



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL TIPO DE MEMBRANA ÓPTIMO  
PARA POTABILIZAR EL AGUA DEL ACUÍFERO DE TULA**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

**ANDRÉS AGUILAR ORTEGA**

TUTOR:

**DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS**



2006

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA.  
Secretario: DRA. MARÍA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ.  
Vocal: DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS.  
1er. Suplente: DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA  
2o. Suplente: DR. JESÚS GRACIA FADRIQUE

**Lugar donde se realizó la tesis:**

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**TUTORA DE TESIS:**

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS

---

*A mis padres*

*A mi tíos Mago<sup>†</sup> y Nito<sup>†</sup>*

## AGRADECIMIENTOS

*Arturo Aguilar Quintero: Gracias papá por tu ejemplo, consejo y apoyo constante e inquebrantable. Gracias por tu examen y juicio, siempre sinceros, profundos, formadores. Gracias por ser Padre y Amigo.*

*Celia Ortega Rodríguez: Gracias mami por tu ternura y amor incondicional. Gracias por todo el esfuerzo y sacrificio que me has dedicado siempre, a cualquier hora y en todo momento.*

*Arturo Aguilar Ortega: Gracias hermano por ser fuente de inspiración y emulación.*

*María Alejandra Aguilar Ortega: Gracias hermanita por tu cariño y confianza.*

*Paulina Araceli Aguilar Ortega: Gracias Pao por tu amistad, compañía, trabajo, esfuerzo, motivación, consejo y más, qué han sido determinantes para alcanzar esta meta.*

*Celia Aguilar Ortega: Gracias hermanita por tu alegría y confianza.*

*Benjamín Díaz Urzúa: Gracias cuñado por tu interés y disponibilidad, siempre vigentes.*

*Brenda del Rosario Díaz Aguilar, Víctor Andrés Serrano Aguilar, Pablo Jazael Serrano Aguilar, José Fernando Díaz Aguilar, Diego Eduardo Serrano Aguilar: Gracias sobrinos, espero, a cambio de ésta, las tesis de cada uno de ustedes.*

*Mis tíos, tías, primos y primas: Gracias por su apoyo, siempre disponible.*

*Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros: Ha sido un honor y un privilegio trabajar con usted y para usted, gracias.*

*Pedro Castrejón Taboada: Caminamos juntos un sendero espinoso y lleno de retos. Vislumbramos juntos la meta. La agri dulce combinación de agotamiento, ánimo, impotencia, esperanza, decepción y entereza, nos llevaron a tomar el lema "sobreviviré". Lo logramos amigo y tú lo hiciste de manera ejemplar. Gracias por tu compañía y amistad.*

*Pedro Trinidad Nicolás, José Elías Becerril Bravo, Sergio Cruz Pérez, Sandra Sánchez Rivera, Olivia Amado Olmos: Gracias amigos por su constante y arduo trabajo, por su talento, su confianza. Gracias por su amistad.*

*Guadalupe Urquiza Moreno, Soledad Lucario, Jaime Pérez Trevilla: Gracias amigos por haberme auxiliado en los momentos más críticos de mi trabajo experimental. Gracias por su amistad.*

*Rubén Martínez Torres y Mónica Dolores San Nicolás Contreras: Gracias amigos por su ayuda, asesoría y cooperación. Especialmente por su hospitalidad, integridad y honestidad.*

*Dr. Pedro Martínez Pereda: Su apoyo fue decisivo para el cumplimiento exitoso de mis responsabilidades como alumno de este posgrado. Gracias por creer en mí.*

*Catalina Maya Rendón: Gracias Cati por tu apoyo generoso y comedido.*

*Martín Rubén Jiménez Magaña: Eres un gran amigo Martín, gracias.*

*Mtro. Victor Franco: Gracias por su preocupación y motivación.*

*Mtro. Juan Javier Carrillo Sosa: Gracias por invitarnos a ser mejores siempre.*

*Rebeca Chávez Mejía: Gracias Rebe por tu amistad y confianza.*

*José Antonio Barrios, Alma Chávez Mejía y Eduardo Vega: Gracias por su colaboración.*

*Queridos amigos: Mónica Silvana Salazar Plata, Alma Beatriz Corrales García, Ricardo Flores Castañeda, Iván Joel Gachuz Monroy, Germán Salgado Velázquez, Mauricio Velázquez Álvarez, Jessica Ivette Díaz Avelar, Karina Minerva Martínez Pérez, Aída Viridiana Vargas Zavala, Emmanuel Gómez Morales, Leonardo Jiménez García, David Martínez Sosa, Judith Trujillo Machado, Ignacio Monje Ramírez, Isaura Yañez Noguez, Karla María Rodas Zavala, Francisco Aurelio Velarde Navarrete, Vanessa Silva Castro, Luis Rodrigo Cervantes Quiroz, Tania Lucero Gayosso Rincón, María del Rosario Naranjo Ortíz, Abril Moreno Gutiérrez, Miguel Angel Ramírez Mendoza, David Jiménez García, José Luis Martínez Palacios, Rosa María Ramírez Zamora: Gracias.*

*Miembros de mi jurado: Dr. Pedro Martínez Pereda, Dra. Ma. del Carmen Durán Domínguez, Dr. Jesús Gracia Fadrique y Dra. María Teresa Orta Ledesma: Gracias por sus observaciones, comentarios y sugerencias que enriquecieron este documento.*

*Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto de Ingeniería: Gracias por darme la oportunidad de crecer y llegar a ser un mexicano con mejores capacidades para servir a mi país.*

*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT): Gracias por la beca que hizo posible mi dedicación de tiempo completo a este proyecto.*

*Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA): Gracias por el apoyo económico para el desarrollo de este proyecto.*

*Gracias a todos aquellos que con su preocupación e interés me motivaron.*

## CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO I PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>7</b>
1.1.    Introducción .....	7
1.2.    Objetivo.....	9
1.3.    Metas .....	9
<b>CAPÍTULO 2 GENERALIDADES .....</b>	<b>10</b>
2.1.    Reúso.....	10
2.1.1.    Historia del reúso de agua.....	10
2.1.2.    Tipos de reúso.....	12
2.1.3.    Recarga artificial de acuíferos .....	14
2.1.3.1.    Contaminantes de interés .....	14
2.1.4.    Marco legal .....	17
2.1.5.    Tecnologías para la regeneración de agua .....	21
2.2.    Tecnología de membranas .....	25
2.2.1.    Definición de membrana.....	25
2.2.2.    Estructura.....	26
2.2.2.1.    Membranas simétricas.....	26
2.2.2.2.    Membranas asimétricas.....	26
2.2.3.    Materiales de las membranas.....	27
2.2.4.    Proceso de filtración con membranas .....	28
2.2.5.    Clasificación de los procesos de membrana .....	28
2.2.6.    Formatos y módulos .....	29
2.2.7.    Configuración de los sistemas de filtración con membranas .....	29
2.2.8.    Evaluación de la efectividad de una membrana.....	32
2.2.8.1.    Flux de permeado.....	32
2.2.8.2.    Selectividad (retención) .....	34
2.2.8.3.    Recuperación.....	34
2.3.    Nanofiltración.....	34
2.3.1.    Aplicaciones .....	35
2.3.2.    Propiedades de las membranas de nanofiltración .....	36
2.3.3.    Caracterización de las membranas de nanofiltración.....	37
2.3.4.    Rechazo de contaminantes.....	37
2.3.4.1.    Inorgánicos.....	37
2.3.4.2.    Orgánicos .....	37
2.3.5.    Flux de la membrana de nanofiltración .....	38
2.3.6.    Modelos de transporte .....	39
2.4.    Pruebas de laboratorio .....	39
2.5.    Reúso en el Valle del Mezquital.....	41
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....</b>	<b>44</b>
3.1.    Muestreo.....	44
3.2.    Caracterización.....	46
3.3.    Membranas .....	47
3.4.    Sistema de nanofiltración .....	49

3.5.	Pruebas .....	50
3.5.1.	Primera etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros convencionales.....	50
3.5.1.1.	Tratamiento estadístico de los resultados.....	52
3.5.1.2.	Estándares de calidad de agua potable y reúso en consumo humano.....	53
3.5.2.	Segunda etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros no convencionales.....	54
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>55</b>
4.1.	Caracterización del agua del manantial Cerro Colorado .....	55
4.1.1.	Calidad microbiológica del agua .....	55
4.1.2.	Orgánicos.....	55
4.1.3.	Inorgánicos .....	59
4.2.	Primera etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros convencionales.....	65
4.2.1.	Flux de permeado .....	65
4.2.2.	Selectividad .....	67
4.2.2.1.	Carbono Orgánico Total (COT).....	67
4.2.2.2.	Absorbancia de luz UV a 254 nm (AUV <sub>254</sub> ) .....	72
4.2.2.3.	Sólidos disueltos totales (SDT).....	73
4.2.2.4.	Conductividad .....	76
4.2.2.5.	Turbiedad .....	78
4.2.2.6.	pH.....	79
4.2.2.7.	Alcalinidad.....	83
4.2.2.8.	Dureza.....	84
4.3.	Segunda etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros no convencionales.....	89
4.3.1.	Microbiológicos .....	89
4.3.2.	Compuestos orgánicos detectados .....	90
4.3.2.1.	Agua cruda.....	90
4.3.2.2.	Permeados.....	92
4.3.3.	Toxicidad.....	94
4.3.4.	Prueba de AMES (Mutagenicidad).....	95
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>97</b>
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>98</b>
<b>ANEXO A: ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....</b>		<b>107</b>
<b>ANEXO B: DATOS DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO (VALLE DE TULA).....</b>		<b>254</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Eventos relevantes en la historia del reúso de agua	11
Tabla 2.2 Tipos de reúso	12
Tabla 2.3 Parásitos patógenos del humano que se encuentran en el agua residual municipal	16
Tabla 2.4 Reúso indirecto en consumo humano	19
Tabla 2.5 Criterios propuestos por el Estado de California para la recarga de acuíferos con agua residual regenerada	20
Tabla 2.6 Recomendaciones de la US EPA para el reúso de agua	22
Tabla 2.7 Niveles de tratamiento alcanzables con varias combinaciones de operaciones unitarias y procesos usados para el tratamiento de aguas residuales	23
Tabla 2.8 Intervalos típicos de la calidad de un efluente tratado con diferentes niveles de tratamiento	24
Tabla 2.9 Aplicaciones de los procesos de membrana en el tratamiento del agua	25
Tabla 2.10 Materiales de las membranas	27
Tabla 2.11 Aplicaciones de la nanofiltración	35
Tabla 2.12 Propiedades del soluto y las membranas que influyen la remoción de compuestos orgánicos	39
Tabla 3.1 Frecuencia de muestreo	46
Tabla 3.2 Parámetros medidos y técnicas	46
Tabla 3.3 Características de las membranas estudiadas	48
Tabla 3.4 Condiciones de operación del sistema	50
Tabla 3.5 Diseño experimental de un factor con tres niveles del factor	51
Tabla 3.6 Corridas experimentales	51
Tabla 3.7 Variables de respuesta	52
Tabla 3.8 Estándares de calidad de agua potable y reúso en consumo humano	53
Tabla 4.1 Características del desempeño de las membranas estudiadas	87
Tabla 4.2 Retención de orgánicos e inorgánicos de las membranas seleccionadas	88
Tabla 4.3 Características microbiológicas del agua del manantial y los permeados de las membranas probadas	90
Tabla 4.4 Características de los compuestos detectados en el agua del manantial	92
Tabla 4.5 Características de los compuestos detectados en los permeados	94
Tabla 4.6 Resultados: toxicidad con T. pyriformis y mutagenicidad con AMES	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2-1 Membrana asimétrica</b>	26
Figura 2-2 a) Acetato de celulosa; b) Fibra de vidrio; c) Polietersulfona; d) Politetrafluoruro de etileno	28
Figura 2-3 Proceso de filtración con membranas	29
Figura 2-4 Clasificación de los procesos de membrana	30
Figura 2-5 Membrana enrollada	31
Figura 2-6 Membrana tubular	31
Figura 2-7 Membrana de fibra hueca	31
Figura 2-8 Sistema de filtración por lote	32
Figura 2-9 Sistema hidrológico del Valle del Mezquital	41
Figura 3-1 Ubicación del manantial Cerro Colorado	45
Figura 3-2 Manantial Cerro Colorado, muestreo y preservación	47
Figura 3-3 Sistema de nanofiltración	49
Figura 3-4 Celda de flujo cruzado	49
Figura 3-5 Esquema del sistema de nanofiltración: operación intermitente o “batch”, en inglés	50
Figura 4-1 Coliformes totales y fecales del agua del manantial	55
Figura 4-2 Contenido de COT en el agua del manantial	56
Figura 4-3 $AUV_{254}$ del agua del manantial	57
Figura 4-4 Correlación $AUV_{254}$ -COT	58
Figura 4-5 Contenido estimado de COT en el agua del manantial	59
Figura 4-6 SDT y Conductividad del agua del manantial	60
Figura 4-7 Turbiedad del agua del manantial	61
Figura 4-8 pH del agua del manantial	62
Figura 4-9 Alcalinidad del agua del manantial	63
Figura 4-10 Dureza del agua del manantial	64
Figura 4-11 Temperatura del agua del manantial	64
Figura 4-12 Efecto de la presión en el Flux de permeado (incremento)	66
Figura 4-13 Efecto de la presión en el Flux de permeado (incremento y mínimo)	67
Figura 4-14 Efecto de la presión en el COT del permeado (incremento)	69
Figura 4-15 Efecto de la presión en el COT del permeado (decremento)	70
Figura 4-16 Efecto de la presión en el COT del permeado (no significativo)	71
Figura 4-17 Efecto de la presión en el COT del permeado (no significativo)	71
Figura 4-18 Valores de $AUV_{254} < 0.010 \text{ cm}^{-1}$	72
Figura 4-19 Valores de $AUV_{254} > 0.010 \text{ cm}^{-1}$	73
Figura 4-20 Permeados con bajo contenido de SDT	74
Figura 4-21 Permeados con un contenido regular de SDT	75
Figura 4-22 Permeados con alto contenido de SDT	75
Figura 4-23 Efecto de la presión en la conductividad de los permeados (incremento)	76
Figura 4-24 Efecto de la presión en la conductividad de los permeados (mínimo)	77
Figura 4-25 Efecto de la presión en la conductividad de los permeados (casos aislados)	78
Figura 4-26 Turbiedad de los permeados producidos con todas las membranas probadas	79
Figura 4-27 Efecto de la presión en el pH de los permeados (incremento)	80
Figura 4-28 Efecto de la presión en el pH de los permeados (decremento)	81
Figura 4-29 Efecto de la presión en el pH de los permeados (sin cambios significativos)	81
Figura 4-30 Efecto de la presión en el pH de los permeados (mínimo)	82
Figura 4-31 Efecto de la presión en el pH de los permeados (máximo)	82
Figura 4-32 Permeados con alcalinidad baja (< 50 mg/L)	83
Figura 4-33 Permeados resistentes a la corrosión (alcalinidad > 50 mg/L)	84
Figura 4-34 Permeados con dureza moderada y alta	85
Figura 4-35 Permeados con baja dureza	86
Figura 4-36 Compuestos detectados en el agua del manantial	91
Figura 4-37 Compuestos detectados en los permeados de las membranas probadas	93

## RESUMEN

De acuerdo con el artículo 115 constitucional, el gobierno, a través de los municipios, tiene la responsabilidad de realizar el suministro público de agua potable. Ello implica que debe distribuir agua segura a la población, lo que con frecuencia no es bien entendido. En el caso del Valle de Tula, el desconocimiento del origen del agua de los nuevos manantiales aunado a la creciente demanda local llevaron al gobierno a usarlos para suministro humano, aplicando los criterios más usuales de potabilidad: coliformes totales y fecales. Sin embargo, por su origen, el agua a parte de contener bacterias, contiene compuestos orgánicos tóxicos que pueden ser carcinógenos, mutagénicos, teratogénicos o alterar el sistema endocrino. Por este motivo, el proceso de potabilización de esta agua puede ser complementado con un sistema que garantice la remoción de los contaminantes mencionados. En esta investigación se evaluó la nanofiltración y, para ello, se desarrolló un ensayo experimental con el que se evaluaron once tipos de membranas, de las cuales, se identificó la más adecuada para la depuración del agua del manantial Cerro Colorado (Valle de Tula). Se encontró que el agua del manantial presenta contaminación microbiológica ( $44 \pm 11$  UFC/100 mL de coliformes totales,  $21 \pm 10$  UFC/100 mL de coliformes fecales y  $1210 \pm 410$  UFP/L de colifagos somáticos) y química ( $39 \pm 5$  mg/L de carbono orgánico total y la detección de dibutil ftalato, dietil ftalato, hidroxitolueno butilado y 4-fenil-biciclohexil). También se observó que dicha agua no contiene sustancias que hagan positiva la prueba de AMES, aunque presenta cierta toxicidad (un organismo afectado de diez de *Tetrahymena pyriformis*). La evaluación de las membranas mostró que el efecto de la presión sobre la efectividad de las membranas dependió del tipo de membrana y que las membranas más efectivas fueron: NF90, NF270, YMCKSP1905, YMDKSP1905 y 302986 (retención de carbono orgánico total del 98%). De éstas, la membrana NF270, membrana compuesta, de capa delgada de poliamida y peso molecular de corte de 200 Dalton, fue la más productiva ( $95 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) y, por ello, se eligió como la membrana más efectiva para potabilizar el agua del manantial Cerro Colorado.

Palabras clave: Nanofiltración, reúso, COT, virus, Valle de Tula, compuestos orgánicos, toxicidad, prueba de AMES.

**ABSTRACT**

The Mexican government responsibility to supply safe drinking water to the general public is not always well understood by the municipalities. In the Tula Valley, ignorance of new springs's origin and the growing local demand led the municipal authorities to supply groundwater from an aquifer recharged with wastewater, taking as a reference the national drinking water regulation. However, this regulation is not rigorous enough to evaluate the reuse of wastewater in human consumption since reclaimed water can contain synthetic organic chemicals that persist or form during wastewater treatment (carcinogenic, mutagenic, teratogenic or endocrine disruptive compounds) which are not considered in drinking water regulation. To evaluate the feasibility of separating these contaminants (in terms of total organic carbon) by nanofiltration, a laboratory test was developed and several membranes were examined. The spring Cerro Colorado (Tula Valley) was selected to achieve experimentation. Water analysis showed the presence of total and fecal coliforms, and somatic coliphages ( $44 \pm 11$  FCU/100 mL,  $21 \pm 10$  FCU/100 mL and  $1210 \pm 410$  FPU/L, respectively). It also showed high concentrations of total organic carbon ( $39 \pm 5$  mg/L) and dibutyl phthalate, diethyl phthalate, hydroxytoluene butylated y 4-phenyl-bicyclohexyl detection. Moreover, water showed no positive results for the mutagenic AMES test even though it showed certain toxicity (one organism damaged from ten organisms tested, *Tetrahymena pyriformis*). Membrane performance dependence on pressure was observed. Membranes with better performances were NF90, NF270, YMCKSP1905, YMDKSP1905 and 302986 (total organic carbon retention of 98%). The most effective membrane was a thin film composite membrane with a molecular weight cut off of 200 Danton, NF270 ( $95 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ).

Key words: Nanofiltration, reuse, TOC, viruses, Tula Valley, organic compounds, toxicity, AMES test.

## CAPÍTULO I PROBLEMÁTICA

### 1.1. Introducción

El consumo de agua en el Valle de Tula es un caso de reúso<sup>1</sup> indirecto e incidental para actividades humanas. La recarga incidental del acuífero del Valle de Tula con las aguas residuales de la Ciudad de México ha ocasionado el surgimiento de nuevos manantiales. Éstos se utilizan actualmente como fuentes de abastecimiento público –previa cloración– a pesar de que el agua que producen presenta contaminación microbiológica y química. La potabilización de esta agua se puede lograr a través de la aplicación de un tratamiento avanzado, como la filtración con membranas.

Así, esta investigación intitulada “Determinación del tipo de membrana óptimo para potabilizar el acuífero de Tula” se desarrolló dentro del contexto del reúso de agua para consumo humano. El tema de la reutilización de agua es extenso y de carácter histórico: de alguna manera, el crecimiento de las poblaciones, la contaminación de los cuerpos de agua naturales, la necesidad de proteger el ambiente y la salud de la población, el advenimiento de los sistemas de drenaje y la necesidad de desalojar las aguas residuales de los centros urbanos, sumados a la creciente escasez de agua potable, han desembocado en el inevitable reúso de agua en prácticamente todas las actividades humanas y han hecho la reutilización de agua para consumo humano una realidad, incidental en muchos casos, pero técnicamente factible gracias al simultáneo desarrollo tecnológico en los sistemas de tratamiento del agua.

Estos sistemas, conocidos como procesos avanzados, permiten la remoción de contaminantes específicos. En particular, la tecnología de membranas ha simplificado y compactado los sistemas de tratamiento y ha hecho posible, a través de la nanofiltración y ósmosis inversa, la separación de compuestos orgánicos de bajo peso molecular que se presentan en muy bajas concentraciones en las aguas tratadas o en fuentes no convencionales de suministro y que se relacionan con serios problemas de salud. La tecnología de membranas es relativamente nueva y continúa

---

<sup>1</sup> La palabra reúso no está registrada en el diccionario de la Real Academia Española, sin embargo, en México, es un término legal ampliamente utilizado en el léxico oficial en materia de protección ambiental. La palabra reúso se establece en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en el Artículo 92, que se refiere a la promoción del ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reúso (LGEEPA, 1998). También se incluye en las definiciones 3.11 y 3.12 de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público: Reúso con contacto directo y Reúso con contacto indirecto u ocasional (NOM, 1998) y en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos: “Reúso: proceso de utilización de los residuos peligrosos que ya han sido tratados y que se aplicarán a un nuevo proceso de transformación o de cualquier otro” (RLGEEPARP, 1988). Así, en este entorno legal y significado oficial, se utiliza la palabra reúso en este documento

evolucionando. La información al respecto es vasta y la oferta del mercado diversa y muy irregular. Esto hace que el proceso de diseño de un sistema de filtración con membranas se deba forzosamente apoyar en pruebas de laboratorio que permiten obtener información sobre su efectividad (muchas veces diferente a la que proporcionan los fabricantes) y así seleccionar el tipo de membrana más adecuado para una aplicación particular. Tal es el caso de la potabilización del agua del Valle del Mezquital que, en principio, es un caso de reúso indirecto e incidental de agua residual para consumo humano y, por ello, requiere de un tratamiento avanzado como la filtración con membranas, en particular, la nanofiltración.

Para abordar esta problemática, el Capítulo 1 (Fundamentos teóricos) se compone de cinco secciones elementales: Reúso, Tecnología de membranas, Nanofiltración, Pruebas de laboratorio y Reúso en el Valle del Mezquital. En la primera sección, se ubica la reutilización de agua para consumo humano dentro del contexto general del reúso. Para ello, se parte de las bases históricas del reúso y se presentan los tipos que hay del mismo. El análisis de los contaminantes involucrados en la recarga artificial de acuíferos y el marco legal se incluyen como referencias para evaluar el caso del Valle del Mezquital. Esta sección se concluye con una revisión general de las tecnologías convencionales y avanzadas para la regeneración de aguas residuales. En ella, se muestra la complejidad y diversidad de tecnologías disponibles y se destaca el papel de la tecnología de membranas como un proceso avanzado exitoso en la depuración de agua regenerada para suministro público. La segunda sección "Tecnología de membranas" presenta las definiciones y terminología básica que permiten diferenciar una membrana de un filtro convencional, distinguir entre procesos de membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa), identificar los elementos constituyentes de los sistemas (membrana, formato, módulo, arreglo, sistema, etc.) y entender el funcionamiento y evaluación de los sistemas de filtración con membranas (flux, selectividad, recuperación, etc.). En la tercera sección se presentan las generalidades de la nanofiltración y se destaca su efectividad en la remoción de compuestos orgánicos traza (contaminantes objetivo en la potabilización del agua del Valle del Mezquital) a través de una extensa revisión de los estudios más recientes del uso de esta tecnología en dicha aplicación. Esta sección se cierra con el planteamiento del uso de modelos matemáticos para la predicción del funcionamiento de los sistemas de nanofiltración y la necesidad aún vigente de las pruebas de laboratorio para seleccionar la membrana más efectiva y confirmar el proceso de membrana más adecuado. La cuarta sección sitúa las pruebas de laboratorio dentro del proceso de diseño de una planta de filtración con membranas y destaca su utilidad en las condiciones actuales del mercado de membranas. Finalmente, en la quinta sección se presenta la situación del reúso indirecto e incidental para consumo humano del Valle del Mezquital con sus particulares necesidades de tratamiento y la propuesta técnica para su potabilización.

## 1.2. Objetivo

Determinar el tipo de membrana óptimo para potabilizar el agua del acuífero de Tula mediante pruebas de tratabilidad apropiadas a nivel laboratorio.

## 1.3. Metas

1. Desarrollar una prueba de laboratorio para comparar la efectividad de varios tipos de membranas.
2. Evaluar la efectividad de las membranas en términos de su flux<sup>2</sup> y selectividad con base en parámetros convencionales (carbono orgánico total, absorbancia UV a 254 nm, sólidos disueltos totales, conductividad, turbiedad, pH, alcalinidad y dureza).
3. Evaluar el efecto de la presión en el flux y en la selectividad de las membranas aplicando tres presiones de operación distintas.
4. Seleccionar las combinaciones membrana-presión más efectivas en términos de los parámetros convencionales.
5. Evaluar la efectividad de las combinaciones membrana-presión seleccionadas con base en los contenidos de coliformes totales y fecales y parámetros no convencionales como virus, compuestos orgánicos específicos, toxicidad y mutagenicidad.
6. Seleccionar la membrana más efectiva para la potabilización del agua de un manantial específico, Cerro Colorado.

---

<sup>2</sup> Flux: flujo de permeado (agua producida) por unidad de área de membrana

## CAPÍTULO 2 GENERALIDADES

### 2.1. Reúso

En esta sección se presentan de manera breve los elementos básicos del reúso de agua, con especial énfasis en el consumo humano. El objetivo es asentar las bases históricas, técnicas y legales del tema y ubicar la tecnología seleccionada para realizar esta tesis.

#### 2.1.1. Historia del reúso de agua

El crecimiento de las poblaciones y la creciente escasez de fuentes de agua susceptibles de ser potabilizadas con procesos convencionales han acelerado forzosamente el reúso de agua en el mundo. La Organización Mundial de la Salud, OMS (WHO, 2003) estima que, para 2008, el 40% de la población mundial vivirá en países con escasez de agua<sup>3</sup>. En las últimas décadas, Estados Unidos de América (EPA, 2004) ha adoptado un gran número de medidas respecto del manejo del agua que incluyen el uso de agua residual altamente tratada para aumentar la disponibilidad de agua en sus fuentes de abastecimiento. A su vez, en Europa el reúso de agua está creciendo constantemente en los países densamente poblados del norte como Bélgica, Inglaterra y Alemania, y más rápidamente en las áreas costeras turísticas e islas del oeste y sur de Europa (Lazarova *et al.*, 2001).

El reúso de agua se define como el empleo benéfico de un agua residual que se sometió natural o artificialmente a un procesamiento físico, químico y/o biológico que le devuelve –al agua usada– características que permiten su reutilización como agua residual tratada o regenerada (WHO, 2003). Sus orígenes, así como los de la regeneración y reciclamiento del agua residual, se encuentran en los primeros sistemas de agua y aguas residuales de la antigua Grecia en la Edad de Bronce (Asano y Levine, 1996).

Más recientemente, el reúso de agua residual doméstica para la producción agrícola fue una consecuencia natural de su histórico depósito final en el suelo. Luego, con la llegada de los sistemas de drenaje en el siglo XIX, el agua residual se llevó a campos de cultivo (granjas) que constituyeron un espacio para su depósito a la vez que una oportunidad para hacer producir la tierra. Esta práctica se extendió por Europa y Estados Unidos de América en el año 1900 (Metcalf y Eddy, 2003). Sin embargo, la fuerza detonante que realmente motivó el desarrollo de numerosos proyectos de regeneración y reúso de agua en el siglo pasado no fue el depósito final sino la creciente escasez de fuentes de suministro (Tabla 2.1).

---

<sup>3</sup> Cálculo hecho con base en la disponibilidad total de agua de cada país sin considerar las desigualdades dentro de sus fronteras

**Tabla 2.1 Eventos relevantes en la historia del reúso de agua**

<b>Primeros sistemas de agua y sanidad: 3000 a. C. a 1850 d. C.</b>	
Edad de Bronce en Grecia	3000 a. C. a 1100 a.C.
<i>Sextus Julius Frontius</i> -- Comisionado para el suministro de agua de la ciudad de Roma	97 AD
Granjas para aguas residuales en Alemania	1550
Granjas para aguas residuales en Reino Unido	1700
Uso legal de los sistemas de drenaje para el depósito de desechos humanos	Londres, 1815; Boston, 1833; París, 1880
Epidemias de cólera en Londres	1848-49 y 1854
Situación sanitaria de la mano de obra de la Gran Bretaña: Informe de Chadwick "La lluvia al río y las aguas residuales al suelo"	1850
<b>El gran despertar sanitario: 1850 a 1950</b>	
Epidemia de cólera relacionada con el control de la contaminación del agua	Londres, 1850
Teoría para la prevención contra la fiebre tifoidea	Reino Unido, 1858
Conexión del ántrax con la etiología de las bacterias	Alemania, 1878
Vertido de las aguas residuales de la Ciudad de México en el Valle de México*	México, 1890
Desinfección con hipoclorito de sodio	Reino Unido, 1895
Cloración en la Ciudad de Jersey	Estados Unidos, 1909
Cinéticas de desinfección elucidadas por Chick	Estados Unidos, 1909
Proceso de lodos activados	Reino Unido, 1915
Primeras reglamentaciones para el uso del agua residual con fines de riego (California)	Estados Unidos, 1918
Construcción del Distrito de Riego 03 en la región del Valle del Mezquital*	México, 1952
<b>Era de la recuperación, reciclamiento y reúso: posterior a 1960</b>	
La legislación de California fomenta la recuperación, reciclado y reúso de agua residual	Estados Unidos, 1960
Riego de cítricos y recarga de acuíferos**	Túnez, 1962
Uso de efluentes secundarios en la agricultura	Israel, 1965
Investigación sobre el reúso potable directo en Windhoek	Namibia, 1968
Riego de áreas verdes, Ciudad de Wagga Wagga**	Australia, 1969
Decreto sobre agua limpia para restaurar y mantener la calidad del agua	Estados Unidos, 1973
Estudio sobre virus en Pomona, California	Estados Unidos, 1977
Proyecto de la región de Dan: Recarga de acuíferos y riego agrícola, Tel Aviv**	Israel, 1977
Criterios de recuperación de las aguas residuales de California (Título 22)	Estados Unidos, 1978
Construcción de la planta del ex lago de Texcoco para el reúso de agua negra tratada en el control de tolvaneras, reconstrucción del sistema natural y riego agrícola***	México, década de los años 80 del Siglo XX
Estudio de efectos en la salud, Los Ángeles California	Estados Unidos, 1984
Proyecto de reciclamiento de agua, Gobierno Metropolitano de Tokio**	Japón, 1984
Estudio de recuperación de las aguas residuales de Monterrey para la agricultura, California	Estados Unidos, 1988
Lineamientos de la Organización Mundial de la Salud para el reúso en la agricultura y acuicultura	1989
Irrigación de campos de golf, Girona**	España, 1989
Estudio de los efectos en la salud de la recuperación total de recursos, Ciudad de Sn. Diego, California	Estados Unidos, 1992
Lineamientos para el reúso de agua US-EPA	Estados Unidos, 1993
Planta potabilizadora para el reúso de agua en consumo humano, Denver, Colorado, informe final (la operación de la planta inició en 1984)	Estados Unidos, 1993
Informe del estado del arte de los riesgos en la salud de la recarga de acuíferos con agua recuperada, Organización Mundial de la Salud	2003

Adaptado de: Asano y Levine, 1996; Sotomayor, 1998\*; Metcalf y Eddy, 2003\*\* y AMC, 2004\*\*\*

El mar se consideró durante muchos años como fuente potencial inagotable de agua pero ahora se sabe que el agua residual doméstica contiene menos del 1% de impurezas –que se pueden remover eficientemente mediante procesos avanzados– mientras que el agua de mar contiene 3.5% de sales disueltas (íntimamente ligadas a las moléculas del agua) además de materia orgánica. Así, con el costo de desalación superior al de re-acondicionamiento del agua residual doméstica (Culp *et al.*, 1978 en Jiménez, 2001), las zonas que enfrentan problemas de escasez usan ampliamente sus aguas residuales en la agricultura, industria y recarga de acuíferos.

### 2.1.2. Tipos de reúso

Se han desarrollado y practicado dos tipos principales de reúso en todo el mundo: (1) usos potables, que pueden ser directos, después de altos niveles de tratamiento, o indirectos, después de pasar a través de un ambiente natural y (2) usos no potables directos o indirectos en la agricultura (riego), industria y asentamientos urbanos (Lazarova *et al.*, 2001; Tabla 2.2).

**Tabla 2.2 Tipos de reúso**

1. Riego agrícola	Cultivos Viveros
2. Riego de áreas verdes	Parques Jardines Camellones Campos de golf Cementerios
3. Industrial	Agua de enfriamiento Alimentación de calderas Agua para el proceso Construcción
4. Recarga de acuíferos	Recarga de agua subterránea Control de la introducción de agua salada Control de hundimientos
5. Usos recreativos	Lagos y lagunas Mejoramiento de pantanos Aumento de arroyos y riachuelos Piscifactorías Producción de nieve artificial
6. Usos urbanos	Control de incendios Lavado de autos y máquinas recolectoras de basura Aire acondicionado Sanitario
7. Consumo humano	Recarga de acuíferos (reúso indirecto) Inyección en el sistema de suministro (reúso directo)

Adaptado de: Jiménez, 2001 y Metcalf y Eddy, 2003

En términos cuantitativos el segundo grupo ha sido más importante. La agricultura es el sector económico que, por mucho, consume los volúmenes más grandes de agua en todo el mundo (Marecos do Monte *et al.*, 1996) por ello es la categoría más importante en el reúso de agua. Le sigue el riego de áreas verdes que tiene una gran incidencia en los usos municipales. El reúso industrial es una categoría general que se integra de una gran diversidad de actividades industriales que incluye industrias con altas tasas de consumo de agua como son las centrales eléctricas y la industria de la celulosa y papel entre otras como la textil, metálica y alimentaria.

En cuanto a los usos potables es importante señalar que, de alguna manera, la gente siempre ha bebido una mezcla de agua limpia y agua sucia tratada por la naturaleza y que desde que el agua residual empezó a ser tratada y los efluentes descargados en los ríos y lagos la gente ha bebido una combinación de agua limpia y agua reciclada artificialmente. En otras palabras, el reúso no intencional indirecto ha existido siempre. En muchos países europeos, la distancia entre el punto de descarga del agua residual tratada y el punto donde se toma para su potabilización es tan corta que se puede considerar que los ríos son *de facto* parte del sistema de reúso. En estos casos se han hecho estudios epidemiológicos –para dar seguimiento al efecto del agua en la salud de la población– que no han mostrado un incremento en el nivel de infecciones, casos de cáncer u otras enfermedades, por lo que se puede decir que el aumento del riesgo relacionado con el uso de agua reciclada es despreciable (WHO, 2003).

Actualmente, se puede afirmar que, gracias a los avances en la tecnología de tratamiento, es técnicamente posible emplear intencionalmente el agua residual en el consumo humano. Ello puede lograrse en dos formas. La primera consiste en tratar el agua residual mediante un proceso secundario e inyectarla en un acuífero de abastecimiento (reúso indirecto). El afinamiento de la calidad del agua se logra mediante el tratamiento natural producto del largo periodo dentro del manto freático. La segunda forma consiste en tratar el agua residual con procesos avanzados hasta obtener el grado de potable e integrarla al sistema de suministro público que lleva una porción de agua de primer uso (reúso directo).

En este contexto, la recarga de acuíferos se ha convertido en la cuarta aplicación más importante en el reúso de agua (Metcalf y Eddy, 2003). En muchas áreas del mundo los acuíferos que suministran el agua potable están siendo utilizados más rápido de lo que son recargados. Esto no sólo representa un problema de suministro de agua, también puede tener serias implicaciones en la salud. Además, en las áreas costeras, la sobreexplotación de los acuíferos ocasiona la intrusión salina que hace que el agua pierda su potabilidad y frecuentemente no se pueda aplicar ni para riego (WHO, 2003).

### **2.1.3. Recarga artificial de acuíferos**

La recarga artificial de acuíferos surge como una alternativa tecnológica decisiva en la sobreexplotación de acuíferos, escasez de agua e intrusión salina pues ofrece los siguientes beneficios: (a) restablecimiento del manto sobreexplotado, (b) provisión de una barrera a la intrusión salina en zonas costeras y (c) almacenamiento de agua durante las épocas de alta disponibilidad de agua. Con base en esto, algunos países desarrollados han decidido recargar artificialmente los acuíferos con agua residual tratada mediante infiltración o inyección, mientras que en países en desarrollo existen casos en que los acuíferos se han recargado pasivamente por el uso de fosas sépticas, agua residual cruda aplicada a la irrigación y otros medios (recarga incidental).

Una consideración importante en el uso de agua tratada para la recarga artificial de acuíferos es la posible presencia de agentes químicos y microbiológicos que podrían ser peligrosos para la salud humana y para el ambiente, sobre todo en el caso de una recarga incidental: fortuita y pobremente planeada (WHO, 2003). Por ello, la recarga de agua subterránea con agua residual municipal presenta un amplio espectro de retos técnicos y de la salud que se deben evaluar cuidadosamente. Existen preocupaciones sobre el impacto que pudieran tener ciertos contaminantes de reciente detección<sup>4</sup> en la salud humana a largo plazo y la percepción pública acerca de la reutilización de agua en consumo humano. Hay cuatro factores de la calidad del agua significativos en la recarga de agua subterránea con agua reciclada: (a) patógenos humanos, (b) contenido mineral, (c) metales pesados, y (d) compuestos orgánicos traza. De éstos, los patógenos humanos y los compuestos orgánicos traza son de particular interés cuando la recarga involucra acuíferos que se usan para el suministro público (WHO, 2003).

#### **2.1.3.1. Contaminantes de interés**

De acuerdo con WHO (2003) se consideran en primer lugar los patógenos por la magnitud y rapidez de sus efectos y en segundo lugar los compuestos químicos tóxicos que tienen efectos en el largo plazo. La mayoría de los microorganismos de la naturaleza (virus, bacterias, parásitos, hongos, algas y helmintos) pueden estar presentes en las aguas residuales y en algún momento en el agua reciclada.

---

<sup>4</sup> Como los disruptores endócrinos que son contaminantes que se encuentran en microgramos, nanogramos o picogramos/L y que no eran detectables en estas magnitudes hasta hace algunos años

### ***Microbiológicos***

Los virus son los agentes más pequeños. Tienen diferentes formas y tamaños que varían de 0.01 a 0.3  $\mu\text{m}$  de diámetro. Hay más de 140 tipos de virus entéricos, capaces de producir infecciones o enfermedades, que se multiplican en el intestino y se expelen en las heces fecales. En general, se reconoce que aunque se presenten en pequeñas cantidades, los virus pueden causar infecciones o enfermedades. El agua residual contiene miles de ellos y algunos son mucho más resistentes a la desinfección que las bacterias. Por ello, su evaluación constante en el agua reciclada es relevante.

Las bacterias son microorganismos unicelulares de 0.2 -10  $\mu\text{m}$  de longitud. Su distribución ambiental es ubicua y por ello hay muchas variedades. Algunas forman colonias intestinales y se expelen en las heces fecales en grandes concentraciones (más de  $10^{12}/\text{g}$ ) aunque la mayoría no son patógenas. Las que representan el mayor riesgo son las entéricas, en otras palabras, aquellas que viven o pueden vivir en los intestinos. Las bacterias patógenas entéricas están presentes en las heces fecales de los individuos infectados y por ello su detección se basa en la medición de otros grupos de bacterias presentes en las heces fecales, tal es el caso de las bacterias coliformes fecales, que se usan comúnmente como indicadores de contaminación fecal y presencia potencial de patógenos. Este grupo responde de manera similar al ambiente y al tratamiento como la mayoría de las bacterias, pero es incapaz de simular a los virus y protozoarios. En particular, los coliformes fecales pueden estar ausentes en el agua aunque estén presentes *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*. Con respecto a la recarga de acuíferos, las bacterias se retienen fácilmente en el suelo, incluso algunos autores establecen que sólo se requieren de uno a nueve centímetros para que se separen del agua durante la infiltración (WHO, 2003).

Los parásitos humanos son los causantes de la patología intestinal. Éstos afectan las áreas del tracto digestivo, causan diarrea y afectan la absorción de los alimentos. Su presencia difiere notoriamente entre los países ricos y pobres. En la Tabla 2.3 se muestra una clasificación resumida de los principales parásitos que causan infecciones gastrointestinales.

**Tabla 2.3 Parásitos patógenos del humano que se encuentran en el agua residual municipal**

Parásito	Características
Amebas	Se han detectado diversos parásitos protozoarios en las aguas residuales municipales, uno de los más importantes es la <i>Entamoeba histolytica</i> que se define morfológicamente como una eucariota unicelular con trofozoitos unicelulares de 20 a 40 $\mu\text{m}$ de diámetro y quistes de 10 a 16 $\mu\text{m}$
<i>Cryptosporidium</i> sp.	<i>Cryptosporidium</i> sp. ooquistes. Son redondos y miden entre 4 y 7 $\mu\text{m}$ , lo que los hace difíciles de remover del agua a través de procesos convencionales
<i>Giardia</i> sp.	Como <i>Cryptosporidium</i> sp., <i>Giardia</i> sp. está presente en los intestinos de un gran número de animales, donde viven como trofozoitos. Los quistes pueden sobrevivir en los cuerpos de agua por largos periodos de tiempo, especialmente en invierno. Los quistes de <i>Giardia</i> sp son óvalos de 8 a 14 $\mu\text{m}$ de largo y de 7 a 10 $\mu\text{m}$ de ancho
Helmintos	Son organismos multicelulares. Las larvas de vida libre no son patógenas usualmente pero las que están presentes en el agua residual, sí lo son. Son de poca importancia para el reúso intencional de agua debido a su gran tamaño (20-80 $\mu\text{m}$ , Chávez, 2004) que se asocia a la presencia de partículas que se miden como sólidos suspendidos o turbiedad

Adaptado de: WHO, 2003

### Químicos

Los compuestos químicos tóxicos que contaminan los acuíferos se pueden agrupar en (a) biodegradables, (b) refractarios, (c) nutrientes, (d) metales pesados y (e) cloro residual (WHO, 2003):

*Biodegradables.* Estos compuestos proveen de alimento a los microorganismos, afectan de manera adversa los procesos de desinfección, limitan su aplicación en algunos procesos industriales, consumen oxígeno y puede causar efectos agudos o crónicos en la salud si el agua regenerada se usa para consumo humano. Las autoridades usan típicamente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como una medida indirecta de los constituyentes orgánicos biodegradables.

*Refractarios.* Se caracterizan por su resistencia a los procesos convencionales de tratamiento. Algunos son peligrosos para el hombre y el ambiente y, por ello, su presencia en el agua reciclada para consumo humano debe ser mínima. El parámetro más comúnmente usado para evaluarlos es el carbono orgánico total (COT) aunque éste incluye la materia biodegradable.

*Nutrientes.* El nitrógeno, fósforo y potasio son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y su presencia en el agua aumenta su valor para la irrigación. En el caso del nitrógeno, su presencia excesiva en el acuífero limita su uso como fuente de suministro debido a los valores críticos establecidos para el control de la toxicidad aguda en bebés.

*Metales pesados.* Algunos metales pesados se acumulan en el ambiente y son peligrosos para las plantas y los animales. Su presencia limita el reciclado y reúso de agua. Usualmente, en términos de la recarga, si el agua tratada es agua residual doméstica no se presentan problemas a menos que el drenaje contenga un alto contenido de descargas industriales.

*Cloro residual.* Éste juega un papel importante en la posible formación de compuestos organoclorados que limitan el uso subsiguiente del agua por su potencial carcinógeno. También es tóxico para el suelo, flora y fauna, que contribuyen a la limpieza del agua durante su percolación. La clave consiste en balancear los beneficios obtenidos de su aplicación con sus efectos secundarios, un balance que no es sencillo.

En particular, los compuestos orgánicos refractarios son de interés porque presentan una dificultad peculiar: el agua reciclada contiene diversos tipos de compuestos orgánicos en muy bajas concentraciones cuya importancia en la salud se conoce pero su presencia en el agua se cuestiona. Por eso, el valor máximo de COT se limita usualmente a 1 y 2 mg/L independientemente del tipo de compuestos que lo generan (WHO, 2003).

#### **2.1.4. Marco legal**

En esta sección se presenta la legislación internacional sobre el reúso de agua para consumo humano. Se toma como referencia principal la legislación de Estados Unidos de América, en particular, la del estado de California porque es la más clara y completa.

En la mayoría de los países, la calidad del agua destinada al consumo humano (agua de primer uso) se regula a través de estándares establecidos a nivel regional, nacional e internacional: la Directiva 98/83/EC de la Unión Europea sobre la calidad del agua prevista para consumo humano (UE, 1998), los estándares para agua potable de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA, 2002), la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 sobre salud ambiental (NOM, 2000), los lineamientos para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004), etc. Estas regulaciones establecen límites en las concentraciones de ciertos contaminantes<sup>5</sup> seleccionados con base en el riesgo que implican y la probabilidad de su presencia en el agua. Así, una gran variedad de compuestos orgánicos que permanecen o se forman durante el tratamiento de las aguas residuales no se incluyen, lo que hace que estas regulaciones sean insuficientes para avalar la calidad de un agua de origen residual.

---

<sup>5</sup> En el caso de los contaminantes orgánicos se incluyen en general: fenoles, hidrocarburos aromáticos, plaguicidas y trihalometanos, entre otros

Otros usos –con agua de primer uso– como el de riego en la agricultura y áreas verdes, usos urbanos e industriales, no están sometidos a regulación en la mayoría de los países. Sin embargo, cuando se ha considerado que el agua por usar es de origen residual, se han establecido regulaciones y/o recomendaciones para proteger la salud pública como son las señaladas por la Organización Mundial de la Salud en la Directiva para los usos de agua residual en la agricultura y acuicultura (WHO, 1996), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América para el reúso de agua (EPA, 2004), la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 (NOM, 1998) y muchas otras en varios países del Mediterráneo como Francia, Israel, Italia, España y Túnez (WHO, 2003).

Sin embargo, cuando se habla de regulaciones (de cumplimiento obligatorio) y recomendaciones (no obligatorias) acerca del reúso de agua en consumo humano, las referencias sólo son la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (U.S. EPA *Guidelines for Water Reuse*) (EPA, 2004), que se basa en las regulaciones de algunos estados como Florida, Washington y California.

La Organización Mundial de la Salud recomienda la evaluación de los proyectos de reúso en consumo humano en los siguientes términos:

- Tipos y cantidades de contaminantes contenidos en el agua residual (doméstica o industrial).
- Grado de pre-tratamiento y calidad previa a la recarga del acuífero (infiltración superficial o inyección).
- Tiempo de almacenamiento.
- Profundidad del suelo para la atenuación de contaminantes.
- Grado de dilución con el agua subterránea.
- Tipo y capacidad del tratamiento que el agua recibirá cuando sea extraída.
- Magnitud y tipo de exposición humana que resultará del uso final del agua, por ejemplo -ingestión, inhalación de aerosoles y exposición dérmica.

A su vez, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (US EPA<sup>6</sup>) regula el reúso indirecto de agua regenerada en consumo humano, para (a) recargar fuentes superficiales que se usan para el suministro público y (b) acuíferos que se usan como fuentes de abastecimiento doméstico, con base en las regulaciones desarrolladas en los estados de Florida, Washington y

---

<sup>6</sup> *United States Environmental Protection Agency*

California. Las tres presentan límites máximos permisibles de contaminantes y tratamientos requeridos para las recargas (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4 Reúso indirecto en consumo humano**

	California	Florida <sup>a</sup>	Washington
Tratamiento	Bases caso por caso	Tratamiento avanzado, filtración y desinfección de alto nivel	Oxidación, coagulación, filtración, ósmosis inversa, y desinfección
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )		20 mg/L	5 mg/L
Sólidos suspendidos totales (SST)		5.0 mg/L <sup>b</sup>	5 mg/L
Turbiedad		NE <sup>c</sup>	0.1 UTN (Media) <sup>f</sup> 0.5 UTN (Máximo) <sup>g</sup>
Coliformes		Totales	Totales
		Todas las muestras por debajo del nivel de detección	1/100 mL <sup>h</sup>
			5/100 mL <sup>i</sup>
Nitrógeno total		10 mg/L	10 mg/L
Carbono orgánico total (COT)		3 mg/L <sup>d</sup>	1.0 mg/L
		5 mg/L <sup>e</sup>	
Estándares primarios y secundarios		De conformidad con la mayoría de los primarios y secundarios	De conformidad con la mayoría de los primarios y secundarios

a Para aumento de agua de fuentes de agua superficial que serán usadas para suministro público

b No debe de exceder 5 mg/L en ninguna muestra y se debe de alcanzar antes de la desinfección

c No especificado por la regulación estatal

d Promedio mensual

e Valor máximo

f Mensual (Unidades de turbiedad nefelométrica)

g En cualquier momento

h Mediana semanal para inyección directa en un acuífero potable

i Máximo en cualquier muestra para inyección directa en un acuífero potable

Adaptado de: EPA, 2004

Las regulaciones del estado de California son más detalladas y completas pero se puede considerar que, en general, tanto California como Florida y Washington utilizan los mismos parámetros para evaluar la calidad del agua regenerada. Por ejemplo, la contaminación orgánica se mide a través del carbono orgánico total (COT) en todos los casos, aunque es notable que los valores establecidos son diferentes. Mientras que Florida permite recargar un acuífero mediante infiltración con un contenido promedio mensual de COT de 3 mg/L y una concentración máxima de 5 mg/L –lo que quiere decir que se considera la capacidad del suelo para degradar la materia orgánica–, Washington fija la concentración de COT en 1 mg/L, contenido de COT que debe cumplir toda agua subterránea extraída de un acuífero recargado con agua residual tratada que se usa para suministro público (Asano y Levine, 1996).

