0,82	16,88	1,43	0,09	0,10	0,06
8,72	4,43	6,05	0,25	0,10	2,35
6,96	3,14	3,05	0,17	0,14	0,14
2,68	2,32	0,66	0,30	0,12	0,64
11,98	11,46	3,53	0,28	0,14	0,86
2,86	5,49	4,64	0,97	0,06	0,18
4,39	7,40	5,40	0,29	0,36	0,37
4,18	9,82	1,16	0,22	0,32	0,15
7,07	7,21	3,19	0,19	0,34	2,64
5,20	2,68	3,96	0,29	0,05	5,39
8,75	12,02	1,93	0,63	2,61	0,71
11,03	5,80	7,33	0,47	1,07	0,42
11,27	7,04	3,94	0,19	0,11	0,23
14,90	5,74	11,84	0,27	0,27	0,99
6,14	6,86	10,65	0,25	0,70	0,18
8,61	4,59	2,87	0,99	1,02	0,87
7,86	12,80	4,82	4,61	0,29	0,60
7,21	15,98	2,79	1,33	0,71	0,48
7,07	9,45	6,00	0,25	1,34	0,26
4,01	11,13	8,82	0,88	1,08	0,11
4,81	11,11	2,49	0,93	1,38	0,04
6,77	8,48	1,18	0,81	0,74	0,10
3,90	11,35	7,48	0,73	2,69	0,05
3,86	6,76	9,18	0,40	0,19	0,08
6,59	1,68	6,75	1,64	5,09	0,07
4,47	4,11	4,88	1,44	0,93	0,05
7,67	0,84	10,20	0,41	0,42	0,60
3,97	8,21	10,77	0,39	0,45	0,09
7,82	3,24	8,50	0,17	1,36	0,18
4,99	8,03	3,11	1,08	8,85	0,34
6,46	7,19	1,54	0,54	1,48	0,15
7,92	12,40	5,46	0,46	1,48	0,06
0,54	7,31	4,90	2,00	1,12	0,05
10,75	7,32	6,28	0,57	2,36	0,16
12,00	5,14	10,16	0,69	0,64	0,17
4,07	2,37	2,20	0,95	2,72	0,07
8,39	2,56	0,79	0,55	0,62	0,11
6,65	9,04	7,12	0,36	0,73	0,49
3,68	5,81	1,48	0,82	0,28	0,14
4,19	2,54	1,09	0,83	0,26	0,04
5,45	10,09	2,62	2,29	2,96	0,05
4,00	3,78	2,72	0,36	0,08	0,15
14,68	10,64	6,44	2,55	0,03	0,16
11,02	1,80	6,97	0,37	0,21	0,06
15,08	9,71	18,04	1,43	0,20	0,21
11,05	11,28	5,46	9,95	0,08	0,21
8,96	9,94	8,03	0,99	0,04	0,36
7,04	10,77	2,64	0,52	0,07	0,26
4,42	7,97	6,79	0,21	0,11	0,09
2,85	3,19	15,83	0,49	0,23	0,10
13,93	7,06	7,12	0,57	0,13	0,05
10,58	7,87	8,34	0,47	0,06	0,11
3,25	5,22	3,98	0,07	0,14	0,10

Continuación del apéndice 28.

2,99	7,32	2,25	0,21	0,04	0,07
2,27	5,15	5,21	0,06	0,26	0,22
7,48	6,98	6,65	0,53	0,18	0,12
4,18	10,86	5,37	0,53	0,07	0,14
11,45	3,63	1,28	0,72	0,26	0,21
8,85	7,24	18,94	0,49	0,29	0,35
11,22	2,81	5,21	0,50	0,19	0,06
13,47	7,50	4,24	0,37	0,12	0,08
3,22	17,42	4,84	0,31	0,18	0,16
4,48	2,34	10,79	1,60	0,09	0,16
15,06	6,05	1,21	0,31	0,29	0,11
4,56	1,66	5,30	0,16	0,14	0,13
8,88	10,57	1,07	0,34	0,13	0,11
12,82	5,02	11,52	0,42	1,33	0,10
3,57	3,14	3,44	0,08	0,98	0,31
4,11	5,03	12,60	0,10	0,05	0,15
1,17	14,72	0,10	0,06	0,33	0,07
1,66	1,20	0,12	0,08	0,06	0,14
1,74	7,08	0,24	0,09	0,03	0,06
9,69	9,14	0,20	0,17	0,06	0,10
0,15	3,73	1,45	0,36	0,07	0,05
0,30	2,81	0,33	0,48	0,07	0,07
1,40	6,71	0,73	0,09	0,05	0,04
0,54	5,21	0,45	0,12	0,04	0,06
3,00	9,62	0,42	0,06	0,03	0,14
2,70	6,51	0,32	0,23	0,05	0,09
0,39	0,31	0,09	0,28	0,09	0,10
0,21	0,91	0,52	0,24	0,09	0,12
0,21	0,19	0,38	0,08	0,28	0,10
0,76	0,15	0,14	0,13	0,10	0,09
0,21	0,25		0,10	0,10	0,05
0,52	0,36		0,21	0,09	0,11
0,92	0,21		0,11	0,08	0,09
0,12	0,46		0,04	0,05	0,05
1,33	0,69			0,03	0,11
	0,22			0,02	0,09
	0,15			0,05	0,05
	0,05			0,08	0,11
	0,70			0,16	0,09
				0,11	0,06
				0,31	0,12
				0,05	0,10
				0,08	0,10
				0,09	0,03
				0,05	0,36
				0,06	0,25
				0,10	0,11
				0,09	0,09
				0,17	0,15
				0,04	0,11
				0,07	0,08
				0,06	0,14
				0,06	0,04

Continuación del apéndice 28.

				0,08	0,11
				0,04	0,07
				0,02	0,16
				0,09	0,17
					0,16
					0,17
					0,03
					0,02
					0,03
					0,11
					0,23
					0,08
					0,04
					0,05
					0,09
					0,09
					0,03
					0,06
					0,04
					0,08
					0,07
					0,05

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. **Porosidad de la membrana 2 B**

	MEMBRANA 2 B					
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	630,71	794,71	523,32	88,36	69,99	46,09
Área Membrana	3539,08	3598,75	3591,52	3359,89	3248,67	3498,54
Porosidad	17,8%	22,1%	14,6%	2,6%	2,2%	1,3%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Áreas de poros de la membrana 3 A obtenidos por GeoGebra**

Membrana 3 A					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
8,19	3,96	0,60	0,44	1,18	0,65
0,43	1,31	3,06	0,89	0,72	0,60
3,27	0,92	1,23	0,31	0,32	1,29
0,37	3,01	1,96	0,52	0,10	0,15
3,88	2,27	1,75	0,28	0,27	0,52
3,14	0,91	1,06	0,44	0,28	0,56
4,70	8,18	0,18	0,06	0,60	0,49
1,83	7,07	1,13	0,16	0,74	2,46
0,16	3,60	0,38	0,69	0,35	0,55
0,40	1,45	2,04	0,23	0,23	0,13
0,82	2,26	3,46	0,11	0,36	0,41
0,55	4,42	0,78	0,29	0,44	0,06
1,27	0,41	0,49	0,18	0,37	0,20
1,27	2,76	0,53	0,23	0,37	0,39
10,31	4,55	0,36	0,10	0,60	0,10
7,22	0,97	0,81	0,14	0,10	0,13
13,05	2,07	5,71	0,13	0,29	0,20
13,25	0,36	1,96	1,32	0,21	0,95
11,56	0,74	3,74	0,46	0,31	0,23
8,32	5,48	8,95	0,38	0,15	0,16
1,12	1,67	5,78	0,21	0,68	0,11
4,26	8,81	7,48	0,06	0,22	1,57
1,83	3,29	4,07	0,35	2,34	1,07
1,66	0,74	3,14	0,49	93,94	0,22
1,25	3,84	6,49	0,18	7,35	0,43
3,98	1,69	6,67	0,14	4,14	0,43
15,97	0,31	3,48	0,07	1,11	0,08
10,93	2,25	3,27	0,28	0,26	0,27
9,26	8,98	5,17	0,06	2,72	0,27
3,01	0,66	3,11	0,05	0,52	0,07
5,88	1,24	3,41	0,09	1,21	0,10
12,92	3,13	7,63	0,22	1,03	0,13
11,92	1,00	6,16	0,14	1,20	0,18
11,71	5,86	1,16	0,25	0,96	0,16
7,64	2,92	4,20	0,25	0,73	0,61
7,71	6,76	5,03	0,21	0,35	1,43
6,92	4,91	5,62	0,38	0,42	4,56
3,31	5,46	3,99	0,14	0,18	1,73
6,87	3,84	4,33	0,06	0,17	0,18
2,26	8,28	4,12	10,90	0,28	1,29
14,05	4,71	4,35	0,59	0,20	0,57
1,33	8,99	2,57	1,17	0,52	3,80
4,70	3,03	13,38	3,16	0,11	1,04
1,38	1,92	7,06	1,50	0,15	1,34
0,84	2,94	3,16	6,93	0,18	2,21
4,08	3,00	7,57	1,72	0,16	1,23
5,27	4,22	5,23	9,11	0,16	2,25

Continuación del apéndice 30.

6,82	7,24	3,89	0,37	0,26	3,17
9,46	5,54	7,22	1,20	0,08	5,74
2,37	10,80	2,56	0,15	0,04	1,14
10,72	15,15	1,18	0,29	0,24	1,73
0,68	4,69	5,52	0,42	0,42	0,55
0,76	4,69	4,75	0,25	0,77	0,60
2,52	2,19	2,33	0,29	0,27	0,50
2,82	4,91	4,59	0,11	0,13	0,23
4,12	4,32	9,60	5,19	0,21	2,33
5,86	9,17	1,81	1,19	0,04	2,09
4,37	7,79	1,11	1,35	0,16	0,19
3,53	5,69	3,41	0,22	0,07	0,29
6,78	8,98	3,30	6,36	0,27	0,43
7,72	2,75	5,51	0,70	0,04	14,38
5,44	2,86	0,60	0,25	0,43	0,74
9,82	9,77	2,90	0,06		0,29
5,93	1,75	5,30	0,05		1,34
3,49	2,57	1,29	0,06		0,22
6,78	8,00	9,06	0,07		0,46
7,06	6,50	7,71	0,05		0,52
1,58	4,25	4,82	0,12		0,15
4,26	4,68	3,82	0,06		0,25
11,94	8,36	1,35	0,04		0,82
5,31	2,13	2,47	0,20		0,30
9,31	6,14	0,33	0,19		1,00
6,32	6,80	4,94	0,21		1,53
3,36	2,65	8,81	0,09		2,52
3,57	3,10	3,03	0,09		2,14
5,28	1,37	0,64	0,18		0,99
4,43	1,01	0,19	0,66		0,72
4,49	11,24	1,10	0,58		1,84
4,83	2,91	0,68	0,41		0,50
5,45	5,15	0,85	0,07		0,10
8,04	13,76		0,05		0,11
5,04	0,99		0,04		0,14
5,20	1,89		0,02		0,09
1,83	4,53		0,09		0,07
3,81	5,82		0,02		0,15
5,80	0,61		0,09		0,13
7,12	2,32		0,02		0,16
12,82	0,57		0,03		0,09
13,53	0,42		0,06		0,06
2,75	1,91				0,05
1,01	0,71				0,06
0,05	0,49				0,15
0,29	0,11				0,05
0,28					0,03
0,22					0,02
0,12					0,06
0,16					0,03
0,03					0,20

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. **Porosidad de la membrana 3 A**

MEMBRANA 3 A						
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	501,40	380,43	294,48	68,02	132,71	89,63
Área Membrana	3549,65	3526,65	3408,11	3289,58	3444,49	3465,41
Porosidad	14,1%	10,8%	8,6%	2,1%	3,9%	2,6%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Áreas de poros de la membrana 3 B obtenidos por GeoGebra**

Membrana 3 B					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
0,66	6,01	6,82	0,41	2,62	2,42
0,52	1,96	0,64	0,69	3,12	0,69
0,22	2,64	1,82	0,39	3,33	1,24
0,38	2,61	6,65	6,31	1,08	0,11
3,64	4,27	0,68	3,19	0,82	0,36
0,99	4,11	1,63	1,01	0,47	1,98
0,98	2,52	0,58	1,34	1,48	0,17
0,43	2,07	9,36	2,42	0,81	0,21
1,09	2,87	0,62	0,36	2,37	0,22
1,16	1,94	0,89	0,94	0,56	0,09
2,00	3,94	4,75	0,31	2,78	0,24
1,45	4,40	1,68	0,27	2,43	1,02
1,44	4,23	1,77	0,52	2,60	0,54
1,84	1,42	3,66	0,16	5,77	1,89
0,22	1,10	1,33	0,14	0,89	1,10
0,64	1,13	0,37	0,10	1,97	0,96
0,28	3,53	0,71	0,13	1,63	0,43
0,21	1,06	1,12	0,16	1,93	0,27
0,59	0,73	0,67	0,43	0,82	0,11
1,85	1,42	0,20	0,19	1,50	0,17
0,70	3,26	0,56	0,79	0,70	0,61
0,88	4,26	0,21	0,39	1,03	0,62
1,74	1,81	0,49	0,86	1,20	0,46
0,69	3,34	1,06	1,52	0,36	1,44
0,60	2,34	0,37	0,36	0,79	0,41
0,10	2,65	0,33	0,59	0,64	0,15
0,51	2,71	1,11	2,79	0,89	0,09
0,62	1,01	6,70	0,98	2,04	0,13
1,69	1,24	2,46	0,86	1,13	0,49
6,70	4,50	12,47	1,52	4,67	0,33
0,76	1,04	8,99	0,36	1,00	0,89

Continuación del apéndice 32.