El estado de California considera prácticamente todas las facetas del reúso de agua. En lo que concierne a la recarga de acuíferos propone los criterios que se muestran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Criterios propuestos por el Estado de California para la recarga de acuíferos con agua residual regenerada**

Tipo de contaminante	Tipo de recarga	
	Infiltración superficial	Inyección directa <sup>7</sup>
Microorganismos patógenos		
Tratamiento secundario	SST ≤ 30 mg/L	
Filtración-turbiedad	≤ 2 UTN	
Desinfección	Inactivación de 4-logs de virus, ≤ 2.2 coliformes totales <sup>b</sup> /100 mL	
Tiempo de retención en el suelo	6 meses	12 meses
Separación horizontal	153 m <sup>c</sup>	610 m <sup>c</sup>
Contaminantes regulados	Debe cumplir los niveles máximos de contaminantes en agua potable	
Contaminantes no regulados		
Tratamiento secundario	DBO ≤ 30 mg/L COT ≤ 16 mg/L	
Ósmosis inversa	Cuatro opciones disponibles dependiendo de las condiciones locales	100% del tratamiento a un $COT \leq \frac{1mgCOT/L}{CAR^d}$
Criterio para infiltración suponiendo 50% de remoción de COT con el TSA <sup>a</sup>	Profundidad hasta el agua subterránea a una tasa de percolación inicial de: < 0.5 cm/min = 3 m < 0.8 cm/min = 6 m	No aplica
Opción de control global	Demostrar la factibilidad del punto de cumplimiento global	No aplica
Contribución de agua reciclada	≤ 50% de volumen afectado de agua subterránea	

a Tratamiento Suelo-Acuífero. Tratamiento del agua a través de su paso y estancia en el suelo

b Número más probable o unidades formadoras de colonias

c Al pozo de extracción de agua más cercano para suministro público

d Contribución de agua reciclada (CAR). Es la contribución porcentual de agua reciclada en el agua subterránea extraída del pozo de agua potable

Fuente: Asano y Cotruvo, 2004

<sup>7</sup> Del inglés: *Subsurface injection*

De la tabla anterior se puede destacar que el valor de COT que se permite en la recarga de acuíferos por infiltración (16 mg/L) es muy superior a aquellos establecidos por los estados de Florida y Washington (3 y 1 mg/L respectivamente), lo que indica que se tiene una mayor confianza en la capacidad del suelo para la remoción y transformación de compuestos orgánicos. Además, en el caso de la recarga de acuíferos mediante inyección directa se propone el uso de la fracción de agua tratada (inyectada) con respecto a la extraída como un factor para determinar el grado de remoción requerido de los orgánicos no regulados (COT).

Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América, con el fin de motivar el desarrollo de regulaciones estatales, hace una serie de recomendaciones en materia de reúso de agua. Entre éstas (Tabla 2.6), es importante destacar las que se refieren a la recarga de acuíferos que se usan para el suministro público pues en ellas se señala el tipo de tratamiento y los límites de calidad del agua requeridos en el punto de descarga del agua tratada.

Finalmente, es importante destacar la importancia de algunos contaminantes biológicos como los virus y parásitos. Los primeros, se consideran en todas las recomendaciones que requieren el cumplimiento de los estándares de calidad de agua potable (Tabla 2.6) y, en particular, el estado de California recomienda una inactivación de virus de 4-logs para la recarga de acuíferos por infiltración. Los parásitos, en particular los helmintos, se asocian con la turbiedad y se considera que es poco probable que se presenten en un agua con turbiedad baja.

#### **2.1.5. Tecnologías para la regeneración de agua**

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales que se utilizan para la regeneración de agua incluyen sistemas convencionales, avanzados y naturales. En general se utilizan trenes de tratamiento convencionales basados en procesos biológicos de biomasa suspendida (por ejemplo, lodos activados) o fija (por ejemplo, filtros percoladores) seguidos de filtración, desinfección (cloración, ozonación o UV), adsorción con carbón activado (granular o en polvo) y procesos de membrana. También se usan sistemas naturales para integrar el agua nuevamente al ambiente (por ejemplo, recarga de acuíferos) como etapa final de tratamiento. En la Tabla 2.7 se muestran los niveles de tratamiento logrados con varias combinaciones de procesos utilizados en el tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 2.6 Recomendaciones de la US EPA para el reúso de agua**

Tipo de uso	Tratamiento	Calidad del agua tratada en el punto de descarga
Usos urbanos, irrigación de cultivos que se comen crudos y usos recreativos	Secundario <sup>f</sup> , Filtración <sup>g</sup> y Desinfección <sup>h</sup>	pH = 6-9 ≤ 10 mg/L de DBO ≤ 2 UTN Coliformes fecales no detectables/100 mL <sup>b</sup> 1 mg/L Cl <sub>2</sub> residual <sup>c</sup> (mínimo)
Riego de áreas con acceso restringido y cultivos procesados, cuerpos de agua para dar estética al paisaje, construcción, enfriamiento industrial <sup>d</sup> y reúso ambiental	Secundario <sup>f</sup> y Desinfección <sup>h</sup>	pH = 6-9 ≤ 30 mg/L de DBO 30 mg/L de SST ≤ 200 UFC/100 mL <sup>e</sup> 1 mg/L Cl <sub>2</sub> residual <sup>c</sup> (mínimo)
Recarga de acuíferos para acuíferos no potables mediante infiltración	Específico del sitio y Dependiente del uso Primario (mínimo)	Específico del sitio y Dependiente del uso
Recarga de acuíferos para acuíferos no potables mediante inyección	Específico del sitio y Dependiente del uso, Secundario <sup>f</sup> (mínimo)	Específico del sitio y Dependiente del uso
Recarga de acuíferos para acuíferos potables mediante infiltración	Secundario <sup>f</sup> Desinfección <sup>h</sup> También puede necesitar filtración y tratamiento avanzado <sup>i</sup>	Secundario <sup>f</sup> Desinfección <sup>h</sup> Debe cumplir con los estándares de calidad de agua potable después de la percolación a través de la zona vadosa
Recarga de acuíferos para acuíferos potables mediante inyección, aumento de fuentes superficiales	Incluye lo siguiente: Secundario <sup>f</sup> , filtración <sup>g</sup> , desinfección <sup>h</sup> y tratamiento avanzado <sup>i</sup>	Incluye lo siguiente: pH = 6.5-8.5 ≤ 2 UTN Coliformes fecales no detectables/100 mL <sup>b</sup> 1 mg/L Cl <sub>2</sub> residual <sup>c</sup> (mínimo) ≤ 3 mg/L COT Debe cumplir con los estándares de calidad de agua potable

a Valor medio en 24 h. No debe exceder 5 UTN en ningún momento. Se debe alcanzar antes de la desinfección

b Basado en el valor medio de 7 días. No debe exceder 14 UFC/100 mL en ninguna muestra

c Después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min

d Torres de enfriamiento

e Basado en el valor medio de 7 días. No debe exceder 800 UFC/100 mL en ninguna muestra

f El tratamiento secundario incluye sistemas de lodos activados, filtros percoladores, biodiscos y puede incluir lagunas de estabilización. El tratamiento secundario debe producir un efluente con 30 mg/L de DBO y SST

g La filtración se refiere al paso del agua residual a través de suelos naturales no alterados o a través de medios filtrantes como arena y/o antracita, telas filtrantes, microfiltros u otros procesos de membrana

h La desinfección significa la destrucción, inactivación o remoción de microorganismos patógenos por medios químicos, físicos y biológicos. La desinfección se puede llevar a cabo mediante cloración, radiación UV, ozonación, otros desinfectantes químicos, procesos de membrana u otros procesos. El uso de cloro no excluye el uso de otros procesos de desinfección

i El tratamiento avanzado incluye: precipitación química, adsorción con carbón activado, ósmosis inversa y otros procesos de membrana, barrido con aire, ultrafiltración e intercambio iónico

Fuente: EPA, 2004

**Tabla 2.7 Niveles de tratamiento alcanzables con varias combinaciones de operaciones unitarias y procesos usados para el tratamiento de aguas residuales**

Tratamiento	Calidad típica del efluente, mg/L excepto para turbiedad, UTN						
	SST	DBO <sub>5</sub>	DQO	N Total	N-NH <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	Turbiedad
Sedimentación primaria+filtración	20-40	50-100	100-200	20-30	15-25	6-10	20-30
Lodos activados+filtración con medio granular	4-6	<5-10	30-70	15-35	15-25	4-10	0.3-5
Lodos activados+filtración con medio granular+adsorción con carbón	<5	<5	5-20	15-30	15-25	4-10	0.3-3
Lodos activados/nitrificación, una etapa	10-15	5-15	20-45	20-30	1-5	6-10	5-15
Lodos activados/nitrificación-desnitrificación etapas separadas	10-25	5-15	20-35	5-10	1-2	6-10	5-15
Adición de sales metálicas a lodos activados	10-20	10-20	30-70	15-30	15-25	<2	5-10
Adición de sales metálicas a lodos activados+nitrificación/desnitrificación+filtración	<5-10	<5-10	20-30	3-5	1-2	<1	0.3-2
Remoción biológica de fósforo	10-20	5-15	20-35	15-25	5-10	<2	5-10
Remoción biológica de nitrógeno y fósforo+filtración	<10	<5	20-30	<5	<2	<2	0.3-2
Lodos activados+filtración con medio granular+adsorción con carbón+ósmosis inversa	<1	<1	5-10	<2	<2	<1	0.01-1
Lodos activados/nitrificación-desnitrificación y remoción de fósforo+filtración con medio granular+adsorción con carbón+ósmosis inversa	<1	<1	2-8	<0.1-0.5	<0.1-0.5	<0.1-0.5	0.01-1

Adaptado de: Metcalf y Eddy, 2003 y Tchobanoglous y Angelakis, 1996

El tren de tratamiento es más complejo en la medida en que se desea producir un efluente de mejor calidad (Tabla 2.7) y el reúso en consumo humano demanda los niveles más altos de remoción de contaminantes a fin de salvaguardar la salud pública. Por ello, los procesos avanzados juegan un papel determinante en el re-acondicionamiento del agua residual.

Los procesos avanzados se definen como un tratamiento adicional necesario para remover los componentes del agua residual que permanecen después del tratamiento secundario convencional. Estos componentes pueden ser materiales suspendidos, coloidales o disueltos. La materia disuelta puede incluir iones como el calcio, potasio, sulfato, nitrato y fosfato, y un número siempre creciente de compuestos orgánicos sintéticos de estructuras muy complejas. Los

compuestos orgánicos son una preocupación importante en el reúso de agua en consumo humano porque están ligados a problemas agudos de salud. Algunos de ellos pueden ser carcinógenos, teratógenos o mutágenos. Por ello se han desarrollado procesos avanzados para su eliminación. En la Tabla 2.8 se compara la calidad del agua tratada obtenida con un tratamiento convencional y dos avanzados.

**Tabla 2.8 Intervalos típicos de la calidad de un efluente tratado con diferentes niveles de tratamiento**

Parámetro	Calidad del efluente, mg/L		
	Después de tratamiento secundario con remoción biológica de nutrientes+desinfección	Después de tratamiento secundario con remoción biológica de nutrientes +filtración profunda+desinfección	Después de tratamiento secundario con remoción biológica de nutrientes+ microfiltración+ósmosis inversa+desinfección
Carbono orgánico total <sup>a</sup>	10-20	0-5	0-2
Orgánicos refractarios	1-5	1-5	1-5
Compuestos orgánicos volátiles	1-2	1-2	≤ 1
Metales	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>	≤ 1
Surfactantes	1-2	1-1.5	≤ 1
Sólidos disueltos totales	500-700	500-700	10-50

a Parámetro clasificado como convencional (se encuentra en cantidades que se pueden medir en mg/L)

b Depende del metal específico y de la operación del sistema biológico

Adaptado de: Metcal y Eddy, 2003

Como se observa en la tabla anterior, los procesos avanzados no se evalúan con parámetros convencionales<sup>8</sup>. La diversidad de contaminantes refractarios y las concentraciones en que se encuentran requieren de técnicas analíticas minuciosas e instrumentación de alta sensibilidad. Los compuestos orgánicos se miden juntos a través del carbono orgánico total<sup>9</sup> o individualmente (ya sean volátiles o semivolátiles) mediante cromatografía.

Por otro lado, los niveles de calidad del agua tratada más altos involucran procesos de membrana (en el caso de la Tabla 2.8, microfiltración y ósmosis inversa). Esto se debe a que los procesos de membrana son capaces de remover contaminantes de tamaños muy pequeños, disueltos y de pesos moleculares muy bajos (nanofiltración y ósmosis inversa). Por ello, en la actualidad, los procesos de membrana son una de las opciones más exitosas y versátiles dentro del tratamiento avanzado de las aguas residuales.

<sup>8</sup> Los parámetros convencionales son los que se utilizan en el diseño de sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales

<sup>9</sup> El carbono orgánico total se fracciona en el carbono orgánico disuelto –el que pasa a través de un filtro de 0.45 µm– y el particulado –el que se retiene en el filtro de 0.45 µm–

En general, los procesos de membrana se pueden utilizar para separar, concentrar y purificar una gran variedad de materiales. Sus principales aplicaciones en el tratamiento y regeneración del agua se basan en la filtración de partículas suspendidas (cuyos tamaños se miden en micras o más pequeñas), remoción de coloides y macromoléculas, transporte selectivo de especies iónicas y la remoción de prácticamente todo el material, suspendido y disuelto, contenido en el agua. En la Tabla 2.9 se muestra una clasificación de las aplicaciones de los procesos de membranas en el tratamiento del agua.

**Tabla 2.9 Aplicaciones de los procesos de membrana en el tratamiento del agua**

Proceso	Tratamiento
Microfiltración	Clarificación de efluentes Pretratamiento para nanofiltración y ósmosis inversa Metales pesados Separación de mezclas de disolventes orgánicos con agua (membranas cerámicas)
Ultrafiltración	Clarificación de efluentes Pretratamiento para nanofiltración y ósmosis inversa Metales pesados Concentración de aceites residuales
Nanofiltración	Remoción de dureza Trihalometanos Nitratos Sulfatos y carbonatos de calcio (incrustantes) Remoción de compuestos orgánicos sintéticos (plaguicidas, farmacéuticos activos y compuestos que alteran el sistema endócrino) Materia orgánica disuelta Carbono orgánico total Remoción de color Remoción de iones polivalentes
Ósmosis inversa	Desalación de agua de mar y salmuera Remoción de compuestos orgánicos sintéticos (plaguicidas, farmacéuticos activos y compuestos que alteran el sistema endócrino) Materia orgánica disuelta Carbono orgánico total Remoción de iones monovalentes y polivalentes

Adaptado de: AWWA, 1998

## 2.2. Tecnología de membranas

### 2.2.1. Definición de membrana

Una membrana es una fase<sup>10</sup> permeable o semi-permeable, frecuentemente un sólido polimérico que restringe el movimiento de ciertas especies. Esta fase agregada<sup>11</sup> es esencialmente una

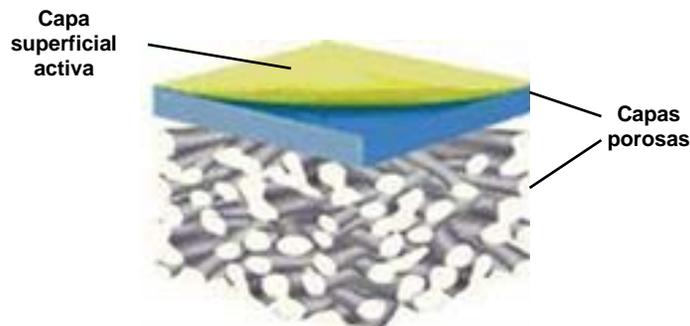
<sup>10</sup> Parte homogénea físicamente separable en un sistema formado por uno o varios componentes

<sup>11</sup> Se dice que es agregada porque durante la separación la membrana está inserta entre dos corrientes de agua que representan las otras dos fases del sistema

barrera entre la corriente de alimentación, que contiene las especies por separar y la corriente producto. Esta membrana o barrera controla las tasas relativas de transporte de varias especies a través de sí misma y, por ello, como con todas las separaciones, da un producto reducido en ciertos componentes (permeado) y un segundo producto concentrado en estos componentes (Scott y Hughes, 1996).

### 2.2.2. Estructura

El funcionamiento de la membrana depende de su estructura. Ésta determina esencialmente los mecanismos de separación y, por lo tanto, la aplicación de la membrana. En general hay dos tipos de estructuras: simétrica y asimétrica. Las membranas simétricas son de tres tipos generales: con poros aproximadamente cilíndricos, porosas y no porosas (homogéneas). Las membranas asimétricas se caracterizan por tener una estructura no uniforme, compuesta por una capa superficial activa (también llamada piel) soportada sobre una capa porosa (Figura 2-1). Hay tres tipos: porosa, porosa con capa superficial, y compuesta.



**Figura 2-1 Membrana asimétrica**

Adaptada de: Alfa Laval, 2005

#### 2.2.2.1. Membranas simétricas

Las membranas micro-porosas son las membranas simétricas de operación más simple. Tienen poros definidos y la separación se lleva a cabo por cribado. Los materiales que se usan en su fabricación son cerámicos, metales, carbono y polímeros.

#### 2.2.2.2. Membranas asimétricas

Estas membranas están hechas de una capa porosa (soporte) relativamente gruesa (0.2-0.5 mm) con una capa densa activa, "piel" ( $< 1 \mu\text{m}$ ). Se clasifican como membranas porosas y se usan en nanofiltración y ultrafiltración. La piel y el soporte son de materiales diferentes. Esto permite ajustar en cierto grado el funcionamiento de la membrana a aplicaciones específicas.

### 2.2.3. Materiales de las membranas

Los materiales que se usan para fabricar membranas deben tener las siguientes propiedades:

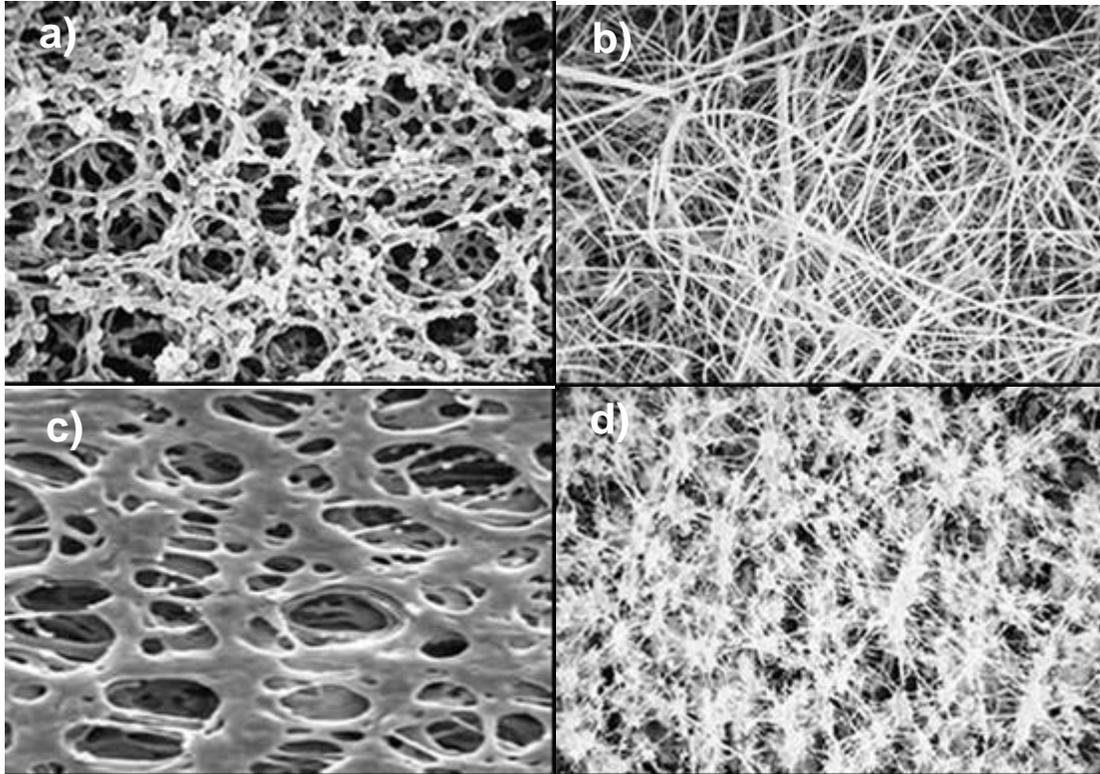
- Resistencia química (al agua de alimentación y fluidos de limpieza).
- Estabilidad mecánica.
- Estabilidad térmica.
- Alta permeabilidad.
- Alta selectividad.
- Operación estable.

Las membranas que se utilizan en los procesos dirigidos por presión se fabrican de una gran variedad de materiales. Éstos incluyen polímeros, cerámicas, vidrio y metales. No todos los materiales se pueden usar en la fabricación de membranas para todos los procesos, por ejemplo, hay membranas de ósmosis inversa y nanofiltración hechas de polímeros, pero el vidrio sólo se puede usar para fabricar membranas de ultrafiltración (Scott y Hughes, 1996). En la Tabla 2.10 se listan los materiales más usados en la fabricación de membranas y en la Figura 2-2 se presentan las estructuras de algunos materiales.

**Tabla 2.10 Materiales de las membranas**

Material	Aplicación	Características
Acetato de celulosa	Primera membrana de ósmosis inversa Ultrafiltración	pH operación = 3-7 T <sub>máx</sub> <sup>a</sup> = 30-35 °C Hidrofílica; Biodegradable
Compuestas con película delgada de poliamida	Ósmosis inversa Nanofiltración	pH operación = 2-12 T <sub>máx</sub> <sup>a</sup> = 70 °C Muy baja tolerancia al cloro libre
Polisulfonas	Ultrafiltración Microfiltración	pH operación = 1.5-12 T <sub>máx</sub> <sup>a</sup> = 80 °C Resistencia media a los oxidantes
Polisulfona sulfonada	Nanofiltración	Alta tolerancia al cloro
Polietersulfona	Similar a la polisulfona	Similar a la polisulfona
Difluoruro de polivinilideno	Microfiltración Ultrafiltración	pH operación = 1.5-12 T <sub>máx</sub> <sup>a</sup> = 80 °C Resistencia alta a los oxidantes
Poliacrilonitrilo	Ultrafiltración	Hidrofílico Tolerante a los disolventes
Politetrafluoruro de etileno	Microfiltración	-
Cerámica	Microfiltración; Ultrafiltración y Nanofiltración	pH operación = 1-14 Mayor tiempo de vida
Acero	Microfiltración	-
Vidrio	Ultrafiltración	-

a Temperatura de operación máxima  
Fuente: Scott y Hughes, 1996



**Figura 2-2 a) Acetato de celulosa; b) Fibra de vidrio; c) Polietersulfona; d) Politetrafluoruro de etileno**

Fuente: *GE Osmonics, Inc. 2005*

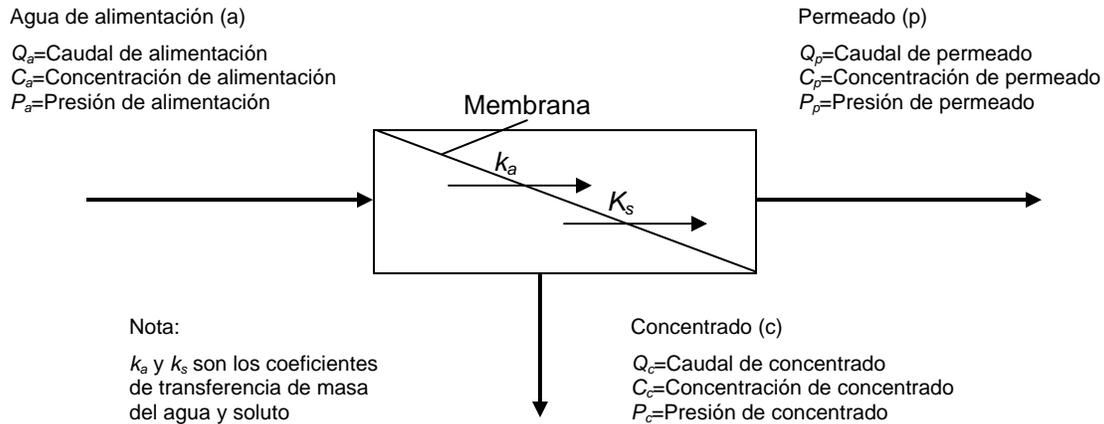
#### 2.2.4. Proceso de filtración con membranas

Se define como una corriente de alimentación que se divide en dos: permeado y concentrado. La corriente de alimentación es el agua que ingresa al sistema de filtración para ser purificada. El permeado, también conocido como agua producida, es el agua que pasa a través de la membrana (depurada). Finalmente, la corriente que contiene los solutos y partículas separados se conoce como concentrado, retenido, rechazo o corriente residual. En la Figura 2-3 se esquematiza este proceso.

#### 2.2.5. Clasificación de los procesos de membrana

El transporte selectivo de especies a través de una membrana se logra mediante la aplicación de una fuerza que atraviesa la membrana (fuerza motriz). Esto permite clasificar las separaciones con membranas a partir del mecanismo que transporta el material de un lado de la membrana al otro. Los mecanismos de transporte tienen su origen en la aplicación de trabajo mecánico, químico o eléctrico y controlan cinéticamente el flujo de materiales a través de la membrana. Las fuerzas motrices son la presión, concentración, temperatura o potencial eléctrico. Los procesos de

membranas utilizados en el tratamiento del agua son generalmente procesos impulsados por presión (excepto la electrodiálisis).



**Figura 2-3 Proceso de filtración con membranas**

Adaptado de: Metcalf y Eddy, 2003

Los procesos impulsados por presión se clasifican en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa con base en los tipos de contaminantes que rechazan, las presiones de operación que utilizan y las dimensiones nominales de los poros de las membranas (Figura 2-4).

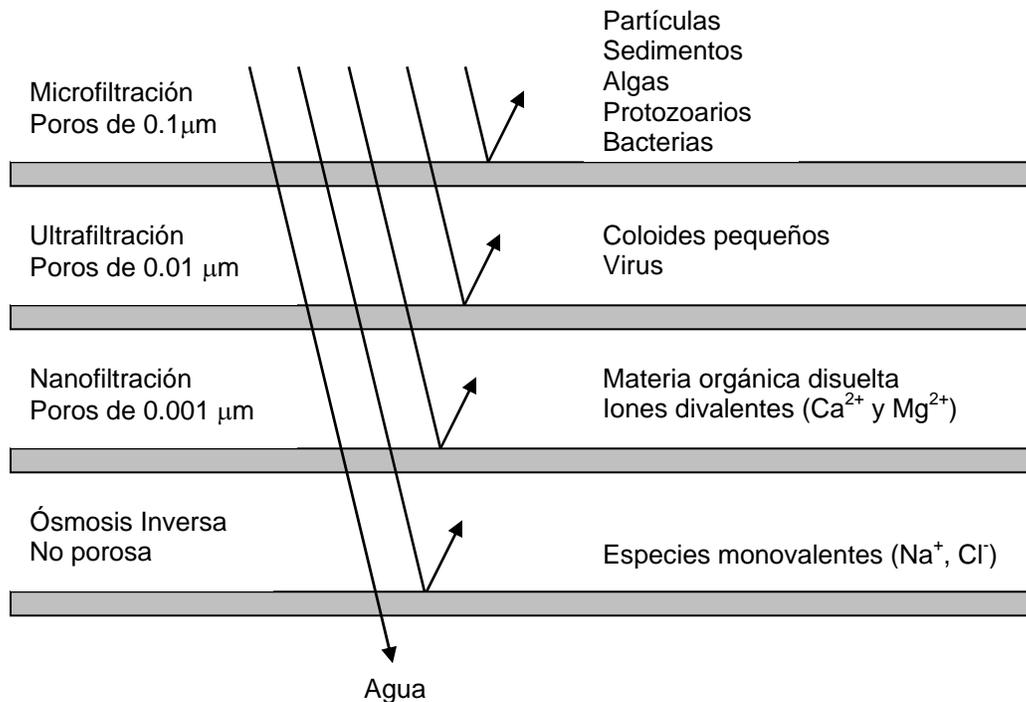
### 2.2.6. Formatos y módulos

Para su instalación en un sistema de filtración las membranas se arreglan y presentan en diversos formatos: enrolladas, tubulares, fibra hueca y planas. Con estos formatos se fabrican módulos; éstos se interconectan para formar un arreglo (varios módulos en serie o en paralelo) y, finalmente, la unión de arreglos forma una planta de filtración con membranas. En la Figura 2-5, Figura 2-6 y Figura 2-7 se presentan los formatos disponibles en el mercado.

### 2.2.7. Configuración de los sistemas de filtración con membranas

La forma en que se unen los módulos y grupos de módulos puede generar numerosos arreglos. La selección de uno depende del tipo de proceso -no todos los arreglos son aplicables a todos los procesos- y de la concentración esperada en la corriente concentrada -los arreglos tienen diferentes capacidades de concentración-. En general, los arreglos se agrupan en sistemas continuos y por lote. Los sistemas continuos se pueden armar con varios arreglos conectados en serie para formar un sistema de varias etapas, por ejemplo, un sistema con disminución gradual de

módulos por etapa<sup>12</sup> o uno de varias etapas con recirculación y bombeo en cada etapa<sup>13</sup>. Los sistemas por lote se pueden aplicar para todos los procesos de membrana y aunque son los más simples presentan un número considerable de variaciones. El esquema del sistema por lote más sencillo se muestra en la Figura 2-8 donde se puede observar que la corriente de concentrado se regresa al tanque de alimentación (lote) mientras que el permeado se colecta continuamente. En este sistema la presión aplicada y la velocidad de flujo cruzado<sup>14</sup> se obtienen de la misma y única bomba, la bomba de alimentación<sup>15</sup>.



**Figura 2-4 Clasificación de los procesos de membrana**

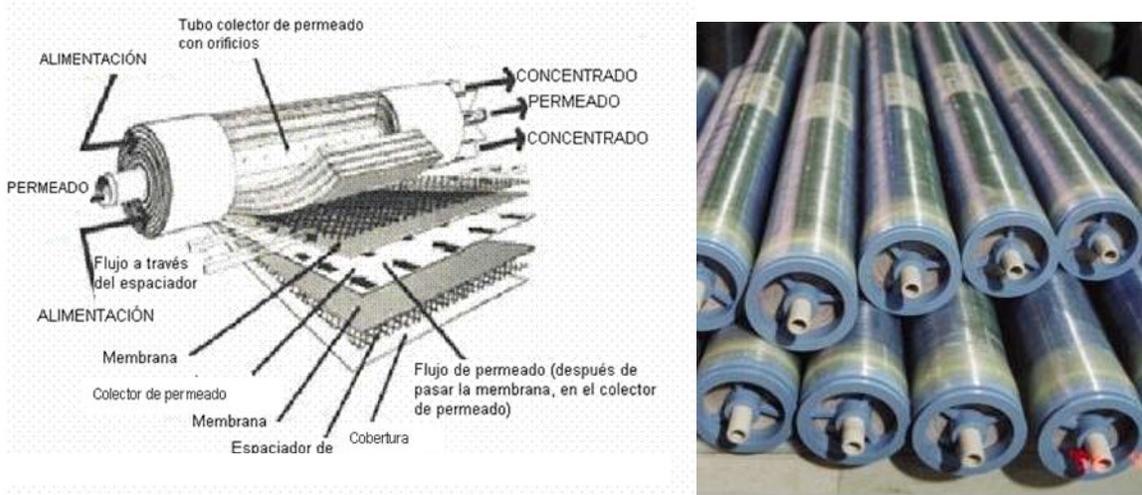
Adaptado de: MWH, 2005

<sup>12</sup> Esta configuración se denomina *Taper plant* en Scott y Hughes, 1996, y *Concentrate-staged array* en MWH, 2005

<sup>13</sup> Esta configuración se denomina *Feed and bleed* en Scott y Hughes, 1996

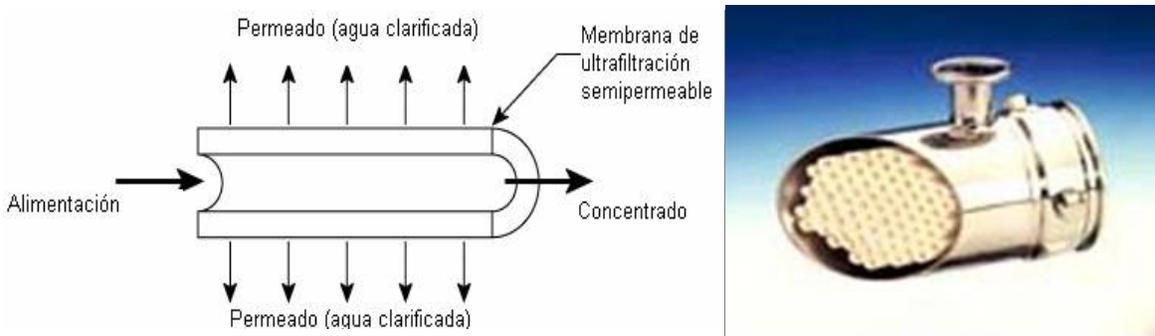
<sup>14</sup> La velocidad de flujo cruzado es la velocidad lineal que lleva el agua de alimentación (m/s) al fluir paralela a la superficie de la membrana. Se dice que es de flujo cruzado porque el agua que atraviesa la membrana (permeado) lo hace en dirección ortogonal al agua de alimentación. Entonces los flujos de alimentación y permeado son ortogonales, o bien, cruzados

<sup>15</sup> En otros sistemas como el *Feed and bleed* y el *Batch with recycle around the module snack* se usa la bomba de alimentación para la presión aplicada y la(s) bomba(s) de recirculación para mantener la velocidad de flujo cruzado



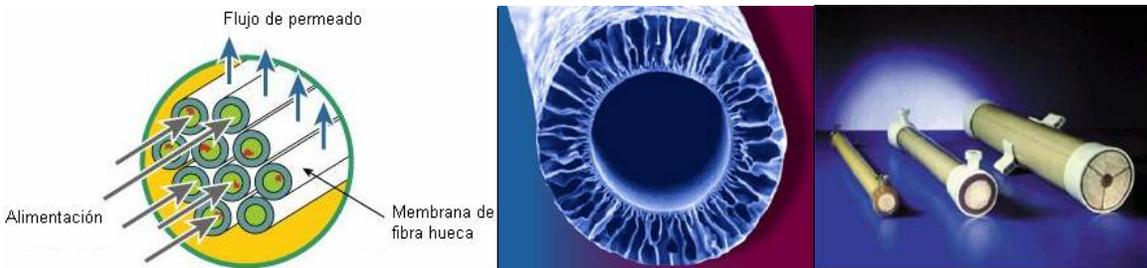
**Figura 2-5 Membrana enrollada**

Adaptado de: *Koch Membrane Systems, Inc., 2005*



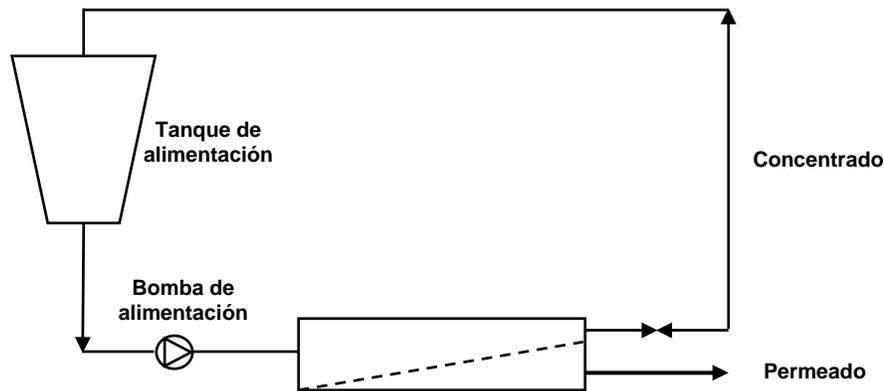
**Figura 2-6 Membrana tubular**

Adaptado de: *Koch Membrane Systems, Inc., 2005; Aquious, ITT Industries, 2005*



**Figura 2-7 Membrana de fibra hueca**

Adaptado de: *Koch Membrane Systems, Inc., 2005*



**Figura 2-8 Sistema de filtración por lote**

Adaptado de: Scott y Hughes, 1996

### 2.2.8. Evaluación de la efectividad de una membrana

La efectividad de una membrana se define en términos de dos factores simples, flux de permeado y selectividad (Scott y Hughes, 1996). La efectividad de un sistema, en términos de su recuperación. Estos factores se discuten en las siguientes secciones.

#### 2.2.8.1. Flux de permeado

El flux de permeado ( $J_p$ ) es el volumen de agua que pasa a través de una unidad de área de membrana por unidad de tiempo. Este parámetro se usa para evaluar la producción de permeado de cualquier sistema de filtración con membranas en términos de la extensión de membrana necesaria para producir cierto flujo de agua filtrada (Scott y Hughes, 1996) y está estrechamente relacionado con los costos de inversión y operación de dichos sistemas (AWWA, 1998). Para calcularlo, hay que distinguir entre la filtración de agua muy limpia y la filtración de agua con especies disueltas. El flux para agua muy limpia se calcula con:

$$J_p = \frac{\Delta p}{\mu R_m} \quad (1)$$

donde

$$J_p = \left[ \frac{m^3}{m^2 s} \right] = \left[ \frac{m}{s} \right]; \text{ Usualmente se expresa en } \left[ \frac{L}{m^2 h} \right],$$

$\Delta p$ : caída de presión a través de la membrana en  $\left[ \frac{N}{m^2} \right] = Pa$ ,

$\mu$ : viscosidad absoluta del agua en  $\left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right]$ , y

$R_m$ : resistencia hidráulica de la membrana limpia en  $\left[ \frac{m^2}{m^3} \right]$

El flux para agua con especies disueltas se calcula con:

$$J_p = \frac{(\Delta p - \sigma_k \Delta \Pi)}{\mu R_m} \quad (2)$$

donde

$\sigma_k$ : constante empírica (adimensional) y

$\Delta \Pi$ : presión osmótica a través de la membrana en pascales (Pa).

En este caso, la presión osmótica es importante porque representa una presión opuesta a la presión requerida para llevar a cabo la filtración con membranas de nanofiltración y ósmosis inversa (AWWA, 1998).

Estas ecuaciones se usan para predecir el flujo de una membrana. Aquí se presentan para analizar los factores que favorecen o menoscaban el paso del agua a través de la membrana. La caída de presión a través de la membrana es directamente proporcional a la presión aplicada (de operación) y favorece directamente al flujo de permeado; sin embargo, si el agua tiene especies disueltas, la presión osmótica<sup>16</sup> ejerce una fuerza opuesta a la presión aplicada que disminuye la fuerza neta que impulsa al agua. La resistencia hidráulica de la membrana es dependiente del tiempo: la acumulación de materiales cerca, sobre y en el interior de la membrana bloquea y constriñe las cavidades de la membrana; por lo tanto, aumenta la resistencia de la membrana al paso del agua. La viscosidad del agua tiene un efecto dependiente de la temperatura: a mayor temperatura, menor viscosidad y mayor flujo

<sup>16</sup> La que ejercen las moléculas del agua en una disolución sobre la membrana semipermeable que la separa de otra de mayor concentración. La presión osmótica tiene un efecto significativo en la nanofiltración y ósmosis inversa, no así en la microfiltración y ultrafiltración

### 2.2.8.2. Selectividad (retención)

La retención ( $R$ ) es la fracción de soluto en la alimentación retenida por la membrana, matemáticamente es la unidad menos la razón de la concentración del soluto en el permeado a la concentración del soluto en la alimentación.

$$R = 1 - \left( \frac{C_p}{C_f} \right) \quad (3)$$

donde

$R$ : [adimensional]

$C_p$ : concentración en el permeado en mg/L y

$C_f$ : concentración en la alimentación en mg/L

### 2.2.8.3. Recuperación

La recuperación de un sistema de membranas ( $r$ ) es el volumen de permeado producido por unidad de volumen de agua introducida al sistema, o bien, la razón del flujo de permeado al flujo de alimentación.

$$r = \frac{F_p}{F_a} \quad (4)$$

donde

$r$ : [adimensional]

$F_p$  y  $F_a$ : flujos de permeado y alimentación en L/h, respectivamente (AWWA, 1998).

## 2.3. Nanofiltración

El constante crecimiento de la demanda de agua unido a la contaminación de fuentes de agua potable ha impulsado la planeación de numerosos proyectos de reutilización de agua en consumo humano. Estos proyectos deben enfrentar el reto de la contaminación orgánica y química que plantea un peligro para la salud humana (Agenson *et al.*, 2003; Kimura *et al.*, 2003a). Los métodos convencionales de potabilización y tratamiento de aguas residuales tienen cierta capacidad para remover y transformar contaminantes orgánicos que se presentan en bajas concentraciones; sin embargo, generalmente tienen dificultades para cumplir con las regulaciones establecidas y, por ello, no resultan económicos (Ozaki y Li, 2002). Además, la información disponible de la capacidad de estos sistemas para eliminar contaminantes específicos (como los compuestos orgánicos

relacionados con trastornos del sistema endocrino) es muy limitada<sup>17</sup> (Kimura *et al.*, 2003b). Los micro-contaminantes orgánicos que pueden persistir a través o formarse durante el tratamiento del agua residual y que están asociados con efectos potenciales en la salud humana son los subproductos de la desinfección, trastornadores del sistema endocrino y compuestos farmacéuticos activos. Las tecnologías que han probado ser capaces de remover estos micro-contaminantes del agua son los procesos de membrana de alta presión como la nanofiltración y ósmosis inversa (Kimura *et al.*, 2003b).

La nanofiltración es una tecnología de membrana desarrollada recientemente para enfrentar varias necesidades del tratamiento y purificación del agua (Wang y Chung, 2005). Es un proceso de filtración (separación en fase líquida) que se lleva a cabo mediante la aplicación de una presión y tiene propiedades (flux de permeado y rendimiento de separación) que están entre las propiedades de la ósmosis inversa y ultrafiltración (Raman *et al.*, 1994 en Wang y Chung, 2005; Bargeman *et al.*, 2005). Se considera que tiene características funcionales únicas en cuanto al ablandamiento y remoción de compuestos orgánicos solubles. Su efectividad depende de las características del agua de alimentación, especialmente de la fuerza iónica, concentraciones y tipos de cationes divalentes y del contenido de materia orgánica natural. En general, se sabe que no hay un procedimiento generalizado que permita la predicción de la efectividad de un sistema de nanofiltración bajo condiciones variables de la fuente de alimentación (Shalan, 2002).

### 2.3.1. Aplicaciones

Las membranas de nanofiltración se utilizan en la potabilización de agua, tratamiento de aguas residuales y diversas aplicaciones industriales (Tabla 2.11).

**Tabla 2.11 Aplicaciones de la nanofiltración**

Aplicación	Proceso
Tratamiento de agua y aguas residuales	Remoción de dureza y orgánicos disueltos
Tratamiento de agua para consumo humano	Remoción de arsénico
Industria lechera	Desmineralización
Síntesis orgánica	Remoción de pequeñas moléculas orgánicas
Industria del galvanizado	Recuperación de iones de metales pesados
Industria textil y del papel	Tratamiento de efluentes
Industria farmacéutica	Purificación y separación de farmacéuticos

Adaptado de: Wang y Chung, 2005 y Ozaki y Li, 2002

La nanofiltración se usa ampliamente para la remoción de contaminantes orgánicos, naturales y sintéticos, sales, color y dureza en la potabilización de agua y tratamiento de aguas residuales (Agenson *et al.*, 2003). Ha tenido éxito en el tratamiento de agua superficial porque ofrece

<sup>17</sup> En parte por la dificultad del análisis de estos químicos (Kimura *et al.*, 2003b)

numerosas ventajas con respecto a las técnicas convencionales, por ejemplo: elimina la desinfección química, remueve contaminantes biológicos y requiere de presiones de operación bajas –respecto de las presiones aplicadas en la ósmosis inversa– ya que las membranas de nanofiltración presentan una presión osmótica pequeña (Shaalan, 2002; Thanuttamavong *et al.*, 2002; Agenson *et al.*, 2003).

En aplicaciones más específicas, como la eliminación de estrógenos y esteroides en el tratamiento de aguas residuales, la nanofiltración ha adquirido una importancia especial debido a que las plantas de tratamiento convencionales no son capaces de eliminar este tipo de contaminantes (Thanuttamavong *et al.*, 2002; Weber *et al.*, 2004).

### 2.3.2. Propiedades de las membranas de nanofiltración

Las propiedades de las membranas de nanofiltración son el peso molecular de corte, tamaño de poro y carga superficial. El peso molecular de corte es el peso molecular del soluto más ligero que rechaza la membrana en un 90%. Las membranas de nanofiltración tienen un peso molecular de corte de 200-1000 Daltons (Wang y Chung, 2005) aunque algunos autores indican un intervalo más estrecho, 100-500 Daltons (Metcalf y Eddy, 2003). El tamaño de poro de una membrana de nanofiltración es, más bien, una estimación a nano-escala del tamaño medio de las cavidades presentes en la red polimérica de la membrana y se estima en 1-2 nm (Galambos *et al.*, 2004 en Matsumoto *et al.*, 2005; Ku *et al.*, 2005; Wang y Chung, 2005). La carga superficial de la membrana se puede definir como la carga que adquiere la membrana por la disociación de los grupos funcionales que se encuentran en su superficie. Estos grupos son, entre otros, ácidos sulfónicos o carboxílicos (Petersen, 1993 en Wang y Chung, 2005). Sin embargo, se ha encontrado que las membranas de nanofiltración se pueden cargar negativa o positivamente dependiendo no sólo del tipo de membrana sino también de las características químicas del agua de alimentación (pH, concentración de electrolitos y presencia de materia orgánica natural; Thanuttamavong *et al.*, 2002; Bellona y Drewes, 2005). Entonces, la carga superficial de la membrana es el resultado de la interacción electrostática entre el material de la membrana y los iones del agua de alimentación. Este fenómeno permite que, por ejemplo, una membrana cargada negativamente sea de gran utilidad para la división de mezclas salinas o separación selectiva de iones (Wang y Chung, 2005). Por ello –una vez que se ha visto que la carga juega un rol importante en la efectividad y tendencia al taponamiento de las membranas–, ha habido un gran interés en realizar estudios sobre la caracterización electrocinética de la superficie de las membranas de nanofiltración (Matsumoto *et al.*, 2005).

### 2.3.3. Caracterización de las membranas de nanofiltración

La caracterización de las membranas de nanofiltración es la determinación cuantitativa de sus propiedades. El peso molecular de corte y el tamaño de poro se obtienen a partir de experimentos de transporte de solutos no cargados<sup>18</sup> (Nakao, 1994 en Wang y Chung, 2005) y la carga superficial mediante la medición del potencial de la membrana (Matsumoto *et al.*, 2005).

En general, se espera que al conocer las propiedades de la membrana y la composición química del agua por tratar (peso molecular, tamaño y carga de los componentes del agua) se pueda predecir la aplicabilidad y efectividad de la membrana de nanofiltración.

### 2.3.4. Rechazo de contaminantes

El rechazo de contaminantes en una membrana de nanofiltración depende de las propiedades de las membranas, de las características fisicoquímicas de los contaminantes (tamaño, carga y grado de disociación) y del pH<sup>19</sup> de la solución de alimentación. Si los contaminantes son orgánicos, el mecanismo de nanofiltración se describe mediante el fenómeno de exclusión por tamaño. Si son inorgánicos, el rechazo ocurre por repulsión electrostática (Thanuttamavong *et al.*, 2002).

#### 2.3.4.1. Inorgánicos

Los estudios acerca del rechazo de contaminantes inorgánicos han mostrado, por un lado, que el incremento de la concentración de cationes divalentes en el agua de alimentación puede reducir la carga de la membrana y, por ende, el rechazo de iones inorgánicos y por otro, que se puede favorecer el rechazo de algún ión en particular (magnesio, perclorato o metales pesados) mediante la manipulación de la carga de la membrana (Bellona y Drewes, 2005).

#### 2.3.4.2. Orgánicos

Las implicaciones en la salud de los compuestos orgánicos han generado un gran número de estudios acerca de su eliminación a través de la filtración con membranas. Las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa han probado ser efectivas en esta aplicación, por ello, hay un gran interés en conocer a fondo los mecanismos que gobiernan el rechazo de dichos compuestos. Esto ha llevado a los investigadores a realizar un gran número de experimentos para determinar qué

---

<sup>18</sup> El tamaño de poro y la distribución del tamaño del poro se pueden obtener, también, mediante la relación de Stocks-Einstein (Matsumoto *et al.*, 2005)

<sup>19</sup> La variación del pH de la solución de alimentación produce cambios en la carga de la membrana que determinan si la membrana tiene carga negativa, positiva o neutral (Thanuttamavong *et al.*, 2002)

factores y en qué magnitud influyen la remoción de compuestos orgánicos en la filtración con membranas de nanofiltración y ósmosis inversa.

Uno de los hallazgos generales más importantes es que el fenómeno del rechazo depende de la interacción de tres factores fundamentales: soluto, membrana y agua por tratar. La interacción entre estos tres factores se multiplica en la interacción de las propiedades de cada factor. Así, el efecto combinado del tamaño, polaridad, carga, solubilidad, tendencia a la difusión, estructura, peso molecular y afinidad con el agua del compuesto orgánico; el tamaño de poro, carga y afinidad con el agua de la membrana; y el pH y contenido de cationes divalentes del agua por tratar, determinan el mecanismo y la magnitud de la remoción. Esta multiplicidad de interacciones se ha evaluado con compuestos específicos, principalmente con compuestos trastornadores del sistema endocrino, farmacéuticos activos, plaguicidas o sustitutos de ellos y compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. Los resultados han demostrado que las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa son capaces de remover estos compuestos a través de la repulsión electrostática, cribado y afinidad con el agua<sup>20</sup>. Además, se ha visto que el pH y contenido de cationes divalentes del agua de alimentación influyen la remoción así como lo hacen las variables de operación (flux, presión de operación y recuperación). Sin embargo, no se considera todavía que se tenga una comprensión total de la manera en que los compuestos orgánicos se rechazan, o bien, pasan a través de las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa. En la Tabla 2.12 se resumen las propiedades e interacciones estudiadas por diferentes investigadores.

### **2.3.5. Flux de la membrana de nanofiltración**

El flux de permeado en un sistema de nanofiltración depende de numerosas variables entre las que destacan, aunque no se limita a ellas, las características de la membrana, geometría del módulo, características del agua cruda, concentraciones y tipos de contaminantes, y condiciones de operación (Shalan, 2002). Se ha visto que una pequeña concentración de compuestos orgánicos causa un decremento sustancial en el flux (Schaep *et al.*, 1998) y que, bajo ciertas condiciones, la concentración de materiales incrustantes (cationes divalentes y materia orgánica natural) puede llevar a interacciones complejas que causen una caída rápida, a veces irreversible, del flux debido a la capa del ensuciamiento (Shalan, 2002).

---

<sup>20</sup> Un compuesto con poca afinidad por el agua se rechaza con mayor facilidad

**Tabla 2.12 Propiedades del soluto y las membranas que influyen en la remoción de compuestos orgánicos**

Propiedades		Referencia
Solutos	Tamaño	Bellona y Drewes, 2005; Ozaki y Li, 2002; Agenson <i>et al.</i> , 2003 <sup>a</sup> ; Kimura <i>et al.</i> , 2003a
	Polaridad	Kimura <i>et al.</i> , 2003a
	Carga	Bellona y Drewes, 2005; Ozaki y Li, 2002 <sup>b</sup> ; Kimura <i>et al.</i> , 2003a
	Solubilidad	Kimura <i>et al.</i> , 2003a
	Tendencia a la difusión	Kimura <i>et al.</i> , 2003a
	Ramificación de los grupos funcionales	Agenson <i>et al.</i> , 2003
	pKa (grado de disociación)	Bellona y Drewes, 2005; Ozaki y Li, 2002
	Estructura	Ozaki y Li, 2002
	Peso molecular	Ozaki y Li, 2002; Agenson <i>et al.</i> , 2003
	Hidrofobicidad	Agenson <i>et al.</i> , 2003; Kimura <i>et al.</i> , 2003a
Membrana	Tamaño de poro	Bellona y Drewes, 2005
	Carga	Bellona y Drewes, 2005
	Afinidad con el agua (hidrofobicidad)	Bellona y Drewes, 2005
Agua por tratar	pH	Bellona y Drewes, 2005; Ozaki y Li, 2002

a Los experimentos se llevaron a cabo con compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. El tamaño se midió como anchura y longitud de la molécula

b Los experimentos se llevaron a cabo con una membrana de ósmosis no cargada

### 2.3.6. Modelos de transporte

Uno de los objetivos de la investigación en torno a los mecanismos de rechazo de los compuestos orgánicos por membranas de nanofiltración ha sido el desarrollo de modelos matemáticos que sean capaces de predecir la efectividad de una membrana a partir de las propiedades de la membrana y el análisis fisicoquímico del agua. Se han propuesto muchos modelos matemáticos para describir y predecir el proceso de rechazo. Generalmente, los mecanismos de rechazo de la nanofiltración involucran el cribado (barrera espacial), exclusión de Donnan (interacción electrostática de solutos cargados con cargas adheridas a la matriz de la membrana y exclusión dieléctrica (interacción de los iones con la carga polarizada; Wang y Chung, 2005). Estos modelos han producido buenas predicciones en la remoción de compuestos específicos y soluciones sintéticas; sin embargo, aún son insuficientes para predecir la efectividad de una membrana en la filtración de cualquier tipo de agua, proveniente de una fuente convencional o contaminada. Por ello, aunque en el futuro se vislumbre el uso de modelos poderosos que puedan evaluar *a priori* la efectividad de una membrana para cualquier aplicación, hoy en día, su uso sigue siendo incierto y la necesidad de pruebas experimentales para evaluar la facultad de la membrana de tratar un tipo de agua en particular sigue vigente.

### 2.4. Pruebas de laboratorio

Para diseñar un sistema de filtración con membranas es necesario desarrollar una serie de etapas que inician con la evaluación teórica de la aplicabilidad de un proceso de membranas (ósmosis

inversa, nanofiltración, ultrafiltración o microfiltración) basada en la información sobre los requerimientos del tratamiento, la caracterización del agua por tratar, las especificaciones de las corrientes de permeado y concentrado (normatividad) y la información ofrecida por los fabricantes.

Luego, se confirma la factibilidad del proceso seleccionado y se evalúa la compatibilidad del agua de alimentación con varios tipos de membranas mediante pruebas de laboratorio a pequeña escala. Estas pruebas permiten seleccionar la membrana más efectiva para una aplicación específica mediante la comparación de las membranas ofrecidas por varios fabricantes<sup>21</sup>. Cada fabricante ofrece varios modelos de membranas para un mismo proceso y la diversidad de modelos hace que la matriz de comparación se componga de los modelos ofrecidos por los diferentes fabricantes.

Algunos fabricantes ofrecen las pruebas de laboratorio a pequeña escala como un servicio a los consumidores. Sin embargo, este servicio sólo permite la comparación de los modelos de membranas de un mismo fabricante. Por lo tanto, no evalúa todas las posibilidades del mercado.

Las pruebas de laboratorio a pequeña escala resuelven el problema de la factibilidad técnica de un proceso de membrana. Sin embargo, son incapaces de producir conclusiones válidas acerca de la probable productividad de la membrana (flux de diseño) porque tienen condiciones de flujo diferentes a las que se presentan en un sistema a plena escala:

1. El sistema a plena escala presenta resistencias al flujo que no se pueden apreciar con equipos más pequeños y de geometría distinta.
2. La distribución del agua en el canal de flujo<sup>22</sup>, entre tubos y entre fibras en el equipo de laboratorio es diferente a la distribución de agua en los módulos usados en una planta real.

Otro problema a considerar es que la efectividad del sistema se evalúa a través del cálculo de la recuperación (sección 1.2.8.3.)<sup>23</sup>. Por ello, es importante que el agua recorra una longitud suficiente dentro del módulo de prueba para reproducir la recuperación del módulo pensado para el sistema a plena escala. Nuevamente, esto es imposible con equipos de laboratorio a pequeña escala (por su tamaño). Se logra a través de la experimentación con pruebas piloto que conforman la última etapa del proceso de diseño de un sistema de filtración con membranas.

---

<sup>21</sup> Es importante hacer notar que en la comparación entre membranas de diferentes fabricantes se comparan las membranas que los fabricantes recomiendan para una misma aplicación. Es decir, todas las membranas que se prueban tienen una alta probabilidad de ser efectivas en la aplicación. Determinar cuál es la mejor, es uno de los productos de las pruebas de laboratorio a pequeña escala

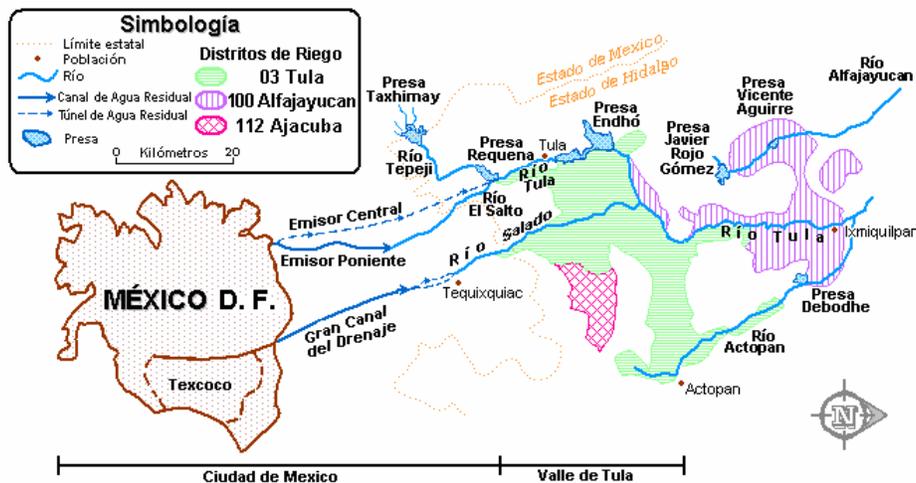
<sup>22</sup> Espacio dentro del módulo donde están en contacto el agua y la membrana bajo presión, donde se lleva a cabo la filtración

<sup>23</sup> Cociente entre el flujo de permeado y el flujo de alimentación

Las pruebas piloto permiten hacer estimaciones precisas sobre el flux de permeado (flux de diseño), mediante el uso de formatos y módulos configurados en la misma geometría que tendrán en el sistema a plena escala, optimar los parámetros de operación, caracterizar el taponamiento y diseñar el régimen de limpieza (Scott y Hughes, 1996).

## 2.5. Reúso en el Valle del Mezquital

De acuerdo con los usos del agua en la ciudad de México (80% municipales, 5% industriales y 15% riego, AMC, 2004) las aguas residuales que se generan en la ciudad son una mezcla de aguas residuales municipales e industriales y pluviales. Se generan más de 40 m<sup>3</sup>/s durante el tiempo de estiaje y en promedio 80 m<sup>3</sup>/s durante el tiempo de lluvias (AMC, 2004). El agua se lleva hacia el Valle del Mezquital (Distrito de Riego 03) a través de tres conductos: el emisor poniente (Tajo de Nochistongo, 1789), el Gran Canal (1898) y el Emisor Central (1975) (Jiménez y Landa, 1998) (Figura 2-9). El Valle del Mezquital se encuentra en el Valle de Tula, al sur del Estado de Hidalgo. Se localiza aproximadamente a 100 km al norte de la Ciudad de México. Es de clima templado subárido con temperatura media anual de 17 °C, precipitación del orden de 550 mm y evapotranspiración de 1750 mm. La época de lluvias se limita a los meses de junio a septiembre (AMC, 2004).



**Figura 2-9 Sistema hidrológico del Valle del Mezquital**

Adaptado de: Jiménez y Chávez, 2004

La mayor parte de las aguas residuales de la Cd. de México, 75% (Siebe y Cifuentes, 1995 en Downs *et al.*, 1999) se reutiliza en la agricultura sin haber sido tratada formalmente para el riego de 90 000 ha (Jiménez y Landa, 1998). Esta práctica tiene sus orígenes en 1896 en las localidades de

Tlaxcopan, Tlahuelilpan y Mixquiahuala del Valle del Mezquital (AMC, 2004) y ha tenido consecuencias diversas y contrapuestas.

Por un lado, la reutilización del agua residual en una región semiárida –como el Valle del Mezquital– representa un recurso valioso en la producción agrícola debido al suministro de agua para la irrigación y la aportación considerable de nutrientes al suelo de siembra (Siebe y Cifuentes, 1995). Por ello, ha promovido el desarrollo de la agricultura y aumentado la producción de maíz en 150%, cebada en 100 %, tomate en 94%, avena para forraje en 83% y alfalfa en 71%, entre otros cultivos (Jiménez y Landa, 1998). Sin embargo, existe evidencia sobre la permanencia de infecciones parasitarias entre los agricultores y sus familias, expuestos al agua cruda durante el riego (Siebe y Cifuentes, 1995). Además, un estudio sobre exposición oral y dérmica de la población local al agua subterránea de la región mostró que el 10% de las personas participantes contraen diarrea con frecuencia y el 9% tiene irritaciones persistentes en la piel (Downs *et al.*, 1999).

Por otro lado, las láminas de riego usadas para lavar las sales de los suelos ( $1.5$  a  $2.2 \text{ m ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) son altas y tanto éstas como el transporte de las aguas negras por medio de canales sin revestir han ocasionado la recarga del acuífero local. La infiltración se calcula en  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  que equivalen a 13 veces la recarga natural (sin la presencia de aguas negras). Así, los niveles piezométricos del agua del subsuelo se han elevado en tal magnitud que han surgido manantiales con gastos de 40 a 600 L/s. Éstos, se han usado como fuentes de agua para todas las actividades de la región. Por ejemplo, el manantial de Cerro Colorado es uno de los más grandes con 600 L/s y abastece los poblados de Mangas, Tezontepec, Ajacuba y San Salvador (AMC, 2004).

En estas condiciones, la calidad del agua debe ser evaluada con un criterio más riguroso que el que establecen las normas de calidad de agua para consumo humano porque éstas están conceptualizadas para fuentes de agua no usadas (limpias). *Máxime* que algunos estudios han detectado compuestos tóxicos no considerados dentro de la norma de agua potable (Jiménez *et al.*, 1999). Además de que al aplicar cloro como desinfectante, previo a la distribución del agua, se forman compuestos organoclorados que también han sido detectados (Gutiérrez, 2002). Dichos compuestos no se usan como parámetros de operación en el sitio ni para avalar la calidad “potable” del agua.

Por estos motivos se ha determinado que el proceso de potabilización debiera ser más complejo que la simple cloración que se emplea y considerar el uso de un sistema de membranas combinado con desinfección con cloro o luz UV (ultravioleta). En particular, se seleccionó la nanofiltración y, en este trabajo, se evaluaron varios tipos de membranas con base en el carbono orgánico total, absorbancia UV a 254 nm, sólidos disueltos totales, conductividad, turbiedad, pH,

alcalinidad y dureza con el fin de seleccionar una membrana capaz de producir agua apta para consumo humano, aceptable y no corrosiva.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Con el fin de seleccionar el tipo de membrana conveniente para producir agua apta para consumo humano a partir del acuífero del Valle de Tula, se utilizó el agua del manantial Cerro Colorado, ubicado dentro del Distrito de Riego 03 y producto de la recarga incidental de dicho acuífero con las aguas negras de la Ciudad de México. Se estudiaron once tipos de membranas con tres presiones de operación cada una. Las membranas se evaluaron en términos de su selectividad, productividad (flux) y presión de operación para producir un permeado de calidad potable de acuerdo con la normatividad nacional y los criterios internacionales para reúso en consumo humano.

La comparación de las membranas se llevó a cabo en dos etapas. En la primera, se seleccionaron aquellas cuyas selectividades permitieran la producción de permeados que cumplieron con los valores establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM, 2000) y las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA, 2002), la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004) y la Unión Europea (UE, 1998) en materia de agua potable así como los valores establecidos por la EPA en materia de reúso en consumo humano, con base en parámetros convencionales como el carbono orgánico total (COT), absorbancia de luz ultravioleta a 254 nanómetros de longitud de onda ( $AUV_{254}$ ), sólidos disueltos totales (SDT), conductividad, turbiedad, pH, alcalinidad y dureza. En la segunda, se evaluó la selectividad de las membranas seleccionadas en términos de parámetros no convencionales: compuestos orgánicos específicos, bacteriófagos y toxicidad.

### 3.1. Muestreo

El agua estudiada se tomó del manantial denominado Cerro Colorado (latitud norte  $20^{\circ}07'13.38''$  y longitud oeste  $99^{\circ}15'43.92''$ ), ubicado en el municipio de Tlahuelilpan, Hidalgo (Figura 3-1).

Se llevaron a cabo 18 muestreos con la frecuencia indicada en la Tabla 3.1. Cada muestreo consistió en tomar entre 240 y 480 L de agua que fueron transportados en garrafones PET (polietilén tereftalato) y almacenados a  $4^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3-1 Ubicación del manantial Cerro Colorado

Tabla 3.1 Frecuencia de muestreo

Año	Mes	Día
2004	Septiembre	28
	Noviembre	10
2005	Enero	18
	Febrero	22
		28
	Marzo	7
		14
	Abril	28
		15
	Mayo	25
		11
	Junio	15
		28
	Julio	6
		15
Agosto	23	
	Septiembre	7

### 3.2. Caracterización

Los parámetros medidos en la caracterización del agua del manantial se listan en la Tabla 3.2. La temperatura, pH, conductividad y turbiedad se midieron en el sitio. La alcalinidad, dureza, los sólidos disueltos totales (SDT), coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), carbono orgánico total (COT) y absorbancia de luz ultravioleta a 254 nanómetros ( $AUV_{254}$ ) se midieron en el laboratorio.

Tabla 3.2 Parámetros medidos y técnicas

Parámetro	Método*	Equipo
CT	9222 B	-
CF	9222 D	-
COT	5310 B	Analizador de Carbono Orgánico Total <i>Shimadzu</i> , modelo TOC-5000
$AUV_{254}$	5910 B	Espectrofotómetro PERKIN-ELMER; Lambda 3B; UV/VIS, Modelo No. C618 0437, Estados Unidos de América
SDT	2540 C	-
Conductividad	2510 A	Conductivímetro HACH 44600-00, Estados Unidos de América
Turbiedad	2130 B	Turbidímetro HF <i>Scientific, inc.</i> , FORT MYERS, FL 33916, Modelo No. 19057
pH	4500-H <sup>+</sup> B	Medidor de pH HANNA <i>instruments</i> , pH213 <i>Microprocessor</i> , Portugal
Alcalinidad	2320 B	-
Dureza	2340 C	-
Temperatura	2550 B	Termómetro de mercurio

\*APHA *et al.*, 1998

Las muestras para la medición de SDT, alcalinidad, dureza, COT y AUV<sub>254</sub> se almacenaron en recipientes de vidrio a 4 °C. La muestra para la determinación de la dureza se preservó con ácido nítrico (pH < 2), en tanto que la usada para la determinación de COT, con ácido fosfórico (pH < 2), como lo indica el método (Figura 3-2). A partir del 11 de abril de 2005, el ácido fosfórico se cambió por clorhídrico (pH < 2) con base en una recomendación del manual de operación del analizador de COT para el análisis de agua subterránea (TOCA Instruction Manual). Las muestras para la determinación de CT y CF se tomaron en bolsas de plástico estériles, se transportaron en una hielera y se almacenaron a 4 °C.



**Figura 3-2 Manantial Cerro Colorado, muestreo y preservación**

### 3.3. Membranas

Se probaron once tipos de membranas en formato de hoja plana. Éstas se obtuvieron de empresas especializadas en la fabricación de las mismas, como son, Film Tec de Dow (Estados Unidos de América), Osmonics (Estados Unidos de América), Thomapor (Alemania), Hydronautics (Estados Unidos de América) y UCB Films (Inglaterra). En la Tabla 3.3 se presentan las características de las membranas y sus intervalos de operación.

Tabla 3.3 Características de las membranas estudiadas

FABRICANTE	MODELO	RECHAZO ESTABILIZADO DE SALES	TIPO DE MEMBRANA O MATERIAL	pH DE OPERACIÓN (UNIDADES)	pH PARA LIMPIEZA (UNIDADES)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (MPa)	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PESO MOLECULAR DE CORTE (DALTON)	TOLERANCIA AL CLORO LIBRE (ppm)
Dow Film-Tec	NF90	85 - 95%NaCl:>97%MgSO <sub>4</sub> *	Compuesta de capa delgada de poliamida	3-10	1-12	4.1	45	200	<0.1
	NF200	50%NaCl - 65:3%MgSO <sub>4</sub> **	Compuesta de capa delgada de poliamida	3-10	1-12	4.1	45	200	<0.1
	NF270	40 %NaCl - 60:<3%MgSO <sub>4</sub> **	Compuesta de capa delgada de poliamida	3-10	1-12	4.1	45	200	<0.1
Osmonics	YMCKSP1905	92%-2K-Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acetato de celulosa	2-8 (25°)	ND	ND	ND	ND	ND
	YMDKSP1905	98% MgSO <sub>4</sub>	Capa delgada	2-11 (25°C)	ND	ND	ND	ND	ND
Thomapor	302984	ND	Poliamida	4-11	ND	10	50	50	ND
	302986	ND	Poliamida	4-11	ND	5	50	100	ND
	302988	ND	Poliamida	4-11	ND	3	50	200	ND
	302990	ND	Poliamida	4-11	ND	2.5	50	500	ND
Hydronautics	ESPA4	99.2% NaCl	Poliamida	3-10	2-12	4.14	45	ND	<0.1
ucb Films	UCB (350PØØ)	-	Celulosa regenerada sin cubierta	-	-	-	-	-	-

\* El rechazo de sales está basado en las siguientes condiciones de prueba:

2,000 mg/L NaCl, 0.48 MPa, 25°C y 15% recuperación

2,000 mg/L MgSO<sub>4</sub>, 0.48 MPa, 25°C y 15% recuperación

\*\*500 mg/L CaCl<sub>2</sub>, 0.48 MPa, 25°C, and 15% recuperación

2000 ppm MgSO<sub>4</sub>, 0.48 MPa, 25°C, and 15% recuperación

ND: No disponible (el fabricante no proporciona esta información)

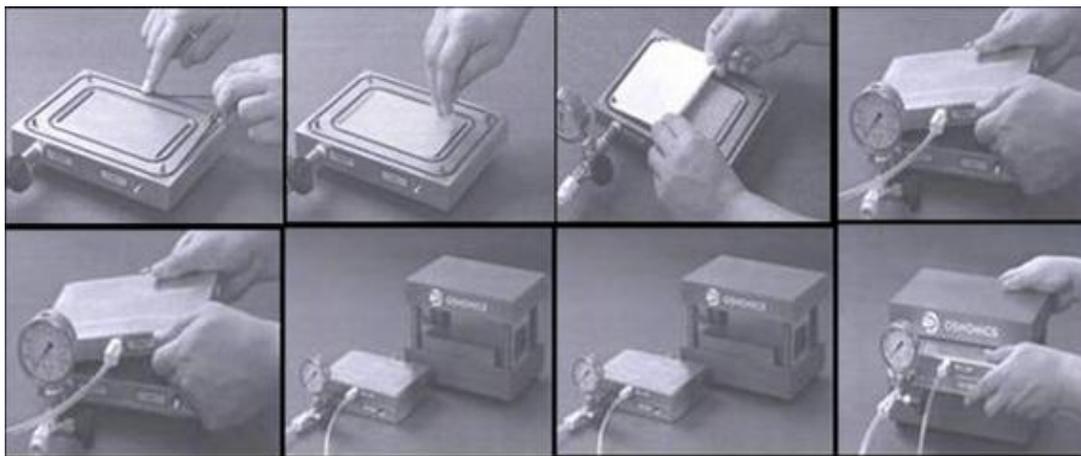
Previo a su uso, las membranas se acondicionaron mediante presurización durante 12 horas (NF90, NF200, NF270, YMCKSP1905 y UCB). Este procedimiento se sustituyó por el de remojarlas en agua destilada durante una hora y filtrar agua destilada a través de ellas, durante aproximadamente tres horas, con la presión de operación seleccionada para la prueba (YMDKSP1905, 302984, 302986, 302988, 302990 y ESPA4). El objetivo de este acondicionamiento fue el de adaptar el material de la membrana a la presión de operación.

### 3.4. Sistema de nanofiltración

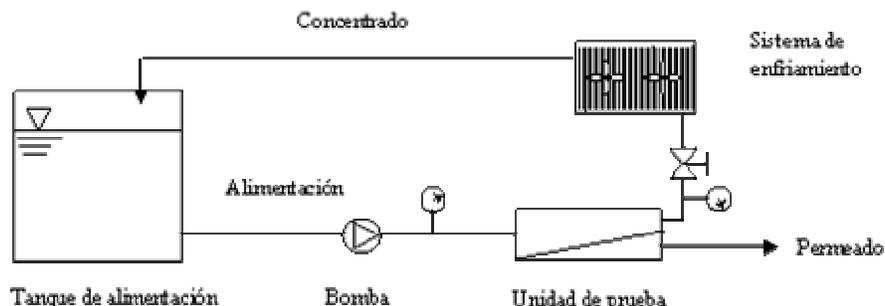
El sistema está compuesto por una unidad de prueba de membranas OSMONICS, tipo CEPA CF II, una bomba de alta presión STA-RITE, 1 HP, un sistema de enfriamiento (intercambiador de calor y ventiladores) y un tanque de alimentación (100 L de capacidad, Figura 3-3). La celda es de flujo cruzado y tiene un área efectiva de filtración de  $140 \text{ cm}^2$  (Figura 3-4). El sistema operó en modo intermitente o "batch", en inglés, recirculando sólo el concentrado (Figura 3-5).



**Figura 3-3 Sistema de nanofiltración**



**Figura 3-4 Celda de flujo cruzado**



**Figura 3-5 Esquema del sistema de nanofiltración: operación intermitente o “batch”, en inglés**

Se utilizaron espaciadores (red que se coloca entre la base de la celda y la membrana para formar un espacio entre ellas que favorece el flujo del agua dentro de la celda), colectores de permeado (red, más fina que el espaciador, que se pone del lado de la membrana por donde sale el permeado para facilitar el flujo de éste hacia el canal colector del permeado producido), conexiones y tubería de material plástico, válvulas y manómetros de acero inoxidable. Las condiciones de operación del sistema se listan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Condiciones de operación del sistema**

Condiciones de operación	
Volumen inicial	80 L
Flujo de alimentación	$0.814 \text{ L s}^{-1}$
Temperatura de alimentación	$25\text{-}31^\circ\text{C}$
pH de la solución de alimentación	$7.1 \pm 0.2$
Velocidad del flujo cruzado	$9.9 \text{ m s}^{-1}$
Altura del canal	0.8636 mm
No. de Reynolds	19 000
Tiempo de estabilización del sistema	> 3 h
Recuperación	< 1%

### 3.5. Pruebas

#### 3.5.1. Primera etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros convencionales

Cada membrana se probó con base en el diseño experimental que se presenta en la Tabla 3.5. Un ensayo consistió en la prueba de una membrana con una presión de operación. En cada ensayo se utilizó una membrana nueva. Una corrida fue la prueba de un tipo de membrana con las tres presiones de operación. El número de réplicas se decidió durante el transcurso de las pruebas con base en la efectividad de la membrana probada. En total se realizaron sesenta y seis ensayos (Tabla 3.6). Los

ensayos se diseñaron para operar la combinación membrana-presión durante seis horas, tiempo suficiente para asegurar un desempeño estable de la membrana.

**Tabla 3.5 Diseño experimental de un factor con tres niveles del factor**  
Presión de operación (Tratamiento)

1	2	3
Y11*	Y21	Y31
Y12	Y22	Y32
.	.	.
Y1n**	Y2n	Y3n

\* Yij es la observación (medición) j del tratamiento (presión) i

\*\* n es el número total de observaciones. Este valor dependió del tiempo de estabilización de la membrana

**Tabla 3.6 Corridas experimentales**

Corrida	Ensayos (membrana-presión)	Réplicas
NF90	NF90-0.35	Triplicado
	NF90-0.52	Triplicado
	NF90-0.69	Triplicado
NF200	NF200-0.35	Duplicado
	NF200-0.52	Duplicado
	NF200-0.69	Duplicado
NF270	NF270-0.35	Triplicado
	NF270-0.52	Triplicado
	NF270-0.69	Triplicado
YMCKSP1905	YMCKSP1905-0.35	Duplicado
	YMCKSP1905-0.52	Duplicado
	YMCKSP1905-0.69	Duplicado
YMDKSP1905	YMDKSP1905-0.35	Duplicado
	YMDKSP1905-0.52	Duplicado
	YMDKSP1905-0.69	Duplicado
302990	302990-0.35	Una vez
	302990-0.52	Una vez
	302990-0.69	Una vez
302988	302988-0.35	Triplicado
	302988-0.52	Triplicado
	302988-0.69	Triplicado
302986	302986-0.35	Triplicado
	302986-0.52	Triplicado
	302986-0.69	Triplicado
302984	302984-0.35	Una vez
	302984-0.52	Una vez
	302984-0.69	Una vez
UCB	UCB-0.35	Una vez
	UCB-0.52	Una vez
	UCB-0.69	Una vez
ESPA4	ESPA4-0.35	Una vez
	ESPA4-0.52	Una vez
	ESPA4-0.69	Una vez

El efecto del tipo de membrana y la presión de operación en la cantidad y calidad del permeado se midió con las variables de respuesta que se presentan en la Tabla 3.7. Las variables de respuesta (parámetros) se clasificaron en cuatro grupos: a) parámetros relacionados con la salud de los consumidores, b) aceptabilidad del agua producida, c) corrosividad y tendencia a la formación de incrustaciones del agua producida y d) producción de agua y control de la operación. En la misma tabla se indica la frecuencia de medición de estos parámetros. Los parámetros que se midieron con mayor frecuencia permitieron detectar el momento en que la membrana comenzó a operar en forma estable. Tal es el caso del COT, AUV<sub>254</sub>, conductividad, turbiedad y pH. Se consideró operación estable cuando las mediciones por hora presentaron una variación menor o igual a la variación esperada por la precisión de la técnica de medición aplicada. Para el análisis estadístico se tomaron sólo las mediciones obtenidas durante la operación estable del sistema. Las mediciones de temperatura y flujo/flux se usaron para controlar la operación del sistema.

**Tabla 3.7 Variables de respuesta**

Grupo	Parámetro	Frecuencia de medición
Salud	COT	60 min
	AUV <sub>254</sub>	60 min
Aceptabilidad	SDT	1 vez por prueba
	Conductividad	60 min
	Turbiedad	60 min
Corrosividad e incrustaciones	pH	60 min
	Alcalinidad	1 vez por prueba
	Dureza	1 vez por prueba
Producción y operación	Flujo/Flux*	15-30 min
	Temperatura	15-30 min

\*Estandarizados a 20°C con la ecuación  $J_{20} = J_M (1.03)^{T_{20} - T_M}$ ; donde J es el flux (L/m<sup>2</sup>·h) y M la temperatura medida (°C)

### 3.5.1.1. Tratamiento estadístico de los resultados

El análisis estadístico de la información correspondiente a cada membrana se llevó a cabo en forma individual. Para evaluar la significación del efecto de la presión en la cantidad y calidad del permeado (variables de respuesta, Tabla 3.7) se aplicaron las técnicas estadísticas de análisis de variancia (ANDEVA) con uno y dos criterios de clasificación. El análisis de variancia con un criterio de clasificación se empleó para analizar las membranas que se probaron una vez (una réplica con varias observaciones por presión) porque sólo presentan una fuente de variación, los tratamientos (presiones), además del error aleatorio. El análisis de variancia con dos criterios de clasificación se usó para analizar las membranas que se probaron en dos y tres réplicas, con el fin de separar la variación producida por las

réplicas de la variación producida por los tratamientos (objeto de estudio). En todos los casos se llevó a cabo la comprobación de supuestos del modelo ANDEVA: normalidad, variancia constante (igualdad de variancia dentro de los tratamientos) e independencia, para verificar la validez de los resultados obtenidos del análisis de variancia. Luego, para todas las membranas, se detectaron los tratamientos que causaron las diferencias significativas a través del método de comparaciones múltiples “Diferencia Mínima Significativa” (LSD<sup>24</sup>, Gutiérrez y De la Vara, 2004).

### 3.5.1.2. Estándares de calidad de agua potable y reúso en consumo humano

Se seleccionaron las membranas capaces de producir el permeado que cumplió con los estándares de calidad de agua potable y reúso indirecto en consumo humano indicados en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Estándares de calidad de agua potable y reúso en consumo humano**

Parámetro	México <sup>a</sup>	Estados Unidos <sup>b</sup>	OMS <sup>c</sup>	Unión Europea <sup>d</sup>	Reúso indirecto en consumo humano <sup>e</sup>
COT(mg/L)	NE <sup>f</sup>	NE	NE	No debe presentar cambios anormales	1
AUV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	NE	NE	NE	NE	NE
SDT (mg/L)	1000	500 <sup>g</sup>	600-1000 <sup>h</sup>	NE	NE
Conductividad (mS/cm)	NE	NE	NE	2.5 <sup>i</sup>	NE
Turbiedad (UTN)	5	0.3 <sup>j</sup>	< 5; < 0.1 <sup>h</sup>	Aceptable para los consumidores y no debe presentar cambios anormales <sup>k</sup>	0.1
pH (Unidades)	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 – 8.0 <sup>n</sup>	6.5 – 9.5 <sup>l</sup>	6.5 – 8.5 <sup>l</sup>
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	NE	NE	NE	NE	NE
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	500	80 <sup>m</sup> /500 <sup>n</sup>	100-200 <sup>h</sup>	NE	NE

a: Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM, 2000)

b: *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2002)

c: Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004)

d: *Council Directive 98/83EC* (UE, 1998)

e: *Guidelines for Water Reuse, U.S. Environmental Protection Agency* (EPA, 2004)

f: NE = No establecido

g: *Secondary Standard*. No es de carácter obligatorio

h: No es un parámetro concerniente a la salud pero puede afectar la aceptabilidad pública del agua. **Dureza** :< 100 mg CaCO<sub>3</sub>/L (agua blanda) puede ser más corrosiva para las tuberías; > 200 mg CaCO<sub>3</sub>/L puede causar incrustaciones en los sistemas de tratamiento y distribución del agua. **SDT**: < 600 mg/L, es de sabor agradable; > 1000 mg/L, es de sabor desagradable. **Turbiedad**: < 5 UTN es usualmente aceptable para los consumidores; < 0.1 UTN para una desinfección efectiva

i: El agua no debe ser agresiva

j: 95% de las muestras diarias de cada mes

k: Para aguas superficiales, < 1 UTN

l: Recarga de acuíferos potables mediante inyección directa

m: *American Water Works Association: Water quality goals* (Davis y Cornwell, 1998)

n: *Public Health Service Standard* (Peavy et al., 1985)

<sup>24</sup> Del inglés *Least Significant Difference*

### **3.5.2. Segunda etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros no convencionales**

Se llevaron a cabo pruebas de presencia-ausencia de compuestos orgánicos específicos en el agua del manantial y en los permeados producidos con las membranas y presiones seleccionadas en la etapa previa mediante el uso de un cromatógrafo de gases (*Agilent Technology* 6890N, modelo G1530N) acoplado a un espectrómetro de masas (*Agilent Technology* 5973N, modelo G2577A).

También se evaluó la capacidad de retención de estas membranas en términos de los coliformes totales (CT, método 9222 B, APHA *et al.*, 1998), fecales (CF, método 9222 D, APHA *et al.*, 1998) y colifagos somáticos (Técnica de la doble capa de agar de Adams, Adams, 1959).

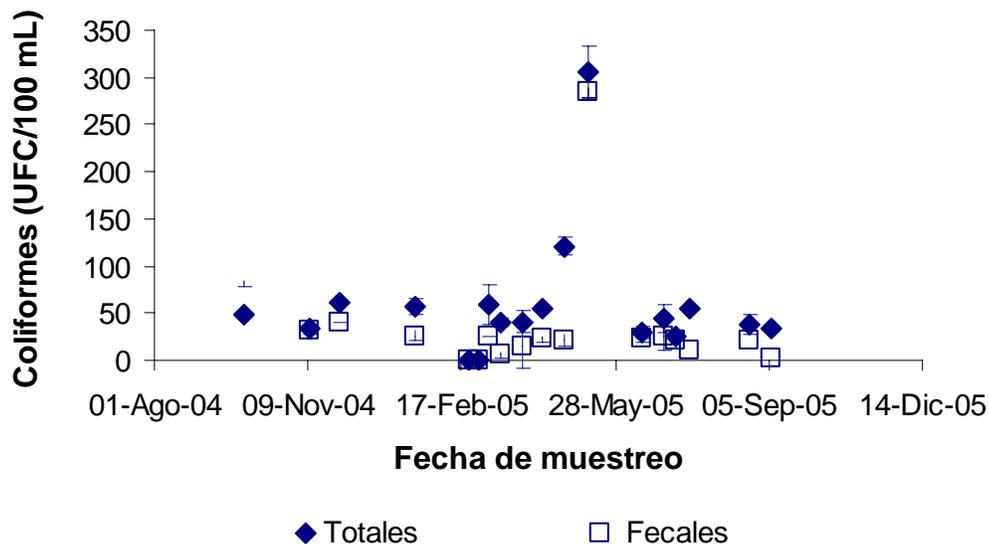
Finalmente, se analizó la mutagenicidad y toxicidad del agua del manantial y los permeados producidos con las membranas seleccionadas mediante la aplicación de la prueba de AMES (método 8030 B, APHA *et al.*, 1998) y la prueba de toxicidad empleando *Tetrahymena pyriformis*.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización del agua del manantial Cerro Colorado

#### 4.1.1. Calidad microbiológica del agua

Los indicadores de contaminación microbiológica muestran que el agua del manantial requiere desinfección (Figura 4-1). El promedio de la concentración de coliformes totales en el agua del manantial fue de  $44 \pm 11$  UFC/100 mL. En el mes de abril (25) se presentó un pico de 121 UFC/100 mL y en mayo (5) otro de 306 UFC/100mL. Los coliformes fecales promediaron  $21 \pm 10$  UFC/100 mL. También presentaron un pico (284 UFC/100 mL) que coincide con el pico de mayo de los coliformes totales. Estos picos pudieron haber sido ocasionados por la presencia de vientos fuertes en los días de muestreo que favorecieron el transporte y depósito de partículas de los terrenos regados con aguas residuales hacia el manantial. La normatividad nacional e internacional indican que un agua de abastecimiento debe estar libre de coliformes totales y fecales. Por ello, el agua del manantial requiere desinfección antes de su distribución.

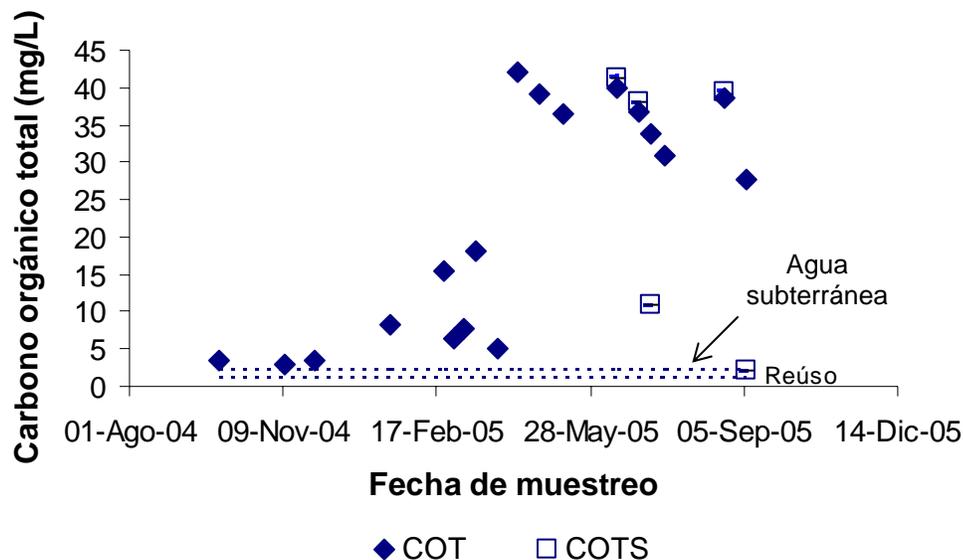


**Figura 4-1 Coliformes totales y fecales del agua del manantial**

#### 4.1.2. Orgánicos

El agua del manantial tiene un alto contenido de sustancias orgánicas que proceden del agua residual que se usa en el riego agrícola de la región. El contenido de materia orgánica del agua del manantial se midió a través del carbono orgánico total (COT) y la absorbancia UV a 254 nm ( $AUV_{254}$ ). El COT presentó un incremento considerable durante los muestreos (Figura 4-2). En el periodo del 28 de septiembre de

2004 al 28 de marzo de 2005 el COT promedió  $8\pm 5$  mg/L con valores entre 3 y 18 mg/L. En un segundo periodo, del 11 de abril de 2005 al 23 de agosto del mismo año, el COT presentó un incremento considerable, promedió  $36\pm 5$  mg/L con valores entre 28 y 42 mg/L. Este aumento coincidió con el cambio de ácido fosfórico<sup>25</sup> a clorhídrico<sup>26</sup> en la preservación de las muestras y el inicio de la primavera que se manifestó con un visible crecimiento de algas en el manantial. Para averiguar si dicho crecimiento afectaba el COT por la presencia de un mayor número de partículas, se llevó a cabo la medición del carbono orgánico total soluble (COT<sub>s</sub>)<sup>27</sup> en paralelo con el COT. Estas mediciones mostraron que el crecimiento de las algas no representaba una aportación extraordinaria para el COT ya que en la mayoría de los casos fueron prácticamente equivalentes, excepto en dos ocasiones<sup>28</sup>. Por otro lado, trabajos previos con el agua del manantial reportaron valores de COT de  $35\pm 16$  mg/L (Torres, 2001) por lo que se considera que probablemente la preservación de las muestras con ácido fosfórico afectó las mediciones de COT en el agua cruda. Es posible que el ácido fosfórico haya contaminado el catalizador de la columna de combustión del analizador de COT y por ello afectó las mediciones (TOCA Instruction Manual).



**Figura 4-2 Contenido de COT en el agua del manantial**

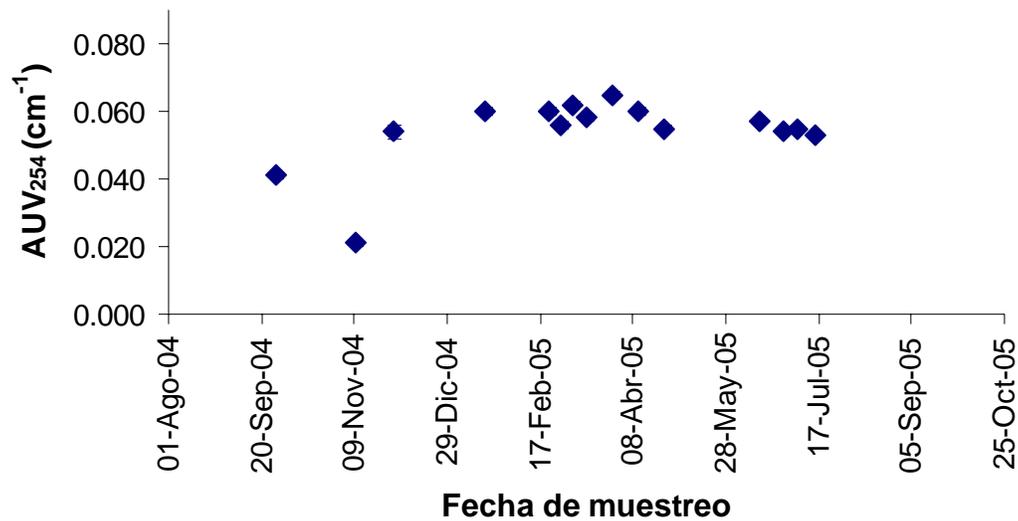
<sup>25</sup> Recomendado por el método (APHA *et al.*, 1998)

<sup>26</sup> Recomendación del manual de operación del analizador de COT para el análisis de agua subterránea (TOCA Instruction Manual)

<sup>27</sup> Muestra filtrada con un filtro de  $0.45\mu\text{m}$

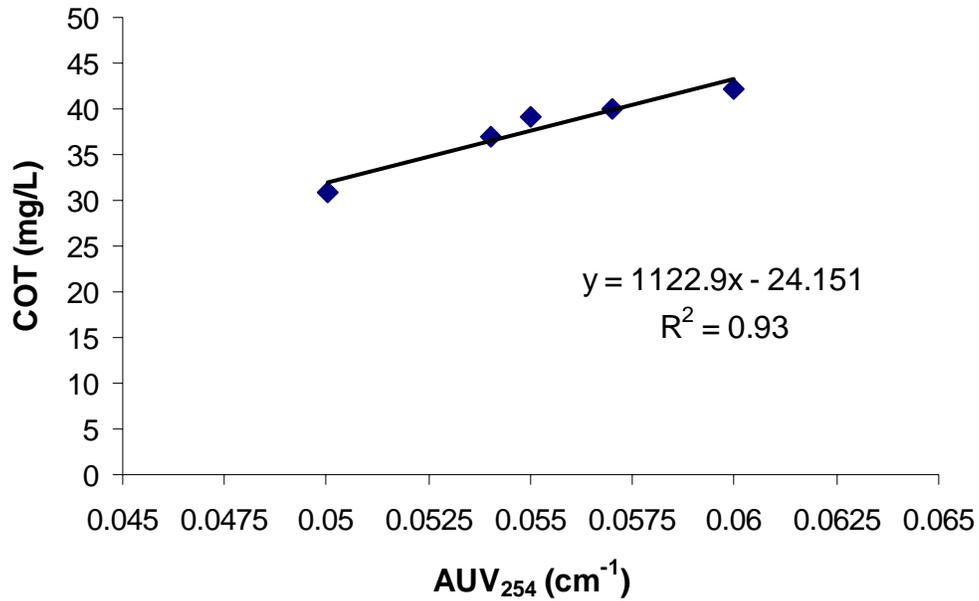
<sup>28</sup> El seis de julio de 2005 el COT (34 mg/L) fue aproximadamente tres veces mayor que el COT<sub>s</sub> (11 mg/L) y el siete de septiembre del mismo año el COT (28 mg/L) fue 14 veces mayor que el COT<sub>s</sub> (2 mg/L). En ambos casos se presentó lluvia el día del muestreo y, en particular, el siete de septiembre (segundo caso) había llovido en la región durante varios días previos al muestreo

Por su parte, la  $AUV_{254}$  no presentó cambios importantes durante el periodo de muestreo (Figura 4-3). Sólo en los dos primeros muestreos se observaron valores bajos, 0.041 y 0.021  $\text{cm}^{-1}$ . En general, promedió  $0.058 \pm 0.004 \text{ cm}^{-1}$  con lo que se puede afirmar que el agua del manantial no presenta cambios abruptos en el contenido de sustancias orgánicas que absorben luz UV.



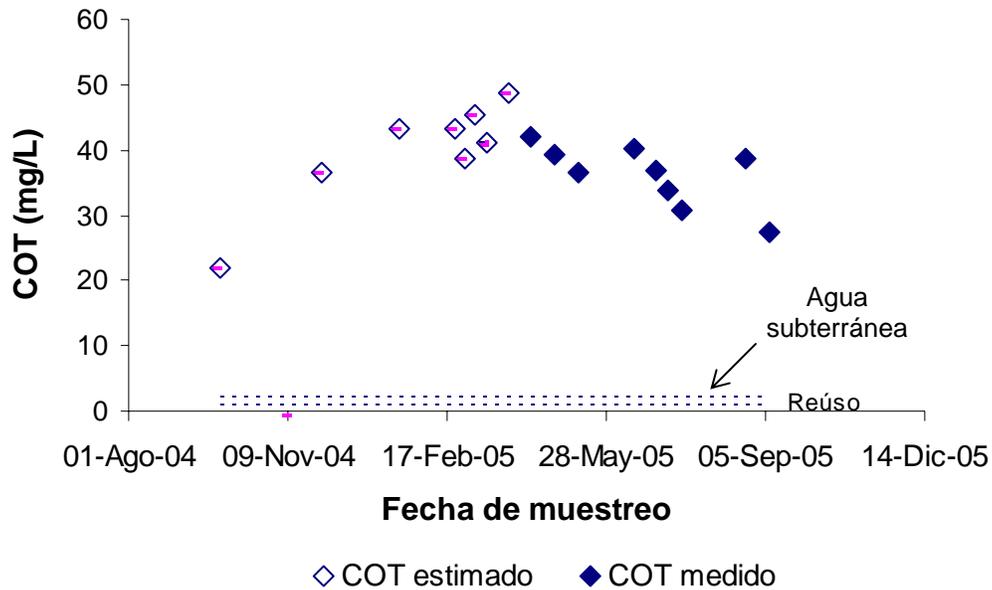
**Figura 4-3  $AUV_{254}$  del agua del manantial**

Con la información obtenida en términos de la  $AUV_{254}$  y el COT (muestras preservadas con ácido clorhídrico) se desarrolló una correlación para estimar el COT de las muestras preservadas con el ácido fosfórico (Figura 4-4). Esta correlación se utiliza con frecuencia para facilitar la medición del contenido orgánico de una fuente de agua (Singer *et al.*, 1981; Edzwald *et al.*, 1985; Chang *et al.*, 1998).