0,94	1,22	2,83	0,59	0,70	0,36
0,69	0,95	2,61	2,79	0,32	0,08
0,26	5,13	7,43	0,98	0,86	0,05
0,25	1,27	25,59	0,86	0,62	0,07
0,23	0,70	2,26	0,27	0,96	0,46
0,49	0,57	2,80	0,39	0,42	0,22
0,33	0,52	3,85	0,26	1,00	0,11
0,23	0,32	16,62	0,27	2,17	0,22
0,65	17,87	22,53	1,37	1,80	0,24
0,23	5,59	23,00	1,54	1,99	0,08
0,20	2,26	11,73	0,37	5,89	0,19
0,29	5,98	3,40	1,44	4,81	0,30
9,36	15,18	11,07	1,60	6,05	0,39
1,73	7,83	12,45	1,63	7,32	0,17
3,77	4,68	1,66	0,70	9,93	0,17
3,02	17,00	1,53	2,72	1,47	0,18
1,07	5,41	6,52	3,74	14,15	1,90
1,13	10,49	6,52	0,06	1,20	1,22
1,08	6,53	3,97	0,18	1,18	0,30
6,47	4,50	8,66	0,34	4,34	0,16
6,01	13,26	6,60	1,37	5,74	0,20
10,82	9,91	3,38	0,10	3,38	1,18
5,98	3,51	1,93	0,13	0,89	0,37
4,88	8,48	5,85	0,09	1,58	0,19
2,06	6,73	4,17	0,09	1,35	0,41
7,54	15,85	10,97	0,10	0,60	2,55
8,45	11,52	12,92	0,10	0,34	0,25
2,32	1,56	10,69	0,05	0,47	0,40
4,27	3,83	13,46	0,56	0,40	0,09
5,93	11,43	6,52	0,05	0,86	0,34
5,80	17,96	14,80	0,27	0,31	0,16
4,21	7,32	7,37	0,47	0,54	0,14
5,10	5,16	12,89	0,61	0,37	0,55
6,77	5,77	15,63	0,31	0,20	0,09
11,59	5,61	10,89	0,45	1,97	0,65
5,48	11,53	10,06	0,72	0,65	0,18
5,83	7,87	3,24	2,20	0,80	0,22
3,22	6,01	5,04	0,33	0,68	0,04
11,45	7,83	15,48	0,25	1,43	0,35
9,51	7,44	24,76	0,19	1,31	1,07
22,50	7,23	21,72	0,17	0,39	0,33
11,71	6,67	6,45	0,12	0,43	1,90
2,64	7,48	1,80	0,54	1,48	2,48
19,98	18,31	18,76	0,71	0,76	1,59
5,13	13,97	20,76	0,89	0,54	0,86
3,11	4,81	7,03	1,26	0,69	1,56
17,69	5,11	6,15	2,09	0,74	1,44
11,04	4,56	5,57	5,59	1,98	0,73
17,36	8,83	10,56	7,91	1,11	1,16
8,76	9,72	20,34	2,05	1,04	0,46
13,95	13,24	4,65	2,35	2,95	0,15
25,47	3,96	14,28	0,38	0,41	10,43
7,41	2,33	3,82	1,14	0,11	4,51
2,53	11,26	20,07	3,73	1,06	0,40

Continuación del apéndice 32.

6,86	2,64	5,52	4,94	0,47	2,43
8,41	17,89	12,48	1,19	0,56	0,29
16,84	8,15	17,51	0,39	0,80	3,26
44,50	7,97	11,63	5,83		1,06
6,87	17,52	3,55	1,62		0,10
8,38	3,38	7,16	0,24		0,48
1,89	8,09	11,86	0,26		2,68
21,60	12,75	4,47	0,09		0,93
6,72	23,80	18,02	0,26		0,22
10,90	0,26	26,47	0,09		0,27
1,80	0,49	5,85	0,26		0,18
4,86	1,83	7,44	0,44		0,30
9,35	0,42	9,88	1,48		0,31
8,07	4,70	1,44	1,87		0,14
1,64	1,05	22,70	0,61		0,30
11,87	0,64	6,31	0,46		0,39
3,55	1,23	5,78	0,22		0,26
7,88	0,85	23,48	0,60		0,35
12,51	0,78	7,14	0,79		0,19
5,83	0,46	20,67	0,42		1,11
2,33	1,22	6,11	0,46		0,27
3,68	0,54	4,76	0,29		0,11
2,65	0,58	4,01	0,31		0,19
22,68	0,33	8,02	0,07		0,02
9,82	0,71	4,43	0,55		0,08
11,80	0,47	14,31	0,68		0,19
11,96	0,30	25,11	1,06		0,06
1,01	0,36	22,33	0,21		0,08
0,96	0,28	4,30	0,17		0,10
1,89	0,45	4,42	0,22		0,10
6,06		8,97	0,30		0,54
0,30		22,14	0,30		0,21
0,09		32,95	0,33		0,27
0,11		5,03	0,14		0,12
0,09		32,09	0,20		0,05
0,58		20,62	0,16		0,19
0,35		2,66	0,24		0,19
0,09		3,25	1,79		0,35
0,41		14,37	1,61		0,29
		5,24	1,31		0,15
		13,51	0,58		0,28
		12,84	0,54		0,17
		2,46	0,63		0,22
		1,97	0,33		0,07
		1,24	0,10		0,20
		0,19	0,10		0,25
		0,37	0,07		0,07
		0,40	0,07		0,05
		4,70	0,11		0,21
		0,71	0,10		0,10
			0,34		0,21
			0,30		0,23
			0,12		0,13
			0,07		0,17

Continuación del apéndice 32.

			0,40		0,62
			0,10		0,13
			0,24		0,10
			0,32		1,20
			0,16		0,16
			0,11		0,05
			0,08		0,29
			0,11		0,26
			0,46		0,38
			0,43		0,89
			0,76		
			0,17		
			0,21		
			0,74		
			0,01		
			0,19		
			0,24		
			0,07		
			0,07		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Porosidad de la membrana 3 B**

MEMBRANA 3 B						
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	647,64	602,85	1131,97	135,97	160,00	89,45
Área Membrana	4995,45	5821,13	5993,04	5510,75	6121,61	5772,10
Porosidad	13,0%	10,4%	18,9%	2,5%	2,6%	1,5%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 34. **Áreas de poros de la membrana 4 A obtenidos por GeoGebra**

Membrana 4 A					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
1,18	2,15	3,41	0,30	0,31	0,59
0,84	1,90	0,77	0,69	0,26	0,91
0,96	1,77	4,29	0,80	1,07	0,39
0,47	0,40	6,33	0,60	0,23	0,32
0,88	0,89	0,45	0,38	0,66	0,72
0,83	2,37	14,75	0,59	0,59	0,15
1,25	6,73	1,65	0,27	0,84	0,19
2,17	0,70	12,17	0,11	0,53	0,24
10,63	2,23	3,37	0,33	0,58	0,27
1,32	2,42	11,10	0,18	0,25	0,80
1,49	6,04	2,80	0,13	0,58	0,31
2,40	3,83	4,53	0,21	1,08	0,17
0,77	7,11	1,51	0,18	0,51	0,10
0,72	3,27	1,07	0,18	0,32	0,62
0,63	1,49	4,24	0,28	0,45	0,38
0,21	0,32	4,28	0,38	0,43	0,58
2,81	1,78	6,77	1,05	0,34	0,94
0,79	1,61	5,01	1,67	0,17	1,08
0,69	2,21	3,98	0,24	0,96	1,51
0,50	0,96	4,78	0,65	0,40	2,82
0,18	3,18	9,24	0,72	1,32	0,51
0,30	1,14	16,88	0,66	0,23	0,36
0,15	1,04	3,62	1,03	0,65	0,65
0,96	0,46	3,27	0,69	0,18	0,37
0,61	1,87	2,03	0,16	0,16	0,79
1,83	4,60	0,68	0,61	0,25	0,28
0,62	1,30	3,58	0,29	0,25	0,12
0,10	3,85	2,64	0,56	0,43	0,13
0,21	2,66	1,35	0,29	0,46	0,18
0,09	0,72	3,41	0,23	0,45	1,24

Continuación del apéndice 34.

0,24	1,16	4,69	0,30	0,54	0,14
0,29	1,17	1,91	0,29	0,32	0,12
0,27	1,20	0,87	0,40	0,47	0,19
0,51	3,95	0,34	0,45	0,36	0,12
0,39	0,81	0,69	3,31	0,61	0,16
2,34	0,53	1,42	1,98	0,51	0,32
0,36	1,74	3,18	2,24	0,26	0,80
0,96	0,66	0,91	0,87	0,16	0,25
8,85	4,70	1,61	2,38	0,14	0,38
3,00	7,90	2,52	0,12	0,84	0,14
2,34	16,95	9,05	0,08	0,37	0,26
9,62	4,33	0,92	0,09	0,40	0,39
0,38	1,38	5,80	0,10	0,55	0,17
8,32	3,26	2,94	0,13	0,14	0,18
4,95	13,96	1,06	0,15	0,30	0,31
1,54	6,42	1,70	0,35	0,26	0,17
4,08	12,60	0,89	0,10	0,31	0,67
6,90	7,24	2,15	0,13	0,36	0,09
2,25	5,01	1,81	0,15	0,41	4,14
3,17	2,16	2,41	0,35	0,58	2,11
2,25	6,24	2,15	0,10	0,29	3,97
3,72	0,63	4,03	0,11	0,19	0,69
4,08	4,17	13,16	0,13	0,20	0,84
2,66	11,76	7,50	0,23	0,90	0,44
3,47	2,20	7,15	0,37	0,40	2,32
2,68	8,62	4,64	0,09	0,06	0,41
6,45	6,05	1,66	0,09	0,09	0,17
0,98	8,95	1,93	0,21	0,23	2,04
5,71	3,04	1,71	0,17	0,30	2,46
5,60	8,97	3,47	0,24	0,25	2,16
1,86	2,23	8,17	0,17	0,25	1,44
10,34	2,01	1,61	0,33	0,08	2,02
2,95	12,86	2,65	1,15	0,39	1,34
1,20	3,73	2,90	0,62	0,13	0,13
17,28	9,12	2,77	1,00	0,32	0,24
5,33	3,47	1,17	0,64	0,20	0,11
9,70	5,25	1,52	0,36	0,15	0,10
6,87	3,26	0,71	1,02	0,22	0,32
4,65	6,18	6,49	0,39	0,32	0,18
2,45	5,43	13,48	0,65	0,13	0,07
1,78	6,70	3,27	4,22	0,20	0,29
9,10	2,48	4,43	0,96	0,46	0,07
12,77	15,53	1,93	1,02	0,22	0,29
5,78	7,44	2,36	1,03	0,27	0,07
2,19	3,79	4,30	0,94	0,36	0,91
6,72	4,26	6,09	0,54	0,16	0,10
3,88	10,05	1,32	0,68	0,40	0,12
12,97	11,43	16,47	0,64	0,21	0,19
9,21	6,08	2,51	7,47	0,25	0,29
2,25	0,92	3,85	0,36	0,47	0,18
4,73	5,65	4,76	7,13	4,67	0,05
2,23	8,30	4,47	0,31	1,11	0,04

Continuación del apéndice 34.

1,14	9,94	10,31	0,63	0,47	0,13
1,83	2,69	9,17	0,15	0,94	0,08
0,33	6,12	5,45	19,55	0,49	0,02
2,07	6,65	7,50	0,32	1,61	0,02
2,43	14,15	9,58	0,29	0,74	0,10
7,07	5,13	11,45	3,79	1,70	0,30
0,61	2,70	4,13	0,30	1,70	0,06
0,37	2,07	5,74	0,35	3,52	0,37
1,13	7,41	5,00	2,55	0,82	0,14
3,56	4,36	5,20	0,23	0,71	0,16
1,07	11,44	4,43	2,30	1,35	0,10
0,40	4,43	5,74	1,80	1,00	0,06
1,19	6,97	4,91	0,86	1,09	0,14
2,02	6,33	3,21	0,35	2,39	0,11
3,13	1,93	2,71	1,21	0,78	0,22
0,63	4,75	4,03	2,04	2,51	0,16
0,56	2,40	3,45	0,30	0,48	0,09
1,74	3,46	3,38	0,50	0,32	0,14
1,83	14,09	2,27	0,39	0,24	0,17
0,14	3,08	8,07	0,20	0,50	0,29
0,05	2,99	1,03	0,16	0,10	0,17
0,04	1,02	1,71	0,20	0,31	0,19
0,43	5,25	0,57	0,16	0,20	0,18
0,11	5,23	4,30	0,20	0,78	0,25
0,61	5,53	0,26	0,14	1,13	0,25
0,16	1,97	0,32	0,15	0,24	0,33
0,33	5,18	0,15	0,13	0,23	0,27
0,43	1,14	0,47	0,33	0,93	0,08
0,22	0,58	2,13	0,19	1,10	0,26
0,17	3,41	0,28	0,18	0,33	0,36
0,07	4,16	1,47	0,07	0,58	0,21
0,15	4,69	0,98	0,23	0,41	0,04
0,36	12,83	1,70	0,20	1,00	
0,28	1,97	1,88	0,36	1,30	
0,36	1,62	2,16	1,97	1,41	
0,35	0,60	0,99	3,42	0,40	
0,48	0,64	4,57	0,09	0,48	
0,15	0,40	1,46	0,07	0,25	
0,28	0,28	2,16	0,12	0,07	
0,22	0,88	3,25	0,15	0,09	
0,12	0,30	6,44	0,10	0,19	
0,11	1,10	3,81	0,15	0,28	
0,21	2,40	3,44	0,13	0,23	
0,06	0,99	2,06	0,13	0,30	
	0,72	4,74	0,20	0,29	
	0,21	1,76	0,12	0,10	
	0,45	2,64	0,22	0,08	
	0,41	0,09	0,31	0,22	
		0,16	0,29	0,25	
		1,63	0,49	0,23	
		0,29	0,25	0,07	

Continuación del apéndice 34.