**Figura 4-4 Correlación AUV<sub>254</sub>-COT**

Con la estimación se pudo establecer que el COT del agua del manantial promedió  $39 \pm 5$  mg/L durante todo el periodo de muestreo (Figura 4-5). Este valor es 19.5 veces mayor que el valor máximo esperado por actividad biológica (materia orgánica natural) en agua subterránea (2 mg/L, MWH, 2005). Además, se han reportado valores de AUV<sub>254</sub> en agua subterránea de 0.009 y 0.036 cm<sup>-1</sup> (Korn *et al.*, 2002; Gwon *et al.*, 2003), que son 6.4 y 1.6 veces menores que la AUV<sub>254</sub> media del agua del manantial. Entonces, se puede afirmar que el agua del manantial se ve afectada por una aportación de materia orgánica que no corresponde al orden natural, las aguas residuales de la Ciudad de México. Por ello, el manantial no es una fuente convencional para suministro público y requiere un tratamiento avanzado para su potabilización, a fin de cumplir con las regulaciones de reúso en consumo humano (COT < 1 mg/L; EPA, 2004).



**Figura 4-5 Contenido estimado de COT en el agua del manantial**

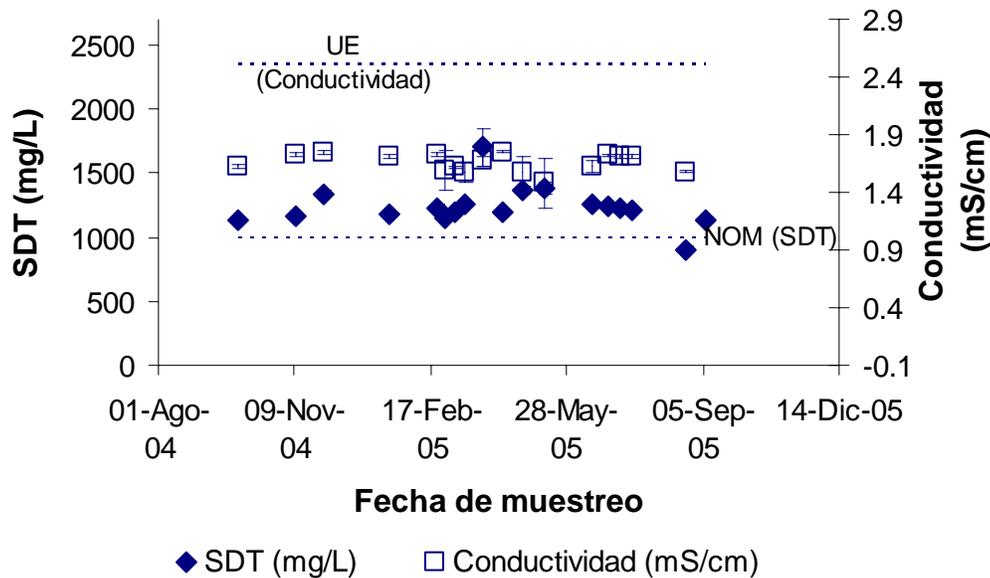
#### 4.1.3. Inorgánicos

El contenido de sólidos disueltos totales (SDT) del agua del manantial es elevado (Figura 4-6) y, a pesar de que no es un parámetro que ponga en riesgo la salud de los consumidores, se sabe que puede ocasionar ciertos efectos en la salud de personas que no están adaptadas a beber agua con altos niveles de sólidos<sup>29</sup> y que, en general, las aguas que contienen menos de 500 mg/L de SDT son más adecuadas para el uso doméstico (Sawyer *et al.*, 2001). Los SDT del manantial promediaron  $1235 \pm 156$  mg/L del mes de septiembre de 2004 al mes de septiembre de 2005. Esto indica que usualmente sobrepasa el límite permisible de calidad establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano (1000 mg/L). Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004) recomienda que el contenido de SDT de un agua de suministro sea menor de 1000 mg/L para evitar que el agua tenga un sabor desagradable y menor de 600 mg/L para que sea de sabor agradable. Más aún, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA, 2002) recomienda<sup>30</sup> que el agua potable contenga como máximo 500 mg/L de SDT. Cabe señalar que la Unión Europea (UE, 1998) establece que el agua potable debe tener una conductividad máxima de 2.5 mS/cm, 1.7 veces mayor que la conductividad promedio del agua del manantial ( $1.66 \pm 0.08$  mS/cm, Figura 4-6), siempre y cuando se garantice que el agua no sea agresiva. Entonces, el agua del manantial requiere tratamiento para reducir

<sup>29</sup> Puede laxar o producir el efecto contrario. No se han presentado efectos de enfermedad en residentes que consumen esta agua con regularidad (Sawyer *et al.*, 2001)

<sup>30</sup> *Nacional Secondary Drinking Water Regulations*. No es de cumplimiento obligatorio

el contenido de SDT, cumplir con la normativa vigente y garantizar la aceptabilidad del agua de suministro.



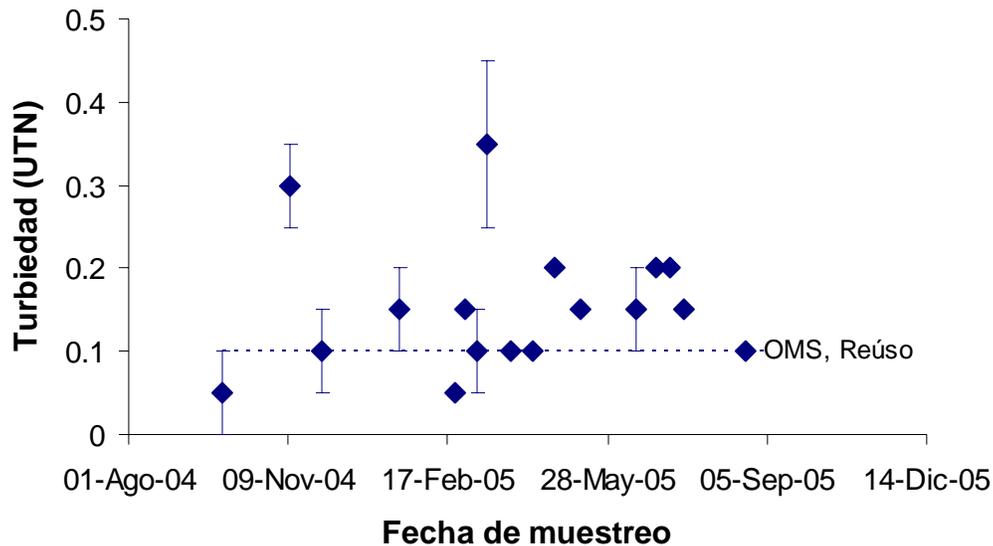
**Figura 4-6 SDT y Conductividad del agua del manantial**

La turbiedad del agua del manantial excedió el valor establecido por la EPA para el reúso de agua en consumo humano en más del 50% de las mediciones (Figura 4-7). En promedio, el agua del manantial presentó  $0.15 \pm 0.08$  UTN. Este valor es bajo si se considera que un agua superficial, por ejemplo, presenta 1-4000 UTN (lagos: 1-20 y ríos:  $<10$  a  $> 4000$  UTN; Peavy *et al.*, 1985). Sin embargo, la EPA (2004) establece un valor límite de turbiedad para reúso indirecto en consumo humano de  $0.1$  UTN<sup>31</sup> – valor cercano al límite de detección del método (APHA *et al.*, 1998)–. Cabe señalar que este valor es más riguroso que el que la misma institución establece para agua potable a partir de una fuente de agua “limpia” o de primer uso ( $0.3$  UTN).

Los materiales que causan la turbiedad del agua del manantial pueden ser pequeñas partículas de materia orgánica, plancton, fragmentos de suelo y microorganismos que se generan por la presencia de algas y peces, y el movimiento del agua. Este material coloidal proporciona sitios para la adsorción de químicos y organismos que pueden ser peligrosos (Peavy *et al.*, 1985). Por ello, la turbiedad se usa con frecuencia como un indicador de la presencia de bacterias y protozoarios y la mayoría de las

<sup>31</sup>Además, la OMS (2004) recomienda una turbiedad de  $0.1$  UTN para garantizar la desinfección efectiva del agua potable

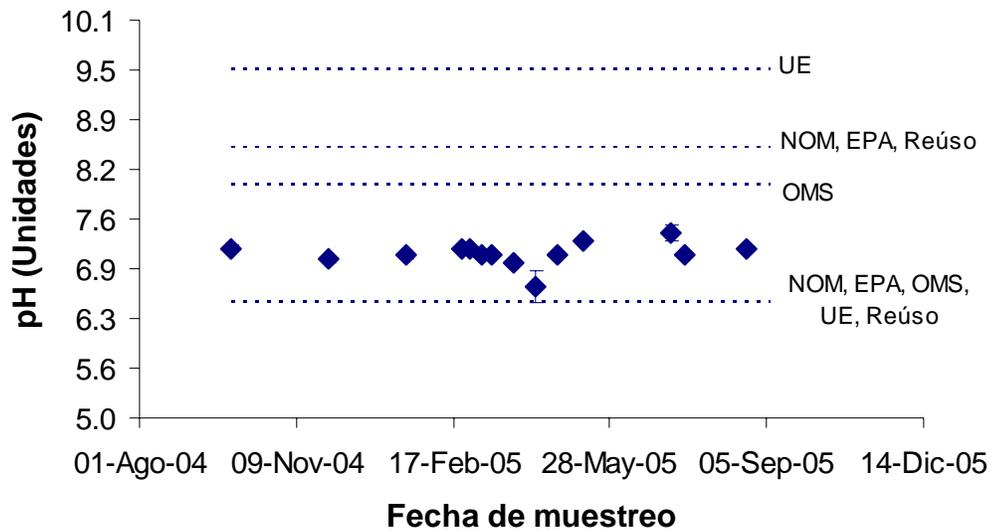
instalaciones de tratamiento de agua tienen como objetivo reducir la turbiedad a menos de 0.1 UTN (MWH, 2005). Entonces, el agua del manantial requiere de cierto tratamiento para reducir su turbiedad.



**Figura 4-7 Turbiedad del agua del manantial**

El pH del agua del manantial cumple con las regulaciones nacionales e internacionales en materia de agua potable y de reúso en consumo humano aunque puede ser corrosiva para el sistema de distribución (Figura 4-8). Este parámetro promedió  $7.1 \pm 0.2$  unidades mientras que el intervalo de pH más estrecho<sup>32</sup> recomendado por la OMS (2004) va de 6.5 a 8.0 unidades. En general se recomienda que el pH de un agua que se va a desinfectar con cloro sea menor de ocho unidades a fin de que la desinfección sea efectiva. Sin embargo, es probable que un agua con valores de pH inferiores resulte corrosiva (OMS, 2004). Pese a esto, en términos de salud pública, no se considera necesario ajustar el pH del agua del manantial.

<sup>32</sup> Respecto de la NOM-127-SSA1-1994 (NOM, 2000), EPA para agua potable (EPA, 2002) y reúso en consumo humano (EPA, 2004; 6.5-8.5 unidades) y la UE (1998; 6.5-9.5)

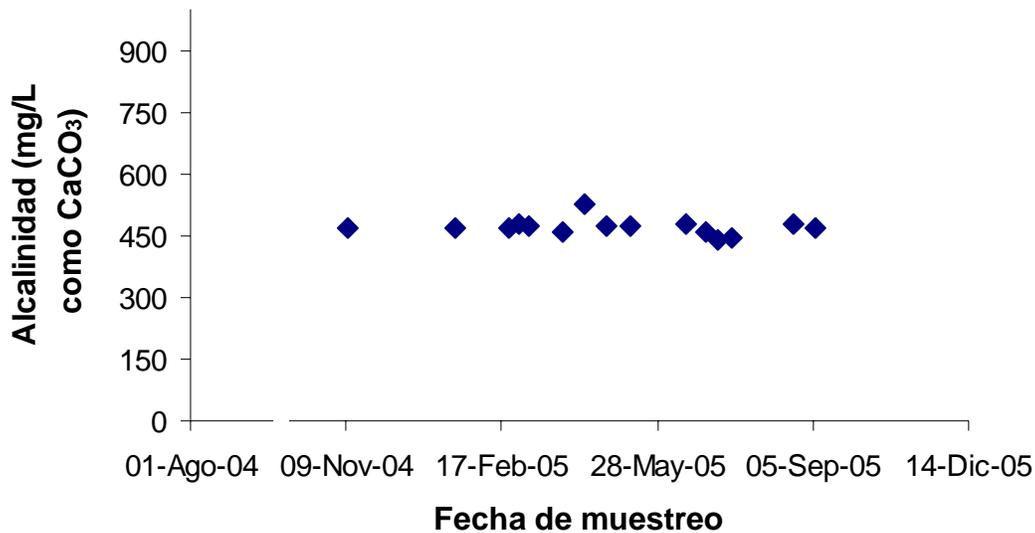


**Figura 4-8 pH del agua del manantial**

El agua del manantial tiene una alta capacidad de amortiguamiento aunque puede ser incrustante y de sabor amargo. La alcalinidad del agua del manantial promedió  $471 \pm 20$  mg/L como carbonato de calcio (Figura 4-9). Si se toma como referencia la alcalinidad típica de una corriente superficial ( $< 200$  mg/L, MHW, 2005) o de un agua de pozo (339 mg/L, Snoeyink y Jenkins, 1999) se puede decir que el agua del manantial tiene una alcalinidad alta<sup>33</sup>. La alcalinidad en grandes cantidades da un sabor amargo al agua aunque la principal razón del rechazo de aguas con alcalinidad alta es el conjunto de reacciones que pueden ocurrir entre ésta y ciertos cationes del agua que forman precipitados que, a su vez, causan incrustaciones (Peavy *et al.*, 1985).

Por otro lado, se supone que el principal constituyente de la alcalinidad es el bicarbonato pues se sabe que esta especie es dominante en aguas de pH inferior a 8.3 unidades (Davis y Cornwell, 1998). El origen de los bicarbonatos es principalmente el agua residual utilizada en el riego agrícola del Valle ya que ésta contiene grandes cantidades de bicarbonatos (Velázquez *et al.*, 2002) aunque también se puede originar por el contacto del agua con el suelo.

<sup>33</sup> Es importante diferenciar entre un agua alcalina y un agua con alta alcalinidad: el agua alcalina es aquella que tiene un  $\text{pH} > 7$ , mientras que un agua con alta alcalinidad se refiere a que ésta tiene una alta capacidad de amortiguamiento (Davis y Cornwell, 1998)

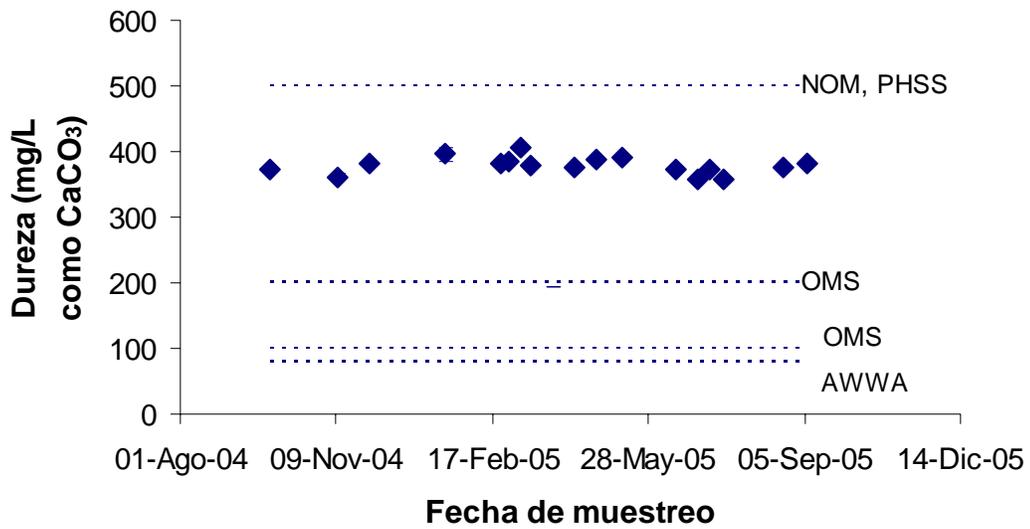


**Figura 4-9 Alcalinidad del agua del manantial**

La dureza del agua del manantial es alta ( $379 \pm 12$  mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , Figura 4-10) aunque no sobrepasa el límite máximo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 ni la recomendación del Servicio de Salud Pública de Estados Unidos de América (PHS, 500 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ). Sin embargo, la OMS y la AWWA recomiendan valores inferiores de dureza para agua potable. La OMS recomienda un intervalo de 100 a 200 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  para evitar problemas de corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución del agua, y la AWWA, 80 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ .

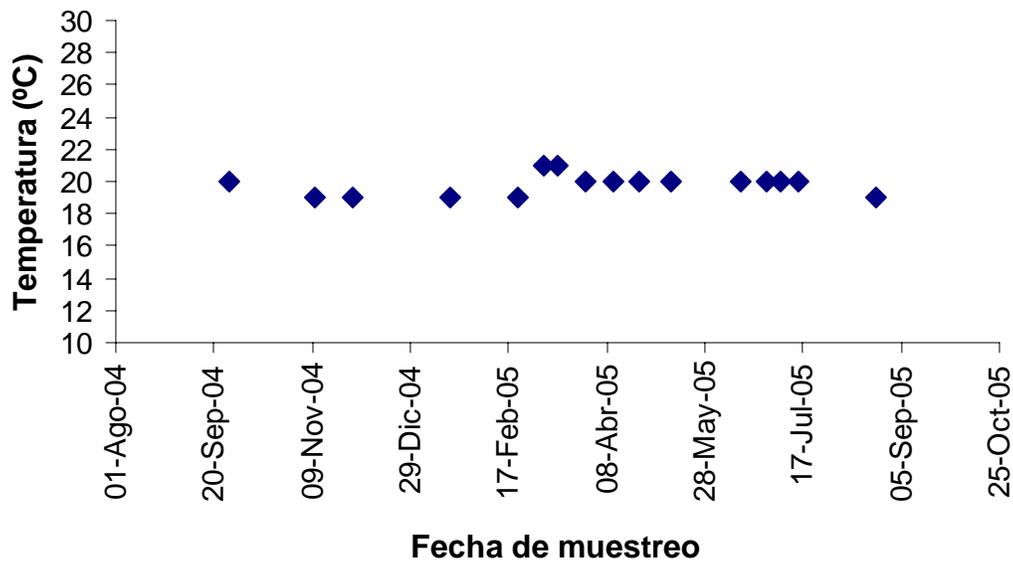
El agua del manantial se clasifica cualitativamente como muy dura (Peavy *et al.*, 1985; Davis y Cornwell, 1998; Sawyer *et al.*, 2001; MHW, 2005) y se deduce que dicha dureza es totalmente carbonatada ya que la alcalinidad del agua es mayor ( $471 \pm 20$  mg/L como carbonato de calcio). El problema con las aguas duras es que forman incrustaciones y mucha gente rechaza el agua si esta tiene una dureza mayor a 150 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ . Por ello, el objetivo común del ablandamiento de aguas duras es una dureza de 75 a 120 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  (Davis y Cornwell, 1998), aunque el ablandamiento generalmente no representa una prioridad en la potabilización del agua (MHW, 2005) y hay cierta evidencia de que el agua dura es benéfica para el sistema cardiovascular humano (Peavy *et al.*, 1985 y McGhee, 1991).

Se sabe que la dureza del agua se forma por la disolución de la piedra caliza (Davis y Cornwell, 1998). Sin embargo, es importante señalar que el agua residual que recarga el acuífero puede influenciar la dureza del agua del manantial puesto que el calcio es uno de los cationes dominantes en el agua residual que se usa para el riego agrícola en el Valle del Mezquital (Siebe y Cifuentes, 1995).



**Figura 4-10 Dureza del agua del manantial**

Finalmente, la temperatura del agua del manantial no presentó cambios importantes, se mantuvo en  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  (Figura 4-11). En la Tabla B. del Anexo B se resume la calidad del agua del manantial.



**Figura 4-11 Temperatura del agua del manantial**

## 4.2. Primera etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros convencionales

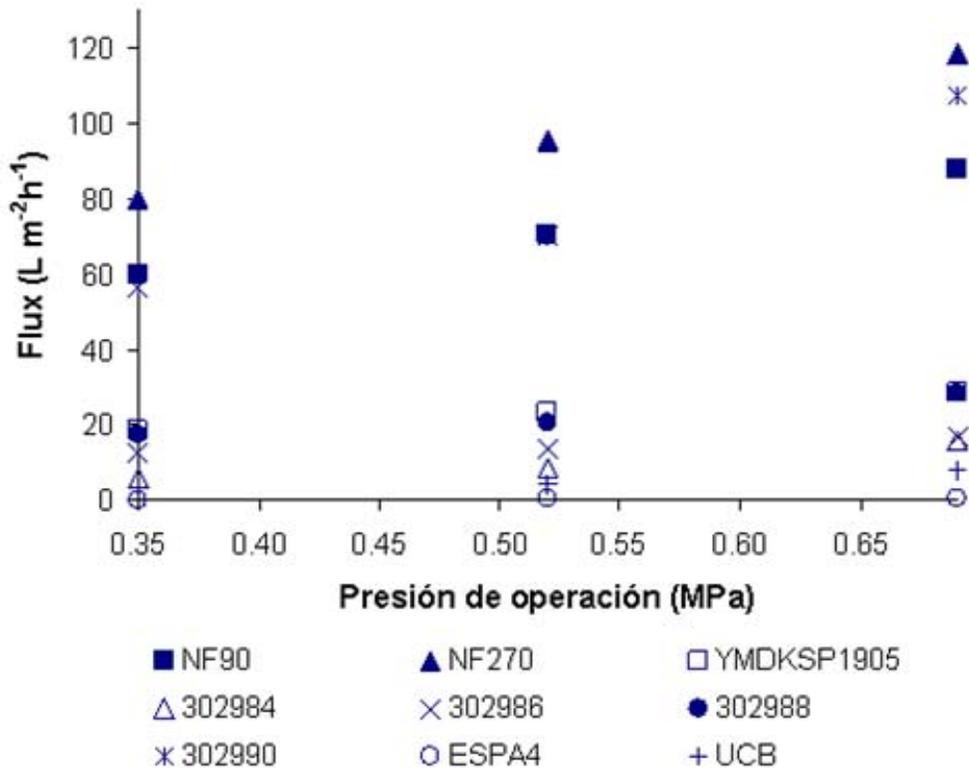
En esta sección se presentan las gráficas de medias de todas las variables de respuesta para discutir el efecto de la presión en el desempeño de las membranas y evaluar la calidad de los permeados producidos respecto de la normativa nacional e internacional. No se graficaron las desviaciones estándar de cada punto (media) para facilitar la lectura de las gráficas ya que se presentaron variaciones importantes y en general fue necesario bloquear la variación por réplica a fin de analizar el efecto de la presión en forma correcta. El análisis de las variaciones se presenta con detalle en el Anexo A (anexo estadístico) a través de las gráficas LSD y las gráficas de comprobación de variancia constante del modelo ANDEVA (predichos vs residuos) construidas para cada parámetro de todas las membranas probadas.

### 4.2.1. Flux de permeado

Todas las membranas probadas presentaron cambios significativos en el flux como consecuencia del cambio en la presión de operación. Se observaron dos efectos: aumento del flux y detección de un flux mínimo. La mayoría de las membranas produjeron más agua ante el aumento de la presión (Figura 4-12). Éstas fueron –de la más productiva a la menos-, la membrana NF270 (Dow) con producciones de 80, 95 y 118 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> obtenidas con las presiones de operación 0.35, 0.52 y 0.69 MPa<sup>34</sup>; 302990 (Thomapor) con 56, 70 y 107 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>; NF90 (Dow) con 60, 71 y 88 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>; YMDKSP1905 (Osmonics) con 19, 23 y 28 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>; 302988 (Thomapor) con 17, 21 y 29 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>; 302986 (Thomapor) con 13, 14 y 17 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>; 302984 (Thomapor) con 6, 9 y 16 L/m<sup>2</sup>·h; UCB con 3, 4 y 8 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> y ESPA4 con 0.226, 0.394 y 0.514 L m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>. Este efecto ha sido ampliamente estudiado y se sabe que el flux es proporcional a la presión de operación (Schaep *et al.*, 1998; Koyuncu *et al.*, 2000; Afonso y Bórquez, 2002; Galambos *et al.*, 2004; Bargeman *et al.*, 2005), a menos que el taponamiento de la membrana lo impida (Liikanen *et al.*, 2003; Lin *et al.*, 2006; Li y Elimelech, in press; Zhang *et al.*, in press; Lee *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005 y Xu *et al.*, in press), como se lee en las ecuaciones básicas del flux de una membrana<sup>35</sup> (Scott y Hughes, 1996; AWWA, 1998).

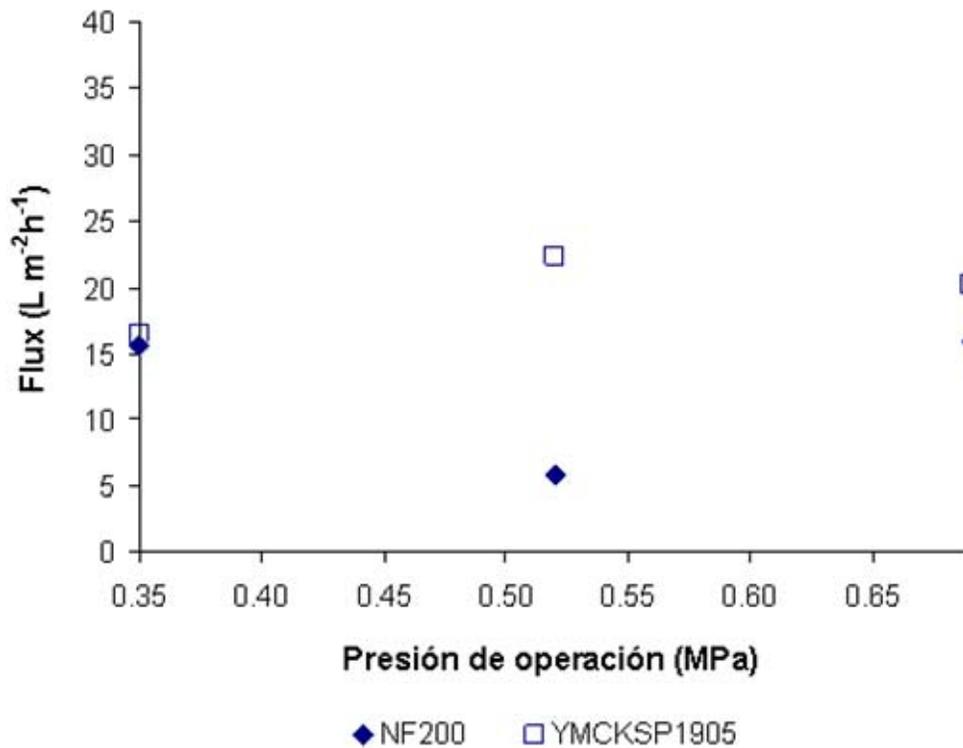
<sup>34</sup> Todas las variables de respuesta (flux, COT, AUV<sub>254</sub>, SDT, conductividad, turbiedad, pH, alcalinidad y dureza) se evaluaron con las tres presiones de operación: 0.35, 0.52 y 0.69 MPa. Por ello, para facilitar la lectura de este documento, en adelante se da por entendido que los valores de las variables de respuesta se presentan en el orden correspondiente al orden ascendente de dichas presiones. Por ejemplo, “los valores de flux X, Y y Z”, se deben interpretar como “los valores de flux X, Y y Z correspondientes a las presiones 0.35, 0.52 y 0.69 MPa”, se da por entendido que X se obtuvo con 0.35 MPa, Y con 0.52 MPa y Z con 0.69 MPa

<sup>35</sup> Estas ecuaciones se presentaron con detalle en el capítulo 1 sección 1.2.8.1



**Figura 4-12 Efecto de la presión en el Flux de permeado (incremento)**

La membrana YMCKSP1905 (Osmonics) se graficó aparte porque en apariencia presenta un flux máximo ( $22 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , Figura 4-13) con la presión de operación intermedia (0.52 MPa). Sin embargo, los valores de flux obtenidos con las presiones 0.52 y 0.69 MPa ( $22$  y  $20 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) son estadísticamente iguales y significativamente mayores a los  $17 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  obtenidos con la presión de 0.35 MPa, por lo que se considera que esta membrana presenta la misma tendencia que las anteriores (el flux aumenta con el incremento de la presión de operación). En cambio, la membrana NF200 (Dow) presentó un flux mínimo con la presión de operación intermedia de 0.52 MPa ( $6 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , Figura 4-13). Esto se corrobora con los valores de flux generados con las presiones de operación extremas (0.35 y 0.69 MPa) que son estadísticamente iguales y significativamente superiores al flux mínimo. Este comportamiento se puede calificar como atípico aunque un análisis más extenso de esta membrana podría demostrar que con la aplicación de presiones superiores el flux presentaría un aumento global.



**Figura 4-13 Efecto de la presión en el Flux de permeado (incremento y mínimo)**

Por otro lado, independientemente de su sensibilidad a la presión de operación, las membranas que destacaron en cuanto a su capacidad para permitir el paso del agua estudiada a través de sí fueron las membrana NF270, 302990 y NF90 cuyos valores de flux ( $56 - 118 \text{ L m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ) fueron notablemente superiores a los que presentaron las otras membranas probadas ( $< 28 \text{ L m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ). Una primera observación de este hecho es que las membranas mencionadas quedan en una posición ventajosa frente al resto. No obstante, esta evaluación es parcial pues no se sabe si las membranas que produjeron los valores de flux más altos presentan la selectividad requerida. La selectividad de las once membranas probadas se analiza en la siguiente sección.

#### 4.2.2. Selectividad

##### 4.2.2.1. Carbono Orgánico Total (COT)

Las membranas que cumplieron con el estándar de calidad establecido por la EPA para reúso en consumo humano ( $< 1 \text{ mg/L}$  de COT) con las tres presiones de operación fueron: NF90 con 0.795, 0.683 y 0.678 mg/L, NF270 con 0.748, 0.639 y 0.780 mg/L, YMDKSP1905 con 0.708, 0.570 y 0.554 mg/L, 302984 con 0.774, 0.861 y 0.735 mg/L y 302986 con 0.739, 0.657 y 0.648 mg/L. (Figura 4-15, Figura 4-16

y Figura 4-17) Las membranas NF200, YMCKSP1905, 302988, 302990 y UCB, no lograron reducir el COT a  $< 1$  mg/L (Figura 4-14, Figura 4-15, Figura 4-16 y Figura 4-17). Los valores alcanzados con estas membranas fueron 1.427, 1.541 y 4.094 mg/L; 1.558, 0.787 y 1.157 mg/L; 1.766, 1.433 y 1.335 mg/L; 19.490, 17.200 y 22.790 mg/L y 13.441, 11.597 y 10.744 mg/L, respectivamente. Como se observa, la mayoría de los cambios en el COT inducidos por la presión de operación son pequeños (0.1-0.2 mg/L). Sin embargo, el análisis estadístico permitió detectar las tendencias significativas.

Antes de discutir estas tendencias es importante señalar, en primer lugar, que si bien se ha publicado un número importante de estudios acerca de los mecanismos de rechazo de sustancias orgánicas en membranas de nanofiltración, aún se considera que la comprensión de las fuerzas e interacciones que lo determinan es parcial. Por ello, se encuentra difícil ofrecer una interpretación totalmente clara de las tendencias observadas en este trabajo máxime la matriz estudiada no es un agua sintética con especies y concentraciones controladas, como es común en las publicaciones *ad hoc*. En segundo lugar, se aclara que los alcances de este trabajo distan de describir el detalle de los fenómenos que tienen lugar en la filtración de sustancias disueltas a nano-escala. Sin embargo, se proponen algunos razonamientos que permiten vislumbrar las causas de las tendencias observadas.

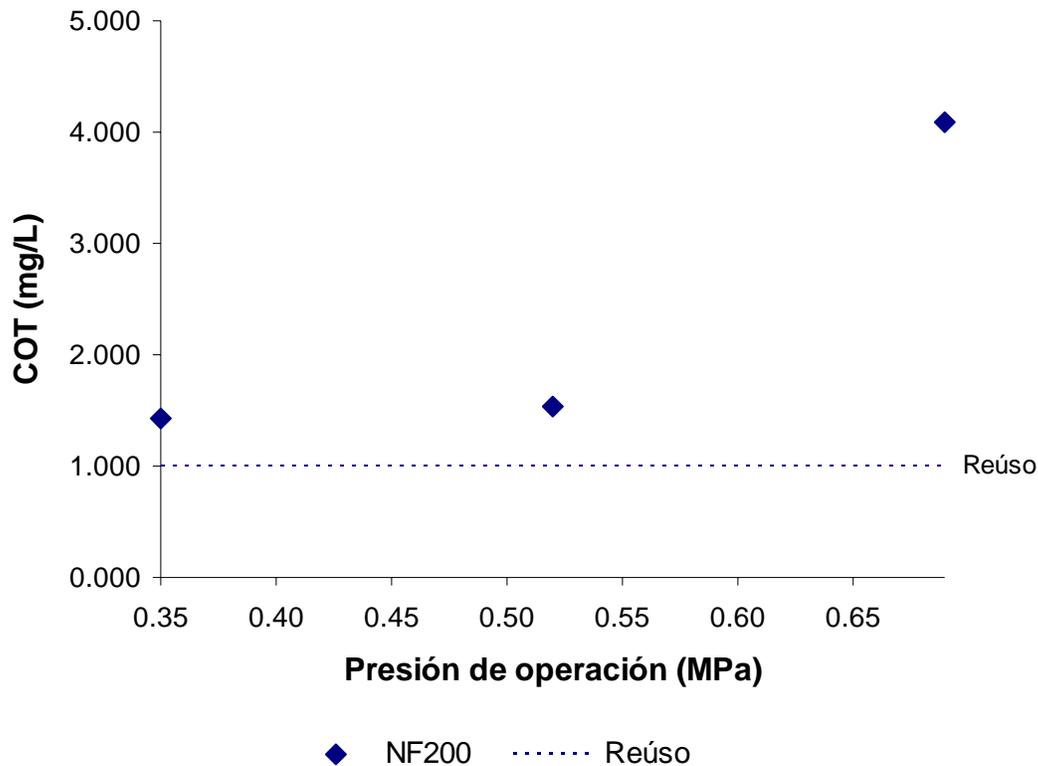
Se sabe que el rechazo de sustancias orgánicas es producto de la interacción entre el agua estudiada, las sustancias contenidas en ella y el material de la membrana<sup>36</sup>. Si se considera que, por un lado, el agua estudiada procede de la misma fuente y ésta regularmente no presenta cambios abruptos de calidad y, por otro, que la naturaleza química de las sustancias orgánicas contenidas en el agua del manantial es la misma, entonces se puede decir que las tendencias observadas en la Figura 4-14, Figura 4-15, Figura 4-16 y Figura 4-17, producidas por el cambio de presión, están determinadas por el material y estructura de las membranas.

La membrana NF200 presentó un incremento en el COT del permeado de 1.427 y 1.541 mg/L, estadísticamente iguales, a 4.094 mg/L, significativamente mayor (Figura 4-14). Esta pérdida de selectividad se atribuye a una pérdida en la capacidad de cribado<sup>37</sup> de la membrana ocasionada por la adaptación de la estructura de la misma a una mayor fuerza de contacto con el agua (mayor presión) que termina por permitir un mayor arrastre de los orgánicos acumulados en la membrana hacia el permeado.

---

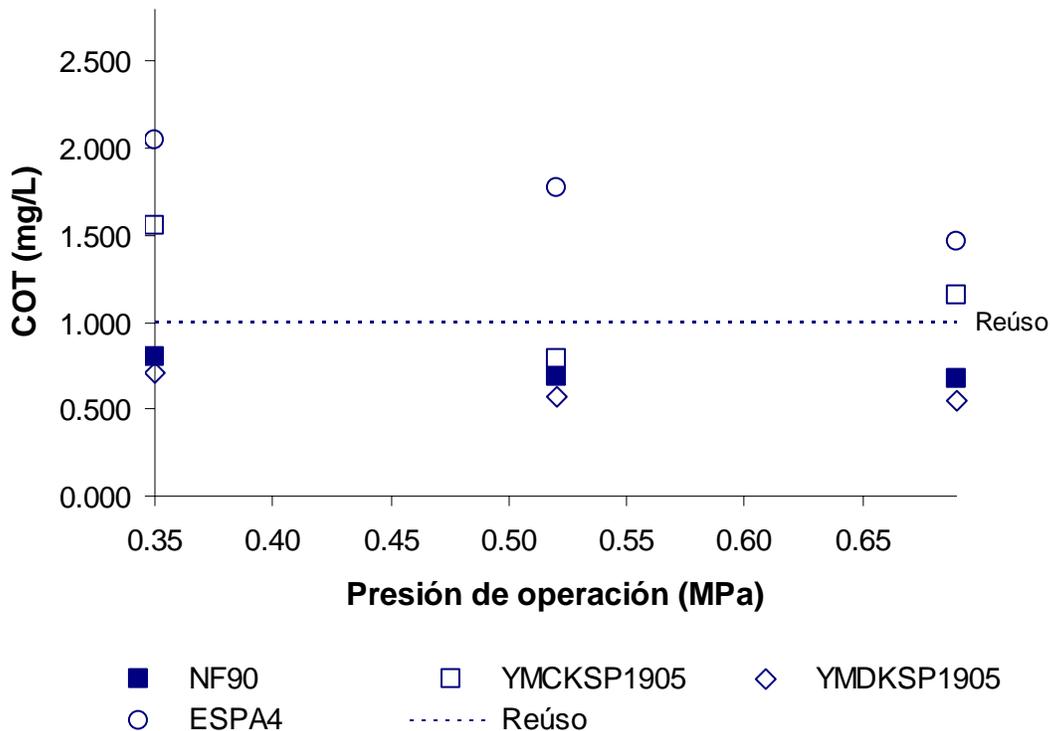
<sup>36</sup> En el Capítulo 1, sección 1.3.4.2. se citan varias publicaciones que han estudiado con detalle diversos aspectos de los mecanismos que gobiernan el rechazo de sustancias orgánicas en membranas de nanofiltración

<sup>37</sup> El cribado no es el único mecanismo de rechazo de sustancias orgánicas en membranas de nanofiltración, se ha demostrado que la repulsión electrostática (Ozaki y Li, 2002; Kimura *et al.*, 2003a; Bellona y Drewes, 2005) y la afinidad agua-membrana (Agenson *et al.*, 2003; Kimura *et al.*, 2003a; Bellona y Drewes, 2005) influyen sustancialmente este rechazo. Sin embargo, en general se considera que el cribado es dominante (Ozaki y Li, 2002; Agenson *et al.*, 2003; Kimura *et al.*, 2003a; Bellona y Drewes, 2005)



**Figura 4-14 Efecto de la presión en el COT del permeado (incremento)**

Las membranas que redujeron el contenido de COT en los permeados por efecto del aumento de la presión de operación fueron: NF90 cuyo COT de permeado disminuyó de 0.795 y 0.683 mg/L, estadísticamente iguales, a 0.678 mg/L, significativamente inferior; YMCKSP1905, de 1.558 mg/L, significativamente superior, a 0.787 y 1.157 mg/L, estadísticamente iguales; YMDKSP1905, de 0.708 mg/L, significativamente mayor, a 0.570 y 0.554 mg/L, estadísticamente iguales; ESPA4, de 2.049 mg/L a 1.775 mg/L y luego a 1.468 mg/L (Figura 4-15). Se considera que este comportamiento se debe a la acumulación de materiales cerca, sobre y dentro de la membrana y al constreñimiento concomitante de las cavidades de la red polimérica (AWWA, 1998) que, en equilibrio con una presión de operación mayor, hace de la membrana una criba más fina que mejora la calidad del permeado.



**Figura 4-15 Efecto de la presión en el COT del permeado (decremento)**

Finalmente, las membranas que no presentaron cambios significativos en el COT del permeado por efecto del cambio en la presión de operación fueron: NF270 con 0.748, 0.639 y 0.780 mg/L de COT, estadísticamente iguales; 302984 con 0.774, 0.861 y 0.735 mg/L, estadísticamente iguales; 302986 con 0.739, 0.657 y 0.648 mg/L, estadísticamente iguales; 302988 con 1.766, 1.433 y 1.335 mg/L, estadísticamente iguales; 302990 con 19.490, 17.200 y 22.790 mg/L, estadísticamente iguales (Figura 4-16 y Figura 4-17). La conjetura más importante surgida de estas observaciones es que la presión de operación no influye la calidad del permeado producido por estas membranas en términos del COT, lo que quiere decir que las membranas conservan su selectividad en el intervalo de presiones probadas. Este resultado tiene consecuencias importantes ya que es deseable en todo momento identificar una membrana con alta selectividad (según las especies de interés) que a su vez produzca grandes volúmenes de permeado por unidad de tiempo y de área de membrana (flux), lo que está directamente vinculado con la presión de operación. Como se observó en el análisis del flux, la mayoría de las membranas presentan un aumento en el flux inducido por el aumento en la presión. Si este efecto se relaciona con la capacidad de las membranas de mantener su selectividad a pesar del incremento en la presión, se identifican las membranas idóneas para la aplicación estudiada.

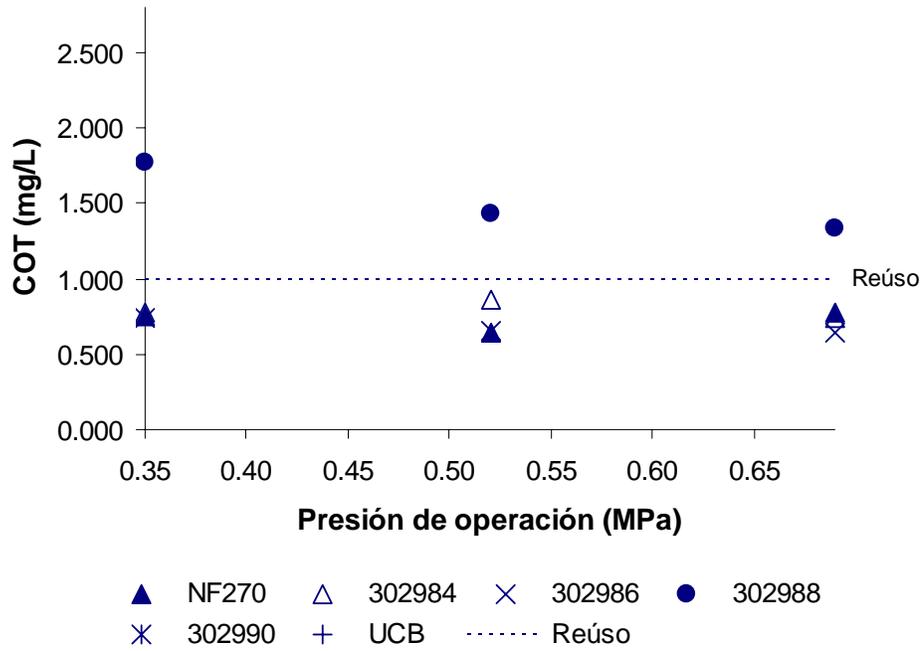


Figura 4-16 Efecto de la presión en el COT del permeado (no significativo)

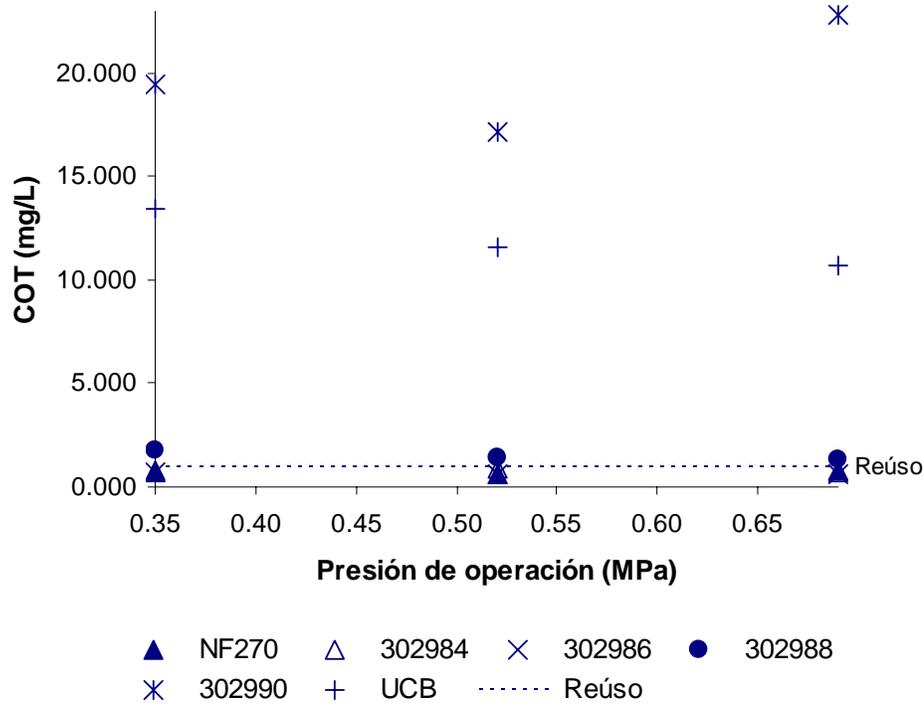


Figura 4-17 Efecto de la presión en el COT del permeado (no significativo)

#### 4.2.2.2. Absorbancia de luz UV a 254 nm ( $AUV_{254}$ )

Este parámetro se utilizó para detectar cambios abruptos en la concentración de compuestos orgánicos en el permeado ocasionados por fallas en el sistema o ruptura de la membrana. Una situación que en realidad no se presentó durante el estudio. En general, se observó que valores inferiores a  $0.010 \text{ cm}^{-1}$  coincidieron con valores de COT de  $< 1$  a  $2 \text{ mg/L}$ . Tal fue el caso de las membranas NF90 ( $0.003$ ,  $0.003$  y  $0.004 \text{ cm}^{-1}$ ), NF270 ( $0.005$ ,  $0.006$  y  $0.007 \text{ cm}^{-1}$ ), YMCKSP1905 ( $0.007$ ,  $0.008$  y  $0.009 \text{ cm}^{-1}$ ), YMDKSP1905 ( $0.010$ ,  $0.006$ ,  $0.007 \text{ cm}^{-1}$ ), 302984 ( $0.011$ ,  $0.009$ ,  $0.008 \text{ cm}^{-1}$ ), 302986 ( $0.003$ ,  $0.007$ ,  $0.006 \text{ cm}^{-1}$ ) y 302988 ( $0.004$ ,  $0.005$  y  $0.004 \text{ cm}^{-1}$ ) que presentaron los valores de COT más bajos (Figura 4-18). Mientras que los valores mayores a  $0.010 \text{ cm}^{-1}$  indicaron concentraciones mayores a  $2 \text{ mg/L}$  como en el caso de las membranas NF200 ( $0.010$ ,  $0.011$  y  $0.028 \text{ cm}^{-1}$ ); 302990 ( $0.011$ ,  $0.010$ ,  $0.016 \text{ cm}^{-1}$ ); ESPA4 ( $0.032$ ,  $0.017$  y  $0.017 \text{ cm}^{-1}$ ) y UCB ( $0.034$ ,  $0.032$  y  $0.026 \text{ cm}^{-1}$ ) (Figura 4-19). Es importante señalar que no se presentó una buena correlación entre el COT y la  $AUV_{254}$  en los permeados producidos con las diferentes membranas porque éstos pueden tener diferentes fracciones de compuestos orgánicos que absorben luz UV a  $254 \text{ nm}$ . Esta conjetura está basada en el hecho de que existen muchos compuestos orgánicos en el agua que no absorben significativamente la luz UV (APHA *et al.*, 1998). Finalmente, este parámetro no aportó información trascendente para la selección de la membrana.

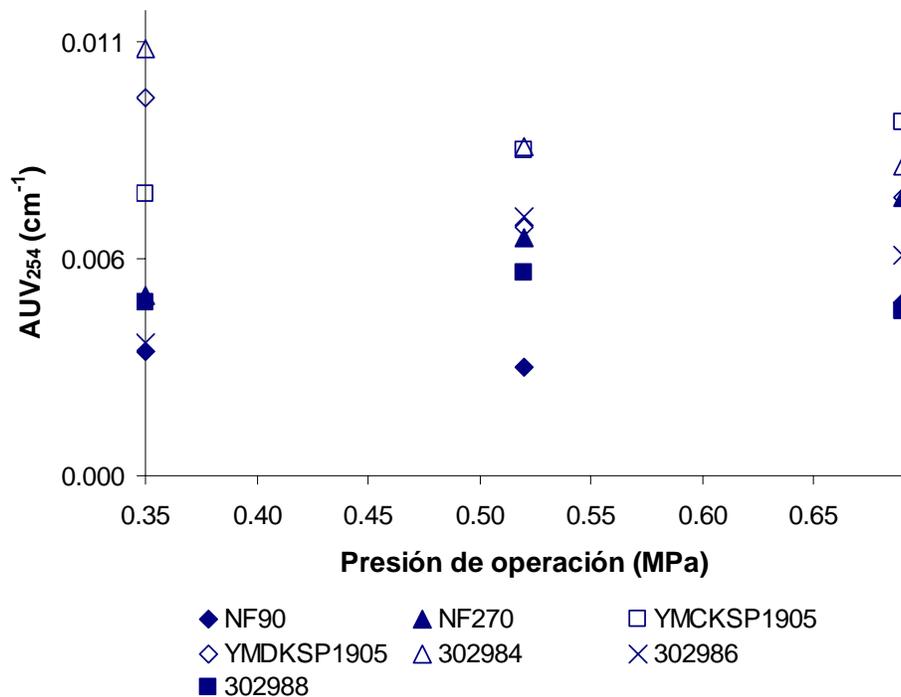
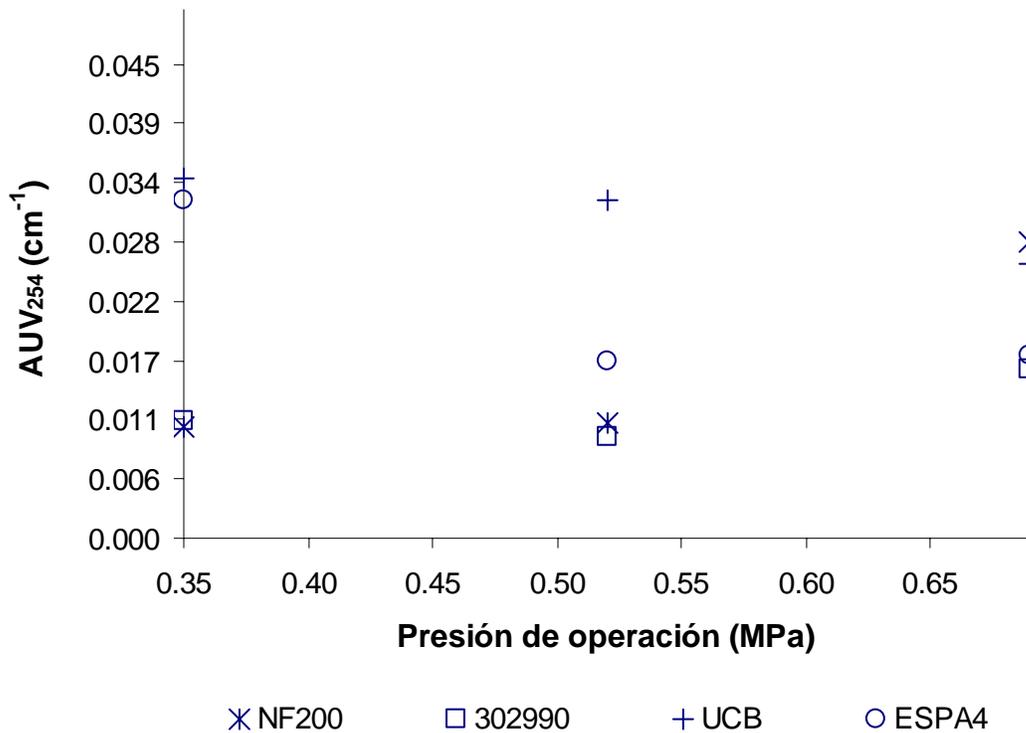


Figura 4-18 Valores de  $AUV_{254} < 0.010 \text{ cm}^{-1}$



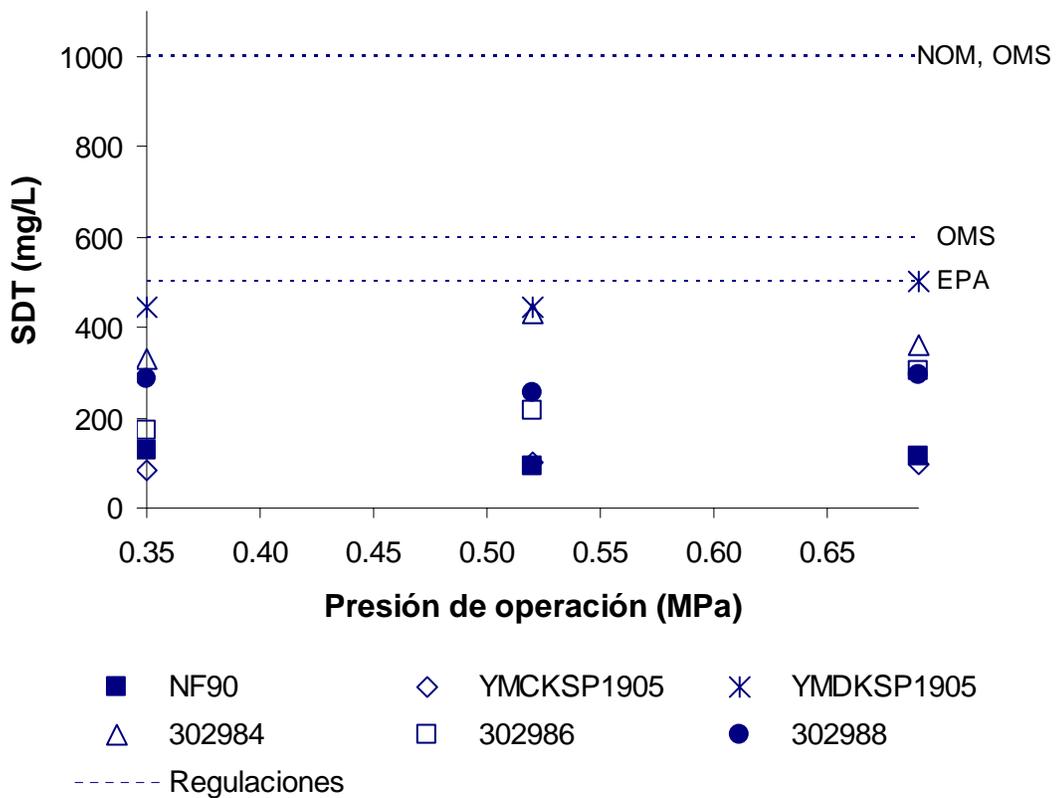
**Figura 4-19 Valores de  $AUV_{254} > 0.010 \text{ cm}^{-1}$**

#### 4.2.2.3. Sólidos disueltos totales (SDT)

Los SDT no son un parámetro relacionado con la salud de las personas. Sin embargo pueden afectar la aceptabilidad del agua por parte de los consumidores. Por ello, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo de 1000 mg/L; la EPA recomienda  $< 500 \text{ mg/L}$  y la OMS propone  $< 600 \text{ mg/L}$  para garantizar un sabor agradable del agua y  $< 1000 \text{ mg/L}$  para asegurar que no sea de sabor desagradable.

Las membranas que presentaron las más altas retenciones de sales y cumplieron con el contenido de SDT más estricto (EPA) fueron (Figura 4-20): NF90 (126, 90 y 115 mg/L), YMCKSP1905 (82, 100 y 98 mg/L), YMDKSP1905 (446, 445 y 503 mg/L), 302984 (328, 430 y 361), 302986 (173, 215 y 304 mg/L) y 302988 (286, 254 y 294 mg/L). Un segundo grupo de membranas, presentó una menor retención de sales pero cumplió con la Norma Oficial Mexicana y las recomendaciones de la OMS (Figura 4-21): NF200 (568, 433 y 441 mg/L), NF270 (596, 609 y 648 mg/L) y UCB (966, 868 y 868 mg/L). Las membranas que no cumplieron las recomendaciones de la EPA, OMS y el valor establecido por la Norma

Oficial Mexicana fueron (Figura 4-22): 302990 (758, 1254 y 1421 mg/L) y la ESPA4 (394, 1058 y 1024 mg/L) que presentaron incrementos significativos en el contenido de SDT por efecto del aumento de presión<sup>38</sup>. Así, para estas membranas se recomienda una operación a baja presión. En general se considera que, con excepción de las membranas 302990 y ESPA4, todas las membranas probadas producen permeados con un contenido de SDT aceptable.



**Figura 4-20 Permeados con bajo contenido de SDT**

<sup>38</sup> En el caso de la membrana ESPA4, que presenta un deterioro importante en la capacidad de retención de SDT causado por el incremento en la presión, no se puede afirmar que dicho efecto sea significativo pues no se obtuvieron datos suficientes para aplicar el análisis de variancia

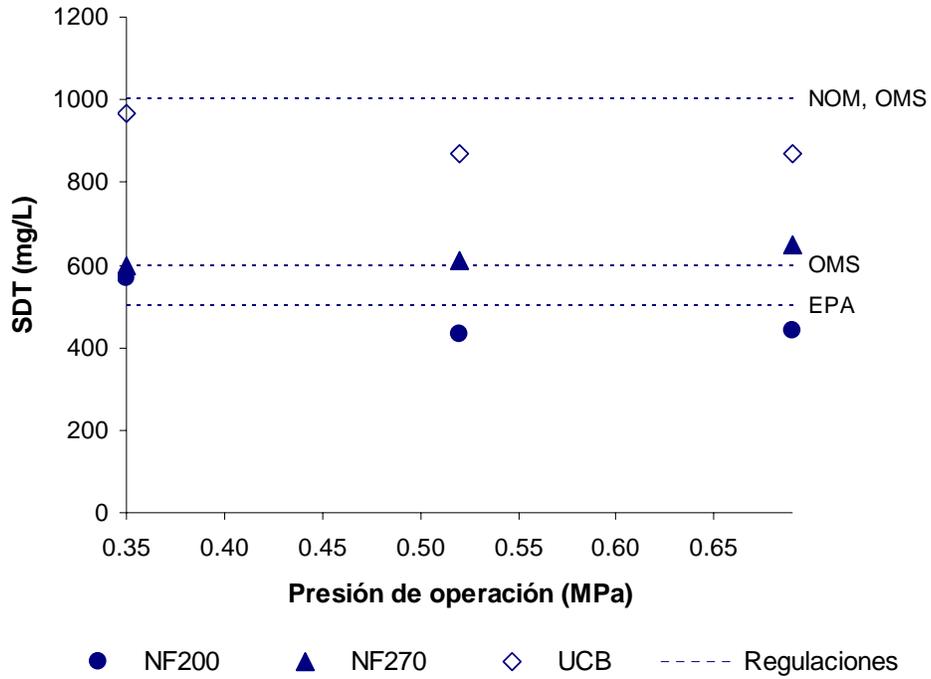


Figura 4-21 Permeados con un contenido regular de SDT

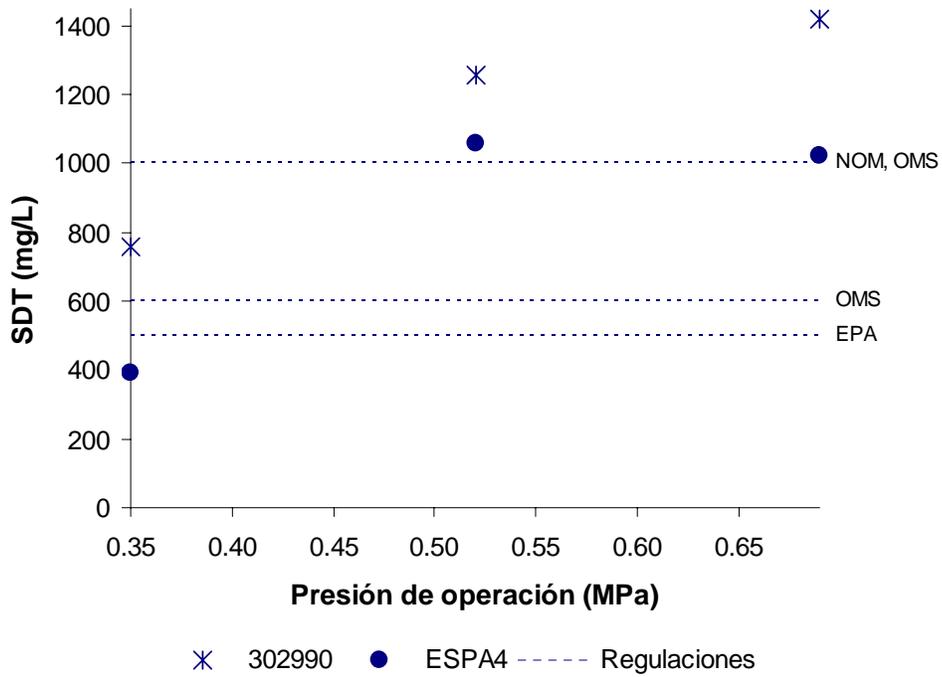
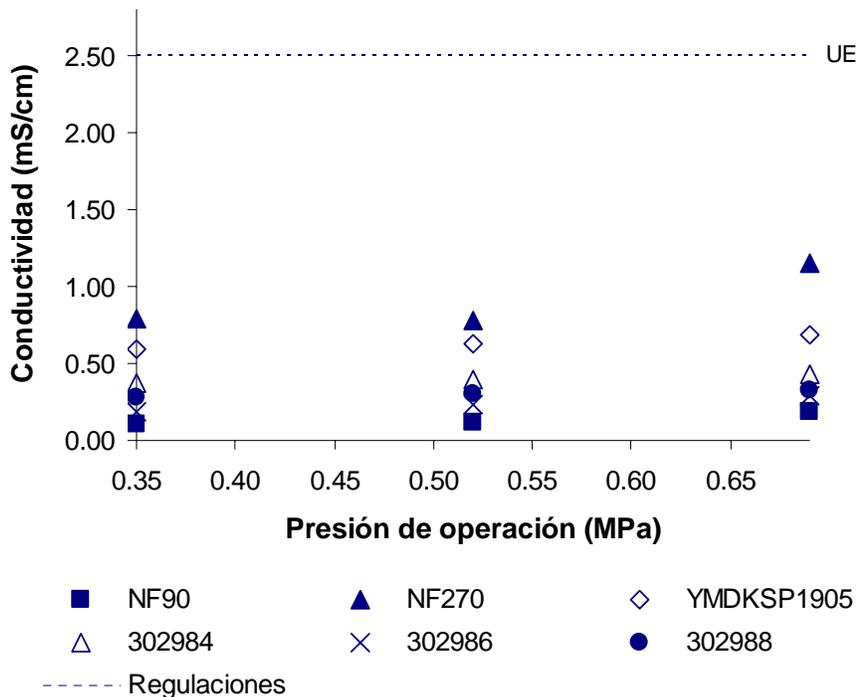


Figura 4-22 Permeados con alto contenido de SDT

#### 4.2.2.4. Conductividad

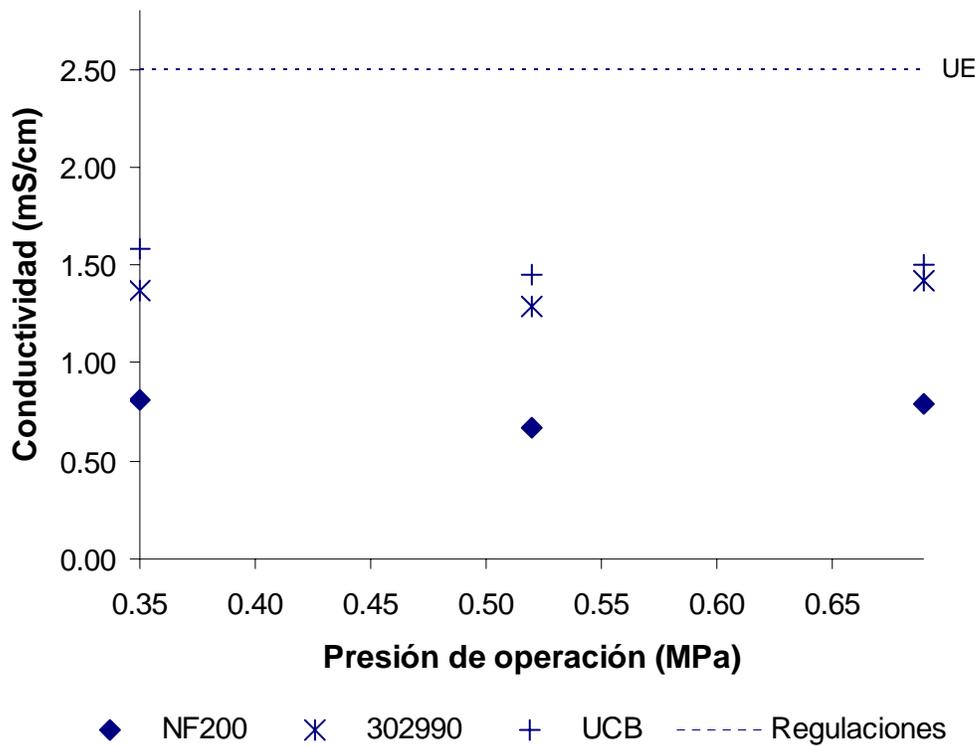
Sólo la Unión Europea establece un valor límite de conductividad para agua potable (2.5 mS/cm) que es muy superior a los valores obtenidos en el agua cruda (alrededor de 1.7 mS/cm) y obviamente en los permeados. Este parámetro permitió hacer una evaluación más sensible del efecto de la presión sobre el contenido de iones en los permeados.

Las membranas NF90 (0.11, 0.12 y 0.19 mS/cm), NF270 (0.79, 0.78 y 1.15 mS/cm), YMDKSP1905 (0.59, 0.63 y 0.69 mS/cm), 302984 (0.37, 0.40 y 0.43 mS/cm), 302986 (0.19, 0.23 y 0.29 mS/cm) y 302988 (0.27, 0.30, 0.33 mS/cm) permitieron un mayor paso de iones (significativo) con el aumento de la presión (Figura 4-23). El aumento en el transporte de iones inorgánicos a través de la membrana ocasionado por el incremento en la presión de operación puede ocurrir por dos razones: a) incremento en la advección: mayor arrastre de iones por la aplicación de una fuerza mayor sobre la membrana (AWWA, 1998); y b) debilitamiento de la repulsión electrostática: el aumento de la presión favorece la acumulación de iones divalentes sobre la membrana y éstos disminuyen la carga de la membrana (neutralización parcial) lo que reduce el rechazo de iones inorgánicos (Bellona y Drewes, 2005).



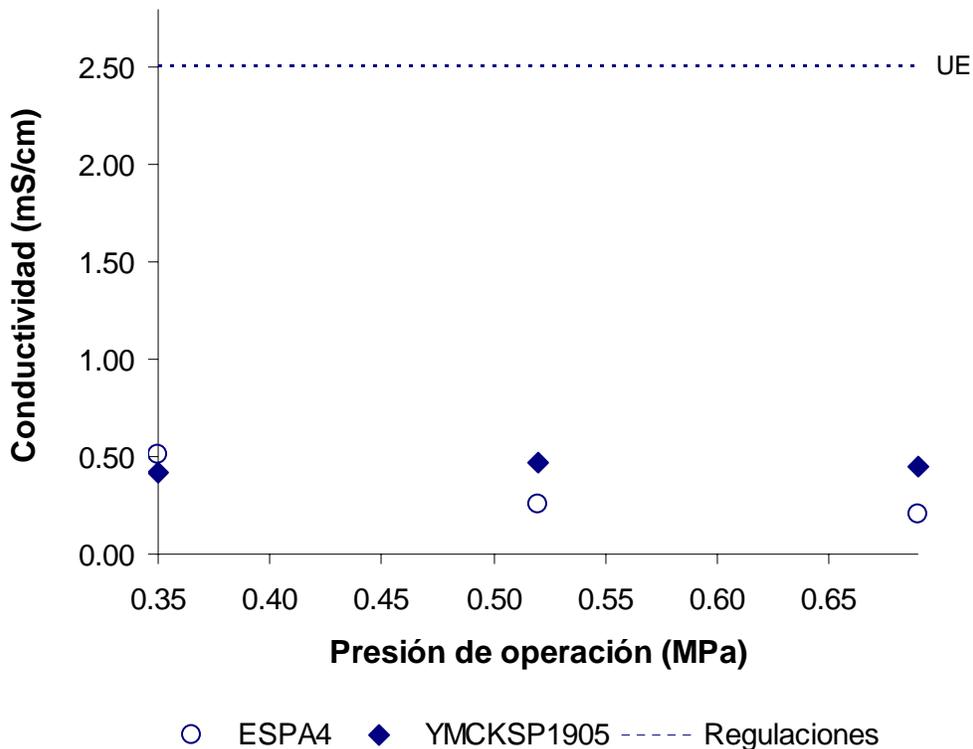
**Figura 4-23 Efecto de la presión en la conductividad de los permeados (incremento)**

Las membranas NF200 (0.81, 0.67 y 0.79 mS/cm), 302990 (1.37, 1.29 y 1.42 mS/cm) y UCB (1.59, 1.45 y 1.50 mS/cm) presentaron un mínimo significativo en la conductividad del permeado con la aplicación de la presión de operación intermedia (0.52 MPa, Figura 4-24). Es posible que un intervalo de presiones más amplio permita observar con mayor claridad el efecto de la presión en la retención de sales de estas membranas. En este caso sólo se puede decir que las membranas parecen mantener la calidad del permeado con ciertas oscilaciones producidas por el aumento en la presión.



**Figura 4-24 Efecto de la presión en la conductividad de los permeados (mínimo)**

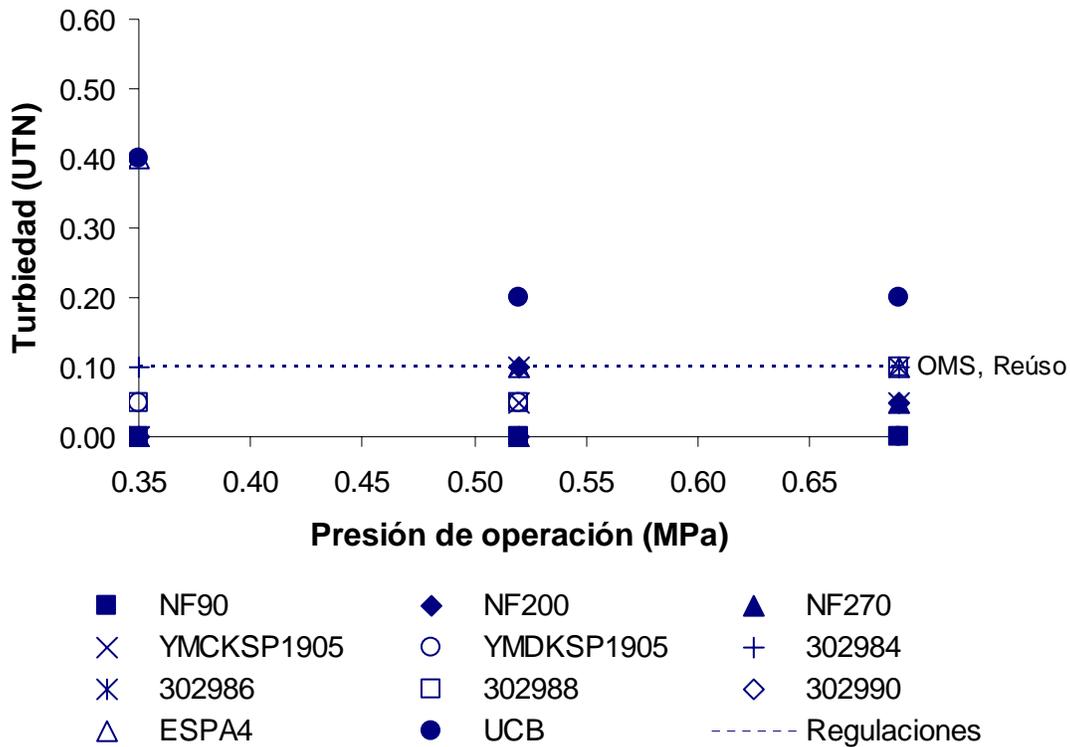
Finalmente, se presentaron dos casos aislados (Figura 4-25): por un lado, la membrana ESPA4 aumentó significativamente el rechazo de iones con el incremento de la presión (0.51, 0.25 y 0.20 mS/cm), comportamiento que ha sido obtenido, también, por Koyunku *et al.* (2000) y Wang y Chung (2005); y por otro lado, la membrana YMCKSP1905 no presentó cambios significativos (0.42, 0.47 y 0.45 mS/cm) lo que indica que la presión no influencia su selectividad (en el intervalo de presiones probadas).



**Figura 4-25 Efecto de la presión en la conductividad de los permeados (casos aislados)**

#### 4.2.2.5. Turbiedad

La turbiedad es un parámetro que generalmente se asocia con la presencia de organismos en el agua y, por ello, es de importancia para la aceptabilidad pública del agua. La Norma Oficial Mexicana establece un valor máximo de turbiedad de 5 UTN para agua potable. Las recomendaciones de la OMS dicen que una turbiedad < 5 UTN es aceptable por parte de los consumidores y que un valor < 0.1 UTN garantiza una desinfección efectiva. A su vez, la EPA establece que para reúso en consumo humano, la turbiedad debe ser < 0.1 UTN. Las membranas probadas produjeron un agua de alta calidad y la mayoría garantizó cualitativamente –en términos de la turbiedad– una desinfección efectiva. Los permeados producidos por la mayoría de las membranas estuvieron por debajo de 0.1 UTN (Figura 4-26). Las membranas NF90 (0, 0 y 0 UTN), NF200 (0, 0.1 y 0.05 UTN), NF270 (0, 0 y 0.05 UTN), YMCKSP1905 (0, 0.05 y 0.05 UTN), YNDKSP1905 (0.05, 0.05 y 0 UTN), 302984 (0.1, 0.1 y 0.1 UTN) 302986 (0, 0.1 y 0.1 UTN), 302988 (0.05, 0.05 y 0.1 UTN) y 302990 (0, 0 y 0.05 UTN) cumplieron con el valor establecido de 0.1 UTN. Las membranas UCB (0.4, 0.2 y 0.2 UTN) y ESPA4 (0.4 UTN con 0.35 MPa) se mantuvieron por debajo de 0.5 UTN.



**Figura 4-26 Turbiedad de los permeados producidos con todas las membranas probadas**

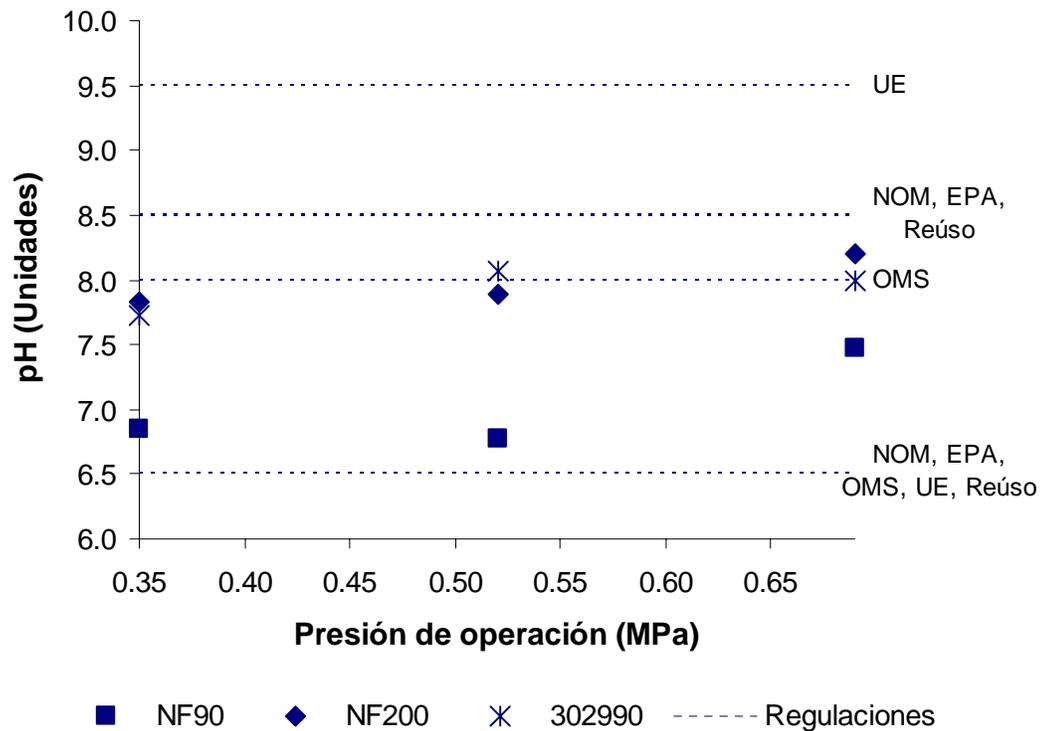
#### 4.2.2.6. pH

El pH no es un parámetro relacionado directamente con la protección de la salud pública, se refiere más bien a la aceptabilidad del agua en función de su agresividad con las instalaciones municipales, industriales y domésticas. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994 y la EPA (agua potable y reúso en consumo humano) establecen un intervalo de pH de 6.5 a 8.5 unidades, la OMS de 6.5 a 8.0 unidades y la UE de 6.5 a 9.5 unidades. Todas las membranas probadas, excepto la 302984 y la UCB (Figura 4-28 y Figura 4-30), produjeron permeados con valores de pH dentro del intervalo de 6.5 a 8.5 unidades (NOM y EPA).

Por otro lado, se observaron diversas tendencias (cambios significativos) movidas por el incremento de presión. Las membranas NF90 (6.8, 6.8 y 7.5 unidades), NF200 (7.8, 7.9 y 8.2 unidades) y 302990 (7.7, 8.1 y 8.0 unidades) presentaron un incremento de pH en los permeados como efecto del aumento de la presión (Figura 4-27). Por el contrario, las membranas NF270 (8.0, 8.0 y 7.7 unidades), YMCKSP1905 (7.6, 7.4 y 7.1 unidades), 302984 (8.9, 7.4 y 7.3 unidades) y 302988 (7.8, 7.6 y 7.3 unidades) presentaron un decremento en el pH de los permeados por el aumento en la presión (Figura 4-28). Finalmente, la

membrana YMDKSP1905 (7.8, 7.8 y 7.9 unidades) no presentó cambios significativos por el aumento en la presión de operación (Figura 4-29), las membranas 302986 (7.6, 7.4 y 8.3 unidades) y UCB (8.6, 8.1 y 8.4 unidades) presentaron un mínimo (Figura 4-30) y la membrana ESPA4 (8.2, 8.4 y 7.8 unidades) un máximo en la aplicación de la presión intermedia (0.52 MPa, Figura 4-31).

No se encontraron estudios sobre el efecto de la presión de operación en el pH de permeados producidos con membranas de nanofiltración, sin embargo, se percibe que la selectividad de cada membrana, producto de su estructura, distribución de tamaño de poro y carga, en interacción con el agua estudiada, puede favorecer o afectar el transporte de iones  $H^+/OH^-$  en función de la presión de operación.



**Figura 4-27 Efecto de la presión en el pH de los permeados (incremento)**

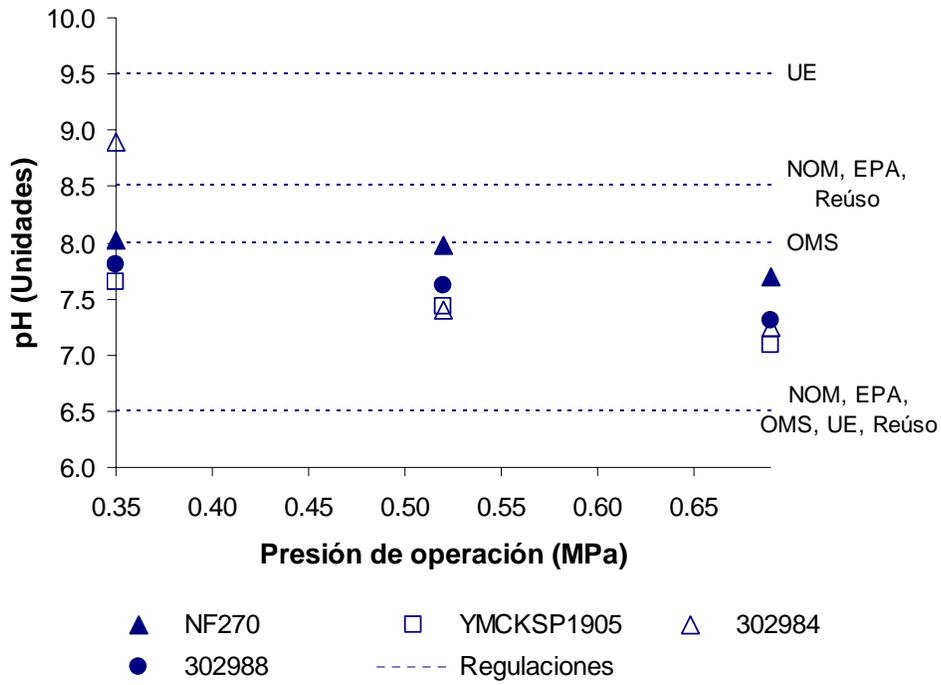


Figura 4-28 Efecto de la presión en el pH de los permeados (decremento)

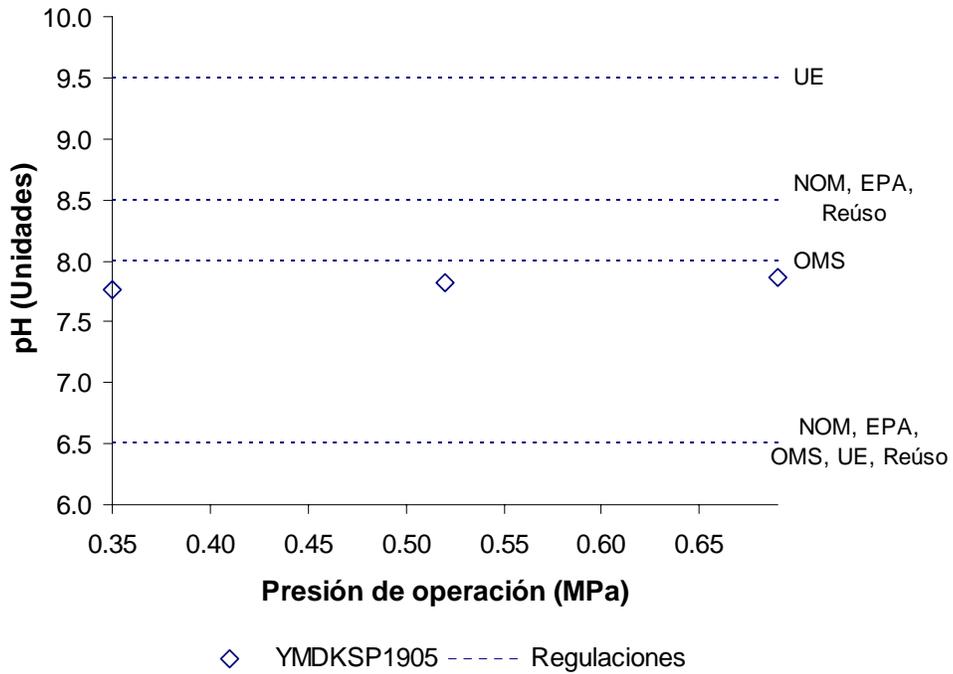


Figura 4-29 Efecto de la presión en el pH de los permeados (sin cambios significativos)

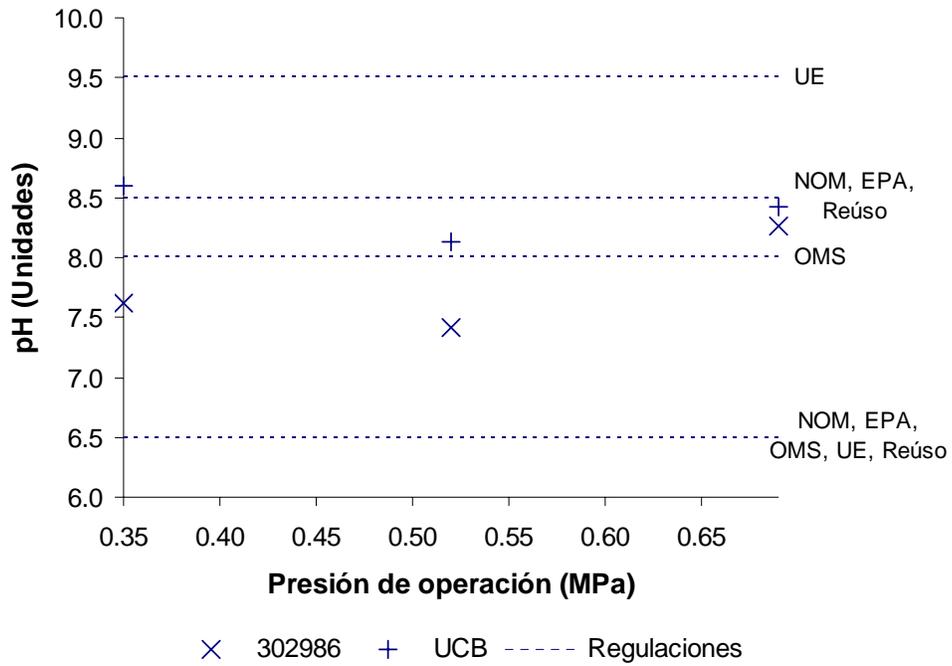


Figura 4-30 Efecto de la presión en el pH de los permeados (mínimo)

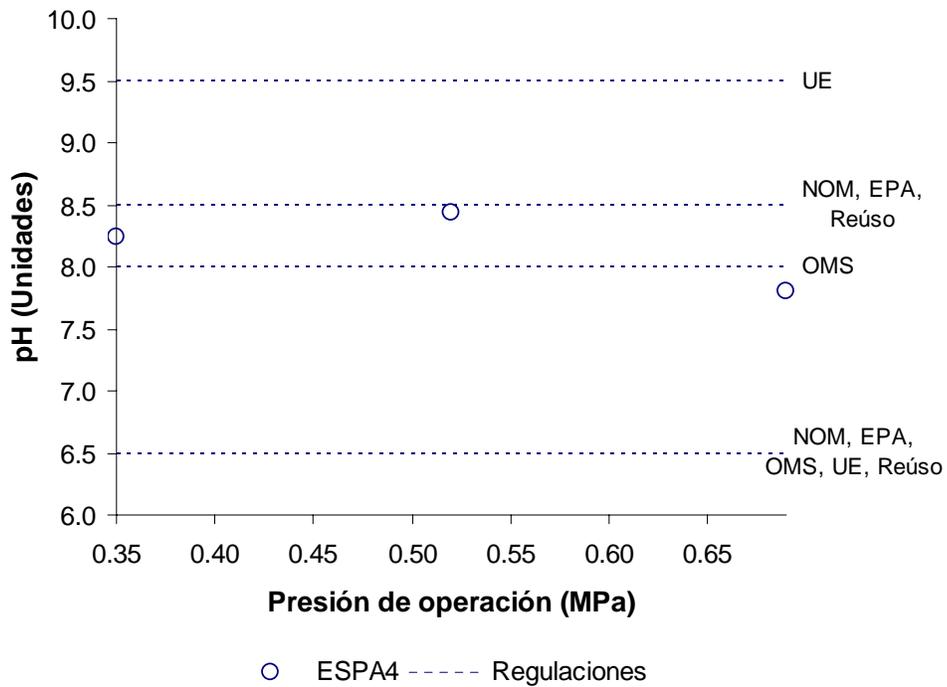
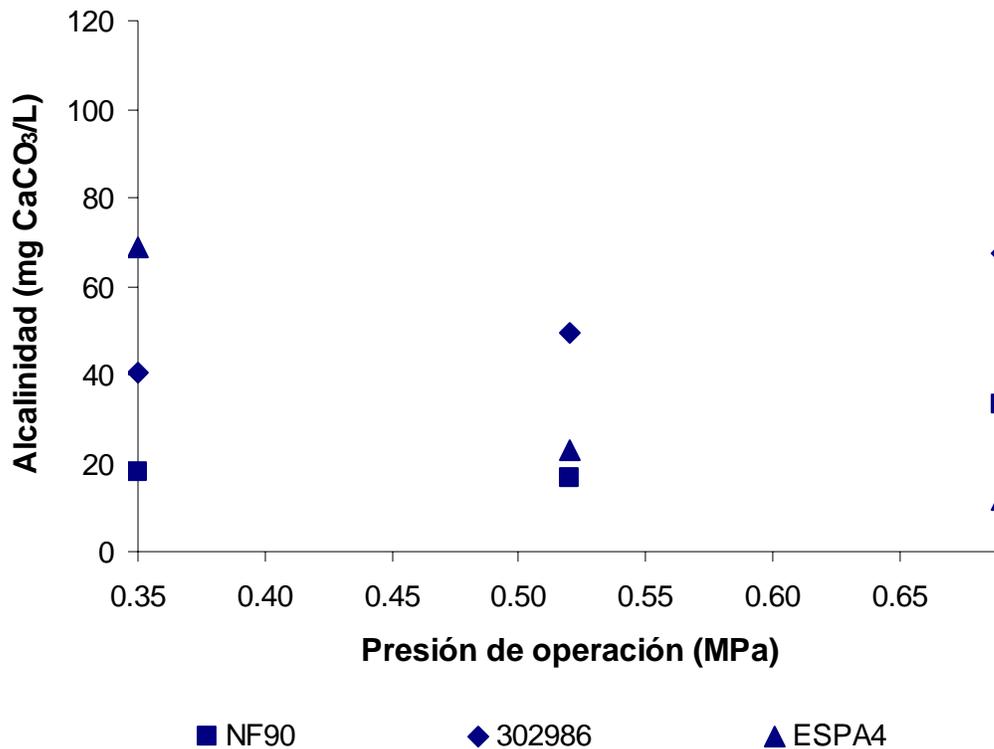


Figura 4-31 Efecto de la presión en el pH de los permeados (máximo)

#### 4.2.2.7. Alcalinidad

La alcalinidad es un parámetro asociado con las características corrosivas del agua y por ello es importante para los sistemas de distribución, en particular, cuando el agua se transporta grandes distancias. No hay valores límite establecidos legalmente, sin embargo, se considera que un agua con poca alcalinidad puede ocasionar problemas de corrosión. Para los efectos de este trabajo se estableció un valor de referencia de 50 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ . Los permeados que tuvieron una alcalinidad inferior a la señalada se clasificaron como potencialmente corrosivos.

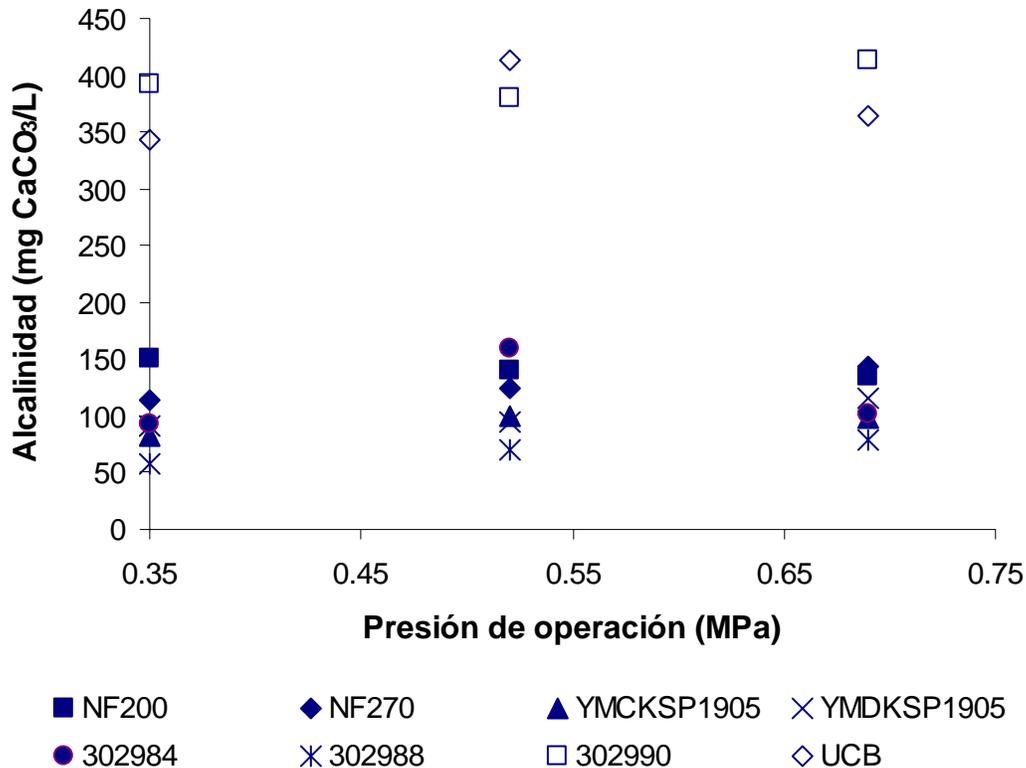
Las membranas que produjeron permeados con alcalinidades muy bajas (< 50 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) y que por ello pueden resultar corrosivos son: NF90 (18, 17 y 33 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302986 (40, 49 y 67 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) y ESPA4 (69, 23 y 11 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , Figura 4-32).



**Figura 4-32 Permeados con alcalinidad baja (< 50 mg/L)**

Las membranas NF200 (151, 140 y 135 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), NF270 (114, 124 y 143 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), YMCKSP1905 (82, 100 y 98 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), YMDKSP1905 (91, 95 y 115 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302984 (92, 160 y 101 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302988 (58, 71 y 78 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302990 (393, 380 y 414 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) y UCB (344, 413 y 364 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) producen permeados con alcalinidades que no provocan problemas de corrosión (Figura 4-33). Finalmente, las membranas 302990

(393, 380 y 414 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) y UCB (344, 413 y 364 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) presentaron una capacidad muy limitada de retención de las especies que generan alcalinidad. Se puede decir que estas membranas prácticamente no remueven alcalinidad (Figura 4-33).

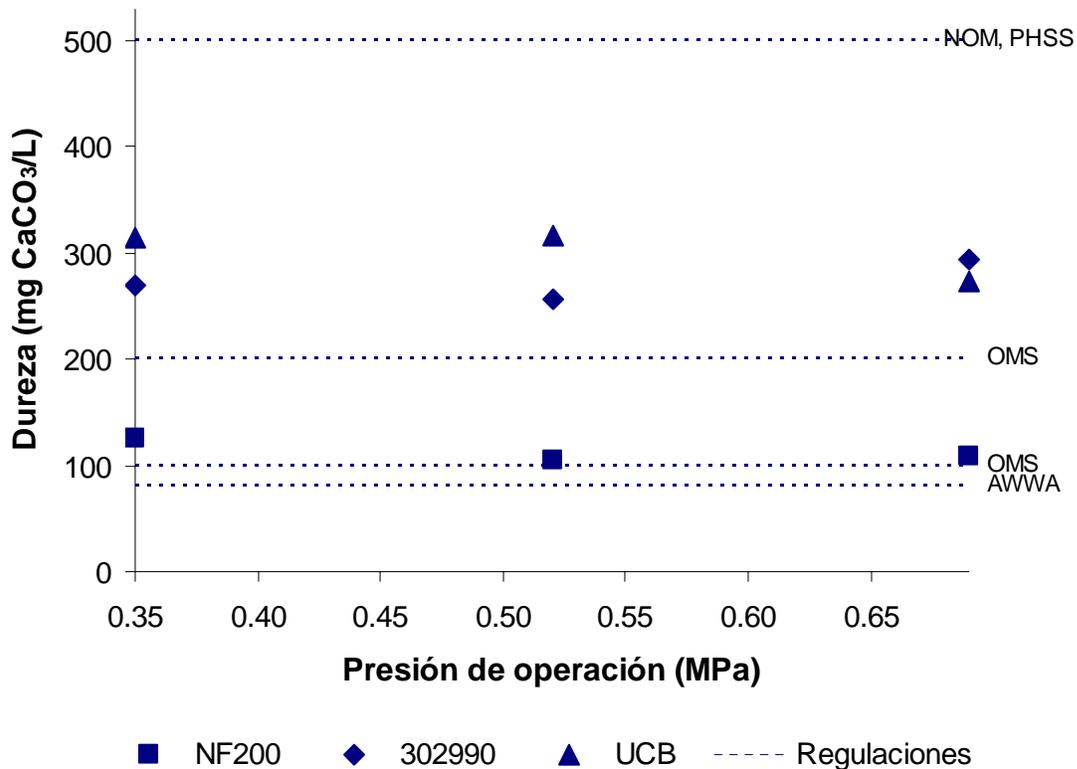


**Figura 4-33 Permeados resistentes a la corrosión (alcalinidad > 50 mg/L)**

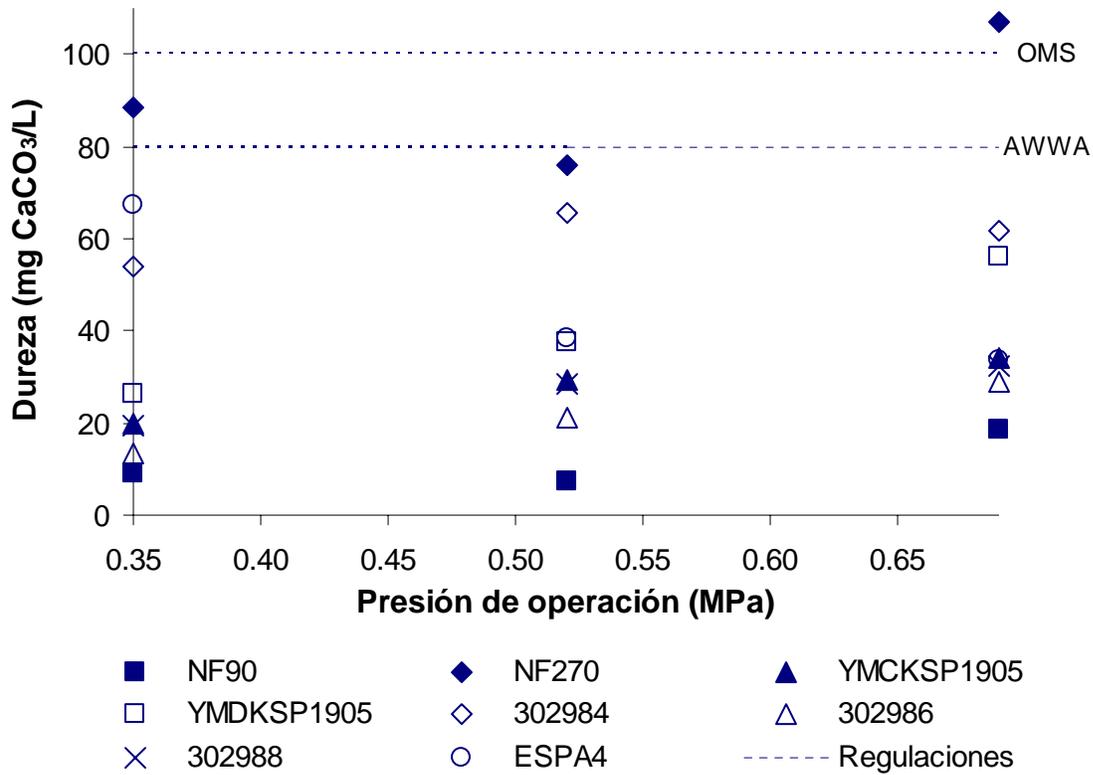
#### 4.2.2.8. Dureza

La dureza es un parámetro relacionado con la aceptabilidad pública del agua, la corrosividad y los problemas de incrustaciones en los sistemas de distribución, instalaciones industriales y domésticas. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y el Servicio de Salud Pública de Estados Unidos de América establecen un límite máximo de 500 mg/L de dureza total como  $\text{CaCO}_3$ . La OMS recomienda que el agua de suministro público tenga más de 100 mg/L de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  para evitar problemas de corrosión en las tuberías y menos de 200 mg/L de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  para evitar incrustaciones en los sistemas de distribución. El valor más estricto es el de 80 mg/L de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  propuesto por la AWWA (*water quality goal*) que entra en conflicto con la recomendación de la OMS siendo menor de los 100 mg/L de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  para evitar problemas de corrosión.