		0,97	0,13	0,17	
			0,21	0,41	
			0,34	0,13	
			0,16	0,85	
			0,10	0,61	
			0,08	0,13	
			0,14	0,10	
			0,14	0,17	
			0,12	0,14	
			0,27	0,24	
			0,11	0,04	
			0,33	0,62	
				0,19	
				0,07	
				0,24	
				0,22	
				0,09	
				0,13	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 35. **Porosidad de la membrana 4 A**

	MEMBRANA 4 A					
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	310,19	551,98	511,06	112,95	78,20	58,33
Área Membrana	3145,65	3565,21	3586,73	3418,65	3322,94	3513,67
Porosidad	9,9%	15,5%	14,2%	3,3%	2,4%	1,7%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. **Áreas de poros de la membrana 4 B obtenidos por GeoGebra**

Membrana 4 B					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
0,63	3,55	0,54	0,35	0,27	0,14
1,36	0,21	0,16	0,32	0,30	0,88
0,44	0,21	2,55	0,25	0,25	0,12
0,17	0,38	4,61	0,42	0,22	0,26
0,13	3,73	4,90	0,24	0,54	0,58
0,50	0,14	2,89	0,09	0,19	0,96
0,19	0,34	1,72	0,45	0,34	0,24
0,99	0,63	0,94	0,17	0,33	0,10
0,49	1,48	2,15	0,40	0,26	0,67
1,32	0,99	6,61	0,49	0,33	0,25
0,38	0,44	2,49	0,16	0,24	0,17
0,18	0,34	5,72	0,15	1,27	1,34
0,18	0,34	5,87	0,16	1,70	1,23
0,24	0,29	2,41	0,16	0,52	0,39
0,37	0,07	0,93	0,16	0,54	0,20
0,52	1,63	2,48	0,57	0,37	1,07
0,24	0,09	4,20	0,53	0,17	0,40
0,80	0,26	3,53	0,15	0,34	0,49
1,49	0,39	0,32	0,26	0,11	0,13
2,47	0,14	0,16	0,73	0,14	0,11
0,81	0,45	0,23	1,46	0,05	0,32
0,50	0,10	1,41	0,74	0,09	0,21
0,54	0,24	0,69	0,27	2,29	1,08
1,09	0,15	0,87	0,52	0,25	0,16
0,19	0,28	0,35	0,49	0,30	0,22
0,13	0,09	0,39	1,68	0,55	0,19
0,42	0,33	0,49	0,29	0,12	0,10
0,16	0,40	0,93	0,24	0,07	0,91
0,10	1,96	1,30	0,39	0,10	0,38
0,45	1,71	0,99	0,62	0,15	0,25
0,49	3,26	0,49	0,42	0,05	0,16
0,17	2,82	0,29	0,19	0,49	0,25
0,10	1,40	0,34	1,30	0,55	0,47
0,15	0,93	0,37	0,98	0,14	0,45
0,06	0,65	0,23	0,75	0,08	0,36
0,32	0,41	0,90	1,36	0,45	0,12
0,12	0,44	0,21	0,82	0,09	0,22
0,19	0,77	0,15	0,14	0,09	0,22
0,12	3,62	0,98	0,16	0,08	0,38
0,38	0,67	0,07	0,10	0,17	0,41
0,27	0,16	0,23	0,31	0,17	0,20

Continuación del apéndice 36.

0,20	7,99	0,26	0,52	0,11	0,14
0,14	2,47	0,34	0,33	0,06	0,78
0,12	2,02	0,38	0,11	0,35	0,51
0,14	0,89	15,90	0,68	0,17	0,41
0,20	6,66	7,43	0,39	0,23	0,49
0,23	0,84	1,04	0,32	0,18	0,29
0,20	0,58	0,53	0,45	0,13	0,07
0,44	0,29	0,86	0,33	0,12	0,06
0,81	6,27	0,63	0,45	0,34	0,03
0,28	5,40	0,98	0,15	0,17	0,13
0,46	4,80	4,91	0,19	0,50	0,16
12,42	0,70	0,34	0,42	0,11	0,30
0,19	2,53	3,21	0,55	0,09	0,20
3,41	6,17	6,99	0,43	0,10	0,21
14,11	8,31	6,29	0,24	0,22	0,06
8,61	1,07	0,91	0,08	0,03	0,20
1,76	12,23	2,72	0,05	0,03	0,14
1,15	3,17	7,37	0,05	0,12	0,05
1,06	4,50	2,43	0,10	0,12	1,32
0,53	1,33	4,03	0,19	0,14	0,83
3,38	5,76	2,44	0,15	0,21	0,28
1,45	0,71	4,17	0,13	0,05	0,05
0,61	2,62	4,16	0,11	0,16	0,14
1,46	7,26	2,42	0,22	0,18	0,07
1,60	1,48	5,97	0,13	0,14	0,29
1,70	10,55	4,58	0,27	0,06	0,69
1,08	2,64	3,76	0,32	0,11	0,10
0,28	6,21	7,35	0,23	0,08	0,07
0,34	12,88	1,89	0,24	0,06	0,07
5,85	5,26	3,39	0,10	0,48	0,04
0,20	4,52	16,76	1,12	0,11	0,05
0,36	1,49	6,20	0,74	0,06	0,20
0,92	0,76	8,21	0,46	0,07	0,33
1,15	1,65	4,88	0,13	6,57	0,04
0,67	1,93	7,47	0,67	0,41	0,26
0,30	0,59	12,49	0,26	0,32	0,03
0,53	0,25	10,60	0,16	0,41	0,51
0,31	0,17	12,75	0,10	0,22	0,13
3,68	2,22	7,26	0,13	0,42	0,08
0,44	0,75	11,74	0,27	0,71	0,05
1,21	0,89	5,51	0,31	1,23	0,09
0,61	7,85	3,22	0,22	1,22	0,09
0,95	4,42	4,69	0,32	0,92	0,17
4,19	8,01	0,99	0,53	0,94	0,38
10,37	1,48	7,55	0,79	1,24	0,08
2,14	12,27	1,69	0,60	1,01	0,07

Continuación del apéndice 36.

3,25	4,15	10,43	0,21	0,61	0,21
0,67	0,88	11,53	3,17	3,20	0,41
0,87	1,23	1,50	0,88	0,55	0,46
0,61	9,87	4,36	0,91	0,71	0,24
0,51	1,21	4,57	0,73	0,82	0,17
0,62	3,41	16,44	0,18	0,30	0,48
2,78	1,79	1,59	0,21	2,38	0,39
11,52	16,76	3,48	0,74	1,39	0,63
1,25	7,95	3,32	0,37	2,84	0,88
4,81	7,04	7,99	0,09	3,05	1,22
1,14	7,87	1,42	0,27	1,46	0,54
5,56	3,84	2,96	0,12	1,16	0,18
1,43	7,84	0,36	0,12	0,56	0,13
1,05	1,61	2,09	0,15	0,05	0,10
7,17	1,72	1,72	0,20	0,08	0,10
4,43	15,25	6,86	0,14	0,28	0,45
2,20	5,02	1,81	0,61	0,80	0,78
7,18	11,72	7,07	1,35	0,28	0,41
1,93	5,67	3,72	0,21	0,80	0,09
4,46	5,05	3,20	0,41	0,42	0,12
5,24	2,99	1,28	0,93	0,32	0,21
0,56	3,72	1,03	1,14	0,04	0,17
4,51	2,04	2,73	0,28	0,13	0,22
0,22	4,65	1,19	0,09	0,04	0,19
2,02	4,01	10,91	0,10	0,11	0,20
9,34	3,14	2,96	0,05	0,09	0,36
3,86	3,27	3,75	0,68	0,62	0,12
1,27	12,22	1,39	0,20	0,09	0,10
4,08	5,77	0,45	0,22	0,16	0,64
9,87	4,28	0,16	0,27	0,04	0,43
10,41	0,69	0,24	0,15	0,09	0,06
3,82	0,10	0,39	0,05	0,12	0,04
2,54	1,83	0,46	0,18	0,25	0,45
2,02	10,30	1,78	0,07	0,04	0,11
3,76	0,66	0,10	0,09	0,11	0,18
5,72	0,09	0,54	0,16	0,10	0,12
8,34	0,10	0,07	0,05	0,04	0,21
4,13	0,05	0,11	0,19	0,13	0,25
12,81	0,19	0,22	0,25	0,12	0,08
1,31	0,05	0,50	0,07	0,07	0,05
4,68	0,05	0,21	0,04	0,08	0,08
1,52	0,21	2,40	0,05	0,09	0,46
1,72	0,40	0,49	0,03	0,08	0,12
4,35	0,25	0,17	0,10	0,22	0,50
5,85	0,31		0,13	0,16	0,46
6,04	0,20		0,03	0,04	0,18

Continuación del apéndice 36.

5,94	0,24		0,04	0,07	0,15
2,61	0,41		0,04	0,04	0,19
6,12			0,04	0,03	0,39
0,48			0,01	0,09	0,40
7,03			0,01	0,12	0,84
4,77			0,06	0,06	0,37
8,48			0,19	0,44	0,13
4,35			0,09	0,21	0,09
9,92			0,15	0,04	0,06
2,68			0,16	0,03	0,06
1,30			0,11	0,07	0,04
5,07			0,16	0,02	0,15
1,43			0,11	0,03	1,79
10,25			0,16	0,10	0,13
1,65			0,11	0,06	0,19
1,46			0,12	0,03	0,61
1,82			0,13	0,01	0,07
5,03			0,22	0,01	0,17
1,50			0,08	0,08	0,04
1,17			0,27	0,03	0,06
0,14			0,09	0,04	0,03
0,13			0,07	0,16	0,03
1,40			0,13		0,04
7,05			0,16		0,05
4,57			0,13		0,02
2,40			0,03		0,11
1,15			0,18		0,04
5,04			0,08		0,05
3,75			0,20		0,25
14,60			0,30		0,15
3,23			0,16		0,17
10,30			0,07		0,09
6,75			0,11		0,05
3,69			0,22		0,31
5,91			0,11		0,14
2,50			0,16		0,20
2,63			0,07		0,05
1,66			0,11		0,03
0,64			0,22		0,07
0,20			0,11		0,11
0,14			0,16		0,13
0,07			0,08		0,08
0,18			0,33		0,05
0,10			0,13		0,02
0,10			0,21		0,02
0,05			0,13		0,02

Continuación del apéndice 36.

0,19			0,12		0,01
0,06			0,19		0,00
0,11			0,08		0,01
0,13			0,06		0,20
0,07			0,48		0,03
0,25			0,15		0,08
0,08			0,09		0,04
0,14			0,03		
0,12			0,10		
1,35			0,11		
0,10			0,03		
0,38			0,00		
0,16			0,03		
0,03			0,03		
			0,05		
			0,24		
			0,03		
			0,03		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 37. **Porosidad de la membrana 4 B**

	MEMBRANA 4 B					
	Parte superior			Parte inferior		
Área poros	382,54	401,43	426,73	58,87	62,36	50,12
Área Membrana	3657,35	3623,28	3547,40	3610,19	3615,17	3562,18
Porosidad	10,5%	11,1%	12,0%	1,6%	1,7%	1,4%

Fuente: elaboración propia.

A-5. DIÁMETROS DE PORO

Apéndice 38. Diámetros de poro de la membrana 1A

Membrana 1 A (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
156,99	241,43	304,42	178,31	123,11	81,57
366,50	345,20	384,23	242,19	136,41	57,68
145,59	216,11	136,41	135,50	113,75	78,50
467,43	153,42	202,27	129,93	98,67	61,81
287,13	142,59	184,76	116,96	89,50	44,40
309,63	134,13	358,85	154,62	194,82	64,73
252,16	224,50	362,44	275,07	160,10	73,64
276,19	240,41	104,73	251,43	99,29	71,94
462,66	253,63	241,94	305,22	141,29	142,59
482,35	176,92	392,95	322,69	127,06	336,71
249,46	257,96	258,68	90,18	62,80	48,39
142,16	181,73	145,16	118,00	117,48	274,17
318,46	328,74	74,47	159,33	161,25	91,54
169,45	352,09	139,54	124,11	73,64	136,86
225,87	149,76	166,88	119,56	139,09	66,61
260,81	105,90	130,88	104,14	135,50	59,78
363,80	197,02	230,46	122,11	118,53	79,28
189,04	160,48	176,57	85,27	145,59	170,90
315,74	168,35	163,53	74,47	153,02	117,48
363,80	301,77	188,06	88,11	154,62	138,65
242,45	260,81	313,20	87,41	343,41	59,78
174,11	501,02	174,11	76,10	336,71	64,73
405,90	380,52	271,23	71,08	587,09	187,08
160,10	199,51	296,00	122,61	427,35	69,33
376,12	327,81	282,80	71,94	164,65	232,85
373,00	461,06	199,82	91,54	137,76	118,00
314,57	390,11	376,94	64,73	152,21	41,54
142,16	394,04	255,80	94,19	295,79	36,82
231,26	301,16	445,01	108,20	213,82	50,87
230,46	251,92	192,27	123,61	582,45	45,77
287,55	289,48	324,02	108,20	151,80	79,28
241,43	169,08	268,04	67,52	703,49	38,45
251,43	358,51	431,08	92,88	263,40	87,41
338,71	401,79	149,35	52,07	171,26	70,21
179,00	418,46	325,35	68,43	343,41	54,38
378,73	387,42	412,83	86,70	135,05	27,19

Continuación del apéndice 38.