No hubo necesidad de cumplir el valor establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y el Servicio de Salud Pública de Estados Unidos de América de 500 mg/L de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  puesto que la dureza del agua del manantial siempre fue inferior a dicho límite. Sin embargo, con respecto a las recomendaciones de la OMS, las membranas UCB (314, 316 y 273 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) y 302990 (270, 256 y 293 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) pasan la recomendación de 200 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  para evitar incrustaciones en los sistemas de distribución de agua (Figura 4-34). La única membrana que produce un permeado cuya dureza queda dentro del intervalo recomendado por la OMS fue la NF200 (125, 105 y 108 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , Figura 4-34). Las demás, NF90 (9, 7 y 19 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), NF270 (88, 76 y 107 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), YMCKSP1905 (20, 29 y 34 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), YMDKSP1905 (27, 38 y 56 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302984 (54, 66 y 62 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302986 (14, 21 y 29 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ), 302988 (19, 28 y 32 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) y ESPA4 (67, 38 y 34 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) quedan por debajo del valor recomendado para prevenir problemas de corrosividad en tuberías –aunque cumplen el estricto límite propuesto por la AWWA (80 mg/L, Figura 4-35)–.



**Figura 4-34 Permeados con dureza moderada y alta**



**Figura 4-35 Permeados con baja dureza**

Finalmente, en la Tabla 4.1 se resumen las características del desempeño de las membranas probadas y se indica la presión con la que se lograron los mejores desempeños. Las membranas más efectivas fueron: NF90, NF270, YMCKSP1905, YMDKSP1905 y 302986. Estas membranas, con excepción de la YMCKSP1905, se analizaron en términos de la retención de orgánicos e inorgánicos.

Tabla 4.1 Características del desempeño de las membranas estudiadas

Membrana	Presión (MPa)	Flux (L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Desempeño	Resultado de la evaluación
NF90	0.69	88	Cumplió con todas las regulaciones de todos los parámetros	Seleccionada
NF200	-	-	No cumplió con el valor de COT establecido por la EPA	Descartada
NF270	0.52	95	Rebasa ligeramente el valor recomendado por la EPA para SDT (Este parámetro no es de carácter obligatorio)	Seleccionada
YMCKSP1905	0.52	22	Cumplió con todas las regulaciones de todos los parámetros	Seleccionada
YMDKSP1905	0.69	28	Rebasa ligeramente el valor recomendado por la EPA para SDT (Este parámetro no es de carácter obligatorio)	Seleccionada
302984	-	-	No cumplió con el valor de turbiedad establecido por la EPA para reúso en consumo humano	Descartada
302986	0.35	12	Cumplió con todas las regulaciones de todos los parámetros	Seleccionada
302988	-	-	No cumplió con el valor de COT establecido por la EPA para reúso en consumo humano	Descartada
302990	-	-	No cumplió con el valor de COT establecido por la EPA para reúso en consumo humano	Descartada
ESPA4	-	-	No cumplió con el valor de COT establecido por la EPA para reúso en consumo humano	Descartada
UCB	-	-	No cumplió con el valor de COT establecido por la EPA para reúso en consumo humano	Descartada

Las membranas seleccionadas presentaron una alta capacidad de retención de orgánicos pero diferentes capacidades de retención de sustancias inorgánicas (SDT, conductividad, turbiedad, alcalinidad y dureza). Las cuatro membranas seleccionadas mostraron una retención de COT del 98% (AUV<sub>254</sub>: 87-94%) mientras que la membrana NF90 presentó las mayores retenciones de compuestos inorgánicos (89-98%) y la NF270 las menores (49-74%, Tabla 4.2).

**Tabla 4.2 Retención de orgánicos e inorgánicos de las membranas seleccionadas**

Parámetro	Retención (%)			
	NF90 (0.69 MPa, 88 L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	NF270 (0.52 MPa, 95 L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	YMDKSP1905 (0.69 MPa, 28 L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	302986 (0.35 MPa, 12 L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )
COT	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>
AUV <sub>254</sub>	92	89	87	94
SDT	<b>92</b>	<b>49</b>	56	86
Conductividad	<b>92</b>	<b>54</b>	59	89
Turbiedad	<b>89</b>	<b>74</b>	88	89
Alcalinidad	<b>97</b>	<b>70</b>	74	91
Dureza	<b>98</b>	80	69	96

Así, si se considera que la membrana más adecuada para el agua del manantial es aquella que presente una alta capacidad de retención de orgánicos y permita un paso considerable de sustancias propias del agua (inorgánicos), la membrana NF270 se mostró destacada. Con todo, las cuatro membranas seleccionadas se consideraron de interés para llevar a cabo una evaluación más minuciosa: retención de coliformes totales y fecales, virus, compuestos orgánicos específicos y toxicidad.

### 4.3. Segunda etapa: evaluación de la efectividad de las membranas a partir de parámetros no convencionales

#### 4.3.1. Microbiológicos

Para evaluar la calidad microbiológica de los permeados producidos con las membranas seleccionadas se analizó el contenido de coliformes totales y fecales, así como de colifagos somáticos en el agua del manantial y en los permeados. Estos tres indicadores de contaminación mostraron que el agua del manantial requiere desinfección y que las membranas probadas tienen una alta capacidad de retención de microorganismos.

El agua del manantial presentó  $38 \pm 10$  UFC/100 mL de coliformes totales y  $22 \pm 14$  UFC/100 mL de coliformes fecales. Éstos fueron retenidos en su totalidad por las membranas probadas excepto por la YMDKSP1905 cuyo permeado presentó  $3 \pm 1$  UFC/100 mL de coliformes totales (Tabla 4.3). La normatividad nacional e internacional indican que el agua potable debe estar libre de coliformes totales y fecales (NOM-127-SSA1-1994; OMS, 2004 y EPA, 2002), por lo que se observa que las membranas NF90, NF270 y 302986 cumplen ampliamente con este criterio mientras que la YMDKSP1905 requiere una desinfección adicional.

Por otro lado, en cuanto a la determinación de virus en el agua del manantial y en los permeados es importante señalar que desde 1940-1960 se aclaró el hecho de que los virus son también responsables de algunas de las enfermedades de la ruta fecal-oral y que los métodos tradicionales para determinar bacterias (coliformes) no son confiables para establecer su presencia o ausencia en el agua (MWH, 2005). Además, como se indicó en la sección 2.1.3.1, algunos virus son más resistentes a la desinfección que las bacterias (WHO, 2003). Así, el interés en la determinación de bacteriófagos<sup>39</sup> como organismos indicadores de contaminación fecal, en particular, de la presencia de virus entéricos, ha ido en aumento (Metcalf y Eddy, 2003). Los colifagos son bacteriófagos que infectan la bacteria *E. coli*. y se usan dos grupos en la evaluación de la calidad del agua: colifagos F-RNA y colifagos somáticos. Los colifagos somáticos atacan la pared de la célula hospedera, se replican en el tracto gastrointestinal de los animales de sangre caliente y también se pueden replicar en el agua (OMS, 2004).

El agua del manantial tiene una concentración importante de colifagos somáticos, lo que indica que está contaminada con materia fecal y potencialmente con virus entéricos y otros patógenos. La concentración de colifagos en el agua del manantial fue de  $1210 \pm 410$  UFP/L mientras que los valores típicos de virus en aguas subterráneas reportados en la literatura científica van de 0-2 virus/L<sup>40</sup> (OMS, 2004). Por su lado, las membranas probadas mostraron una alta capacidad de retención de colifagos somáticos. Los

<sup>39</sup> Virus que sólo utilizan bacterias como célula hospedera

<sup>40</sup> Estos valores no se obtuvieron con métodos basados en cultivos. Se utilizaron métodos como la microscopía o el análisis molecular/ácido nucleico

permeados producidos con las cuatro membranas probadas presentaron menos de 0.8 UFP/L. Las membranas YMDKSP1905 y NF90 produjeron permeados con ausencia total de colifagos, la membrana 302986 presentó un permeado con  $0.3\pm 0.2$  UFP/L y la membrana NF270 produjo un permeado con  $0.5\pm 0.4$  UFP/L (Tabla 4.3).

Este resultado pone de manifiesto el hecho de que la ausencia de coliformes totales y fecales no garantiza la ausencia de virus, en este caso, colifagos somáticos y que, no obstante, las concentraciones de microorganismos en todos los permeados son muy bajas, la única membrana que produjo un permeado libre de microorganismos fue la NF90.

**Tabla 4.3 Características microbiológicas del agua del manantial y los permeados de las membranas probadas**

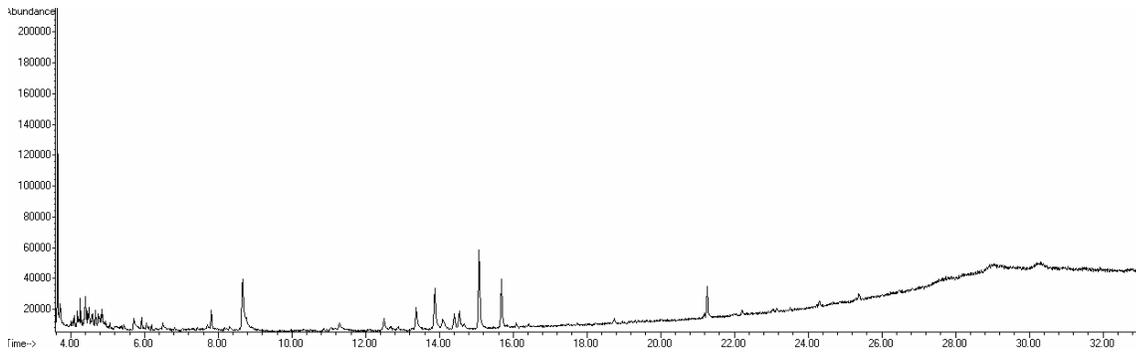
Membrana	CT (UFC/100mL)	CF (UFC/100mL)	Colifagos somáticos (UFP/100 mL)		
			A	B	C
Cruda	38±10	22±14	1.4 X10 <sup>2</sup>	1.5X10 <sup>2</sup>	7.4X10 <sup>1</sup>
NF270 (P2)	ND	ND	0.8*	0.6*	ND
YMDKSP1905 (P3)	3±1	ND	ND	ND	ND
NF90 (P2)	ND	ND	ND	ND	ND
302986 (P1)	ND	ND	0.4*	0.4*	ND

\*UFP/L

#### 4.3.2. Compuestos orgánicos detectados

##### 4.3.2.1. Agua cruda

Los compuestos orgánicos detectados e identificados en el agua del manantial sugieren un riesgo en la salud de los consumidores por exposición oral crónica. Se detectó un número importante de compuestos orgánicos en el agua del manantial (Figura 4-36). La mayoría de ellos no se han identificado y su presencia en una fuente de agua "limpia" no es común. De los picos con mayor abundancia (del cromatograma de la Figura 4-36) se identificaron los compuestos: dibutil ftalato, dietil ftalato, hidroxitolueno butilado, 4-fenil-biciclohexil y 1,1-ciclohexilidenebis-benceno (Tabla 4.4).



**Figura 4-36 Compuestos detectados en el agua del manantial**

El dibutil ftalato es un compuesto que se origina en la industria de la química orgánica. Es un éster ftalato utilizado ampliamente en la industria para la fabricación de productos tales como tubos de PVC, plásticos de celulosa, barnices, lacas, vidrios de seguridad, esmaltes, protectores de papel, materiales dentales, farmacéuticos y envolturas plásticas para comida. Es un componente de los adhesivos látex y se usa como solvente para tintas. Las fuentes de exposición más importantes son la comida procesada y empacada y los cosméticos. Se sabe que es tóxico en la reproducción y desarrollo de roedores (Langonne *et al.*, 1998; Ema *et al.*, 1995; Choi *et al.*, 2002). Por ello, la EPA establece una dosis de referencia para exposición oral crónica (RfD) de  $1 \times 10^{-1} \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (IRIS, 1996).

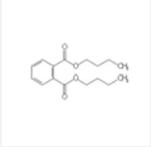
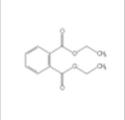
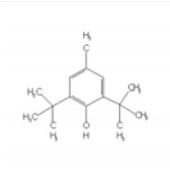
El dietil ftalato es un compuesto que se origina en la industria de la química orgánica. Es un líquido incoloro con un ligero olor aromático y baja volatilidad. Es soluble en agua (1000 mg/L a 25 °C). Se usa como plastificante en una amplia variedad de productos como son los plásticos para embalaje, cosméticos, artículos de aseo personal y las tuberías de los equipos de tratamiento médico (CICAD, 2003). Se ha visto, en estudios con humanos, que irrita ojos y piel lesionada. No se han encontrado evidencias de su actividad carcinógena en ratas (BIBRA, 1994). Sin embargo, la EPA establece una dosis de referencia para exposición oral crónica de  $8 \times 10^{-1} \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$  (IRIS, 1996).

El hidroxitolueno butilado se usa desde 1947 como antioxidante en productos de goma y petróleo y, más recientemente, en plásticos y desde 1949 como antioxidante en muchos alimentos que contienen grasas, en aceites comestibles y cosméticos (IARC, 1986). Hay una extensa exposición humana a este compuesto. Se acumula predominantemente en el tejido adiposo y en menor grado en el hígado (administración prolongada, BUA, 1994). Sin embargo, no hay evidencia suficiente para afirmar que sea mutagénico o carcinógeno (BUA, 1994). Por el contrario, puede ser un agente anti-carcinógeno en los niveles en que se presenta en los aditivos para comida que se usan en la actualidad (Williams *et al.*, 1999). La EPA no establece un valor de dosis de referencia para la exposición oral crónica a este compuesto.

El 4-fenil-biciclohexil y el 1,1-ciclohexilidenebis-benceno no son compuestos muy estudiados. De una amplia búsqueda en varias fuentes actualizadas de información toxicológica y características fisicoquímicas de compuestos orgánicos no se encontró información sobre ellos.

Estos resultados confirman la contaminación del agua del manantial con sustancias orgánicas que no se encuentran de manera natural en una fuente de agua “limpia”. Por ello, se ratifica la necesidad de aplicar un tratamiento avanzado (filtración con membranas) para tratar el agua del manantial (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4 Características de los compuestos detectados en el agua del manantial**

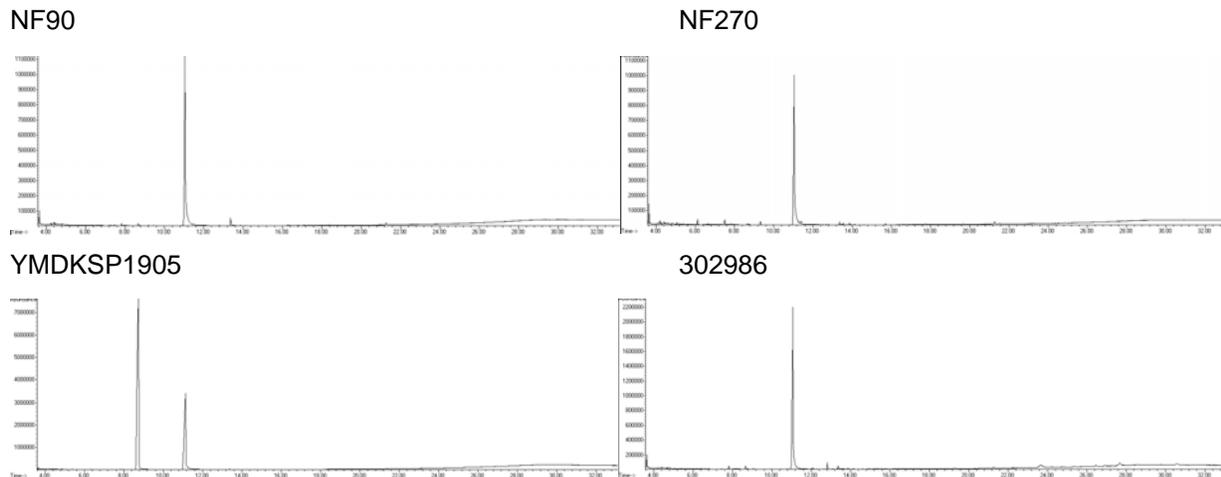
Compuesto detectado	Fórmula	Estructura	PM	Probabilidad (%)	DL50 oral rata (mg kg <sup>-1</sup> )	DL50 dérmica conejo (mg kg <sup>-1</sup> )
Dibutil ftalato (84-74-2)	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>		278	19-20	7499	20000
Dietil ftalato (84-66-2)	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>		222	89-92	9168	-
Hidroxitolueno butilado (128-37-0)	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O		220	34-36	2000	-
4-fenil-biciclohexil (20273-27-2)	C <sub>18</sub> H <sub>26</sub>		242	57-70		
1,1-ciclohexilidenebis-benceno (21113-55-3)	C <sub>18</sub> H <sub>20</sub>		236	24-36		

#### 4.3.2.2. Permeados

Las cuatro membranas fueron capaces de retener todos los compuestos detectados en el agua del manantial excepto la membrana YMDKSP1905 que permitió el flujo de dietil ftalato (Figura 4-37). Es notable el hecho de que esta membrana (YMDKSP1905) haya permitido el paso de dietil ftalato (222 Dalton) mientras retuvo completamente el hidroxitolueno butilado, el cual, tiene un peso molecular menor (220 Dalton). Este resultado evidencia el hecho de que el peso molecular de los compuestos –respecto del peso molecular de corte de las membranas (sección 2.3.2.)– es un parámetro útil pero no el más apropiado para describir la capacidad de retención (cribado) de una membrana, pues a nano-escala el

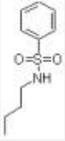
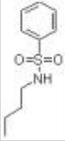
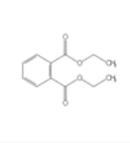
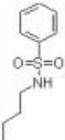
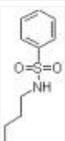
tamaño de los compuestos y sus ramificaciones juegan un papel muy importante (Agenson *et al.*, 2003). En este caso, el hidroxitolueno butilado es más ligero, pero tiene más ramificaciones que el dietil ftalato (Tabla 4.4), por ello, la red polimérica de la membrana lo retiene.

Por otro lado, en los cromatogramas de los permeados, se observa un pico común que corresponde al compuesto bencenosulfonamida. Este compuesto proviene del material de las membranas. Se presentó por la disolución de pequeñas partículas del material de las membranas con los solventes aplicados durante el procedimiento analítico (Tabla 4.5).



**Figura 4-37 Compuestos detectados en los permeados de las membranas probadas**

Tabla 4.5 Características de los compuestos detectados en los permeados

Membrana	Compuesto detectado	Fórmula	Estructura	PM	Probabilidad (%)	DL50 oral rata (mg kg <sup>-1</sup> )	DL50 dérmica conejo (mg kg <sup>-1</sup> )
NF90 (duplicado)	N-butil-bencenosulfonamida (3622-84-2)	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub> S		213	94-95	-	-
NF270 (duplicado)	N-butil-bencenosulfonamida (3622-84-2)	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub> S		213	93-94	-	-
YMDKSP1905 (cuadruplicado)	Dietil ftalato (84-66-2)	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>		222	97-98	9168	-
	N-butil-bencenosulfonamida (3622-84-2)	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub> S		213	92-95	-	-
302986 (duplicado)	N-butil-bencenosulfonamida (3622-84-2)	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub> S		213	94-95	-	-

### 4.3.3. Toxicidad

Las pruebas de toxicidad del agua se llevan a cabo a través del análisis de los efectos que ésta produce en un organismo de prueba (bacterias, protozoos, algas y/o insectos, WHO, 2003). Se considera que el agua es tóxica si el organismo de prueba muere o presenta inmovilidad, alteraciones en su reproducción, crecimiento, funciones fisiológicas y comportamiento (Bogaerts *et al.*, 2001).

*Tetrahymena pyriformis* es un protozoo ciliado que se encuentra de manera natural en el agua. Por sus características<sup>41</sup>, es un organismo apropiado para la evaluación del riesgo ambiental. Se sabe que es un organismo eficiente para la detección de contaminantes en sistemas acuáticos y que se usa en varios métodos de determinación de toxicidad xenobiótica<sup>42</sup>. Estos métodos, conocidos como “técnicas *in vitro*”,

<sup>41</sup> En condiciones apropiadas su tiempo de generación es de aproximadamente tres horas, por lo que los efectos de los contaminantes sobre ciertos procesos fisiológicos y metabólicos de este organismo se pueden estudiar a través de varias generaciones (Bogaerts *et al.*, 2001)

<sup>42</sup> Del inglés *xenobiotic* que significa: compuesto químico (droga, plaguicida o carcinógeno) que es ajeno a un organismo vivo (MWD, 2005)

se han utilizado para predecir el peligro potencial de residuos químicos e industriales en sistemas acuáticos (Bogaerts *et al.*, 2001), evaluar la toxicidad de fenoles (Cronin *et al.*, 2002), antidepresivos (Darcy *et al.*, 2002), antraceno (Bonnet *et al.*, 2003), surfactantes no-iónicos (Dias *et al.*, 2003), aldehídos (Netzeva y Schultz, 2005) y colorantes (Novotny *et al.*, *in press*), y como sustitutos de las pruebas que utilizan animales para la detección de irritación en la piel (Aptula *et al.*, 2005), entre otros.

La toxicidad del agua del manantial y los permeados se evaluó a través del ciliado *Tetrahymena pyriformis*. Los resultados mostraron efectos adversos en los organismos estudiados tanto para el agua del manantial (cruda) como para los permeados producidos con las cuatro membranas probadas en esta etapa (Tabla 4.6). El agua del manantial presentó falta de movimiento en dos de diez ciliados expuestos y los permeados, en uno de diez. Una primera observación de este resultado es que el agua del manantial tiene cierta toxicidad y que ésta, aunque en menor grado, permanece en el agua a pesar de la nanofiltración. Es importante señalar que los estudios toxicológicos basados en un solo bio-ensayo no proporcionan una evaluación completa de los efectos que puede presentar un organismo, por ello, se recomienda realizar ensayos morfológicos, estructurales, fisiológicos y bioquímicos que proporcionen información global de los efectos que experimenta el organismo estudiado (Dias *et al.*, 2003).

**Tabla 4.6 Resultados: toxicidad con *T. pyriformis* y mutagenicidad con AMES**

Membrana	<i>T. pyriformis</i> (organismos afectados)	AMES	COT (mg/L)
Cruda	//	Negativo	38.62±0.2
NF90	/	Negativo	0.683±0.017
NF270	/	Negativo	0.639±0.030
YMDKSP1905	/	Negativo	0.565±0.020
302986	/	Negativo	0.648±0.019

#### 4.3.4. Prueba de AMES (Mutagenicidad)

La prueba de AMES se usa para identificar compuestos potencialmente carcinógenos mediante el estudio de su efecto mutagénico en la bacteria eucariota *Salmonella typhimurium*. La técnica se basa en la suposición de que toda sustancia que es mutagénica (para dicha bacteria) puede ser también carcinógena. Aunque de hecho algunas sustancias que causan cáncer en animales de laboratorio no producen pruebas positivas de Ames (y viceversa).

Recientemente se ha utilizado para la evaluación de la mutagenicidad de agua subterránea (Sujbert *et al.*, 2006), superficial (Aleem y Malik, 2005) y tratada (Aguayo *et al.*, 2004; Zani *et al.*, 2005) con buenos resultados. Sin embargo, se han observado ciertas diferencias en los resultados inducidas por el método de extracción utilizado para la concentración de las muestras (Aleem y Malik, 2005).

El análisis del agua del manantial mediante la prueba de AMES mostró que dicha agua no contiene agentes mutagénicos (todas las pruebas resultaron negativas). El mismo resultado se obtuvo para los permeados producidos con las membranas probadas en esta etapa (Tabla 4.6). Es probable que para el agua del manantial sea necesario concentrar un mayor volumen de muestra pues el contenido de sustancias orgánicas es alto (COT>38 mg/L, Tabla 4.6) y se esperaría cierto grado de mutagenicidad. Por otro lado, es importante hacer notar que la prueba de AMES no detecta algunos mutágenos activos en células animales, ni carcinógenos que no son mutágenos. Sumado a esto, la muestra puede perder actividad mutagénica durante su almacenamiento y muchos agentes mutagénicos se pueden oxidar con la luz y producir sustancias no mutagénicas (APHA, 1998).

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las pruebas para comparar membranas permitieron obtener permeados de diferentes membranas en condiciones de operación controladas y comparar su cantidad y calidad.

La evaluación de la efectividad de las membranas en términos del volumen de permeado producido por unidad de área de membrana (flux) y selectividad (parámetros convencionales) permitió seleccionar las membranas más productivas ( $17-95 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) y selectivas (retención de COT del 98%).

El estudio del efecto de la presión en el flux y la selectividad de las membranas mostró que el aumento en la presión tiene efectos diferentes en la cantidad y calidad de los permeados dependiendo del tipo de membrana.

Las combinaciones membrana-presión más productivas (mayor flux) que produjeron el permeado de mejor calidad (parámetros convencionales) fueron: NF90 con 0.69 MPa ( $88 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , retención de COT del 98%), NF270 con 0.52 MPa ( $95 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , retención de COT del 98%), YMCKSP1905 con 0.52 MPa ( $22 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , retención de COT del 98%), YMDKSP1905 con 0.69 MPa ( $28 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , retención de COT del 98%) y 302986 con 0.35 MPa ( $12 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , retención de COT del 98%).

La evaluación de las membranas NF90, NF270, YMDKSP1905 y 302986 con base en los parámetros no convencionales mostró que: a) las cuatro combinaciones membrana-presión tienen una alta capacidad de retención de microorganismos (coliformes totales y fecales así como virus) y compuestos orgánicos de bajo peso molecular (dibutil ftalato, dietil ftalato, hidroxitolueno butilado y 4-fenil-biciclohexil) con excepción de la membrana YMDKSP1905 que permitió el paso de dietil ftalato; b) el agua del manantial presentó falta de movimiento en dos de diez ciliados expuestos y los permeados, en uno de diez y c) el agua del manantial y los permeados analizados no son mutagénicos.

La membrana más efectiva para potabilizar el agua del manantial Cerro Colorado fue la membrana NF270, la cual presentó una alta retención de compuestos orgánicos, baja retención de sales y el mayor flux.

En cuanto a las pruebas de toxicidad, se recomienda complementar el estudio con ensayos morfológicos, estructurales, fisiológicos y bioquímicos que permitan hacer una evaluación global de los efectos que experimenta el organismo de prueba al ser expuesto al agua del manantial, para así, tener una mejor comprensión del tipo de daño que experimenta el organismo de prueba.

**ANEXO A: ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

**A.1. Membrana NF90**

**A.1.1. Flux**

**A.1.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)  
 α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.1.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica pues ésta influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.1.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana NF90**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	23234.625	2	11617.312	162.212	0.000
Réplica	813.015	2	406.508	5.676	0.004
Error	12103.441	169	71.618		
Total	948168.662	174			

**A.1.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.1.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (60<sub>0.35</sub> ≠ 71<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (60<sub>0.35</sub> ≠ 88<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (71<sub>0.52</sub> ≠ 88<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.1.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-11.08029(*)	1.552050	0.000	-14.14419	-8.01639
	0.69	-28.25420(*)	1.573598	0.000	-31.36064	-25.14776
0.52	0.35	11.08029(*)	1.552050	0.000	8.01639	14.14419
	0.69	-17.17392(*)	1.592777	0.000	-20.31822	-14.02961
0.69	0.35	28.25420(*)	1.573598	0.000	25.14776	31.36064
	0.52	17.17392(*)	1.592777	0.000	14.02961	20.31822

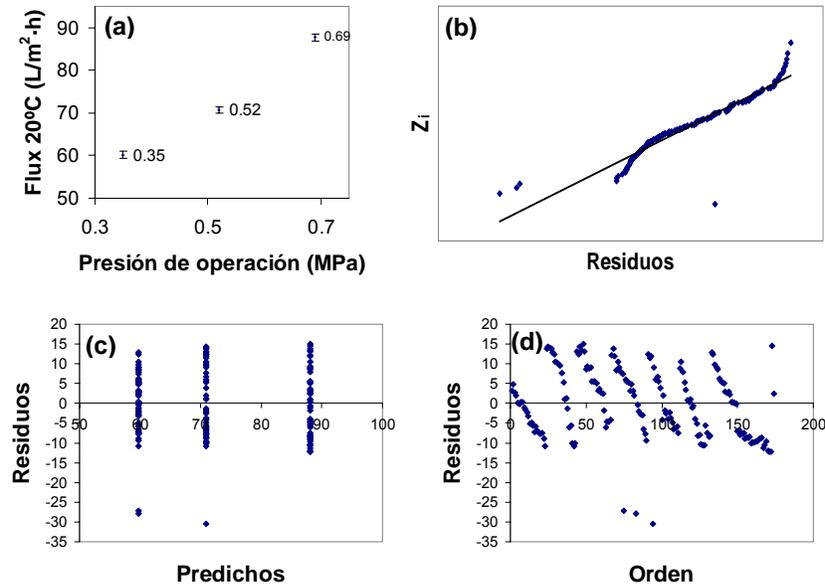
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la Figura A.1.1.a se observa claramente que las barras LSD de los flux de permeado de las tres presiones aplicadas no se traslapan. Esto quiere decir que las presiones tienen un efecto significativo en el volumen de permeado producido por esta membrana. Además, se observa que el efecto es positivo, la producción (flux) aumenta con el incremento en la presión.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.1.b).
2. Los tratamientos cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos; Figura A.1.1.c).
3. Se detectan tendencias de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No es claro el cumplimiento del supuesto de independencia (Figura A.1.1.d).



**Figura A.1.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.1.2. Carbono Orgánico Total (COT)**

**A.1.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: COT (mg/L)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos un par de medias de tratamientos (presiones) son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el COT del permeado.

**Tabla A.1.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana NF90**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.113	2	0.056	7.838	0.002
Réplica	0.338	2	0.169	23.502	0.000
Error	0.244	34	0.007		
Total	20.850	39			

**A.1.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD (Diferencia Mínima Significativa)**

Variable de respuesta: COT (mg/L)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.1.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}\neq\mu_{P2}$ ; (0.795<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.683<sub>0.52</sub>)
- $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ; (0.795<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.678<sub>0.69</sub>)
- $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; (0.683<sub>0.52</sub> = 0.678<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.1.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.11215(*)	0.033237	0.002	0.04461	0.17970
	0.69	0.11569(*)	0.033237	0.001	0.04815	0.18324
0.52	0.35	-0.11215(*)	0.033237	0.002	-0.17970	-0.04461
	0.69	0.00354	0.033237	0.916	-0.06401	0.07108
0.69	0.35	-0.11569(*)	0.033237	0.001	-0.18324	-0.04815
	0.52	-0.00354	0.033237	0.916	-0.07108	0.06401

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

De la gráfica de medias LSD (Figura A.1.2.a) se confirman los resultados del método de comparaciones múltiples. El contenido de COT del permeado producido con la presión de 0.35 MPa es significativamente mayor a los contenidos de COT de los permeados producidos con las otras dos presiones: las barras de error (LSD) del COT en la presión de 0.35 MPa no se traslapan con las barras LSD de los contenidos de COT de los permeados producidos con las presiones de operación 0.52 y 0.69 MPa. Éstas, producen permeados con un contenido de COT estadísticamente igual: las barras LSD de los contenidos de COT de los permeados producidos con estas presiones se traslapan. Se puede decir que el aumento de la presión disminuye significativamente el COT del permeado.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.2.b).
- Los datos de las presiones 0.52 y 0.69 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). La presión 0.35 MPa presenta ligeramente menor variación. No se puede afirmar que se cumpla el supuesto de variancia constante. Se debe tomar con cautela la conclusión de que el COT baja con el aumento de la presión de operación (Figura A.1.2.c)

3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.1.2.d).

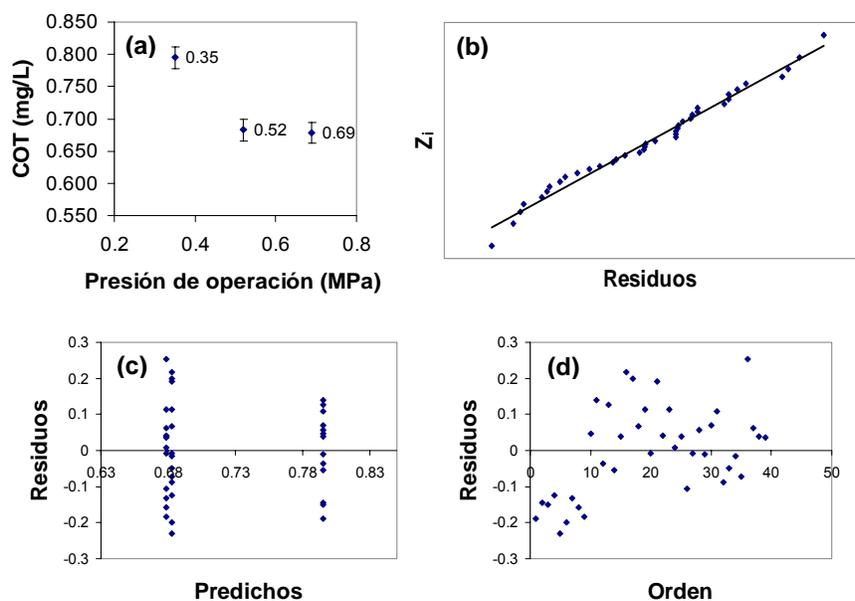


Figura A.1.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.1.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)

#### A.1.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

Tabla A.1.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana NF90

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.000	2	0.000	0.219	0.805
Réplica	0.000	2	0.000	21.644	0.000
Error	0.000	22	0.000		
Total	0.000	27			

#### A.1.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> cm<sup>-1</sup>

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.1.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de  $AUV_{254}$  obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.003_{0.35}=0.003_{0.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.003_{0.35}=0.003_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.003_{0.52}=0.003_{0.69})$

**Tabla A.1.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de  $AUV_{254}$  obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.00033	0.000656	0.616	-0.00103	0.00169
	0.69	-0.00007	0.000656	0.911	-0.00143	0.00129
0.52	0.35	-0.00033	0.000656	0.616	-0.00169	0.00103
	0.69	-0.00041	0.000656	0.541	-0.00177	0.00095
0.69	0.35	0.00007	0.000656	0.911	-0.00129	0.00143
	0.52	0.00041	0.000656	0.541	-0.00095	0.00177

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

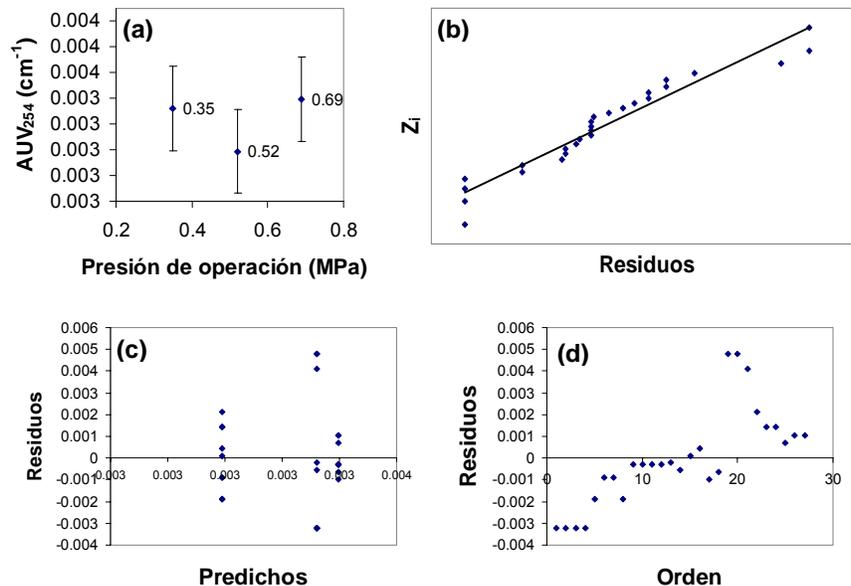
### A.1.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

De la gráfica de medias se confirman los resultados del método LSD. Las medias de los valores de  $AUV_{254}$  obtenidas con las tres presiones son iguales: las barras LSD se traslapan (Figura A.1.3.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.3.b).
2. Los tratamientos tienen variaciones distintas. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.1.3.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple con claridad el supuesto de independencia (Figura A.1.3.d).

Este parámetro presentó variaciones irregulares, por ello, no aporta información sobre el efecto de presión en el contenido de sustancias orgánicas en el permeado producido con la membrana NF90.



**Figura A.1.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA- $AUV_{254}$ : (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.1.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.1.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Sólidos Disueltos

Totales mg/L

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica no es significativa. La réplica no influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian los SDT del permeado.

**Tabla A.1.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF90**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	2002.154	2	1001.077	0.335	0.734
Réplica	12810.317	2	6405.159	2.143	0.233
Error	11953.968	4	2988.492		
Total	136295.918	9			

**A.1.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.1.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $126_{0.35} = 90_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $126_{0.35} = 115_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $90_{0.52} = 115_{0.69}$ )

**Tabla A.1.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	35.7143	44.63550	0.468	-88.2137	159.6423
	0.69	11.1905	44.63550	0.814	-112.7375	135.1185
0.52	0.35	-35.7143	44.63550	0.468	-159.6423	88.2137
	0.69	-24.5238	44.63550	0.612	-148.4518	99.4042
0.69	0.35	-11.1905	44.63550	0.814	-135.1185	112.7375
	0.52	24.5238	44.63550	0.612	-99.4042	148.4518

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD confirma los resultados del método de comparaciones múltiples. Las medias de los SDT obtenidos con las tres presiones son estadísticamente equivalentes: las barras LSD de los SDT de los permeados producidos con las tres presiones se traslapan. Este parámetro no aporta información sobre el efecto de la presión en el contenido de SDT del permeado producido con esta membrana (Figura A.1.4.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.4.b).
2. Los tratamientos 0.52 y 0.69 MPa presentan variancia constante. El tratamiento 0.35 MPa presenta una variancia mayor (Figura A.1.4.c).
3. Se detecta cierta tendencia no definida claramente de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.1.4.d).

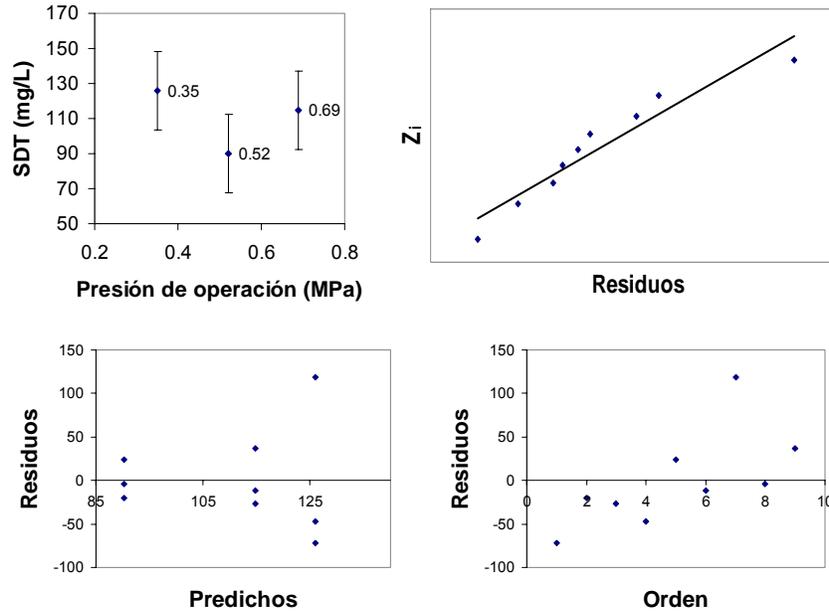


Figura A.1.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.1.5. Conductividad

#### A.1.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

Tabla A.1.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana NF90

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.064	2	0.032	9.936	0.000
Réplica	0.135	2	0.068	20.873	0.000
Error	0.149	46	0.003		
Total	1.306	51			

**A.1.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.1.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; (0.11<sub>.35</sub> = 0.12<sub>.52</sub>)
2.  $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ; (0.11<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.19<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2}\neq\mu_{P3}$ ; (0.12<sub>0.52</sub>  $\neq$  0.19<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.1.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0099	0.01951	0.615	-0.0491	0.0294
	0.69	-0.0798(*)	0.01951	0.000	-0.1190	-0.0405
0.52	0.35	0.0099	0.01951	0.615	-0.0294	0.0491
	0.69	-0.0699(*)	0.01951	0.001	-0.1091	-0.0306
0.69	0.35	0.0798(*)	0.01951	0.000	0.0405	0.1190
	0.52	0.0699(*)	0.01951	0.001	0.0306	0.1091

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD confirma los resultados del método de comparaciones múltiples. Las conductividades de los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD se traslapan). La conductividad del permeado producido con la presión 0.69 MPa es significativamente superior a las conductividades de los permeados producidos con las otras dos presiones. Se puede decir que el incremento de la presión aumenta significativamente la conductividad del permeado producido con esta membrana (Figura A.1.5.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.5.b).
2. Los datos de las presiones 0.35 y 0.69 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Sin embargo, la presión 0.69 MPa presenta mayor variación. No se puede decir que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.1.5.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple con claridad el supuesto de independencia (Figura A.1.5.d).

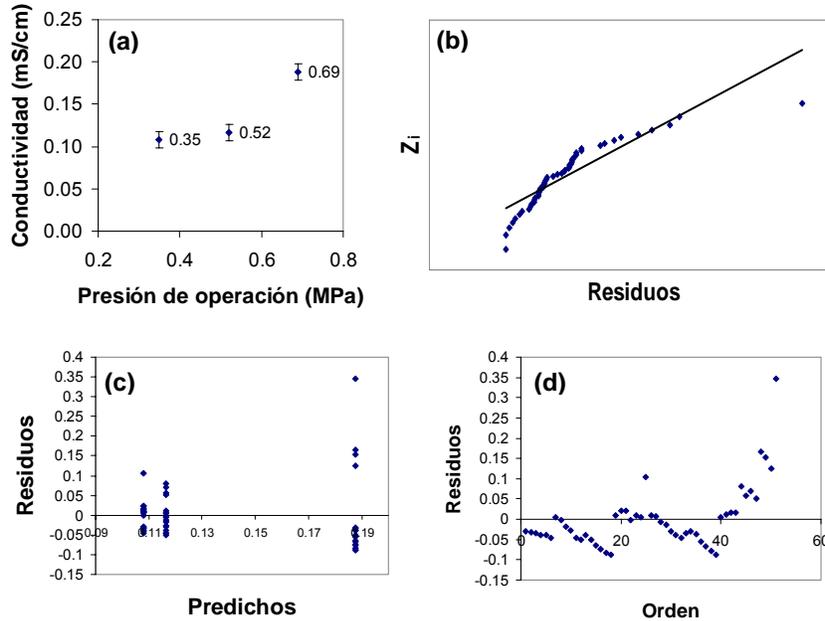


Figura A.1.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.1.6. Turbiedad**

**A.1.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica no es significativa. La réplica no influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.1.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF90**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.000	2	0.000	3.213	0.047
Réplica	0.000	2	0.000	0.246	0.783
Error	0.004	58	0.000		
Total	0.021	63			

**A.1.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.1.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(0.02_{0.35} \neq 0.01_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ;  $(0.02_{0.35} = 0.02_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.01_{0.52} \neq 0.02_{0.69})$

**Tabla A.1.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.0059(*)	0.00257	0.026	0.0007	0.0110
	0.69	0.0005	0.00257	0.854	-0.0047	0.0056
0.52	0.35	-0.0059(*)	0.00257	0.026	-0.0110	-0.0007
	0.69	-0.0054(*)	0.00257	0.040	-0.0105	-0.0002
0.69	0.35	-0.0005	0.00257	0.854	-0.0056	0.0047
	0.52	0.0054(*)	0.00257	0.040	0.0002	0.0105

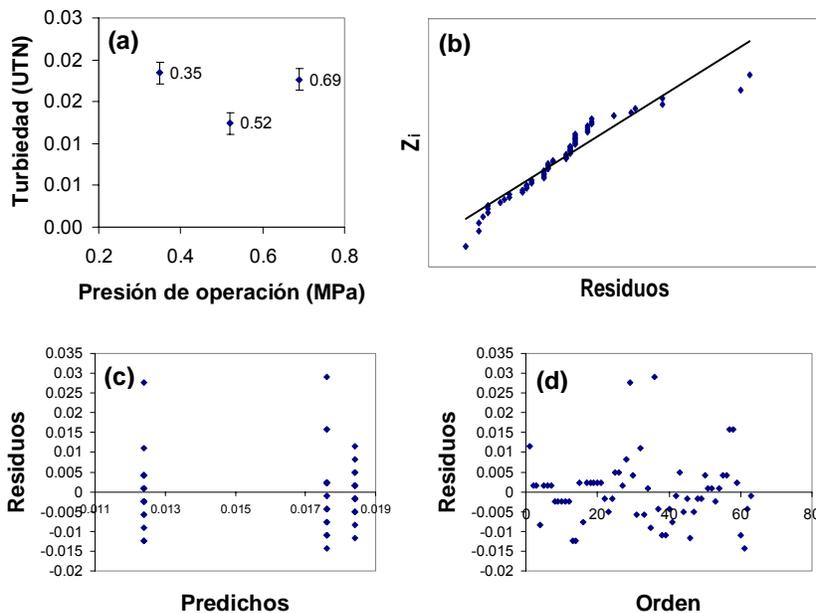
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.1.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica de medias LSD confirma los resultados del método de comparaciones múltiples. Las turbiedades de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.69 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD se traslapan). La turbiedad del permeado producido con la presión de operación (intermedia) de 0.52 MPa es significativamente inferior a las turbiedades producidas con las presiones extremas. Se puede decir que se presentó un mínimo de turbiedad con la aplicación de la presión de operación intermedia (Figura A.1.6.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.6.b).
2. Los datos de las presiones 0.52 y 0.69 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). La presión 0.35 MPa presenta una variación ligeramente menor. Se considera que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.1.6.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.1.6.d).



**Figura A.1.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

**A.1.7. pH**

**A.1.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

Variable de respuesta: pH (Unidades)

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

$\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el pH del permeado.

**Tabla A.1.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana NF90**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	4.482	2	2.241	20.930	0.000
Réplica	1.077	2	0.539	5.030	0.011
Error	4.283	40	0.107		
Total	2234.205	45			

**A.1.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.1.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $6.8_{0.35} = 6.8_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $6.8_{0.35} \neq 7.5_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $6.8_{0.52} \neq 7.5_{0.69}$ )

**Tabla A.1.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.0669	0.11949	0.579	-0.1746	0.3084
	0.69	-0.6336(*)	0.11949	0.000	-0.8750	-0.3921
0.52	0.35	-0.0669	0.11949	0.579	-0.3084	0.1746
	0.69	-0.7004(*)	0.11949	0.000	-0.9419	-0.4590
0.69	0.35	0.6336(*)	0.11949	0.000	0.3921	0.8750
	0.52	0.7004(*)	0.11949	0.000	0.4590	0.9419

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD confirma los resultados del método de comparaciones múltiples. Los valores de pH de los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD de ambos se traslapan) y significativamente inferiores al valor de pH del permeado producido con la presión de 0.69 MPa (sus barras LSD no se traslapan con las barras de los otros puntos). Se puede decir que el incremento de la presión aumenta el pH del permeado producido con esta membrana (Figura A.1.7.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.7.b).
2. Los tratamientos presentan variancias diferentes. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.1.7.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.1.7.d).