277,97	250,45	346,63	63,77	192,27	31,40
247,23	203,79	277,52	44,40	354,19	36,82
289,05	425,47	157,77	56,60	385,99	63,77
200,43	600,27	185,75	56,60	257,00	53,24
172,33	386,94	346,27	96,14	79,28	29,37
226,14	243,21	256,76	83,07	35,10	42,99
192,91	313,20	217,53	54,38	40,02	22,20
295,58	248,22	222,57	36,82	29,37	
292,65	701,03	373,49	27,19	109,33	
389,17	314,57	185,75	22,20	102,35	
305,22	189,69	294,96	76,91	80,82	
298,69	105,31	204,09	55,50	61,81	
307,64	305,22	282,36		41,54	
497,44	268,72	243,46		45,77	
466,50	201,66	205,89		64,73	
415,06	226,41	195,77		72,79	
359,02	94,19	267,11		65,67	
510,52	112,11	282,36		93,54	
270,78	137,76	149,35		124,11	
335,97	153,02	247,23		76,10	
351,22	72,79	154,22		117,48	
338,90	276,19	289,26		118,00	
358,51	137,76	423,15		112,11	
200,12	66,61	149,76		91,54	
364,98	104,73	76,91		141,29	
360,05	120,59	87,41		139,09	
335,61	56,60	61,81		85,27	
305,02	55,50	140,85		42,99	
342,87	92,21	105,31		40,02	
241,68		96,14		79,28	
411,33		76,10		44,40	
377,43		93,54		29,37	
349,28		63,77		59,78	
360,39		202,27		56,60	
291,60		58,74		19,23	
213,82		33,30		54,38	
226,14		52,07		101,74	
118,53		207,08		66,61	
119,56		35,10		95,49	
375,47		108,77		45,77	
143,88		352,09		88,81	
124,11				63,77	
197,02				50,87	
123,61				58,74	
107,63				40,02	
104,14				52,07	
62,80				47,10	
141,29				41,54	
71,08				48,39	

Continuación del apéndice 38.

66,61				38,45	
89,50				54,38	
				41,54	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 39. Diámetros de poro de la membrana 1 B

Membrana 1 B (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
342,69	203,79	165,40	111,01	148,93	129,46
155,81	237,31	376,45	121,10	107,05	85,99
161,25	129,93	190,34	57,68	134,59	105,31
132,28	308,24	174,46	60,80	181,05	75,29
166,88	184,42	139,98	84,54	201,35	147,69
80,82	166,51	230,73	175,87	127,06	50,87
221,74	199,82	262,46	55,50	104,73	73,64
234,70	205,29	127,06	116,96	131,35	121,60
139,54	119,04	481,96	128,02	100,52	78,50
138,21	76,10	308,24	62,80	107,63	65,67
271,69	349,81	169,45	48,39	76,91	100,52
265,03	155,81	277,08	79,28	70,21	35,10
420,66	201,66	203,48	54,38	128,02	59,78
187,73	172,69	121,60	76,10	237,83	63,77
226,41	150,58	209,75	71,94	160,10	54,38
167,25	243,71	90,18	60,80	179,00	71,94
64,73	348,58	114,29	52,07	133,21	69,33
81,57	129,93	86,70	38,45	241,43	66,61
108,20	281,71	53,24	161,25	240,41	40,02
211,79	248,22	202,57	54,38	238,60	45,77
59,78	237,31	218,10	54,38	135,50	64,73
121,10	457,30	229,12	69,33	259,39	36,82
271,01	187,08	311,42	63,77	89,50	52,07
299,72	300,34	247,48	98,04	130,88	71,08
359,20	198,89	215,83	211,79	84,54	61,81
233,65	145,16	361,08	164,65	57,68	40,02
459,72	333,95	261,28	223,68	57,68	137,31
117,48	285,19	121,60	243,21	96,14	128,98
409,53	242,96	202,57	133,67	63,77	111,01
307,04	122,11	228,04	151,40	85,99	61,81

Continuación del apéndice 39.

371,84	285,62	241,43	166,14	63,77	44,40
295,17	455,14	308,64	135,05	63,77	60,80
211,79	293,28	398,24	144,31	191,31	193,87
316,13	338,71	352,09	477,47	223,13	214,97
126,08	439,71	348,93	89,50	49,64	126,57
305,22	153,02	176,92	312,60	44,40	92,88
345,56	238,35	245,98	259,87	45,77	133,21
207,38	478,89	256,04	226,69	130,88	181,73
236,53	318,08	228,85	303,81	91,54	115,90
357,99	236,79	289,26	45,77	60,80	82,33
219,79	234,96	246,23	64,73	42,99	265,50
251,92	178,31	201,05	36,82	56,60	258,92
249,46	313,39	164,65	64,73	72,79	113,21
310,83	542,81	408,33	36,82	31,40	118,00
287,55	122,61	143,03	127,54	27,19	71,94
305,43	283,45	375,79	35,10	40,02	83,81
200,74	265,26	287,13	31,40	22,20	162,77
346,45	304,42	345,91	36,82	48,39	69,33
279,95	277,08	279,95	52,07	24,82	70,21
220,07	544,85	309,04	48,39	33,30	128,98
299,31	146,43	211,79	42,99	31,40	132,75
266,88	155,02	316,33	47,10	42,99	137,31
271,46	99,91	277,30	41,54	42,99	192,27
279,07	60,80	280,39	27,19	24,82	96,14
251,92	255,80	162,01	27,19	38,45	90,18
254,60	195,77	478,89	35,10	49,64	170,90
350,51	238,86	516,88	47,10	29,37	154,62
365,66	294,54	280,61	94,19	27,19	69,33
438,59	292,86	364,81	40,02	29,37	147,69
248,97	512,33	172,69	67,52	29,37	288,20
233,12	76,10	266,19	61,81	19,23	201,96
208,27	99,91	212,95	44,40	27,19	189,37
140,85	95,49	206,19	42,99	22,20	52,07
272,82	59,78	213,24	22,20	24,82	71,08
382,62	40,02	73,64	31,40	56,60	62,80
159,71	160,48	142,59	19,23		55,50
88,81	27,19	60,80	44,40		72,79
138,65	102,95	264,80	49,64		62,80
71,08		200,74	41,54		59,78
94,19		302,39	52,07		35,10
85,27		124,11	22,20		29,37
160,48		36,82	24,82		27,19
85,27		36,82	15,70		40,02
50,87		163,90	29,37		31,40
52,07		31,40	45,77		40,02
40,02		71,08	36,82		64,73

Continuación del apéndice 39.

56,60		41,54	22,20		45,77
48,39		33,30	22,20		35,10
50,87		80,82	29,37		29,37
38,45		55,50	19,23		27,19
280,83		29,37	29,37		40,02
58,74			24,82		31,40
36,82			42,99		40,02
94,19			48,39		64,73
33,30			27,19		45,77
38,45			24,82		35,10
36,82			29,37		29,37
75,29			24,82		38,45
69,33			29,37		58,74
40,02			19,23		31,40
24,82			19,23		44,40
27,19			24,82		33,30
29,37			19,23		27,19
60,80			19,23		41,54
33,30			22,20		44,40
15,70			15,70		71,94
24,82			22,20		56,60
27,19			36,82		52,07
29,37			19,23		62,80
33,30			22,20		44,40
19,23			24,82		38,45
60,80			40,02		88,81
44,40			29,37		87,41
49,64			36,82		57,68
			35,10		35,10
			76,10		33,30
			47,10		49,64
			27,19		29,37
			24,82		29,37
					29,37
					22,20
					64,73
					52,07
					41,54
					59,78
					38,45

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 40. Diámetros de poro de la membrana 2 A

Membrana 2 A (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
121,10	88,11	157,38	140,85	68,43	54,38
165,03	86,70	283,02	103,54	99,91	77,71
330,24	65,67	367,84	97,41	47,10	38,45
169,81	48,39	480,43	71,94	45,77	49,64
158,16	71,08	287,34	101,74	88,11	52,07
226,96	133,21	302,79	91,54	68,43	65,67
262,93	72,79	114,29	121,60	85,99	75,29
232,06	84,54	242,19	157,77	93,54	116,96
120,07	101,13	275,29	60,80	60,80	71,94
103,54	82,33	132,28	67,52	133,21	49,64
132,28	275,74	98,04	97,41	62,80	147,27
246,23	302,59	141,29	44,40	45,77	77,71
202,57	164,65	152,21	36,82	40,02	56,60
202,27	160,10	279,07	31,40	38,45	29,37
144,74	237,83	310,83	160,87	94,19	101,13
101,13	327,43	404,54	99,91	62,80	27,19
91,54	393,73	236,01	60,80	64,73	56,60
109,89	389,96	270,32	75,29	98,04	108,20
117,48	132,75	243,21	77,71	465,31	75,29
115,36	235,75	186,09	58,74	93,54	96,14
94,19	424,46	167,62	94,19	98,04	49,64
399,17	434,07	135,96	67,52	93,54	82,70
232,06	283,24	188,39	150,58	190,99	108,20
428,07	271,01	280,61	45,77	49,64	69,33
300,75	161,63	107,05	45,77	58,74	123,61
268,72	393,73	181,73	76,10	38,45	204,09
412,23	361,42	181,05	161,63	47,10	50,87
357,13	391,38	176,22	122,61	27,19	65,67
264,10	327,24	47,10	41,54	36,82	69,33
391,53	261,76	66,61	795,94	19,23	71,08
289,90	273,95	69,33	153,82	42,99	33,30
267,35	198,58	193,87	124,11	41,54	
192,59	119,56	294,33	373,33	29,37	
280,17	119,56	307,64	936,17	24,82	
320,58	231,53	251,67	514,85	24,82	
314,76	117,48	387,26	190,02	15,70	
286,27	265,50	435,21	128,02		
247,23	94,85	358,17	133,21		
214,11	222,85	402,40	138,21		
355,92	289,69	290,75	15,70		
248,97	162,39	326,86	40,02		
318,08	129,93	391,53	72,79		
434,07	97,41	160,48	45,77		
96,78	187,08	290,96	27,19		
94,85	118,53	369,01	29,37		
204,99	355,92	303,20	111,01		
303,61	150,17	327,99	106,48		

Continuación del apéndice 40.

394,82	133,21	335,79	52,07		
313,00	243,97	245,48	81,57		
327,81	455,14	266,42	85,99		
240,15	294,12	163,15	76,10		
349,28	333,95	347,51	97,41		
252,41	293,91	248,72	88,11		
406,66	226,69	377,76	35,10		
237,83	318,46	394,36	148,52		
316,33	356,10	416,84	88,11		
240,15	146,85	447,49	90,86		
245,73	130,41	302,79	38,45		
272,37	104,73	359,20	41,54		
286,05	225,60	183,08	59,78		
570,70	268,95	351,22	73,64		
186,42	340,71	215,54	31,40		
448,32	250,69	403,01	45,77		
415,80	269,41	276,19	35,10		
300,96	347,69	196,08	35,10		
207,98	67,52	197,96	35,10		
277,97	266,42	151,80	89,50		
202,57	241,17	107,05	33,30		
386,78	106,48	88,81	36,82		
307,24	343,05	134,59	76,10		
358,68	153,82	314,37	31,40		
173,76	390,27	203,79	36,82		
243,71	210,04	210,33	40,02		
382,14	149,76	471,89	27,19		
404,84	366,83	314,18	27,19		
218,66	352,79	463,59	22,20		
170,90	277,08	294,96			
226,14	227,77	331,73			
303,81	384,87	193,55			
357,13	186,42	111,01			
177,96	268,95	177,96			
470,32	432,79	319,43			
133,21	362,27	362,78			
216,97	200,43	139,09			
338,90	254,11	125,59			
199,20	277,08	154,22			
71,08	427,64	125,10			
88,11	195,45	72,79			
66,61	453,10	91,54			
64,73	243,97	140,85			
	202,88	301,16			
	257,48	127,54			
	417,58	59,78			
	147,27	47,10			
	229,39	132,75			
	268,27				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 41. Diámetros de poro de la membrana 2 B

Membrana 2 B (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
288,20	114,29	79,28	59,78	53,24	70,21
308,44	90,18	59,78	80,82	42,99	156,60
139,54	127,06	49,64	116,96	27,19	93,54
185,75	89,50	48,39	191,63	76,10	35,10
94,85	144,31	113,75	237,57	33,30	65,67
109,89	150,58	115,90	159,33	87,41	128,98
105,31	127,54	116,96	84,54	41,54	50,87
130,88	132,75	299,72	78,50	48,39	47,10
224,23	98,04	166,14	59,78	57,68	54,38
135,50	101,74	113,75	54,38	40,02	41,54
183,75	60,80	230,73	49,64	31,40	53,24
256,28	75,29	249,96	58,74	65,67	65,67
160,87	84,54	182,74	69,33	127,06	53,24
160,87	56,60	271,23	56,60	74,47	70,21
265,96	140,42	95,49	103,54	53,24	66,61
136,86	85,99	335,61	61,81	44,40	35,10
214,68	221,46	138,65	131,82	48,39	41,54
76,10	316,91	118,53	63,77	88,81	31,40
61,81	165,03	50,87	44,40	35,10	45,77
50,87	257,72	57,68	40,02	44,40	22,20
42,99	196,71	41,54	38,45	125,10	53,24
36,82	69,33	48,39	49,64	31,40	111,56
122,11	130,41	135,50	58,74	36,82	44,40
107,05	216,68	93,54	45,77	48,39	69,33
116,96	197,33	206,49	67,52	74,47	77,71
210,92	459,05	124,61	55,50	60,80	90,18
104,14	186,75	127,54	58,74	31,40	66,61
213,53	457,70	71,08	42,99	33,30	71,08
189,04	282,36	99,91	161,25	27,19	24,82
66,61	56,60	108,77	86,70	54,38	33,30
136,86	525,51	208,57	76,10	41,54	33,30
227,77	237,05	85,27	48,39	29,37	59,78
250,45	239,12	71,08	98,04	42,99	68,43
165,03	304,82	90,86	125,59	85,27	71,94
187,08	127,54	60,80	72,79	80,82	76,91
173,76	327,62	72,79	76,10	36,82	41,54
119,04	320,20	73,64	98,67	86,70	49,64
78,50	308,24	57,68	61,81	66,61	61,81
346,09	278,41	111,56	58,74	85,27	52,07
292,02	256,28	492,08	101,74	24,82	22,20
132,75	451,33	295,58	94,19	33,30	24,82
109,89	387,26	76,91	66,61	31,40	45,77
139,54	320,39	270,10	65,67	33,30	33,30
131,82	203,18	260,34	38,45	29,37	40,02
91,54	301,77	198,89	27,19	38,45	64,73

Continuación del apéndice 41.

90,18	300,96	316,33	27,19	42,99	44,40
84,54	367,51	329,12	48,39	27,19	54,38
100,52	456,08	132,75	33,30	35,10	27,19
327,81	233,65	273,05	55,50	35,10	170,17
292,86	196,71	193,87	45,77	41,54	41,54
181,73	169,08	90,18	60,80	38,45	88,81
384,23	375,79	208,57	58,74	41,54	102,95
187,73	260,10	239,12	109,33	27,19	47,10
232,59	301,98	257,96	59,78	66,61	67,52
226,96	347,87	119,56	52,07	62,80	42,99
295,17	298,08	198,27	48,39	64,73	180,37
253,14	181,73	220,91	59,78	24,82	257,72
328,37	384,87	154,22	88,11	179,34	93,54
368,68	267,35	300,55	76,10	114,83	71,94
372,67	294,54	220,35	48,39	36,82	53,24
428,50	265,96	381,97	57,68	57,68	110,45
275,07	290,75	362,27	55,50	92,88	47,10
325,73	237,83	188,06	110,45	112,11	103,54
311,22	397,16	243,71	238,35	59,78	85,99
298,08	443,76	185,42	128,02	93,54	76,91
295,17	341,25	271,92	55,50	128,50	56,60
222,30	370,34	329,68	104,14	115,36	36,82
243,46	370,01	175,17	107,05	130,41	22,20
288,84	323,26	120,59	99,91	95,49	35,10
219,23	373,99	303,61	94,85	182,07	24,82
218,10	288,62	336,34	70,21	48,39	31,40
284,97	143,88	288,41	142,16	250,45	29,37
234,70	225,05	245,23	133,21	107,05	24,82
307,44	101,74	354,53	71,08	71,94	85,99
221,18	318,08	364,31	69,33	74,47	33,30
310,43	199,82	323,64	45,77	129,46	47,10
247,98	314,57	195,77	115,36	330,24	64,73
282,15	297,66	137,76	81,57	135,05	42,99
312,41	390,90	259,39	75,29	135,05	27,19
81,57	300,14	245,73	156,99	117,48	24,82
363,97	300,34	278,19	83,81	170,54	44,40
384,55	251,67	353,84	92,21	88,81	45,77
223,95	170,90	164,65	108,20	183,08	29,37
321,54	177,61	98,67	82,33	87,41	36,82
286,27	333,77	296,21	66,61	94,85	77,71
212,95	267,58	135,05	100,52	58,74	41,54
227,23	176,92	115,90	101,13	56,60	22,20
259,15	352,62	179,68	167,99	190,99	24,82
222,02	215,83	183,08	66,61	31,40	42,99
425,33	362,10	281,71	177,27	19,23	44,40
368,51	148,93	293,07	67,52	50,87	27,19
431,08	345,91	471,49	132,75	49,64	50,87
369,01	372,83	259,39	350,16	31,40	50,87
332,29	349,99	314,57	110,45	22,20	66,61
294,54	364,31	180,37	80,05	29,37	56,60
233,38	313,39	289,26	50,87	36,82	33,30

Continuación del apéndice 41.

187,40	198,27	441,67	77,71	53,24	35,10
414,32	294,96	296,21	83,81	40,02	24,82
361,08	311,42	320,58	76,10	27,19	36,82
200,12	253,63	221,46	29,37	41,54	35,10
191,95	300,34	166,51	50,87	22,20	29,37
167,25	251,92	253,38	27,19	56,60	52,07
303,61	293,28	286,27	80,82	47,10	38,45
226,96	365,82	257,24	80,82	29,37	41,54
375,63	211,50	125,59	94,19	56,60	50,87
330,24	298,69	483,11	77,71	59,78	65,67
371,84	186,09	253,38	78,50	48,39	27,19
407,42	304,01	228,58	67,52	38,45	31,40
199,20	463,32	244,22	61,81	47,10	44,40
234,96	169,81	364,64	140,42	33,30	44,40
430,80	273,05	122,11	61,81	59,78	36,82
237,05	143,03	255,56	44,40	41,54	40,02
330,80	360,91	114,83	64,73	40,02	36,82
397,47	248,72	376,78	71,94	128,02	35,10
209,75	196,71	205,89	31,40	109,89	61,81
225,05	248,97	394,04	35,10	24,82	42,99
120,07	425,90	35,10	27,19	63,77	29,37
143,03	121,60	38,45	31,40	27,19	41,54
146,43	295,38	54,38	33,30	19,23	27,19
345,56	335,61	49,64	45,77	27,19	35,10
42,99	214,39	133,67	66,61	29,37	24,82
60,80	186,09	63,77	76,91	29,37	29,37
131,35	287,55	94,85	33,30	24,82	22,20
81,57	253,38	74,47	38,45	22,20	27,19
192,27	344,31	71,94	27,19	19,23	41,54
182,41	283,24	62,80	53,24	24,82	33,30
69,33	61,81	33,30	58,74	33,30	35,10
50,87	105,90	80,05	54,38	33,30	38,45
50,87	48,39	68,43	31,40	58,74	35,10
96,78	42,99	41,54	40,02	35,10	33,30
50,87	55,50		35,10	35,10	24,82
80,05	66,61		50,87	33,30	36,82
106,48	50,87		36,82	31,40	33,30
38,45	75,29		22,20	24,82	24,82
128,02	92,21			19,23	36,82
	52,07			15,70	33,30
	42,99			24,82	24,82
	24,82			31,40	36,82
	92,88			44,40	33,30
				36,82	27,19
				61,81	38,45
				24,82	35,10
				31,40	35,10
				33,30	19,23
				24,82	66,61
				27,19	55,50
				35,10	36,82

Continuación del apéndice 41.

				33,30	33,30
				45,77	42,99
				22,20	36,82
				29,37	31,40
				27,19	41,54
				27,19	22,20
				31,40	36,82
				22,20	29,37
				15,70	44,40
				33,30	45,77
					44,40
					45,77
					19,23
					15,70
					19,23
					36,82
					53,24
					31,40
					22,20
					24,82
					33,30
					33,30
					19,23
					27,19
					22,20
					31,40
					29,37
					24,82

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 42. Diámetros de poro de la membrana 3 A

Membrana 3 A (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
317,69	220,91	85,99	73,64	120,59	89,50
72,79	127,06	194,19	104,73	94,19	85,99
200,74	106,48	123,11	61,81	62,80	126,08
67,52	192,59	155,41	80,05	35,10	42,99
218,66	167,25	146,85	58,74	57,68	80,05
196,71	105,90	114,29	73,64	58,74	83,07
240,66	317,49	47,10	27,19	85,99	77,71
150,17	295,17	118,00	44,40	95,49	174,11
44,40	210,62	68,43	92,21	65,67	82,33
70,21	133,67	158,55	53,24	53,24	40,02
100,52	166,88	206,49	36,82	66,61	71,08
82,33	233,38	98,04	59,78	73,64	27,19
125,10	71,08	77,71	47,10	67,52	49,64
125,10	184,42	80,82	53,24	67,52	69,33
356,44	236,79	66,61	35,10	85,99	35,10
298,28	109,33	99,91	41,54	35,10	40,02
401,02	159,71	265,26	40,02	59,78	49,64
404,08	66,61	155,41	127,54	50,87	108,20
377,43	95,49	214,68	75,29	61,81	53,24
320,20	259,87	332,10	68,43	42,99	44,40
117,48	143,46	266,88	50,87	91,54	36,82
229,12	329,49	303,61	27,19	52,07	139,09
150,17	201,35	223,95	65,67	169,81	114,83
143,03	95,49	196,71	77,71	1075,93	52,07
124,11	217,53	282,80	47,10	300,96	72,79
221,46	144,31	286,70	41,54	225,87	72,79
443,62	61,81	207,08	29,37	116,96	31,40
367,00	166,51	200,74	58,74	56,60	57,68
337,80	332,66	252,41	27,19	183,08	57,68
192,59	90,18	195,77	24,82	80,05	29,37
269,18	123,61	204,99	33,30	122,11	35,10
399,02	196,40	306,63	52,07	112,66	40,02
383,26	111,01	275,52	41,54	121,60	47,10
379,87	268,72	119,56	55,50	108,77	44,40
306,84	189,69	227,50	55,50	94,85	86,70
308,24	288,62	248,97	50,87	65,67	132,75
292,02	245,98	263,16	68,43	71,94	237,05
201,96	259,39	221,74	41,54	47,10	146,01
290,96	217,53	230,99	27,19	45,77	47,10
166,88	319,43	225,32	366,50	58,74	126,08
416,10	240,92	231,53	85,27	49,64	83,81
128,02	332,84	177,96	120,07	80,05	216,40
240,66	193,23	406,06	197,33	36,82	113,21
130,41	153,82	294,96	135,96	42,99	128,50
101,74	190,34	197,33	292,23	47,10	165,03
224,23	192,27	305,43	145,59	44,40	123,11

Continuación del apéndice 42.

254,84	228,04	253,87	335,06	44,40	166,51
289,90	298,69	218,94	67,52	56,60	197,65
341,43	261,28	298,28	121,60	31,40	265,96
170,90	364,81	177,61	42,99	22,20	118,53
363,46	432,08	120,59	59,78	54,38	146,01
91,54	240,41	260,81	71,94	71,94	82,33
96,78	240,41	241,94	55,50	97,41	85,99
176,22	164,28	169,45	59,78	57,68	78,50
186,42	245,98	237,83	36,82	40,02	53,24
225,32	230,73	343,95	252,90	50,87	169,45
268,72	336,16	149,35	121,10	22,20	160,48
232,06	309,83	116,96	128,98	44,40	48,39
208,57	264,80	204,99	52,07	29,37	59,78
289,05	332,66	201,66	279,95	57,68	72,79
308,44	184,09	260,58	92,88	22,20	420,96
258,92	187,73	85,99	55,50	72,79	95,49
347,87	346,98	189,04	27,19		59,78
270,32	146,85	255,56	24,82		128,50
207,38	177,96	126,08	27,19		52,07
289,05	313,98	334,14	29,37		75,29
294,96	283,02	308,24	24,82		80,05
139,54	228,85	243,71	38,45		42,99
229,12	240,15	216,97	27,19		55,50
383,58	320,97	128,98	22,20		100,52
255,80	162,01	174,46	49,64		60,80
338,71	275,07	63,77	48,39		111,01
279,07	289,48	246,73	50,87		137,31
203,48	180,71	329,49	33,30		176,22
209,75	195,45	193,23	33,30		162,39
255,08	129,93	88,81	47,10		110,45
233,65	111,56	48,39	90,18		94,19
235,22	372,17	116,43	84,54		150,58
243,97	189,37	91,54	71,08		78,50
259,15	251,92	102,35	29,37		35,10
314,76	411,78		24,82		36,82
249,21	110,45		22,20		41,54
253,14	152,61		15,70		33,30
150,17	236,27		33,30		29,37
216,68	267,81		15,70		42,99
267,35	86,70		33,30		40,02
296,21	169,08		15,70		44,40
397,47	83,81		19,23		33,30
408,33	71,94		27,19		27,19
184,09	153,42				24,82
111,56	93,54				27,19
24,82	77,71				42,99
59,78	36,82				24,82
58,74					19,23
52,07					15,70

Continuación del apéndice 42.