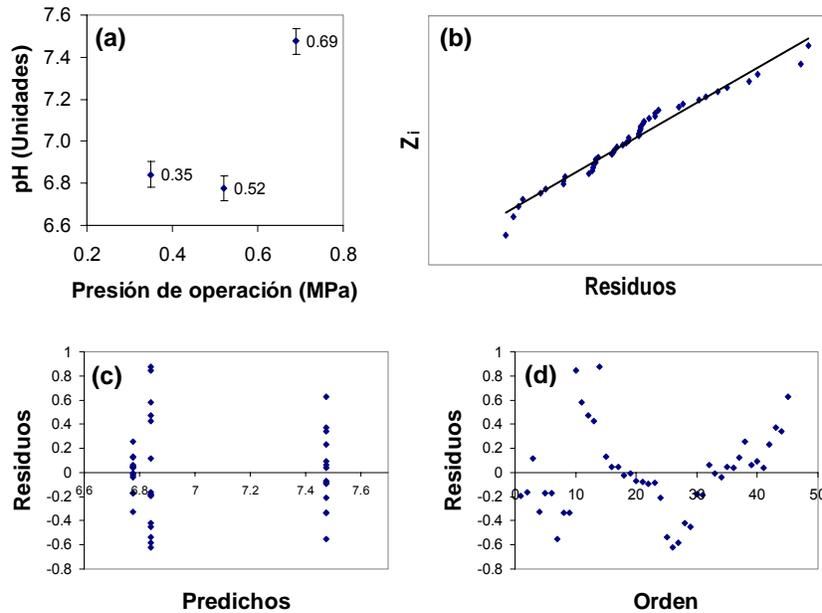


Figura A.1.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia

### A.1.8. Alcalinidad

#### A.1.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica no es significativa. La réplica no influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian la alcalinidad del permeado.

Tabla A.1.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF90

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	510.104	2	255.052	1.071	0.424
Réplica	1520.743	2	760.372	3.192	0.148
Error	952.849	4	238.212		
Total	7575.202	9			

**A.1.8.2. Método de comparaciones múltiples**

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>) Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.1.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>; (18<sub>0.35</sub> = 17<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub>; (18<sub>0.35</sub> = 33<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (17<sub>0.52</sub> = 33<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.1.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	1.3055	12.60191	0.922	-33.6830	36.2940
	0.69	-15.2775	12.60191	0.292	-50.2660	19.7110
0.52	0.35	-1.3055	12.60191	0.922	-36.2940	33.6830
	0.69	-16.5830	12.60191	0.259	-51.5715	18.4055
0.69	0.35	15.2775	12.60191	0.292	-19.7110	50.2660
	0.52	16.5830	12.60191	0.259	-18.4055	51.5715

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En este caso, la gráfica LSD muestra la igualdad de las medias de la alcalinidad medida en los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa (las barras LSD se traslapan). Sin embargo, aparentemente, la alcalinidad del permeado producido con la presión 0.69 MPa es significativamente mayor (sus barras LSD no se traslapan con las de los otros dos puntos). En contraste, el método analítico, como ya se indicó, concluye que las tres alcalinidades son iguales. Esto ocurre porque el intervalo de confianza (95%) de la alcalinidad en esta presión (extremo derecho de la tabla de comparaciones múltiples) es considerablemente amplio, lo suficiente para traslaparse con los intervalos de confianza de las alcalinidades en las otras presiones. Esto ocasiona que –siendo las variaciones dentro y entre tratamientos substanciales- no se pueda observar el efecto de la presión sobre la alcalinidad de los permeados producidos con las diferentes presiones (Figura A.1.8.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.8.b).
2. Los tratamientos no presentan variancia constante. No se cumple el supuesto de variancia constante. En particular, la variancia correspondiente a la alcalinidad del permeado producido con 0.69 MPa es grande. Por ello, a pesar de la diferencia visible entre 17 y 18 mg/L como CaCO<sub>3</sub> con respecto de 33 mg/L como CaCO<sub>3</sub> de alcalinidad, ésta –la diferencia- resulta no ser significativa en el análisis de comparación de medias (Figura A.1.8.c).
3. No se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.1.8.d).

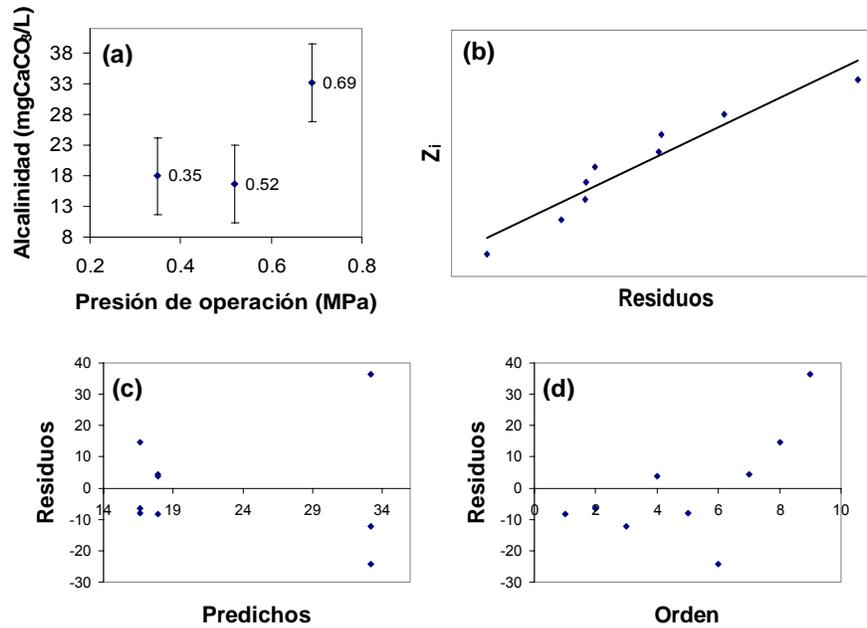


Figura A.1.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.1.9. Dureza (EDTA)**

**A.1.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.1.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica tampoco es significativa.
3. Las presiones no cambian la dureza del permeado.

**Tabla A.1.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF90**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	220.663	2	110.332	0.793	0.513
Réplica	498.204	2	249.102	1.790	0.278
Error	556.612	4	139.153		
Total	2530.489	9			

**A.1.9.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.1.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF90. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $9_{0.35} \neq 7_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $9_{0.35} \neq 19_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $7_{0.52} = 19_{0.69}$ )

**Tabla A.1.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF90**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	1.7819	9.63165	0.862	-24.9598	28.5237
	0.69	-9.4989	9.63165	0.380	-36.2407	17.2428
0.52	0.35	-1.7819	9.63165	0.862	-28.5237	24.9598
	0.69	-11.2809	9.63165	0.307	-38.0226	15.4609
0.69	0.35	9.4989	9.63165	0.380	-17.2428	36.2407
	0.52	11.2809	9.63165	0.307	-15.4609	38.0226

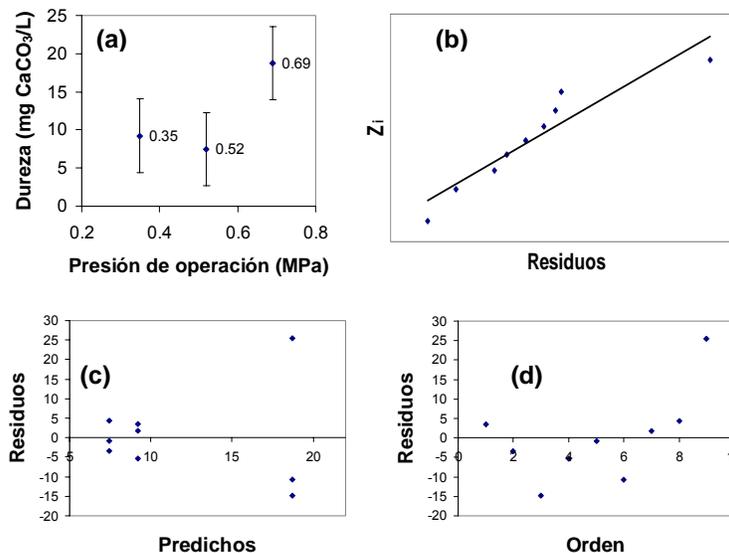
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.1.9.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Nuevamente, la gráfica LSD muestra la igualdad de las medias de la dureza medida en los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa (las barras LSD se traslapan) y aunque, en apariencia, la dureza del permeado producido con la presión 0.69 MPa es mayor (sus barras LSD no se traslapan con las de los otros dos puntos), el método analítico, como se indica arriba, concluye que las tres durezas son iguales. Esto ocurre porque el intervalo de confianza (95%) de la dureza en esta presión (extremo derecho de la tabla de comparaciones múltiples) es considerablemente amplio, lo suficiente para traslaparse con los intervalos de confianza de las durezas de las otras presiones. Esto ocasiona que –siendo las variaciones dentro y entre tratamientos importantes- no se pueda observar el efecto de la presión sobre la dureza de los permeados producidos con las diferentes presiones (Figura A.1.9.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.1.9.b).
2. Los tratamientos 0.35 y 0.52 presentan variancia constante. El tratamiento 0.69 presenta una variación mayor. Esto impide el hecho de que se pueda afirmar que la media de la dureza del permeado producido con la presión 0.69 MPa sea mayor (Figura A.1.9.c).
3. No se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Por lo tanto, se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.1.9.d).



**Figura A.1.9 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-dureza: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

**A.2. NF200**

**A.2.1. Flux**

**A.2.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa, por eso, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.2.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	2719.035	2	1359.518	54.428	0.000
Réplica	4240.514	1	4240.514	169.767	0.000
Error	2597.751	104	24.978		
Total	27143.093	108			

**A.2.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $16_{0.35} \neq 6_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; ( $16_{0.35} = 16_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $6_{0.52} \neq 16_{0.69}$ )

**Tabla A.2.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	9.61870(*)	1.162398	0.000	7.31362	11.92378
	0.69	-2.12730	1.195200	0.078	-4.49743	0.24283
0.52	0.35	-9.61870(*)	1.162398	0.000	-11.92378	-7.31362
	0.69	-11.7460(*)	1.179824	0.000	-14.08563	-9.40636
0.69	0.35	2.12730	1.195200	0.078	-.24283	4.49743
	0.52	11.74600(*)	1.179824	0.000	9.40636	14.08563

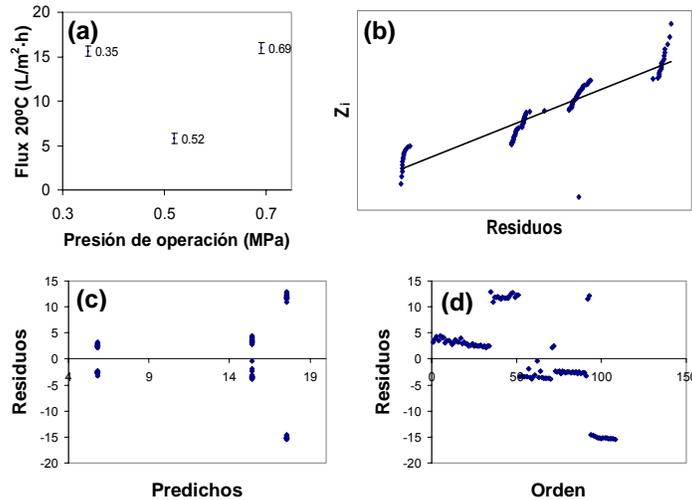
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD muestra lo siguiente (Figura A.2.1.a). La producción de permeado (flux) presenta un mínimo significativo en la presión de operación (intermedia) de 0.52 MPa. Los valores de flux obtenidos con las presiones 0.35 y 0.69 MPa son estadísticamente equivalentes (sus barras LSD se superponen). Se confirma el resultado de la prueba de comparaciones múltiples

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos no siguen con claridad una distribución normal con media cero. No se puede afirmar que los datos provengan de una distribución normal (Figura A.2.1.b).
2. Los tratamientos 0.35 y 0.52 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Sin embargo, el tratamiento 0.69 MPa presenta una variancia mayor. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.2.1.c).
3. No es muy clara la independencia de estos datos aunque no se detecta un patrón bien definido de los residuos en función del orden en que se realizaron las mediciones (Figura A.2.1.d).



**Figura A.2.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**Carbono Orgánico Total (COT)**

**A.2.1.4. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: COT (mg/L)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos dos medias son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica ya que ésta influye en el COT del permeado.
3. Las presiones cambian el COT del permeado.

**Tabla A.2.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	27.277	2	13.638	8.145	0.005
Réplica	11.017	1	11.017	6.580	0.022
Error	23.441	14	1.674		
Total	161.479	18			

**A.2.1.5. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ;  $(1.427_{0.35} = 1.541_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ;  $(1.427_{0.35} \neq 4.094_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ;  $(1.541_{0.52} \neq 4.094_{0.69})$

**Tabla A.2.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana NF200**

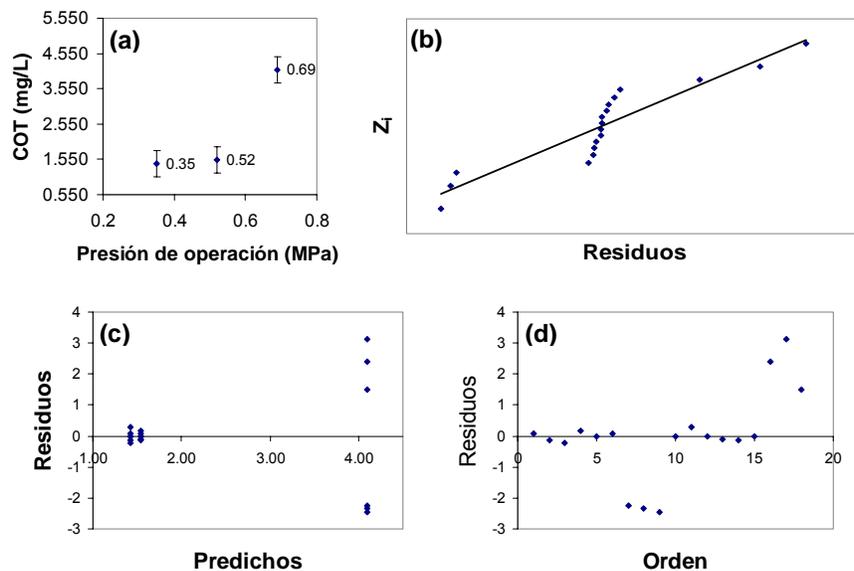
(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.11400	0.747078	0.881	-1.71632	1.48832
	0.69	-2.6665(*)	0.747078	0.003	-4.26882	-1.06418
0.52	0.35	0.11400	0.747078	0.881	-1.48832	1.71632
	0.69	-2.5525(*)	0.747078	0.004	-4.15482	-0.95018
0.69	0.35	2.66650(*)	0.747078	0.003	1.06418	4.26882
	0.52	2.55250(*)	0.747078	0.004	0.95018	4.15482

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.2.1.6. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica de medias LSD (Figura A.2.2.a) confirma los resultados del método de comparaciones múltiples. El COT de los permeados obtenidos con las presiones de 0.35 y 0.52 MPa es estadísticamente el mismo (las barras de error LSD se traslapan). El COT del permeado producido con la presión de 0.69 MPa es significativamente mayor (su barra LSD no se traslapa con las de los otros puntos). Por lo tanto, se puede decir que el incremento de la presión aumenta el contenido de COT del permeado producido con esta membrana.

1. Los residuos no siguen con claridad una distribución normal con media cero. No se puede afirmar que los datos correspondan a una distribución normal (Figura A.2.2.b).
2. Los datos de COT de las presiones 0.35 y 0.52 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Sin embargo, la presión 0.69 MPa presenta una variación mayor. No se puede afirmar que se cumpla el supuesto de variancia constante (Figura A.2.2.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.2.d).



**Figura A.2.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)**

**A.2.1.7. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>)

α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>

H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.2.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica pues ésta influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

**Tabla A.2.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.001	2	0.001	12.272	0.001
Réplica	0.000	1	0.000	8.786	0.010
Error	0.001	14	0.000		
Total	0.007	18			

**A.2.1.8. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>)

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.2.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>; (0.010<sub>0.35</sub>=0.011<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.010<sub>0.35</sub>≠0.028<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.011<sub>0.52</sub>≠0.028<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.2.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.00039	0.004047	0.925	-0.00907	0.00829
	0.69	-0.0176(*)	0.004047	0.001	-0.02624	-0.00888
0.52	0.35	0.00039	0.004047	0.925	-0.00829	0.00907
	0.69	-0.0172(*)	0.004047	0.001	-0.02585	-0.00849
0.69	0.35	0.01756(*)	0.004047	0.001	0.00888	0.02624
	0.52	0.01717(*)	0.004047	0.001	0.00849	0.02585

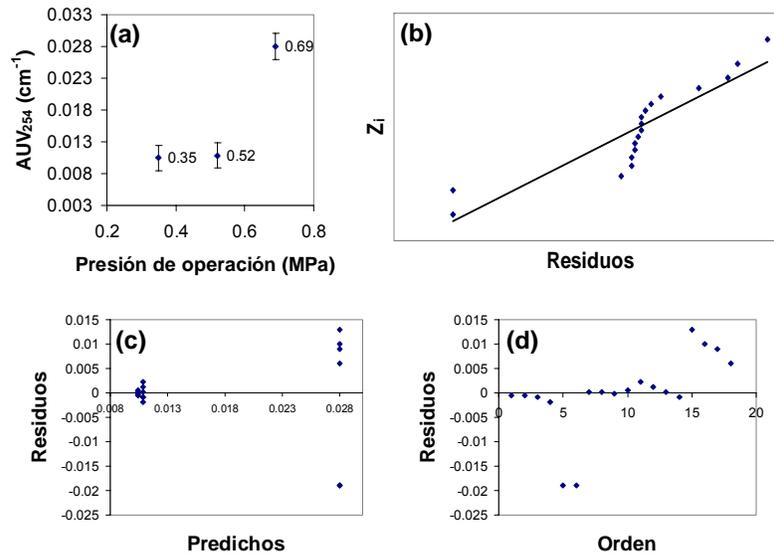
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.9. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.2.3.a) confirma los resultados del método de comparaciones múltiples. Las AUV<sub>254</sub> de los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras de error LSD se traslapan). En cambio, la barra LSD de la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con la presión de 0.69 MPa no se traslapa con las dos anteriores. Entonces, la media de los datos obtenidos con la presión de 0.69 MPa es significativamente superior a las otras dos. Se puede decir que la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con esta membrana aumenta con el incremento de presión.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos no siguen con claridad una distribución normal con media cero. No se puede afirmar que los datos provienen de una distribución normal (Figura A.2.3.b).
2. No se cumple con el supuesto de variancia constante. Los tratamientos tienen diferentes variaciones. (Se forma un cono; Figura A.2.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.3.d).



**Figura A.2.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-AUV<sub>254</sub>: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.2.1.10. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: SDT (mg/L)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica no es significativa.
3. Las presiones no cambian los SDT del permeado.

**Tabla A.2.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	22911.098	2	11455.549	3.118	0.243
Réplica	23976.637	1	23976.637	6.525	0.125
Error	7348.842	2	3674.421		
Total	1440070.020	6			

**A.2.1.11. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $568_{0.35} = 433_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $568_{0.35} = 441_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $433_{0.52} = 441_{0.69}$ )

**Tabla A.2.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	134.9979	60.61700	0.156	-125.8161	395.8118
	0.69	126.7864	60.61700	0.172	-134.0275	387.6003
0.52	0.35	-134.9979	60.61700	0.156	-395.8118	125.8161
	0.69	-8.2114	60.61700	0.905	-269.0253	252.6025
0.69	0.35	-126.7864	60.61700	0.172	-387.6003	134.0275
	0.52	8.2114	60.61700	0.905	-252.6025	269.0253

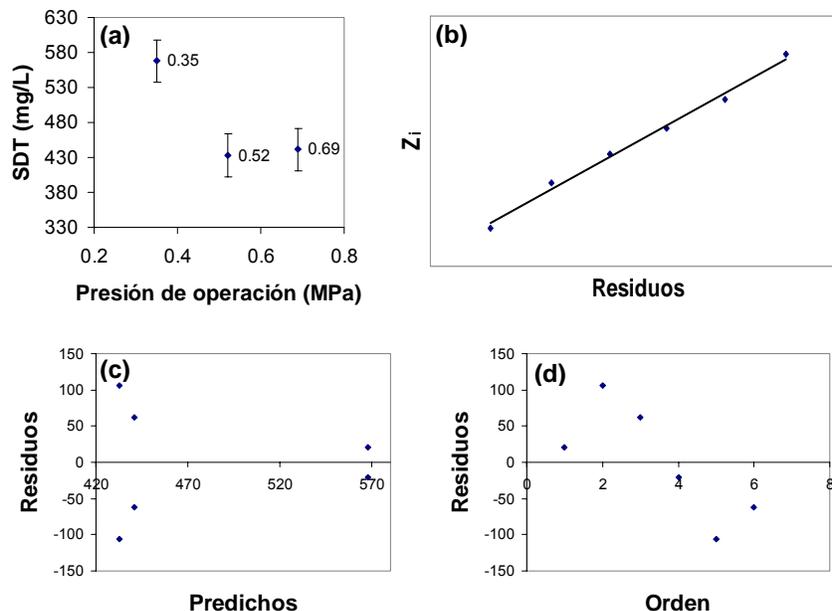
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.2.1.12. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Según la gráfica de medias LSD (Figura A.2.4.a), se presenta una disminución en el contenido de SDT del permeado producido con esta membrana (las barras LSD del los puntos 0.52 y 0.69 MPa, estadísticamente iguales, no se traslapan con las barras LSD del punto 0.35 MPa). Sin embargo, los intervalos de confianza –que no se ven en la gráfica de medias LSD- sí se superponen, por ello, el resultado del método analítico es que los tratamientos son iguales.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Se puede afirmar que los datos proceden de una distribución normal (Figura A.2.4.b).
2. Los tratamientos no presentan variancia constante. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.2.4.c).
3. Se detecta una tendencia no muy clara de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.4.d).



**Figura A.2.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**Conductividad**

**A.2.1.13. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica no es significativa. Entonces, la réplica no influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.2.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de Conductividad obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.062	1	0.062	19.705	0.001
Réplica	0.008	1	0.008	2.462	0.139
Error	0.044	14	0.003		
Total	10.495	18			

**A.2.1.14. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta:

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

Conductividad (mS/cm).

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $0.81_{0.35} \neq 0.67_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $0.81_{0.35} = 0.79_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $0.67_{0.52} \neq 0.79_{0.69}$ )

**Tabla A.2.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de Conductividad obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.1433(*)	0.03229	0.001	0.0741	0.2126
	0.69	0.0205	0.03229	0.536	-0.0488	0.0898
0.52	0.35	-0.1433(*)	0.03229	0.001	-0.2126	-0.0741
	0.69	-0.1228(*)	0.03229	0.002	-0.1921	-0.0536
0.69	0.35	-0.0205	0.03229	0.536	-0.0898	0.0488
	0.52	0.1228(*)	0.03229	0.002	0.0536	0.1921

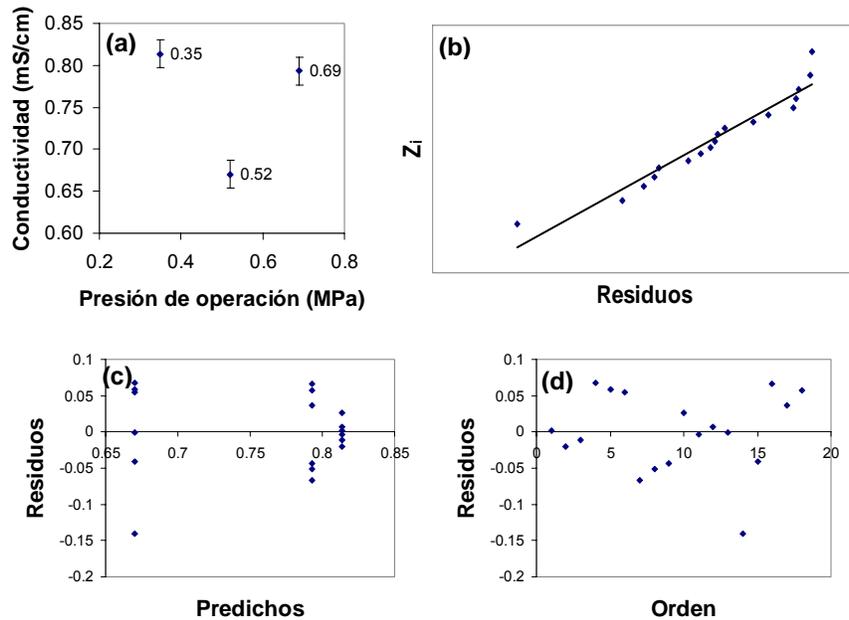
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.15. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.2.5.a) se puede apreciar que la conductividad del permeado producido con la presión de 0.52 MPa es significativamente inferior a las conductividades de los permeados producidos con las otras dos presiones (0.35 y 0.69 MPa) puesto que las barras LSD del punto 0.52 MPa no se sobreponen con las barras LSD de los otros dos puntos (0.35 y 0.69 MPa), que sí se traslapan entre sí y por ello son estadísticamente iguales).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.2.5.b).
2. Los datos forman un cono (tendencia clara). Por lo tanto, no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.2.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.5.d).



**Figura A.2.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

### Turbiedad

#### A.2.1.16. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica pues ésta influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.2.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.028	2	0.014	13.195	0.000
Réplica	0.041	1	0.041	38.573	0.000
Error	0.040	38	0.001		
Total	0.244	42			

**A.2.1.17. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(0.02_{0.35} \neq 0.08_{0.52})$
- $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.02_{0.35} \neq 0.06_{0.69})$
- $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ;  $(0.08_{0.52} = 0.06_{0.69})$ .

**Tabla A.2.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0619(*)	0.01233	0.000	-0.0869	-0.0369
	0.69	-0.0426(*)	0.01233	0.001	-0.0676	-0.0177
0.52	0.35	0.0619(*)	0.01233	0.000	0.0369	0.0869
	0.69	0.0193	0.01233	0.126	-0.0057	0.0443
0.69	0.35	0.0426(*)	0.01233	0.001	0.0177	0.0676
	0.52	-0.0193	0.01233	0.126	-0.0443	0.0057

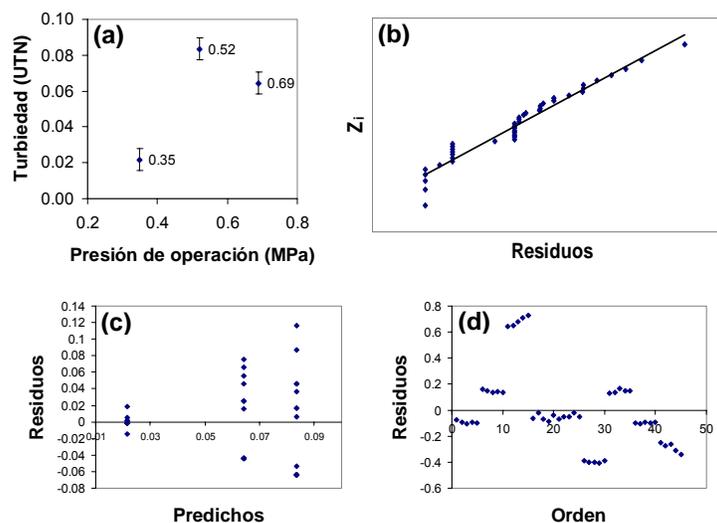
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.18. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Como se observa en la gráfica LSD (Figura A.2.6.a) las turbiedades de los permeados producidos con las presiones de 0.52 y 0.69 MPa son estadísticamente iguales, mientras que la turbiedad del permeado producido con la presión de 0.35 MPa es significativamente inferior a las otras dos (esto se aprecia por la superposición o no superposición de las barras LSD). Se puede afirmar que el incremento de la presión de operación aumenta la turbiedad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Se puede afirmar que los datos proceden de una distribución normal (Figura A.2.6.b).
- No se cumple el supuesto de variancia constante, se forma un cono. La mayor variación se presenta en la presión 0.69 MPa. Por lo tanto, no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.2.6.c).
- No se aprecia con claridad la independencia de los datos. Se pueden ver algunas tendencias de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones (Figura A.2.6.d).



**Figura A.2.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**pH**

**A.2.1.19. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: pH (Unidades).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica no es significativa. La réplica no influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el pH del permeado.

**Tabla A.2.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.636	2	.318	11.414	.000
Réplica	0.038	1	0.038	1.373	0.255
Error	0.558	20	0.028		
Total	1527.328	24			

**A.2.1.20. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $7.8_{0.35} = 7.9_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.8_{0.35} \neq 8.2_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.9_{0.52} \neq 8.2_{0.69}$ )

**Tabla A.2.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0663	0.08348	0.437	-0.2404	0.1079
	0.69	-0.3738(*)	0.08348	0.000	-0.5479	-0.1996
0.52	0.35	0.0663	0.08348	0.437	-0.1079	0.2404
	0.69	-0.3075(*)	0.08348	0.001	-0.4816	-0.1334
0.69	0.35	0.3738(*)	0.08348	0.000	0.1996	0.5479
	0.52	0.3075(*)	0.08348	0.001	0.1334	0.4816

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.21. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.2.7.a) muestra la igualdad estadística de los valores de pH de los permeados producidos con las presiones de operación 0.35 y 0.52 MPa (las barras de error LSD no se superponen) y, por otro lado, el incremento significativo del pH del permeado producido con la presión de operación de 0.69 MPa (su barra LSD está muy lejos de las otras dos).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.2.7.b).
2. Los datos forman un cono. No cumplen el supuesto de variancia constante. La presión 0.69 MPa es la que presenta mayor variación (Figura A.2.7.c).
3. Se detectan ciertas tendencias, no muy claras, de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.7.d).

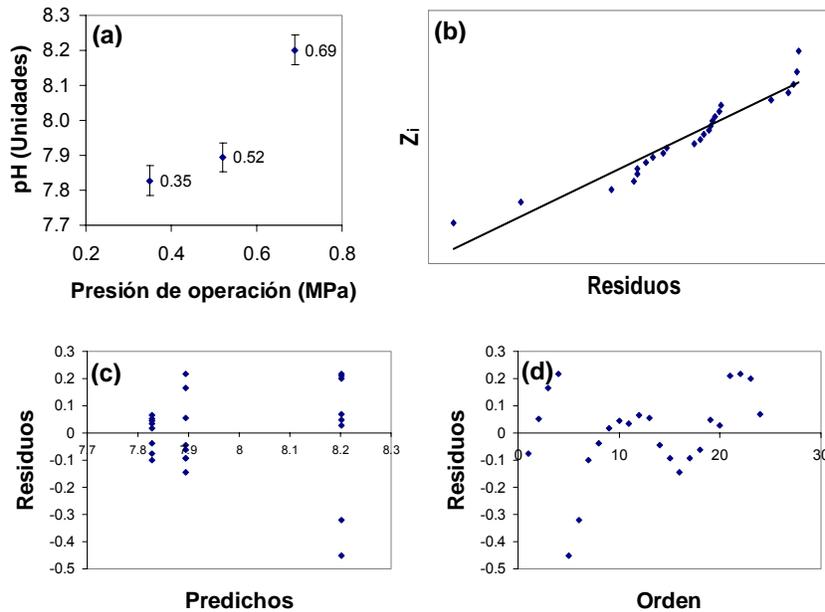


Figura A.2.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**Alcalinidad**

**A.2.1.22. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica es significativa (más que por el cambio de presión). Fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian la alcalinidad del permeado.

**Tabla A.2.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	268.330	2	134.165	0.283	0.780
Réplica	12975.100	1	12975.100	27.332	0.035
Error	949.437	2	474.719		
Total	134897.915	6			

**A.2.1.23. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.2.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>; (151<sub>0.35</sub> = 140<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub>; (151<sub>0.35</sub> = 135<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (140<sub>0.52</sub> = 135<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.2.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	10.7870	21.78804	0.670	-82.9594	104.5333
	0.69	16.0696	21.78804	0.538	-77.6768	109.8159
0.52	0.35	-10.7870	21.78804	0.670	-104.5333	82.9594
	0.69	5.2826	21.78804	0.831	-88.4637	99.0290
0.69	0.35	-16.0696	21.78804	0.538	-109.8159	77.6768
	0.52	-5.2826	21.78804	0.831	-99.0290	88.4637

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.24. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.2.8.a) muestra que las alcalinidades de los permeados producidos con las diferentes presiones son estadísticamente iguales. Es posible que se hayan presentado factores que influenciaron este parámetro y por ello no se observan efectos significativos. Por lo tanto, este parámetro no aporta información sobre el efecto de la presión en la alcalinidad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero, por lo tanto, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.2.8.b).
2. Los tratamientos 0.35 y 0.52 MPa presentan variancia constante. La presión 0.69 MPa presenta menor variación. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.2.8.c).
3. Se detecta una tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Por ello, no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.8.d).

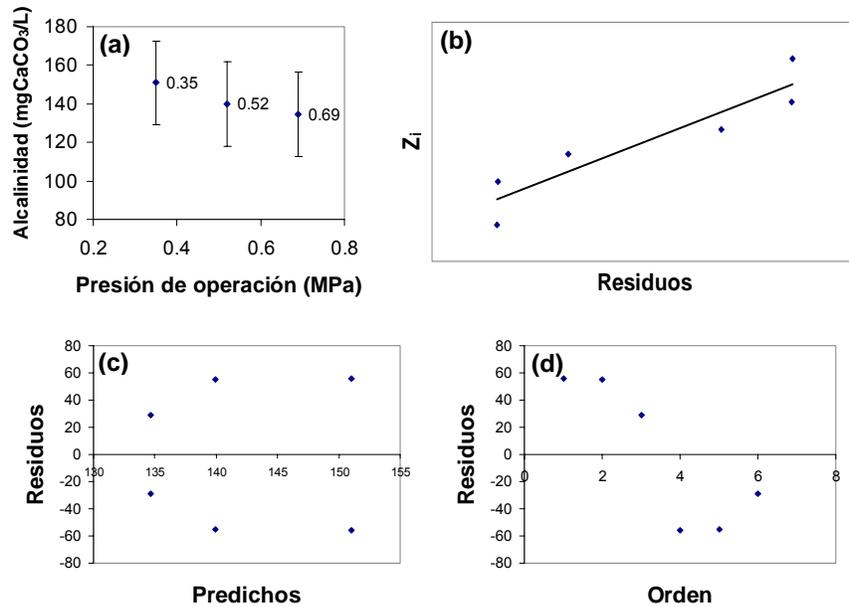


Figura A.2.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-alkalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**Dureza (EDTA)**

**A.2.1.25. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.2.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica no es significativa.
3. Las presiones no cambian la dureza del permeado.

**Tabla A.2.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF200**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	479.725	2	239.863	0.445	0.692
Réplica	103.464	1	103.464	0.192	0.704
Error	1077.053	2	538.527		
Total	77662.773	6			

**A.2.1.26. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.2.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF200. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $125_{0.35} = 105_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $125_{0.35} = 108_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $105_{0.52} = 108_{0.69}$ )

**Tabla A.2.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF200**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	20.2483	23.20617	0.475	-79.5998	120.0964
	0.69	17.3559	23.20617	0.533	-82.4922	117.2040
0.52	0.35	-20.2483	23.20617	0.475	-120.0964	79.5998
	0.69	-2.8924	23.20617	0.912	-102.7405	96.9557
0.69	0.35	-17.3559	23.20617	0.533	-117.2040	82.4922
	0.52	2.8924	23.20617	0.912	-96.9557	102.7405

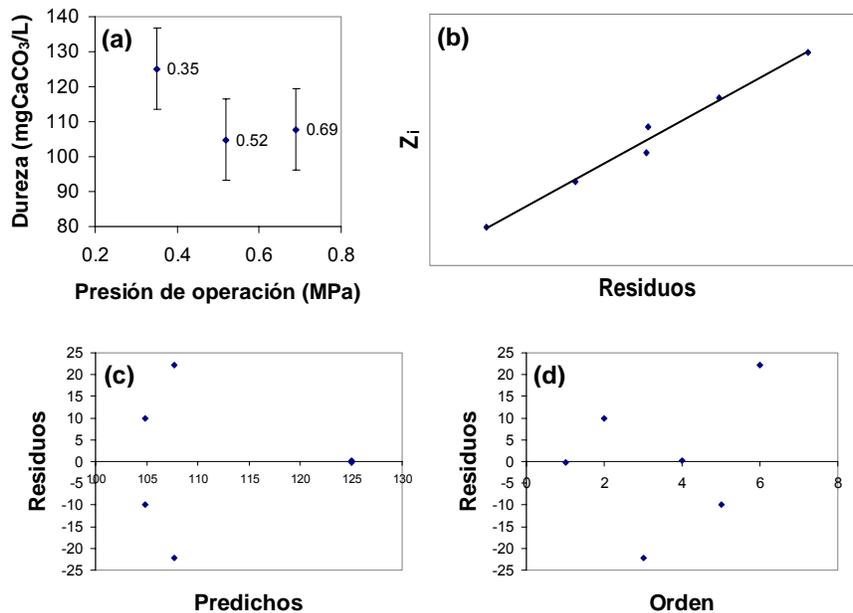
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.2.1.27. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.2.9.a) se puede observar cierta disminución de la dureza con el incremento de la presión, sin embargo, como lo muestran las barras LSD, estadísticamente no se puede decir que exista dicho efecto pues se presentaron variaciones sustanciales. Esta gráfica confirma las conclusiones del método analítico presentado en la tabla anterior.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.2.9.b).
2. Los tratamientos no presentan variancia constante. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.2.9.c).
3. No se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.2.9.d).



**Figura A.2.9 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Dureza: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.3. Membrana NF270**

**A.3.1. Flux**

**A.3.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>.h).  
 α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.3.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Por eso, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.3.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	44333.447	2	22166.723	86.463	0.000
Réplica	9596.369	2	4798.184	18.716	0.000
Error	42557.643	166	256.371		
Total	1731025.512	171			

**A.3.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>.h).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.3.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (80<sub>0.35</sub> ≠ 95<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (80<sub>0.35</sub> ≠ 118<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (95<sub>0.52</sub> ≠ 118<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.3.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	16.53267(*)	3.025908	0.000	-22.50690	-10.55845
	0.69	39.91037(*)	2.987195	0.000	-45.80816	-34.01257
0.52	0.35	16.53267(*)	3.025908	0.000	10.55845	22.50690
	0.69	23.37769(*)	2.987195	0.000	-29.27549	-17.47990
0.69	0.35	39.91037(*)	2.987195	0.000	34.01257	45.80816
	0.52	23.37769(*)	2.987195	0.000	17.47990	29.27549

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.3.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.3.1.a) muestra con claridad la diferencia significativa de los valores de flux producidos con las tres presiones de operación (las barras LSD no se enciman en ningún caso). El flux de permeado aumenta con el incremento de la presión de operación.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.1.b).
2. Los tratamientos 0.35 y 0.52 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Sin embargo, el tratamiento 0.69 MPa presenta una variancia mayor (por la réplica). No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.3.1.c).
3. No se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.1.d).

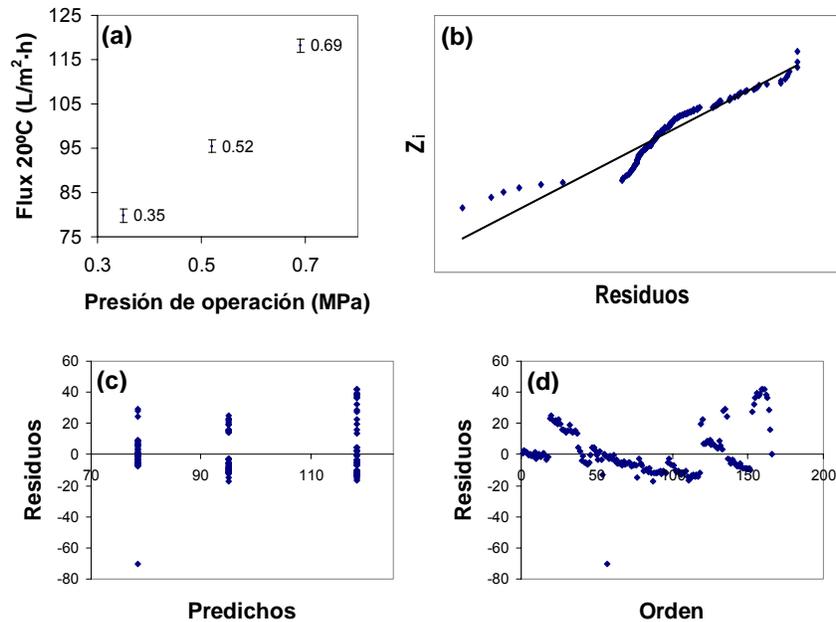


Figura A.3.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.3.2. Carbono Orgánico Total (COT)

#### A.3.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: COT (mg/L).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.3.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica es significativa. Por lo tanto, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian el COT del permeado.

Tabla A.3.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana NF270

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.153	2	0.076	3.026	0.061
Réplica	0.878	2	0.439	17.380	0.000
Error	0.934	37	0.025		
Total	23.877	42			

**A.3.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.3.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; (0.748<sub>0.35</sub>=0.639<sub>0.52</sub>)
- $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; (0.748<sub>0.35</sub>=0.780<sub>0.69</sub>)
- $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; (0.639<sub>0.52</sub>=0.780<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.3.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.10950	0.060058	0.076	-0.01219	0.23119
	0.69	-0.03114	0.060058	0.607	-0.15283	0.09055
0.52	0.35	-0.10950	0.060058	0.076	-0.23119	0.01219
	0.69	-0.14064(*)	0.060058	0.025	-0.26233	-0.01895
0.69	0.35	0.03114	0.060058	0.607	-0.09055	0.15283
	0.52	0.14064(*)	0.060058	0.025	0.01895	0.26233

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.3.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.3.2.a) se observa un mínimo en el COT del permeado producido con la presión de operación de 0.52 MPa que en apariencia es significativo (las barras LSD de este punto no se superponen con las de los puntos extremos). Sin embargo, los intervalos de confianza sí se superponen. Por ello, como consecuencia de las variaciones del proceso no se puede afirmar que el mínimo observado sea relevante.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero, entonces los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.2.b).
- Los datos de las presiones 0.35 y 0.52 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). No obstante, la presión 0.69 MPa presenta mayor variación. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.3.2.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.2.d).

**A.3.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)**

**A.3.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.3.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
- La variación por réplica es significativa. Entonces, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
- Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

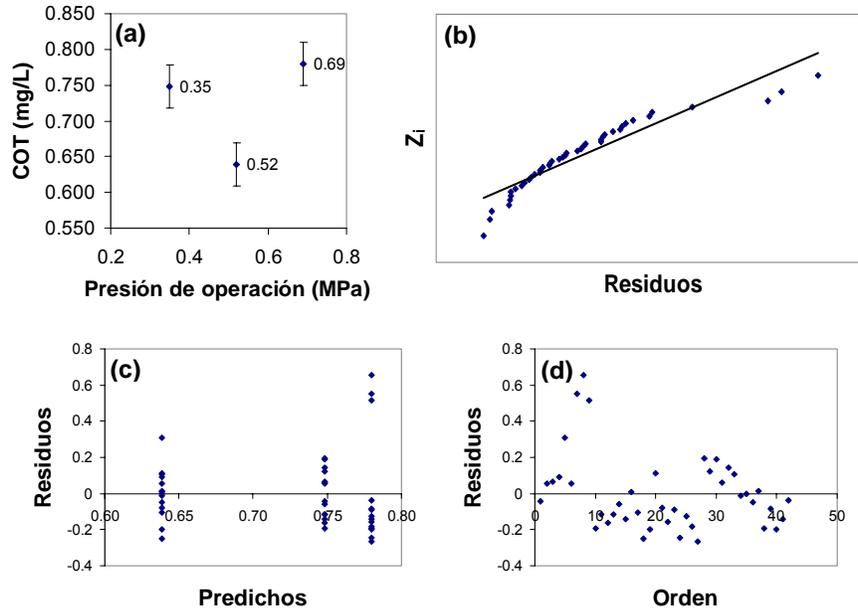


Figura A.3.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

Tabla A.3.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana NF270

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.000	2	0.000	8.612	0.001
Réplica	0.000	2	0.000	21.333	0.000
Error	0.000	37	0.000		
Total	0.002	42			

**A.3.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.3.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (0.005<sub>0.35</sub>≠0.006<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.005<sub>0.35</sub>≠0.007<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.006<sub>0.52</sub>=0.007<sub>0.69</sub>)

Tabla A.3.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana NF270

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.00174(*)	0.000704	0.018	-0.00317	-0.00031
	0.69	-0.00290(*)	0.000704	0.000	-0.00433	-0.00148
0.52	0.35	0.00174(*)	0.000704	0.018	0.00031	0.00317
	0.69	-0.00117	0.000704	0.106	-0.00259	0.00026
0.69	0.35	0.00290(*)	0.000704	0.000	0.00148	0.00433
	0.52	0.00117	0.000704	0.106	-0.00026	0.00259

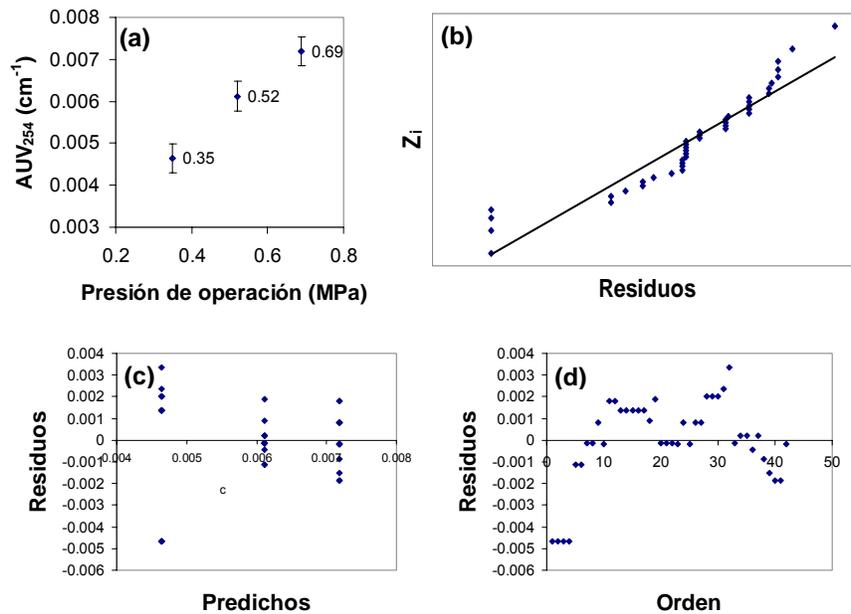
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.3.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD (Figura A.3.3.a) se observa un incremento significativo de la  $AUV_{254}$  del permeado producido con esta membrana como efecto del aumento en la presión de operación. Aunque, se hace notar que los valores de  $AUV_{254}$  de los permeados producidos con las presiones 0.52 y 0.69 MPa son estadísticamente iguales. Esto no se puede apreciar en la grafica LSD porque es una conclusión derivada de la superposición de los intervalos de confianza que se presentan en la tabla de comparaciones múltiples.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.3.b).
2. Las presiones 0.52 y 0.69 MPa presentan variancias semejantes, pero la variación en la presión 0.35 MPa es mayor. Por ello, no se puede afirmar que se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.3.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos en los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.3.d).



**Figura A.3.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA- $AUV_{254}$ : (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

### A.3.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)

#### A.3.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: SDT (mg/L).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.3.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica es significativa. Por lo tanto, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian los el contenido de SDT del permeado.