38,45					27,19
44,40					19,23
19,23					49,64
29,37					35,10
					47,10
					24,82
					19,23
					29,37
					48,39

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 43. Diámetros de poro de la membrana 3 B

Membrana 3 B (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
90,18	272,14	289,90	71,08	179,68	172,69
80,05	155,41	88,81	92,21	196,08	92,21
52,07	180,37	149,76	69,33	202,57	123,61
68,43	179,34	286,27	278,85	115,36	36,82
211,79	229,39	91,54	198,27	100,52	66,61
110,45	225,05	141,73	111,56	76,10	156,20
109,89	176,22	84,54	128,50	135,05	45,77
72,79	159,71	339,62	172,69	99,91	50,87
115,90	188,06	87,41	66,61	170,90	52,07
119,56	154,62	104,73	107,63	83,07	33,30
156,99	220,35	241,94	61,81	185,09	54,38
133,67	232,85	143,88	57,68	173,05	112,11
133,21	228,31	147,69	80,05	179,00	81,57
150,58	132,28	212,37	44,40	266,65	152,61
52,07	116,43	128,02	41,54	104,73	116,43
88,81	118,00	67,52	35,10	155,81	108,77
58,74	208,57	93,54	40,02	141,73	72,79
50,87	114,29	117,48	44,40	154,22	57,68
85,27	94,85	90,86	72,79	100,52	36,82
150,99	132,28	49,64	48,39	135,96	45,77
92,88	200,43	83,07	98,67	92,88	86,70
104,14	229,12	50,87	69,33	112,66	87,41
146,43	149,35	77,71	102,95	121,60	75,29
92,21	202,88	114,29	136,86	66,61	133,21
85,99	169,81	67,52	66,61	98,67	71,08
35,10	180,71	63,77	85,27	88,81	42,99
79,28	182,74	116,96	185,42	104,73	33,30
87,41	111,56	287,34	109,89	158,55	40,02
144,31	123,61	174,11	102,95	118,00	77,71
287,34	235,49	392,00	136,86	239,89	63,77

Continuación del apéndice 43.

56,60	251,43	302,59	109,89	102,95	24,82
55,50	125,10	561,56	102,95	87,41	29,37
53,24	92,88	166,88	57,68	108,77	75,29
77,71	83,81	185,75	69,33	71,94	52,07
63,77	80,05	217,82	56,60	111,01	36,82
53,24	62,80	452,56	57,68	163,53	52,07
89,50	469,27	526,91	129,93	148,93	54,38
53,24	262,46	532,38	137,76	156,60	31,40
49,64	166,88	380,20	67,52	269,41	48,39
59,78	271,46	204,69	133,21	243,46	60,80
339,62	432,51	369,34	140,42	273,05	69,33
146,01	310,63	391,69	141,73	300,34	45,77
215,54	240,15	143,03	92,88	349,81	45,77
192,91	457,70	137,31	183,08	134,59	47,10
114,83	258,20	283,45	214,68	417,58	153,02
118,00	359,54	283,45	27,19	121,60	122,61
115,36	283,67	221,18	47,10	120,59	60,80
282,36	235,49	326,68	64,73	231,26	44,40
272,14	404,23	285,19	129,93	265,96	49,64
365,15	349,46	204,09	35,10	204,09	120,59
271,46	207,98	154,22	40,02	104,73	67,52
245,23	323,26	268,50	33,30	139,54	48,39
159,33	287,98	226,69	33,30	128,98	71,08
304,82	441,95	367,67	35,10	85,99	177,27
322,69	376,78	399,02	35,10	64,73	55,50
169,08	138,65	362,95	24,82	76,10	70,21
229,39	217,25	407,27	83,07	70,21	33,30
270,32	375,30	283,45	24,82	102,95	64,73
267,35	470,45	427,06	57,68	61,81	44,40
227,77	300,34	301,36	76,10	81,57	41,54
250,69	252,16	398,55	86,70	67,52	82,33
288,84	266,65	438,87	61,81	49,64	33,30
377,92	262,93	366,33	74,47	155,81	89,50
259,87	376,94	352,09	94,19	89,50	47,10
268,04	311,42	199,82	164,65	99,29	52,07
199,20	272,14	249,21	63,77	91,54	22,20
375,63	310,63	436,76	55,50	132,75	65,67
342,33	302,79	552,37	48,39	127,06	114,83
526,56	298,49	517,35	45,77	69,33	63,77
379,87	286,70	281,93	38,45	72,79	153,02
180,37	303,61	148,93	81,57	135,05	174,82
496,20	475,01	480,81	93,54	96,78	139,98
251,43	414,91	505,79	104,73	81,57	102,95
195,77	243,46	294,33	124,61	92,21	138,65
466,90	250,94	275,29	160,48	95,49	133,21
368,84	237,05	261,99	262,46	156,20	94,85
462,52	329,87	360,74	312,21	116,96	119,56
328,56	346,09	500,65	158,94	113,21	75,29
414,62	403,93	239,38	170,17	190,66	42,99
560,24	220,91	419,49	68,43	71,08	358,51

Continuación del apéndice 43.

302,18	169,45	216,97	118,53	36,82	235,75
176,57	372,50	497,32	214,39	114,29	70,21
290,75	180,37	260,81	246,73	76,10	173,05
321,93	469,53	392,16	121,10	83,07	59,78
455,54	316,91	464,52	69,33	99,29	200,43
740,52	313,39	378,57	268,04		114,29
290,96	464,65	209,16	141,29		35,10
321,35	204,09	297,04	54,38		76,91
152,61	315,74	382,30	56,60		181,73
515,92	396,38	234,70	33,30		107,05
287,77	541,56	471,23	56,60		52,07
366,50	56,60	571,13	33,30		57,68
148,93	77,71	268,50	56,60		47,10
244,72	150,17	302,79	73,64		60,80
339,44	71,94	348,93	135,05		61,81
315,35	240,66	133,21	151,80		41,54
142,16	113,75	528,90	86,70		60,80
382,46	88,81	278,85	75,29		69,33
209,16	123,11	266,88	52,07		56,60
311,62	102,35	537,91	85,99		65,67
392,63	98,04	296,62	98,67		48,39
268,04	75,29	504,69	71,94		116,96
169,45	122,61	274,40	75,29		57,68
212,95	81,57	242,19	59,78		36,82
270,78	80,82	184,42	253,63		27,19
180,71	84,54	222,30	61,81		48,39
528,66	63,77	314,37	29,37		15,70
347,87	93,54	233,65	82,33		31,40
381,33	76,10	419,93	91,54		48,39
383,91	60,80	556,26	114,29		27,19
111,56	66,61	524,57	50,87		31,40
108,77	58,74	230,19	45,77		35,10
152,61	74,47	233,38	52,07		35,10
273,27		332,47	60,80		81,57
60,80		522,33	60,80		50,87
33,30		637,22	63,77		57,68
36,82		248,97	41,54		38,45
33,30		628,84	49,64		24,82
84,54		504,08	44,40		48,39
65,67		181,05	54,38		48,39
33,30		200,12	148,52		65,67
71,08		420,81	140,85		59,78
		254,11	127,06		42,99
		408,02	84,54		58,74
		397,78	81,57		45,77
		174,11	88,11		52,07
		155,81	63,77		29,37
		123,61	35,10		49,64
		48,39	35,10		55,50
		67,52	29,37		29,37

Continuación del apéndice 43.

		70,21	29,37		24,82
		240,66	36,82		50,87
		93,54	35,10		35,10
			64,73		50,87
			60,80		53,24
			38,45		40,02
			29,37		45,77
			70,21		87,41
			35,10		40,02
			54,38		35,10
			62,80		121,60
			36,82		24,82
			31,40		59,78
			36,82		56,60
			75,29		68,43
			72,79		104,73
			96,78		
			45,77		
			50,87		
			95,49		
			11,10		
			48,39		
			54,38		
			29,37		
			29,37		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 44. Diámetros de poro de la membrana 4 A

Membrana 4 A (μm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
120,59	162,77	204,99	60,80	61,81	85,27
101,74	153,02	97,41	92,21	56,60	105,90
108,77	147,69	229,93	99,29	114,83	69,33
104,14	104,73	74,47	68,43	90,18	94,19
101,13	170,90	426,34	85,27	85,27	42,99
124,11	287,98	142,59	57,68	101,74	48,39
163,53	92,88	387,26	36,82	80,82	54,38
361,93	165,77	203,79	63,77	84,54	57,68
127,54	172,69	369,85	47,10	55,50	99,29
135,50	272,82	185,75	40,02	84,54	61,81
171,97	217,25	236,27	50,87	115,36	45,77
97,41	296,00	136,41	47,10	79,28	35,10

Continuación del apéndice 44.

94,19	200,74	114,83	47,10	62,80	87,41
88,11	135,50	228,58	58,74	74,47	68,43
50,87	62,80	229,66	68,43	72,79	84,54
186,09	148,10	288,84	113,75	64,73	107,63
98,67	140,85	248,47	143,46	45,77	115,36
92,21	165,03	221,46	54,38	108,77	136,41
78,50	108,77	242,70	89,50	70,21	186,42
47,10	197,96	337,44	94,19	127,54	79,28
60,80	118,53	456,08	90,18	53,24	66,61
42,99	113,21	211,21	112,66	89,50	89,50
108,77	75,29	200,74	92,21	47,10	67,52
86,70	151,80	158,16	44,40	44,40	98,67
150,17	238,09	91,54	86,70	55,50	58,74
87,41	126,57	210,04	59,78	55,50	38,45
35,10	217,82	180,37	83,07	72,79	40,02
50,87	181,05	128,98	59,78	75,29	47,10
33,30	94,19	204,99	53,24	74,47	123,61
54,38	119,56	240,41	60,80	81,57	41,54
59,78	120,07	153,42	59,78	62,80	38,45
57,68	121,60	103,54	70,21	76,10	48,39
79,28	220,63	64,73	74,47	66,61	38,45
69,33	99,91	92,21	201,96	86,70	44,40
169,81	80,82	132,28	156,20	79,28	62,80
66,61	146,43	197,96	166,14	56,60	99,29
108,77	90,18	105,90	103,54	44,40	55,50
330,24	240,66	140,85	171,26	41,54	68,43
192,27	312,01	176,22	38,45	101,74	41,54
169,81	457,03	333,95	31,40	67,52	56,60
344,31	230,99	106,48	33,30	70,21	69,33
68,43	130,41	267,35	35,10	82,33	45,77
320,20	200,43	190,34	40,02	41,54	47,10
246,98	414,76	114,29	42,99	60,80	61,81
137,76	281,27	144,74	65,67	56,60	45,77
224,23	394,04	104,73	35,10	61,81	90,86
291,60	298,69	162,77	40,02	66,61	33,30
166,51	248,47	149,35	42,99	71,08	225,87
197,65	163,15	172,33	65,67	84,54	161,25
166,51	277,30	162,77	35,10	59,78	221,18
214,11	88,11	222,85	36,82	48,39	92,21
224,23	226,69	402,70	40,02	49,64	101,74
181,05	380,68	304,01	53,24	105,31	73,64
206,79	164,65	296,83	67,52	70,21	169,08
181,73	325,92	239,12	33,30	27,19	71,08
281,93	273,05	143,03	33,30	33,30	45,77
109,89	332,10	154,22	50,87	53,24	158,55
265,26	193,55	145,16	45,77	60,80	174,11
262,70	332,47	206,79	54,38	55,50	163,15
151,40	165,77	317,30	45,77	55,50	133,21
356,96	157,38	140,85	63,77	31,40	157,77

Continuación del apéndice 44.

190,66	398,09	180,71	119,04	69,33	128,50
121,60	214,39	189,04	87,41	40,02	40,02
461,46	335,24	184,76	111,01	62,80	54,38
256,28	206,79	120,07	88,81	49,64	36,82
345,74	254,35	136,86	66,61	42,99	35,10
290,96	200,43	93,54	112,11	52,07	62,80
239,38	275,96	282,80	69,33	62,80	47,10
173,76	258,68	407,57	89,50	40,02	29,37
148,10	287,34	200,74	228,04	49,64	59,78
334,87	174,82	233,65	108,77	75,29	29,37
396,69	437,47	154,22	112,11	52,07	59,78
266,88	302,79	170,54	112,66	57,68	29,37
164,28	216,11	230,19	107,63	66,61	105,90
287,77	229,12	273,95	81,57	44,40	35,10
218,66	351,92	127,54	91,54	70,21	38,45
399,79	375,30	450,51	88,81	50,87	48,39
336,89	273,72	175,87	303,40	55,50	59,78
166,51	106,48	217,82	66,61	76,10	47,10
241,43	263,87	242,19	296,42	239,89	24,82
165,77	319,81	234,70	61,81	116,96	22,20
118,53	349,99	356,44	88,11	76,10	40,02
150,17	182,07	336,16	42,99	107,63	31,40
63,77	274,62	259,15	490,83	77,71	15,70
159,71	286,27	304,01	62,80	140,85	15,70
173,05	417,58	343,59	59,78	95,49	35,10
295,17	251,43	375,63	216,11	144,74	60,80
86,70	182,41	225,60	60,80	144,74	27,19
67,52	159,71	265,96	65,67	208,27	67,52
118,00	302,18	248,22	177,27	100,52	41,54
209,45	231,79	253,14	53,24	93,54	44,40
114,83	375,47	233,65	168,35	128,98	35,10
70,21	233,65	265,96	148,93	111,01	27,19
121,10	293,07	245,98	102,95	115,90	41,54
157,77	279,29	198,89	65,67	171,62	36,82
196,40	154,22	182,74	122,11	98,04	52,07
88,11	241,94	222,85	158,55	175,87	44,40
83,07	171,97	206,19	60,80	76,91	33,30
146,43	206,49	204,09	78,50	62,80	41,54
150,17	416,69	167,25	69,33	54,38	45,77
41,54	194,82	315,35	49,64	78,50	59,78
24,82	191,95	112,66	44,40	35,10	45,77
22,20	112,11	145,16	49,64	61,81	48,39
72,79	254,35	83,81	44,40	49,64	47,10
36,82	253,87	230,19	49,64	98,04	55,50
86,70	261,05	56,60	41,54	118,00	55,50
44,40	155,81	62,80	42,99	54,38	63,77
63,77	252,65	42,99	40,02	53,24	57,68
72,79	118,53	76,10	63,77	107,05	31,40
52,07	84,54	162,01	48,39	116,43	56,60

Continuación del apéndice 44.

45,77	204,99	58,74	47,10	63,77	66,61
29,37	226,41	134,59	29,37	84,54	50,87
42,99	240,41	109,89	53,24	71,08	22,20
66,61	397,62	144,74	49,64	111,01	
58,74	155,81	152,21	66,61	126,57	
66,61	141,29	163,15	155,81	131,82	
65,67	85,99	110,45	205,29	70,21	
76,91	88,81	237,31	33,30	76,91	
42,99	70,21	134,13	29,37	55,50	
58,74	58,74	163,15	38,45	29,37	
52,07	104,14	200,12	42,99	33,30	
38,45	60,80	281,71	35,10	48,39	
36,82	116,43	216,68	42,99	58,74	
50,87	171,97	205,89	40,02	53,24	
27,19	110,45	159,33	40,02	60,80	
	94,19	241,68	49,64	59,78	
	50,87	147,27	38,45	35,10	
	74,47	180,37	52,07	31,40	
	71,08	33,30	61,81	52,07	
		44,40	59,78	55,50	
		141,73	77,71	53,24	
		59,78	55,50	29,37	
		109,33	40,02	45,77	
			50,87	71,08	
			64,73	40,02	
			44,40	102,35	
			35,10	86,70	
			31,40	40,02	
			41,54	35,10	
			41,54	45,77	
			38,45	41,54	
			57,68	54,38	
			36,82	22,20	
			63,77	87,41	
				48,39	
				29,37	
				54,38	
				52,07	
				33,30	
				40,02	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 45. **Diámetros de poro de la membrana 4 B**

Membrana 4 B (µm)					
arriba 1	arriba 2	arriba 3	abajo 1	abajo 2	abajo 3
88,11	209,16	81,57	65,67	57,68	41,54
129,46	50,87	44,40	62,80	60,80	104,14
73,64	50,87	177,27	55,50	55,50	38,45
45,77	68,43	238,35	71,94	52,07	56,60
40,02	214,39	245,73	54,38	81,57	84,54
78,50	41,54	188,72	33,30	48,39	108,77
48,39	64,73	145,59	74,47	64,73	54,38
110,45	88,11	107,63	45,77	63,77	35,10
77,71	135,05	162,77	70,21	56,60	90,86
127,54	110,45	285,40	77,71	63,77	55,50
68,43	73,64	175,17	44,40	54,38	45,77
47,10	64,73	265,50	42,99	125,10	128,50
47,10	64,73	268,95	44,40	144,74	123,11
54,38	59,78	172,33	44,40	80,05	69,33
67,52	29,37	107,05	44,40	81,57	49,64
80,05	141,73	174,82	83,81	67,52	114,83
54,38	33,30	227,50	80,82	45,77	70,21
99,29	56,60	208,57	42,99	64,73	77,71
135,50	69,33	62,80	56,60	36,82	40,02
174,46	41,54	44,40	94,85	41,54	36,82
99,91	74,47	53,24	134,13	24,82	62,80
78,50	35,10	131,82	95,49	33,30	50,87
81,57	54,38	92,21	57,68	167,99	115,36
115,90	42,99	103,54	80,05	55,50	44,40
48,39	58,74	65,67	77,71	60,80	52,07
40,02	33,30	69,33	143,88	82,33	48,39
71,94	63,77	77,71	59,78	38,45	35,10
44,40	70,21	107,05	54,38	29,37	105,90
35,10	155,41	126,57	69,33	35,10	68,43
74,47	145,16	110,45	87,41	42,99	55,50
77,71	200,43	77,71	71,94	24,82	44,40
45,77	186,42	59,78	48,39	77,71	55,50
35,10	131,35	64,73	126,57	82,33	76,10
42,99	107,05	67,52	109,89	41,54	74,47
27,19	89,50	53,24	96,14	31,40	66,61
62,80	71,08	105,31	129,46	74,47	38,45
38,45	73,64	50,87	100,52	33,30	52,07
48,39	97,41	42,99	41,54	33,30	52,07
38,45	211,21	109,89	44,40	31,40	68,43

Continuación del apéndice 45.

68,43	90,86	29,37	35,10	45,77	71,08
57,68	44,40	53,24	61,81	45,77	49,64
49,64	313,78	56,60	80,05	36,82	41,54
41,54	174,46	64,73	63,77	27,19	98,04
38,45	157,77	68,43	36,82	65,67	79,28
41,54	104,73	442,65	91,54	45,77	71,08
49,64	286,48	302,59	69,33	53,24	77,71
53,24	101,74	113,21	62,80	47,10	59,78
49,64	84,54	80,82	74,47	40,02	29,37
73,64	59,78	102,95	63,77	38,45	27,19
99,91	277,97	88,11	74,47	64,73	19,23
58,74	257,96	109,89	42,99	45,77	40,02
75,29	243,21	245,98	48,39	78,50	44,40
391,22	92,88	64,73	71,94	36,82	60,80
48,39	176,57	198,89	82,33	33,30	49,64
204,99	275,74	293,49	72,79	35,10	50,87
416,99	320,01	278,41	54,38	52,07	27,19
325,73	114,83	105,90	31,40	19,23	49,64
147,27	388,21	183,08	24,82	19,23	41,54
119,04	197,65	301,36	24,82	38,45	24,82
114,29	235,49	173,05	35,10	38,45	127,54
80,82	128,02	222,85	48,39	41,54	101,13
204,09	266,42	173,40	42,99	50,87	58,74
133,67	93,54	226,69	40,02	24,82	24,82
86,70	179,68	226,41	36,82	44,40	41,54
134,13	299,11	172,69	52,07	47,10	29,37
140,42	135,05	271,23	40,02	41,54	59,78
144,74	360,57	237,57	57,68	27,19	92,21
115,36	180,37	215,25	62,80	36,82	35,10
58,74	276,63	300,96	53,24	31,40	29,37
64,73	398,40	152,61	54,38	27,19	29,37
268,50	254,60	204,39	35,10	76,91	22,20
49,64	236,01	454,46	117,48	36,82	24,82
66,61	135,50	276,41	95,49	27,19	49,64
106,48	96,78	318,08	75,29	29,37	63,77
119,04	142,59	245,23	40,02	284,54	22,20
90,86	154,22	303,40	90,86	71,08	56,60
60,80	85,27	392,32	56,60	62,80	19,23
80,82	55,50	361,42	44,40	71,08	79,28
61,81	45,77	396,38	35,10	52,07	40,02
212,95	165,40	299,11	40,02	71,94	31,40
73,64	96,14	380,36	57,68	93,54	24,82
122,11	104,73	260,58	61,81	123,11	33,30
86,70	311,02	199,20	52,07	122,61	33,30
108,20	233,38	240,41	62,80	106,48	45,77

Continuación del apéndice 45.

227,23	314,18	110,45	80,82	107,63	68,43
357,48	135,05	305,02	98,67	123,61	31,40
162,39	388,85	144,31	85,99	111,56	29,37
200,12	226,14	358,51	50,87	86,70	50,87
90,86	104,14	376,94	197,65	198,58	71,08
103,54	123,11	135,96	104,14	82,33	75,29
86,70	348,75	231,79	105,90	93,54	54,38
79,28	122,11	237,31	94,85	100,52	45,77
87,41	204,99	450,10	47,10	60,80	76,91
185,09	148,52	139,98	50,87	171,26	69,33
376,78	454,46	207,08	95,49	130,88	88,11
124,11	313,00	202,27	67,52	187,08	104,14
243,46	294,54	313,78	33,30	193,87	122,61
118,53	311,42	132,28	57,68	134,13	81,57
261,76	217,53	190,99	38,45	119,56	47,10
132,75	310,83	66,61	38,45	83,07	40,02
113,75	140,85	160,48	42,99	24,82	35,10
297,25	145,59	145,59	49,64	31,40	35,10
233,65	433,50	290,75	41,54	58,74	74,47
164,65	248,72	149,35	86,70	99,29	98,04
297,45	380,03	295,17	128,98	58,74	71,08
154,22	264,33	214,11	50,87	99,29	33,30
234,44	249,46	198,58	71,08	71,94	38,45
254,11	191,95	125,59	107,05	62,80	50,87
83,07	214,11	112,66	118,53	22,20	45,77
235,75	158,55	183,42	58,74	40,02	52,07
52,07	239,38	121,10	33,30	22,20	48,39
157,77	222,30	366,67	35,10	36,82	49,64
339,26	196,71	190,99	24,82	33,30	66,61
218,10	200,74	214,97	91,54	87,41	38,45
125,10	388,06	130,88	49,64	33,30	35,10
224,23	266,65	74,47	52,07	44,40	88,81
348,75	229,66	44,40	57,68	22,20	72,79
358,17	92,21	54,38	42,99	33,30	27,19
216,97	35,10	69,33	24,82	38,45	22,20
176,92	150,17	75,29	47,10	55,50	74,47
157,77	356,27	148,10	29,37	22,20	36,82
215,25	90,18	35,10	33,30	36,82	47,10
265,50	33,30	81,57	44,40	35,10	38,45
320,58	35,10	29,37	24,82	22,20	50,87
225,60	24,82	36,82	48,39	40,02	55,50
397,31	48,39	52,07	55,50	38,45	31,40
127,06	24,82	78,50	29,37	29,37	24,82
240,15	24,82	50,87	22,20	31,40	31,40
136,86	50,87	171,97	24,82	33,30	75,29

Continuación del apéndice 45.

145,59	70,21	77,71	19,23	31,40	38,45
231,53	55,50	45,77	35,10	52,07	78,50
268,50	61,81		40,02	44,40	75,29
272,82	49,64		19,23	22,20	47,10
270,55	54,38		22,20	29,37	42,99
179,34	71,08		22,20	22,20	48,39
274,62			22,20	19,23	69,33
76,91			11,10	33,30	70,21
294,33			11,10	38,45	101,74
242,45			27,19	27,19	67,52
323,26			48,39	73,64	40,02
231,53			33,30	50,87	33,30
349,63			42,99	22,20	27,19
181,73			44,40	19,23	27,19
126,57			36,82	29,37	22,20
249,96			44,40	15,70	42,99
132,75			36,82	19,23	148,52
355,40			44,40	35,10	40,02
142,59			36,82	27,19	48,39
134,13			38,45	19,23	86,70
149,76			40,02	11,10	29,37
248,97			52,07	11,10	45,77
135,96			31,40	31,40	22,20
120,07			57,68	19,23	27,19
41,54			33,30	22,20	19,23
40,02			29,37	44,40	19,23
131,35			40,02		22,20
294,75			44,40		24,82
237,31			40,02		15,70
171,97			19,23		36,82
119,04			47,10		22,20
249,21			31,40		24,82
214,97			49,64		55,50
424,16			60,80		42,99
199,51			44,40		45,77
356,27			29,37		33,30
288,41			36,82		24,82
213,24			52,07		61,81
269,87			36,82		41,54
175,52			44,40		49,64
180,03			29,37		24,82
143,03			36,82		19,23
88,81			52,07		29,37
49,64			36,82		36,82
41,54			44,40		40,02

Continuación del apéndice 45.

29,37			31,40		31,40
47,10			63,77		24,82
35,10			40,02		15,70
35,10			50,87		15,70
24,82			40,02		15,70
48,39			38,45		11,10
27,19			48,39		0,00
36,82			31,40		11,10
40,02			27,19		49,64
29,37			76,91		19,23
55,50			42,99		31,40
31,40			33,30		22,20
41,54			19,23		
38,45			35,10		
128,98			36,82		
35,10			19,23		
68,43			0,00		
44,40			19,23		
19,23			19,23		
			24,82		
			54,38		

Fuente: elaboración propia.

A-6. DATOS PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Apéndice 46. **Datos de diámetro para distribución de frecuencia de la parte superior de las membranas**

INTERVALO DIÁMETRO (µm)	MEMBRANA 1 A	MEMBRANA 2 A	MEMBRANA 3 A	MEMBRANA 4 A
0	0,00	0,00	3,00	4,00
30	6,00	7,00	9,00	30,00
90	12,00	17,00	17,00	41,00
130	15,00	24,00	24,00	41,00
175	20,00	23,00	18,00	36,00
220	18,00	21,00	22,00	49,00
265	23,00	26,00	31,00	41,00
310	12,00	18,00	28,00	35,00
355	25,00	29,00	37,00	30,00
400	19,00	25,00	20,00	23,00
445	18,00	24,00	15,00	10,00
490	16,00	19,00	13,00	16,00
535	17,00	12,00	8,00	4,00
580	8,00	17,00	8,00	10,00
625	4,00	10,00	2,00	1,00
670	4,00	5,00	0,00	4,00
715	3,00	0,00	0,00	0,00
760	0,00	0,00		0,00
805	0,00	0,00		
850	0,00	1,00		
895	0,00	0,00		
940	0,00	0,00		
985	0,00			
1030	1,00			
TOTAL	221,00	278,00	255,00	375,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 47. **Datos de diámetro para distribución de frecuencia de la parte inferior de las membranas**

INTERVALO DIÁMETRO (µm)	PARTE INFERIOR			
	MEMBRANA 1 A	MEMBRANA 2 A	MEMBRANA 3 A	MEMBRANA 4 A
0	1,00	3,00	8,00	2,00
20	14,00	28,00	53,00	56,00
40	36,00	29,00	80,00	148,00
60	32,00	28,00	32,00	87,00
80	22,00	23,00	27,00	44,00
100	17,00	8,00	11,00	32,00
120	17,00	8,00	17,00	9,00
140	10,00	6,00	4,00	10,00
160	6,00	2,00	8,00	10,00
180	3,00	2,00	3,00	1,00
200	1,00	1,00	1,00	4,00
220	1,00	0,00	2,00	4,00
240	3,00	0,00	1,00	0,00
260	3,00	0,00	2,00	0,00
280	1,00	0,00	1,00	1,00
300	1,00	0,00	1,00	1,00
320	3,00	0,00	1,00	0,00
340	3,00	0,00	0,00	0,00
360	0,00	1,00	1,00	0,00
380	1,00	0,00	0,00	0,00
400	0,00	0,00	0,00	0,00
420	1,00	0,00	1,00	0,00
440	0,00	0,00	0,00	0,00
460	0,00	1,00	0,00	0,00
480	0,00	0,00	0,00	1,00
500	0,00	1,00	0,00	0,00
520	0,00	0,00	0,00	0,00
540	0,00	0,00	0,00	
560	0,00	0,00	0,00	
580	2,00	0,00	0,00	
600	0,00	0,00	0,00	
620	0,00	0,00	0,00	
640	0,00	0,00	0,00	
660	0,00	0,00	0,00	
680	0,00	0,00	0,00	
700	1,00	0,00	0,00	
720	0,00	0,00	0,00	
740		0,00	0,00	
760		0,00	0,00	
780		1,00	0,00	

Continuación del apéndice 47.

800		0,00	0,00	
820		0,00	0,00	
840		0,00	0,00	
860		0,00	0,00	
880		0,00	0,00	
900		0,00	0,00	
920		1,00	0,00	
940		0,00	0,00	
960			0,00	
980			0,00	
1000			0,00	
1020			0,00	
1040			0,00	
1060			1,00	
1080			0,00	
TOTAL	179,00	143,00	255,00	410,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 48. **Datos de diámetro para la frecuencia acumulada de la parte superior de las membranas**

INTERVALO DIÁMETRO (µm)	MEMBRANA 1 A	MEMBRANA 2 A	MEMBRANA 3 A	MEMBRANA 4 A
0	0,00	0,00	1,18	1,07
30	2,71	2,52	4,71	9,07
90	8,14	8,63	11,37	20,00
130	14,93	17,27	20,78	30,93
175	23,98	25,54	27,84	40,53
220	32,13	33,09	36,47	53,60
265	42,53	42,45	48,63	64,53
310	47,96	48,92	59,61	73,87
355	59,28	59,35	74,12	81,87
400	67,87	68,35	81,96	88,00
445	76,02	76,98	87,84	90,67
490	83,26	83,81	92,94	94,93
535	90,95	88,13	96,08	96,00
580	94,57	94,24	99,22	98,67
625	96,38	97,84	100,00	98,93
670	98,19	99,64		100,00
715	99,55	99,64		

Continuación del apéndice 48.

760	99,55	99,64		
805	99,55	99,64		
850	99,55	100,00		
895	99,55			
940	99,55			
985	99,55			
1030	100,00			

Fuente: elaboración propia

Apéndice 49. **Datos de diámetro para la frecuencia acumulada de la parte inferior de las membranas**

INTERVALO DIÁMETRO (μm)	MEMBRANA 1 A	MEMBRANA 2 A	MEMBRANA 3 A	MEMBRANA 4 A
0	0,56	2,10	3,14	0,49
20	8,38	21,68	23,92	14,15
40	28,49	41,96	55,29	50,24
60	46,37	61,54	67,84	71,46
80	58,66	77,62	78,43	82,20
100	68,16	83,22	82,75	90,00
120	77,65	88,81	89,41	92,20
140	83,24	93,01	90,98	94,63
160	86,59	94,41	94,12	97,07
180	88,27	95,80	95,29	97,32
200	88,83	96,50	95,69	98,29
220	89,39	96,50	96,47	99,27
240	91,06	96,50	96,86	99,27
260	92,74	96,50	97,65	99,27
280	93,30	96,50	98,04	99,51
300	93,85	96,50	98,43	99,76
320	95,53	96,50	98,82	99,76
340	97,21	96,50	98,82	99,76
360	97,21	97,20	99,22	99,76
380	97,77	97,20	99,22	99,76
400	97,77	97,20	99,22	99,76
420	98,32	97,20	99,61	99,76
440	98,32	97,20	99,61	99,76
460	98,32	97,90	99,61	99,76

Continuación del apéndice 49.

480	98,32	97,90	99,61	100,00
500	98,32	98,60	99,61	
520	98,32	98,60	99,61	
540	98,32	98,60	99,61	
560	98,32	98,60	99,61	
580	99,44	98,60	99,61	
600	99,44	98,60	99,61	
620	99,44	98,60	99,61	
640	99,44	98,60	99,61	
660	99,44	98,60	99,61	
680	99,44	98,60	99,61	
700	100,00	98,60	99,61	
720		98,60	99,61	
740		98,60	99,61	
760		98,60	99,61	
780		99,30	99,61	
800		99,30	99,61	
820		99,30	99,61	
840		99,30	99,61	
860		99,30	99,61	
880		99,30	99,61	
900		99,30	99,61	
920		100,00	99,61	
940			99,61	
960			99,61	
980			99,61	
1000			99,61	
1020			99,61	
1040			99,61	
1060			100,00	

Fuente: elaboración propia.

A-7. REQUISITOS ACADÉMICOS

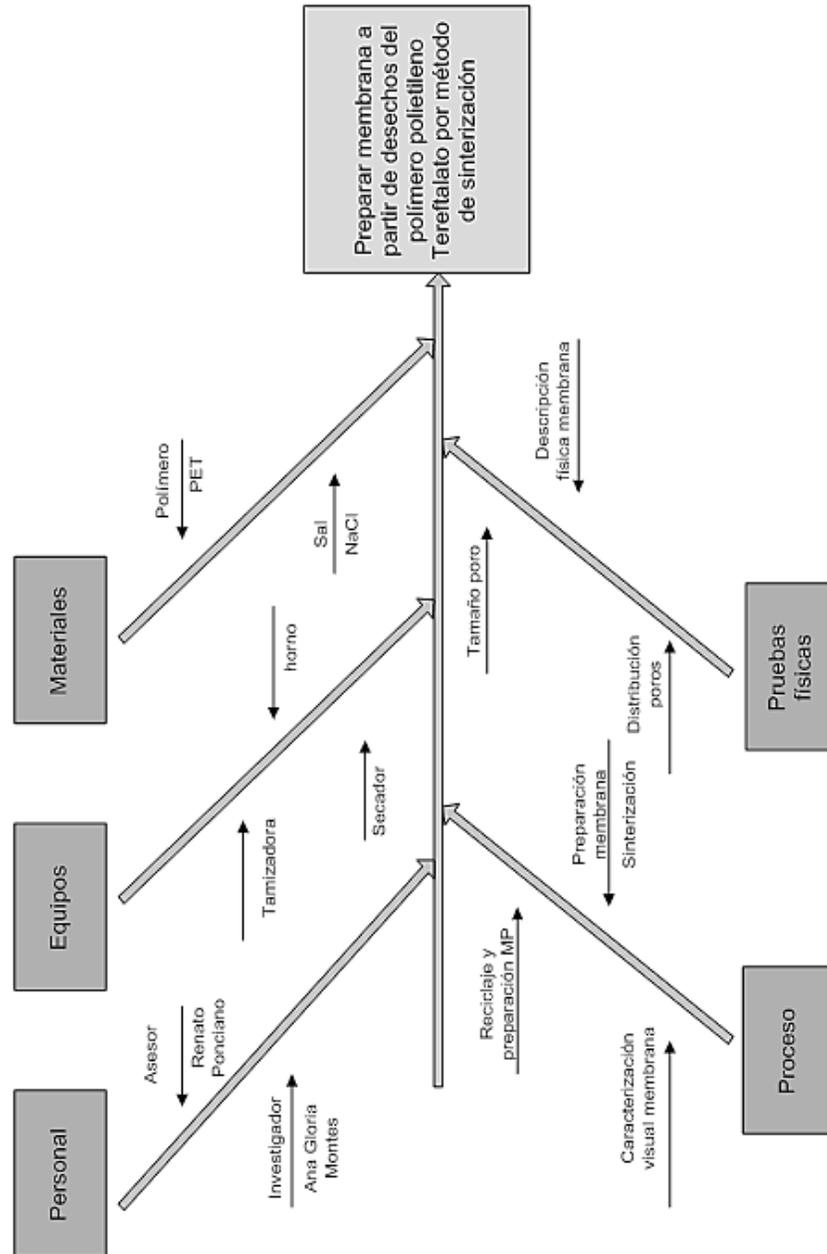
Apéndice 50. **Tabla de requisitos académicos**

Área	Cursos	Temas
Química	<ul style="list-style-type: none"> • Química 4 • Química orgánica 2 • Química ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Estados de agregación de la materia • Temperatura de fusión • Polímeros • Reciclaje de PET
Fisicoquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio de Fisicoquímica 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Práctica de ósmosis
Operaciones unitarias	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de fluidos • Transferencia de calor • Transferencia de masa • Laboratorio de Ingeniería química 1 • Separación por medio de membranas selectivas 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de tamaño de partícula • Calentamiento • Difusión • Diagramas de flujo • Membranas • Permeabilidad y selectividad • Preparación de membranas
Ciencias básicas	<ul style="list-style-type: none"> • Estadística 	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas de dispersión • Pruebas de hipótesis • Análisis de varianza • Diseño factorial
Especialización	<ul style="list-style-type: none"> • Ciencia de los materiales • Diseño de equipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Polímeros • Sinterización • Costo de equipos

Fuente: elaboración propia.

A-8. DIAGRAMA CAUSAL

Apéndice 51. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de seguridad del polietileno tereftalato⁷

Identificación de riesgos:

Resumen sobre emergencias:

Advertencia: el material fundido puede provocar quemaduras térmicas.

- Pellets inodoros de coloración transparente a blanca grisácea.
- Altas concentraciones de polvo pueden ser un riesgo de explosión.
- El procesamiento térmico puede liberar gases irritantes, vapores y/o gases.

Efectos potenciales sobre la salud:

- El polímero fundido puede adherirse a la piel y provocar quemaduras severas.
- El contacto de partículas de polietileno tereftalato con los ojos puede causar irritación, acompañada de incomodidad, desgarramiento o visión borrosa.
- Los productos de la descomposición del polietileno tereftalato por sobrecalentamiento pueden causar irritación de la piel, los ojos o de vías respiratorias.

⁷ DAK Americas, Hoja de seguridad, POLIETILEN TEREFTALATO, http://www.dakamericas.com/esp/pdfs/DK0003_Spanish_Version.pdf%20<http://www.dakamericas.com/esp/pdfs/dk0008S.pdf>

Primeros auxilios

- **Inhalación:** no se indica intervención específica, ya que el compuesto no es peligroso por inhalación. Sin embargo, si existe exposición a gases o vapores producto de la combustión sobrecalentamiento del producto, trasládese al aire libre. Si no hay respiración, proporcione respiración artificial. Si la respiración se dificulta, proporcione oxígeno. Llame a un médico de ser necesario.
- **Contacto con la piel:** el compuesto no es peligroso al contacto con la piel, pero es recomendable limpiar la piel después del uso. Si el material fundido cae sobre la piel, enfríe rápidamente con agua fría. No intente remover el material de la piel. Obtenga tratamiento médico para quemaduras térmicas.
- **Contacto con los ojos:** en caso de contacto, enjuague los ojos con agua abundante por al menos 15 minutos. Si hubo contacto con material fundido, busque atención médica inmediatamente. Si el contacto fue con material no fundido, consulte al médico.
- **Ingestión:** la ingestión no es una de las rutas esperadas de exposición durante el uso normal del producto. Si se ingiere, consulte al médico.

NOTA PARA EL MÉDICO: trate las quemaduras como quemaduras térmicas. El material se desprenderá al sanar la piel; por ello, la remoción inmediata no es necesaria.

Medidas de control de incendios

Propiedades de flamabilidad:

Productos de combustión peligrosos: dióxido de carbono, monóxido de carbono. Operaciones físicas, como el molido, pueden generar polvo y un peligro potencial de explosión por polvo. Bajo estas condiciones, siga los Códigos y

Estándares de la *National Fire Protection Association Codes and Standards* para el manejo de polvos combustibles.

Medios de extinción:

Agua, espuma, dióxido de carbono y polvo químico