**Tabla A.3.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF270**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	4403.937	2	2201.968	0.275	0.773
Réplica	118428.032	2	59214.016	7.391	0.045
Error	32046.512	4	8011.628		
Total	3587781.612	9			

**A.3.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.3.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $596_{0.35} = 609_{0.52}$ )
- $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $596_{0.35} = 648_{0.69}$ )
- $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $609_{0.52} = 648_{0.69}$ )

**Tabla A.3.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-13.1429	73.08273	0.866	-216.0530	189.7673
	0.69	-52.0952	73.08273	0.515	-255.0054	150.8149
0.52	0.35	13.1429	73.08273	0.866	-189.7673	216.0530
	0.69	-38.9524	73.08273	0.622	-241.8626	163.9578
0.69	0.35	52.0952	73.08273	0.515	-150.8149	255.0054
	0.52	38.9524	73.08273	0.622	-163.9578	241.8626

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.3.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

A pesar de que se observa un incremento en el contenido de SDT del permeado producido con esta membrana en función de la presión de operación (Figura A.3.4.a), no se tiene la certeza de que esto sea correcto ya que el análisis LSD demuestra que, con base en las variaciones del proceso, el contenido de SDT de los permeados producidos con las tres presiones probadas es estadísticamente igual (por eso las barras LSD se traslapan en los tres puntos).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

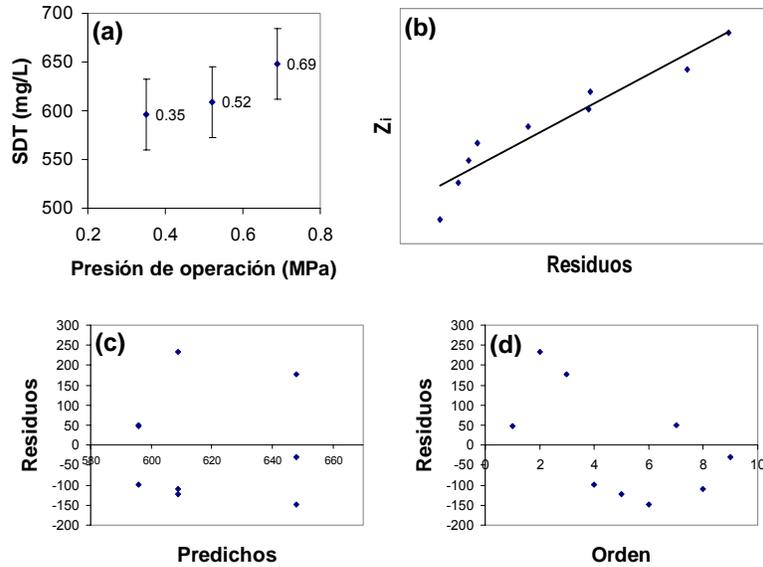
- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.4.b).
- Los datos no cumplen el supuesto de variancia constante (Figura A.3.4.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.4.d).

**A.3.5. Conductividad**

**A.3.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$



**Figura A.3.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

Del análisis de variancia (Tabla A.3.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Entonces, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.3.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana NF270**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	1.329	2	0.664	10.795	0.000
Réplica	1.402	2	0.701	11.391	0.000
Error	2.461	40	0.062		
Total	42.110	45			

**A.3.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.3.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.79_{0.35} = 0.78_{0.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.79_{0.35} \neq 1.15_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.78_{0.52} \neq 1.15_{0.69})$

**Tabla A.3.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.0111	0.09058	0.903	-0.1719	0.1942
	0.69	-0.3588(*)	0.09058	0.000	-0.5419	-0.1757
0.52	0.35	-0.0111	0.09058	0.903	-0.1942	0.1719
	0.69	-0.3699(*)	0.09058	0.000	-0.5530	-0.1869
0.69	0.35	0.3588(*)	0.09058	0.000	0.1757	0.5419
	0.52	0.3699(*)	0.09058	0.000	0.1869	0.5530

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.3.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD se observa un incremento significativo de la conductividad del permeado producido con esta membrana en función de la presión de operación (Figura A.3.5.a). Se hace notar que las conductividades de los permeado producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras del error se traslapan). El incremento significativo se presenta en la presión 0.69 MPa (sus barras LSD no se enciman con aquellas de los otros dos puntos).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Por lo tanto, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.5.b).
2. Los datos de las presiones 0.35 y 0.69 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Sin embargo, la presión 0.69 MPa presenta una variación mayor (Figura A.3.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.5.d).

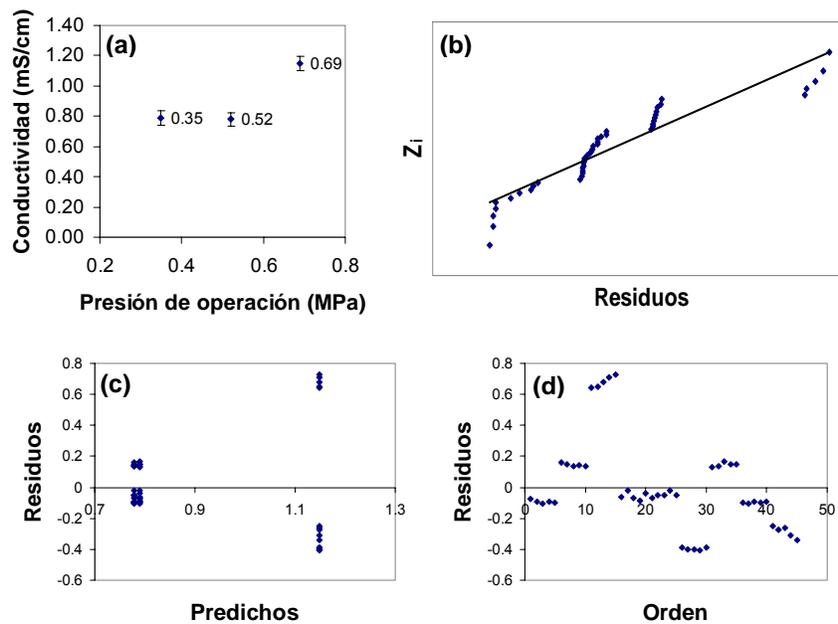


Figura A.3.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.3.6. Turbiedad

#### A.3.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2} = \mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.3.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Entonces, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.3.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF270**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.001	2	0.001	4.317	0.018
Réplica	0.002	2	0.001	7.131	0.002
Error	0.009	55	0.000		
Total	0.048	60			

### A.3.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.3.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ; ( $0.02_{0.35} = 0.02_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; ( $0.02_{0.35} \neq 0.03_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $0.02_{0.52} = 0.03_{0.69}$ )

**Tabla A.3.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0045	0.00413	0.280	-0.0128	0.0038
	0.69	-0.0120(*)	0.00413	0.005	-0.0203	-0.0037
0.52	0.35	0.0045	0.00413	0.280	-0.0038	0.0128
	0.69	-0.0075	0.00413	0.075	-0.0158	0.0008
0.69	0.35	0.0120(*)	0.00413	0.005	0.0037	0.0203
	0.52	0.0075	0.00413	0.075	-0.0008	0.0158

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.3.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD (Figura A.3.6.a) se aprecia un aumento significativo en la turbiedad de los permeados producidos por esta membrana (las barras LSD de las presiones de los extremos del intervalo de presiones probado no se traslapan). No obstante, la turbiedad en la presión 0.35 MPa es estadísticamente igual a la correspondiente en la presión 0.52 MPa. Lo mismo ocurre para las turbiedades que se presentan en las presiones 0.52 y 0.69 MPa. Sin embargo, entre la turbiedad obtenida con la presión 0.35 MPa y aquella con 0.69 MPa hay una diferencia significativa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. No es muy clara la normalidad de los residuos aunque se aprecia cierta distribución normal con media cero (Figura A.3.6.b).
2. Los datos de las presiones 0.52 y 0.69 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). La presión 0.35 MPa es la que presenta menor

variación. Se considera que se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.3.6.c).

- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.6.d).

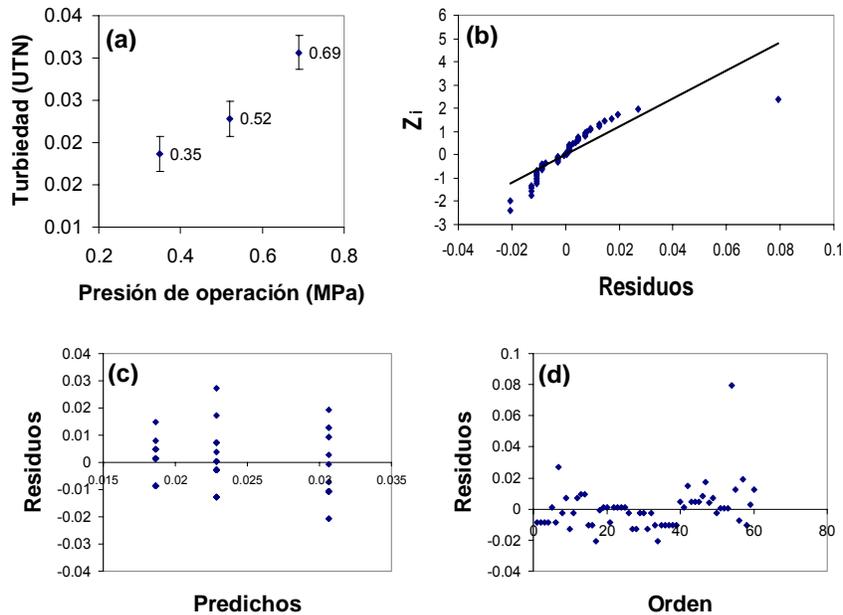


Figura A.3.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.3.7. pH

#### A.3.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: pH (Unidades)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.3.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
- La variación por réplica es significativa. Entonces, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
- Las presiones cambian el pH del permeado.

Tabla A.3.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana NF270

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.836	2	0.418	12.690	0.000
Réplica	0.315	2	0.157	4.774	0.014
Error	1.219	37	0.033		
Total	2625.170	42			

### A.3.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.3.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ; ( $8.0_{0.35} = 8.0_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $8.0_{0.35} \neq 7.7_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $8.0_{0.52} \neq 7.7_{0.69}$ )

**Tabla A.3.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.0714	0.06860	0.305	-0.0676	0.2104
	0.69	0.3286(*)	0.06860	0.000	0.1896	0.4676
0.52	0.35	-0.0714	0.06860	0.305	-0.2104	0.0676
	0.69	0.2571(*)	0.06860	0.001	0.1181	0.3961
0.69	0.35	-0.3286(*)	0.06860	0.000	-0.4676	-0.1896
	0.52	-0.2571(*)	0.06860	0.001	-0.3961	-0.1181

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.3.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se observa en la gráfica de medias LSD (Figura A.3.7.a), el pH de los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD de los puntos se enciman). Ambos, son significativamente mayores que el pH del permeado producido con la presión de 0.69 MPa (su barra LSD no se traslapa con las barras de los otros puntos). Se puede decir que el incremento en la presión baja el pH del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.7.b).
2. Las presiones 0.35 y 0.52 MPa presentan variancias semejantes. Sin embargo, se observa una variación mayor en la presión 0.69 MPa. Por lo tanto, no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.3.7.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Por ello, se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.7.d).

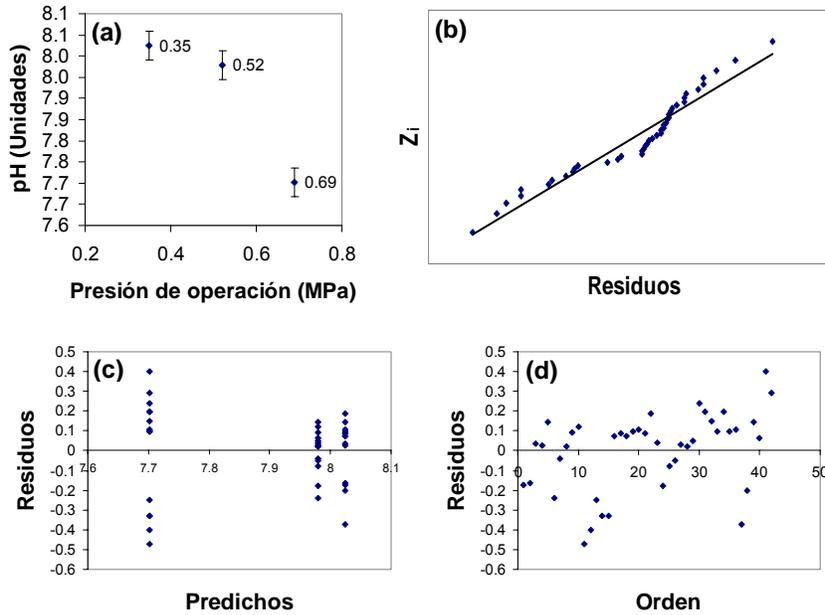


Figura A.3.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.3.8. Alcalinidad

#### A.3.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.3.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica es significativa (más que por el cambio de presión). Entonces, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian la conductividad del permeado.

Tabla A.3.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF270

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	1273.831	2	636.916	0.634	0.577
Réplica	11244.386	2	5622.193	5.596	0.069
Error	4019.004	4	1004.751		
Total	161993.422	9			

#### A.3.8.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.3.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $114_{0.35} = 124_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $114_{0.35} = 143_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $124_{0.52} = 143_{0.69}$ )

**Tabla A.3.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-9.5897	25.88115	0.730	-81.4473	62.2679
	0.69	-28.6264	25.88115	0.331	-100.4840	43.2312
0.52	0.35	9.5897	25.88115	0.730	-62.2679	81.4473
	0.69	-19.0368	25.88115	0.503	-90.8943	52.8208
0.69	0.35	28.6264	25.88115	0.331	-43.2312	100.4840
	0.52	19.0368	25.88115	0.503	-52.8208	90.8943

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.3.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se aprecia en la gráfica de medias LSD (Figura A.3.8.a), las alcalinidades de los permeados producidos con todas las presiones probadas son estadísticamente equivalentes (las barras de error se superponen) a pesar de que se observa un incremento en las medias. Éste se puede tomar sólo como un indicio poco sólido de que el aumento en la presión de operación puede incrementar la alcalinidad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Por ello, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.8.b).
2. Los tratamientos no presentan variancias semejantes. Por lo tanto, no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.3.8.c).
3. Se detecta una tendencia definida claramente de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.8.d).

### A.3.9. Dureza

#### A.3.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

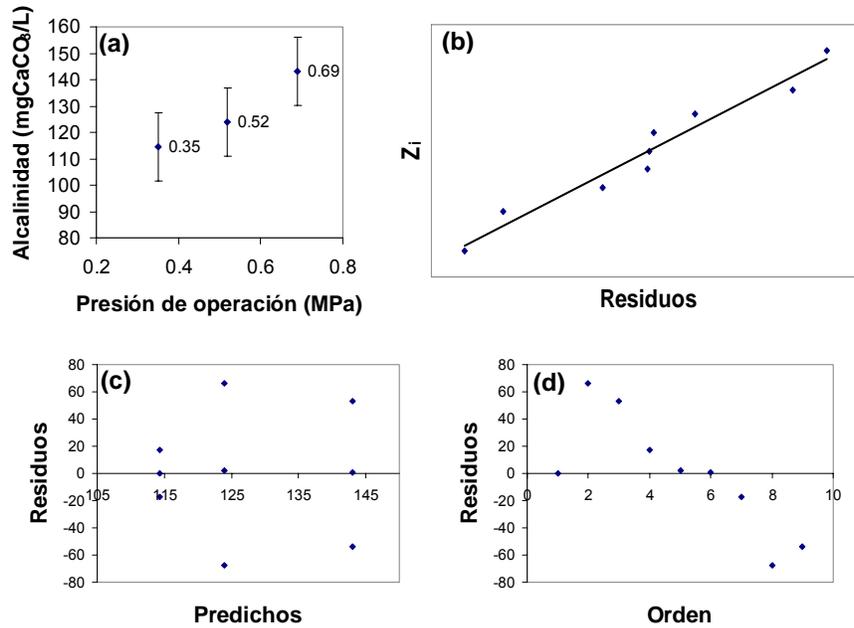


Figura A.3.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

Del análisis de variancia (Tabla A.3.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La variación por réplica no es significativa. La réplica no influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian la conductividad del permeado.

Tabla A.3.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF270

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	1478.170	2	739.085	0.523	0.628
Réplica	1163.756	2	581.878	0.412	0.688
Error	5651.202	4	1412.801		
Total	81950.489	9			

### A.3.9.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.3.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana NF270. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ; ( $88_{0.35} = 76_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; ( $88_{0.35} = 107_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $76_{0.52} = 107_{0.69}$ )

**Tabla A.3.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana NF270**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	12.5928	30.68985	0.703	-72.6159	97.8015
	0.69	-18.6064	30.68985	0.577	-103.8151	66.6023
0.52	0.35	-12.5928	30.68985	0.703	-97.8015	72.6159
	0.69	-31.1992	30.68985	0.367	-116.4079	54.0095
0.69	0.35	18.6064	30.68985	0.577	-66.6023	103.8151
	0.52	31.1992	30.68985	0.367	-54.0095	116.4079

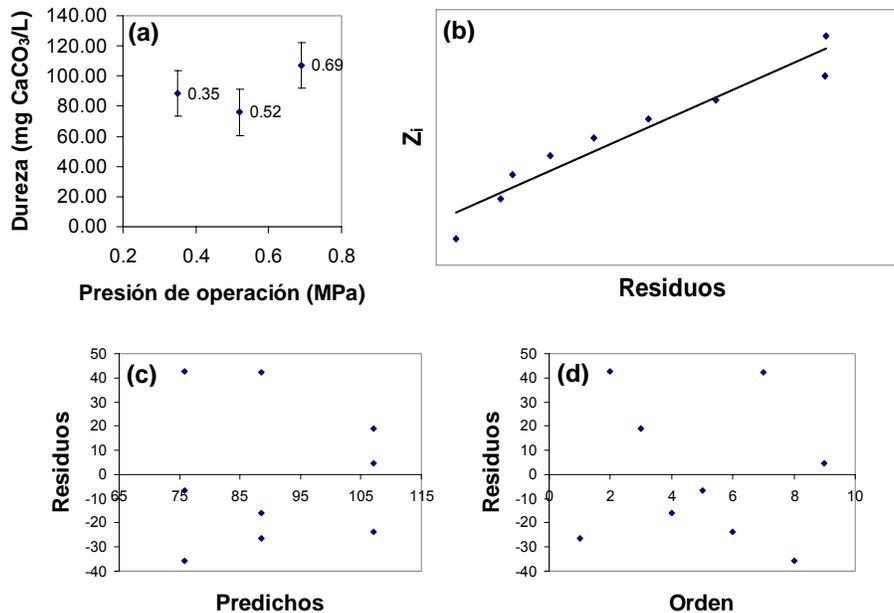
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.3.9.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.3.9.a) se observa que las medias de la dureza de los permeados producidos con las tres presiones probadas son estadísticamente equivalentes (las barras de error se sobrepone). Este parámetro no aporta información sobre el efecto de la presión en la dureza del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.3.9.b).
2. Los datos no presentan variancia constante. Se forma un cono. Se considera que no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.3.9.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.3.9.d).



**Figura A.3.9 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Dureza: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.4. Membrana YMCKSP1905**

**A.4.1. Flux**

**A.4.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación. Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$   
 Variable de respuesta: Flux ( $L/m^2 \cdot h$ ).  
 $\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica no es significativa.
3. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.4.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	656.754	2	328.377	5.166	0.007
Réplica	7.182	1	7.182	0.113	0.737
Error	6801.509	107	63.566		
Total	50441.943	111			

**A.4.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux ( $L/m^2 \cdot h$ ). Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.4.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $17_{0.35} \neq 22_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $17_{0.35} \neq 20_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $22_{0.52} = 20_{0.69}$ )

**Tabla A.4.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-5.85576(*)	1.841402	0.002	-9.50612	-2.20539
	0.69	-3.70617(*)	1.854315	0.048	-7.38213	-0.03021
0.52	0.35	5.85576(*)	1.841402	0.002	2.20539	9.50612
	0.69	2.14959	1.866466	0.252	-1.55046	5.84964
0.69	0.35	3.70617(*)	1.854315	0.048	.03021	7.38213
	0.52	-2.14959	1.866466	0.252	-5.84964	1.55046

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.4.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.4.1.a) se confirma el resultado del método analítico de comparación de medias. Las presiones 0.52 y 0.69 MPa presentan una producción de agua filtrada estadísticamente equivalente. La presión 0.35 MPa produce una cantidad de agua significativamente menor a las producciones de las otras dos presiones. Entonces, se considera que el incremento en la presión favorece la producción de permeado aunque presumiblemente alcanza un límite máximo entre las presiones de 0.52 y 0.69 MPa

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.4.1.b).
2. Los tratamientos 0.35 y 0.52 MPa presentan variancias semejantes. Sin embargo, el tratamiento de 0.69 MPa presenta una variancia mayor. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.4.1.c).
3. No se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.1.d).

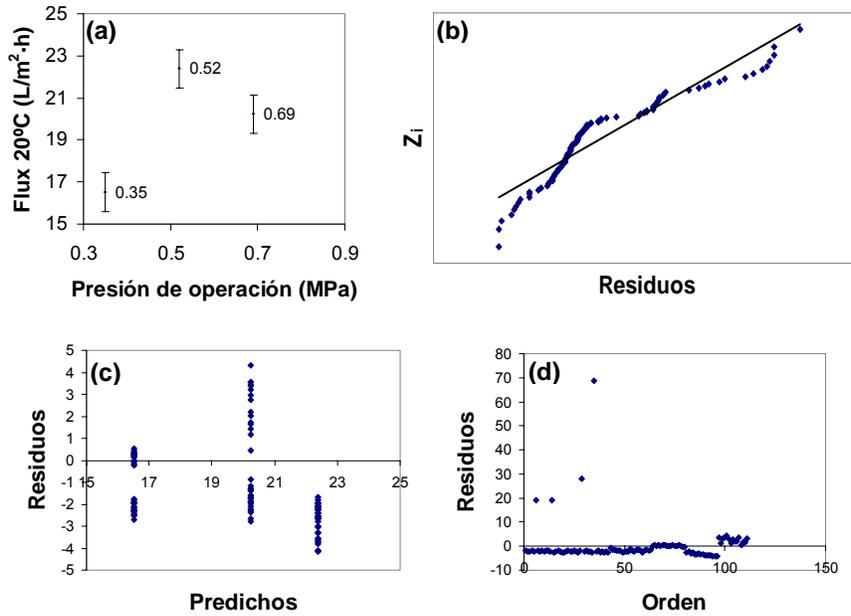


Figura A.4.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

#### A.4.2. Carbono Orgánico Total (COT)

##### A.4.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: COT (mg/L).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos un par de medias son diferentes.
2. La variación por réplica no es significativa. Las réplicas no influyen en las mediciones de COT.
3. Las presiones cambian el COT del permeado.

Tabla A.4.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana YMCKSP1905

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	2.086	2	1.043	4.040	0.037
Réplica	0.954	1	0.954	3.693	0.072
Error	4.389	17	0.258		
Total	36.041	21			

### A.4.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.4.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}\neq\mu_{P2}$ ;  $(1.558_{0.35}\neq 0.787_{0.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(1.558_{0.35}=1.157_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.787_{0.52}=1.157_{0.69})$

**Tabla A.4.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.77186(*)	0.271611	0.011	0.19881	1.34491
	0.69	0.40171	0.271611	0.157	-0.17133	0.97476
0.52	0.35	-0.77186(*)	0.271611	0.011	-1.34491	-0.19881
	0.69	-0.37014	0.271611	0.191	-0.94319	0.20291
0.69	0.35	-0.40171	0.271611	0.157	-0.97476	0.17133
	0.52	0.37014	0.271611	0.191	-0.20291	0.94319

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.4.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica de medias LSD (Figura A.4.2.a) no muestra superposición en las barras de error de ninguno de los tratamientos (presiones). Sin embargo, los intervalos de confianza (tabla comparaciones múltiples) indica que los tratamientos 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente equivalentes al tratamiento 0.69 MPa. Mientras que la única diferencia significativa es entre el tratamiento 0.35 y 0.52 MPa. De esto se concluye que hay un decremento significativo del COT del permeado producido con esta membrana por efecto del aumento en la presión de operación

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Por eso, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.4.2.b).
2. Con excepción de algunos puntos, los tratamientos presentan variaciones semejantes. Se considera que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.4.2.c).
3. Se detecta cierta tendencia o patrón de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.2.d).

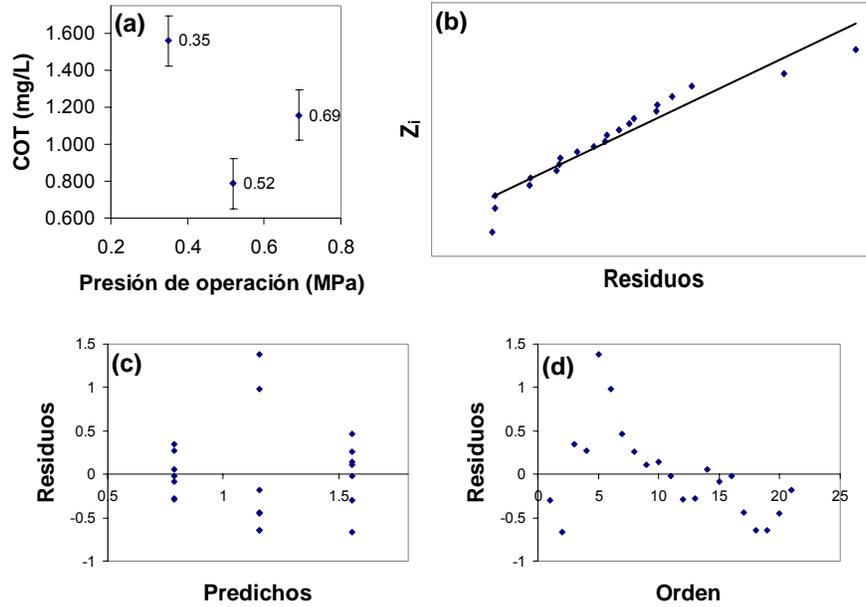


Figura A.4.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.4.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)**

**A.4.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).  
 α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.4.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. La réplica influye en las mediciones de la AUV<sub>254</sub>
3. Las presiones cambian la absorbancia UV<sub>254</sub> del permeado.

**Tabla A.4.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.000	2	0.000	3.797	0.040
Réplica	0.000	1	0.000	5.004	0.037
Error	0.000	20	0.000		
Total	0.002	24			

**A.4.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.4.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.007_{0.35}=0.008_{0.52})$
- $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ;  $(0.007_{0.35}\neq0.009_{0.69})$
- $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.008_{0.52}=0.009_{0.69})$

**Tabla A.4.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.00113	0.000685	0.116	-0.00255	0.00030
	0.69	-0.00187(*)	0.000685	0.013	-0.00330	-0.00045
0.52	0.35	0.00113	0.000685	0.116	-0.00030	0.00255
	0.69	-0.00075	0.000685	0.287	-0.00218	0.00068
0.69	0.35	0.00187(*)	0.000685	0.013	0.00045	0.00330
	0.52	0.00075	0.000685	0.287	-0.00068	0.00218

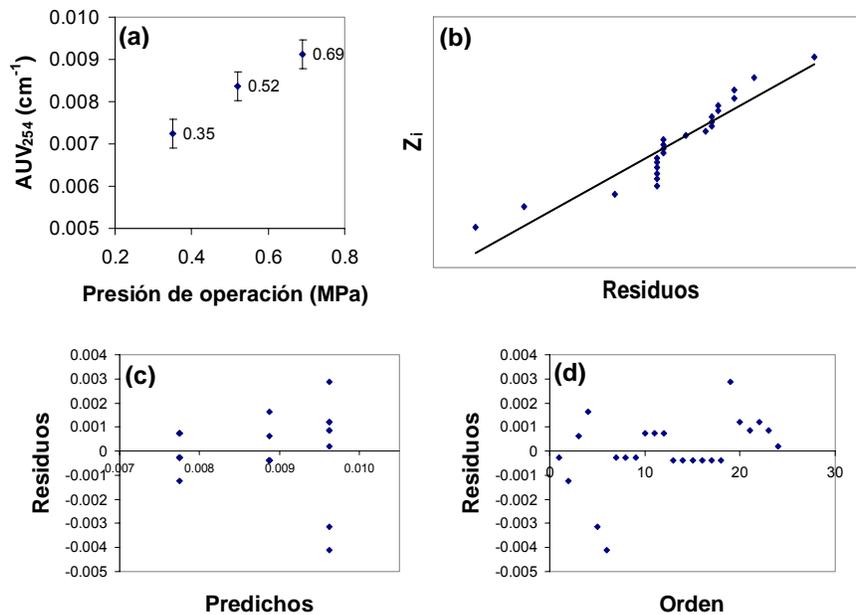
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.4.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD (Figura A.5.3.a) se observa un aumento significativo en la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con esta membrana por efecto del aumento en la presión de operación. No obstante, es importante señalar que la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con la presión (intermedia) de 0.52 MPa resulta estadísticamente equivalente a los valores de AUV<sub>254</sub> correspondientes a las presiones 0.35 y 0.69 MPa (extremos del intervalo de presiones probado). Por otro lado, la AUV<sub>254</sub> del permeado obtenido con la presión de 0.69 MPa es significativamente mayor que el correspondiente a la presión de 0.35 MPa. Por ello, se puede decir que el incremento en la presión aumenta la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.3.b).
- Los datos (excepto por dos puntos) cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Los tratamientos tienen la misma variancia (Figura A.5.3.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.3.d).



**Figura A.4.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-AUV<sub>254</sub>: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.4.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.4.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: SDT (mg/L).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula. No es significativo el cambio en los SDT por el cambio de presión.
2. Las réplicas no influyen en los SDT medidos.

**Tabla A.4.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	2727.060	2	1363.530	0.701	0.588
Réplica	38.700	1	38.700	0.020	0.901
Error	3891.686	2	1945.843		
Total	1081117.914	6			

**A.4.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.4.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $405_{0.35} = 411_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $405_{0.35} = 453_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $411_{0.52} = 453_{0.69}$ )

**Tabla A.4.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-6.4286	44.11171	0.897	-196.2259	183.3688
	0.69	-48.0952	44.11171	0.389	-237.8926	141.7021
0.52	0.35	6.4286	44.11171	0.897	-183.3688	196.2259
	0.69	-41.6667	44.11171	0.445	-231.4640	148.1307
0.69	0.35	48.0952	44.11171	0.389	-141.7021	237.8926
	0.52	41.6667	44.11171	0.445	-148.1307	231.4640

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.4.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.4.4.a) se puede apreciar un incremento en el contenido de SDT del permeado producido con la membrana probada en función de la presión de operación. Sin embargo, este cambio (aumento) no es significativo. Las variaciones que se presentaron en el proceso fueron tales que las barras de error LSD se traslapan en las tres presiones probadas. Por ello no se puede afirmar que este efecto sea importante.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos siguen una distribución normal (Figura A.4.4.b).
2. No es muy claro el cumplimiento del supuesto de variancia constante. Los tratamientos no tienen la misma variación. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.4.4.c).
3. Hay una tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.4.d).

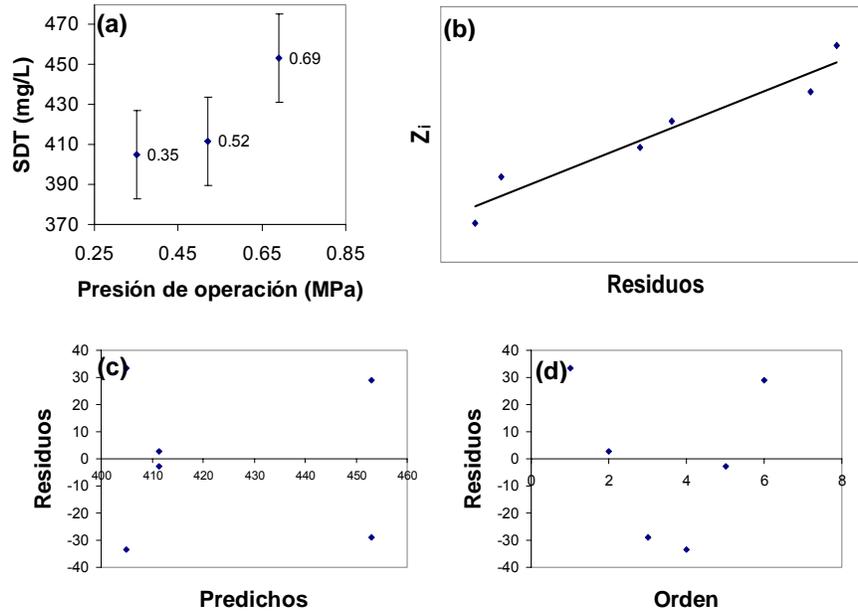


Figura A.4.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.4.5. Conductividad**

**A.4.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de los tratamientos son iguales.
2. La variación por réplica es significativa. Entonces, fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones no cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.4.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.009	2	0.005	3.285	0.056
Réplica	0.052	1	0.052	36.504	0.000
Error	0.032	23	0.001		
Total	5.488	27			

**A.4.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta:  
Conductividad (mS/cm).

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.4.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (0.42<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.47<sub>0.52</sub>)
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; (0.42<sub>0.35</sub> = 0.45<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; (0.47<sub>0.52</sub> = 0.45<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.4.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0451(*)	0.01771	0.018	-0.0817	-0.0085
	0.69	-0.0269	0.01771	0.143	-0.0635	0.0097
0.52	0.35	0.0451(*)	0.01771	0.018	0.0085	0.0817
	0.69	0.0182	0.01771	0.314	-0.0184	0.0549
0.69	0.35	0.0269	0.01771	0.143	-0.0097	0.0635
	0.52	-0.0182	0.01771	0.314	-0.0549	0.0184

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.4.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.4.5.a) también se puede observar la diferencia significativa entre las conductividades de los permeados producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa. Se considera, con base en el hecho expuesto anteriormente, que el incremento en la presión de operación aumenta la conductividad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Entonces, los datos proceden de una distribución normal (Figura A.4.5.b).
2. Los datos de las presiones 0.52 y 0.69 MPa presentan variancias semejantes. Sin embargo, la presión 0.35 MPa muestra una variación menor. Por ello, no se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.4.5.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.5.d).

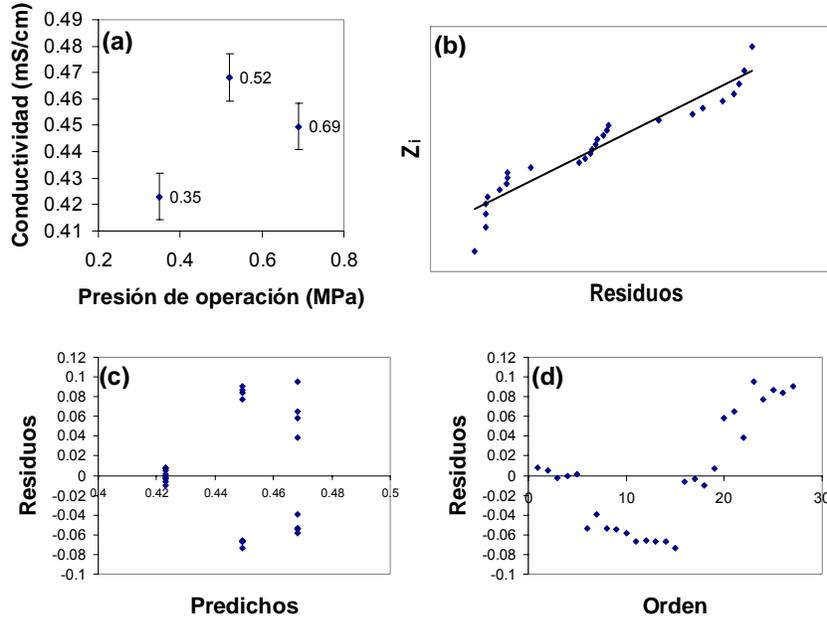


Figura A.4.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.4.6. Turbiedad**

**A.4.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula. La presión no tiene efecto significativo sobre la turbiedad del permeado.
2. Las réplicas sí influyen en las turbiedades medidas.

**Tabla A.4.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.001	2	0.000	1.922	0.160
Réplica	0.004	1	0.004	20.804	0.000
Error	0.008	38	0.000		
Total	0.039	42			

**A.4.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.4.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.02_{0.35} = 0.03_{0.52})$     2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.02_{0.35} = 0.03_{0.69})$     3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.03_{0.52} = 0.03_{0.69})$

**Tabla A.4.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0100	0.00537	0.070	-0.0209	0.0009
	0.69	-0.0079	0.00537	0.152	-0.0187	0.0030
0.52	0.35	0.0100	0.00537	0.070	-0.0009	0.0209
	0.69	0.0021	0.00537	0.692	-0.0087	0.0130
0.69	0.35	0.0079	0.00537	0.152	-0.0030	0.0187
	0.52	-0.0021	0.00537	0.692	-0.0130	0.0087

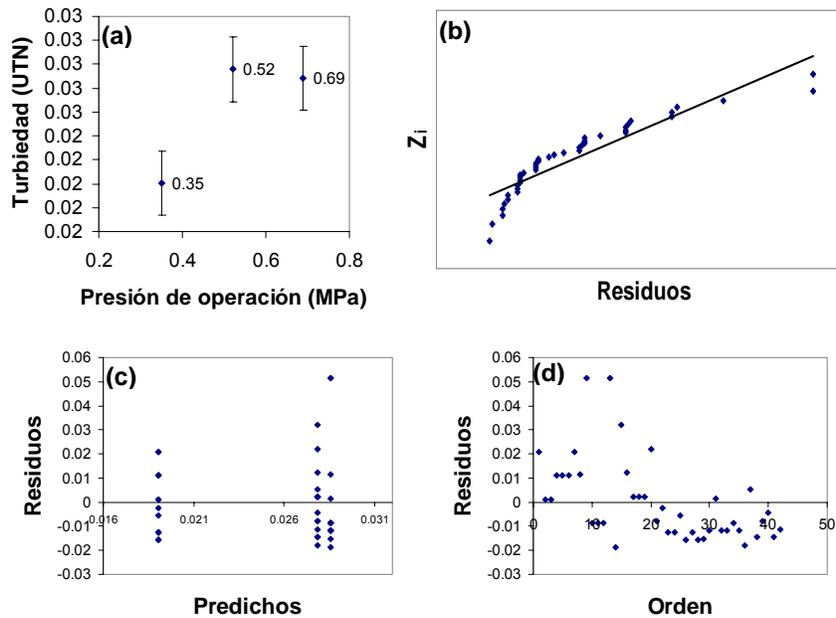
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.4.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Se puede observar en la gráfica de medias LSD (Figura A.4.6.a) un incremento significativo de la turbiedad del permeado producido con esta membrana en función de la presión de operación. Sin embargo, el método analítico, basado en los intervalos de confianza (95%), indica que el cambio no es importante y que las medias de turbiedad correspondientes a las tres presiones probadas son estadísticamente equivalentes. Por ello, se considera que la presión no afecta la turbiedad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.4.6.b).
2. Se cumple el supuesto de variancia constante. Los tratamientos (presiones) presentan variaciones semejantes (Figura A.4.6.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Por ello, se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.6.d).



**Figura A.4.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

### A.4.7. pH

#### A.4.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: pH (Unidades).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula. Al menos hay dos medias de tratamientos que son diferentes.
2. La presión afecta el pH del permeado.
3. La réplica influye significativamente en pH del permeado. Entonces, fue correcto bloquear la réplica.

**Tabla A.4.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	1.423	2	0.712	12.848	0.000
Réplica	0.406	1	0.406	7.334	0.013
Error	1.274	23	0.055		
Total	1477.778	27			

#### A.4.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: pH (Unidades).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.4.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $7.6_{0.35} = 7.4_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.6_{0.35} \neq 7.1_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.4_{0.52} \neq 7.1_{0.69}$ )

**Tabla A.4.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.2196	0.11094	0.060	-0.0099	0.4491
	0.69	0.5581(*)	0.11094	0.000	0.3287	0.7876
0.52	0.35	-0.2196	0.11094	0.060	-0.4491	0.0099
	0.69	0.3385(*)	0.11094	0.006	0.1090	0.5680
0.69	0.35	-0.5581(*)	0.11094	0.000	-0.7876	-0.3287
	0.52	-0.3385(*)	0.11094	0.006	-0.5680	-0.1090

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

#### A.4.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica de medias LSD (Figura A.4.7.a) muestra un decremento significativo del pH del permeado producido por esta membrana como consecuencia del aumento en la presión de operación. Es importante hacer notar que los valores de pH de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD se

superponen). No obstante, el pH del permeado producido con la presión 0.69 MPa es significativamente inferior a los otros dos (0.35 y 0.52 MPa).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos provienen de una distribución normal (Figura A.4.7.b).
2. No se cumple el supuesto de variancia constante. Los tratamientos no tienen la misma variación. Se forma un cono (Figura A.4.7.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.7.d).

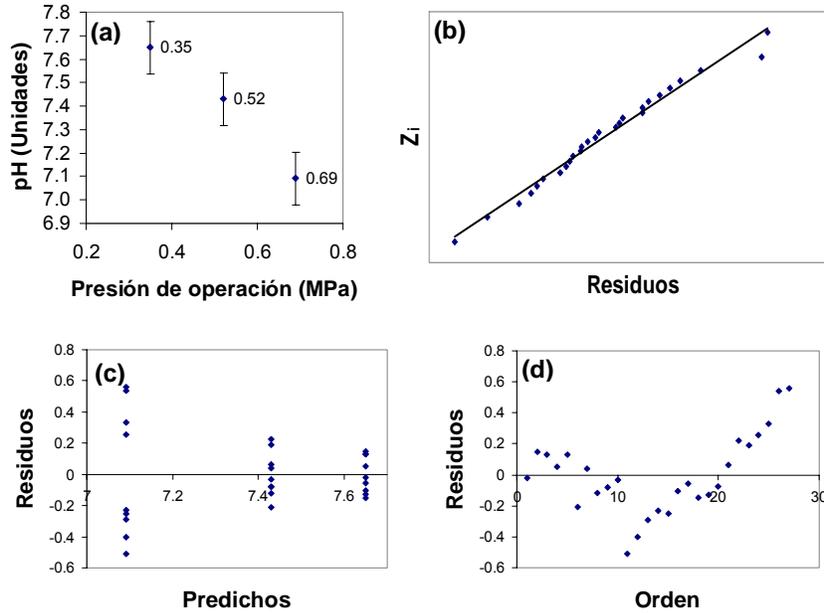


Figura A.4.7(a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

#### A.4.8. Alcalinidad

##### A.4.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula. La presión no afecta la alcalinidad del permeado.
2. Las réplicas no influyen en las alcalinidades medidas.

**Tabla A.4.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	380.348	2	190.174	0.200	0.833
Réplica	669.998	1	669.998	0.706	0.489
Error	1898.053	2	949.027		
Total	55118.674	6			

**A.4.8.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.4.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>; (82<sub>0.35</sub> = 100<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub>; (82<sub>0.35</sub> = 98<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (100<sub>0.52</sub> = 98<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.4.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-17.7333	30.80628	0.623	-150.2820	114.8154
	0.69	-15.8957	30.80628	0.657	-148.4445	116.6530
0.52	0.35	17.7333	30.80628	0.623	-114.8154	150.2820
	0.69	1.8376	30.80628	0.958	-130.7111	134.3863
0.69	0.35	15.8957	30.80628	0.657	-116.6530	148.4445
	0.52	-1.8376	30.80628	0.958	-134.3863	130.7111

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.4.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.4.8.a) muestra claramente que no hay cambios significativos en la alcalinidad del permeado producido con esta membrana en función de la presión de operación (las barras de error son considerablemente amplias y todas se superponen). Este parámetro no aporta información sobre el efecto de la presión de operación en la calidad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos provienen de una distribución normal (Figura A.4.8.b).
2. No se cumple el supuesto de variancia constante. Se forma un cono (Figura A.4.8.c).
3. Se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.8.d).

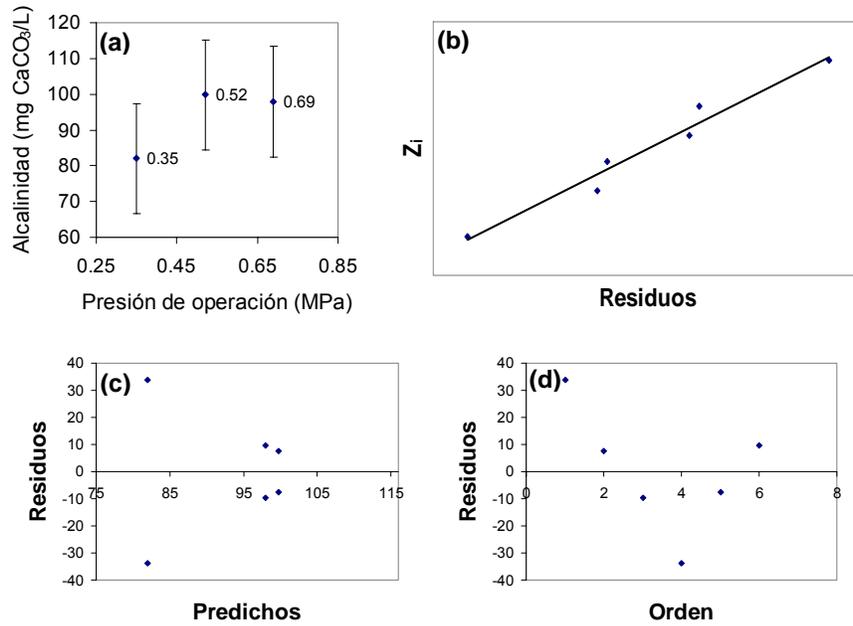


Figura A.4.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.4.9. Dureza**

**A.4.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.4.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula. Las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. La presión no afecta la dureza del permeado.
3. Las réplicas no influyen en las durezas medidas.

**Tabla A.4.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de dureza obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	211.239	2	105.620	0.384	0.723
Réplica	650.180	1	650.180	2.362	0.264
Error	550.522	2	275.261		
Total	6027.489	6			

**A.4.9.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.4.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana YMCKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $20_{0.35} = 29_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $20_{0.35} = 34_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $29_{0.52} = 34_{0.69}$ )

**Tabla A.4.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana YMCKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-9.5247	16.59099	0.624	-80.9100	61.8605
	0.69	-14.2697	16.59099	0.480	-85.6549	57.1156
0.52	0.35	9.5247	16.59099	0.624	-61.8605	80.9100
	0.69	-4.7450	16.59099	0.802	-76.1302	66.6403
0.69	0.35	14.2697	16.59099	0.480	-57.1156	85.6549
	0.52	4.7450	16.59099	0.802	-66.6403	76.1302

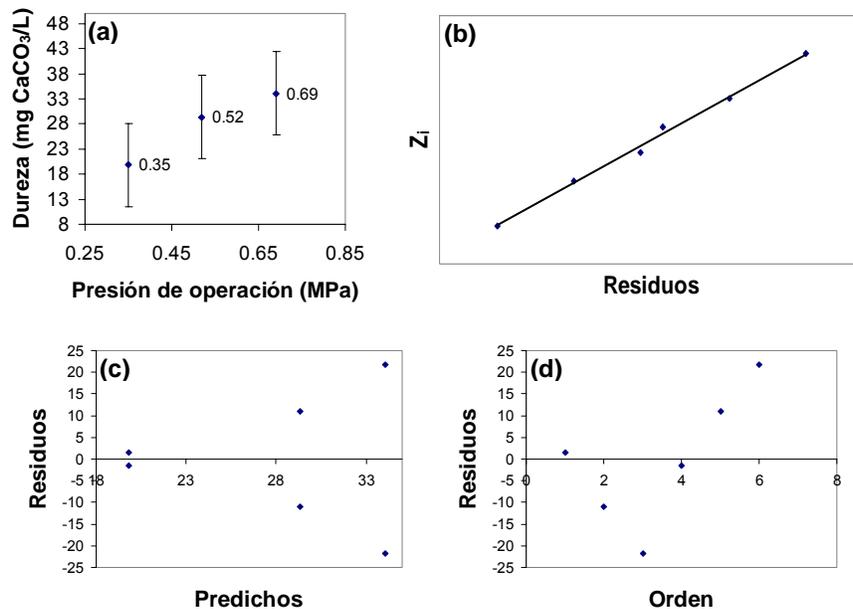
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.4.9.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica de medias LSD muestra (Figura A.4.9.a) que al aumentar la presión de operación se incrementa la dureza del permeado producido con esta membrana. Sin embargo, las barras LSD se traslapan en todos los casos ya que éstas son considerablemente extensas. Por ello, no es posible afirmar que este efecto es importante.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos provienen de una distribución normal (Figura A.4.9.b).
2. Los tratamientos tienen diferentes variancias (se forma un cono). No se cumple es supuesto de variancia constante (Figura A.4.9.c).
3. Se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.4.9.d).



**Figura A.4.9(a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Dureza: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.5. Membrana YMDKSP1905**

**A.5.1. Flux**

**A.5.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación. Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$   
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h).  
 $\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.5.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica. Ésta influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.5.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	999.474	2	499.737	2917.216	0.000
Réplica	118.637	1	118.637	692.544	0.000
Error	9.936	58	0.171		
Total	34315.695	62			

**A.5.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h). Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.5.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $19_{0.35} \neq 23_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $19_{0.35} \neq 28_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $23_{0.52} \neq 28_{0.69}$ ).

**Tabla A.5.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-4.18338(*)	0.127875	0.000	-4.43935	-3.92741
	0.69	-9.90048(*)	0.127875	0.000	-10.15645	-9.64451
0.52	0.35	4.18338(*)	0.127875	0.000	3.92741	4.43935
	0.69	-5.71710(*)	0.130884	0.000	-5.97910	-5.45511
0.69	0.35	9.90048(*)	0.127875	0.000	9.64451	10.15645
	0.52	5.71710(*)	0.130884	0.000	5.45511	5.97910

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la Figura A.5.1.a se observa que los valores de flux correspondientes a cada presión aplicada son significativamente distintos y que al aumentar la presión se incrementa el flux. Cabe señalar que las barras LSD son mínimas y no se traslapan.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.1.b).
2. Los tratamientos 0.35 y 0.52 MPa cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). El tratamiento 0.69 MPa presenta una variancia mayor (por la réplica). Se considera que en general se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.5.1.c).
3. Se detecta una tendencia claramente definida de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.1.d).

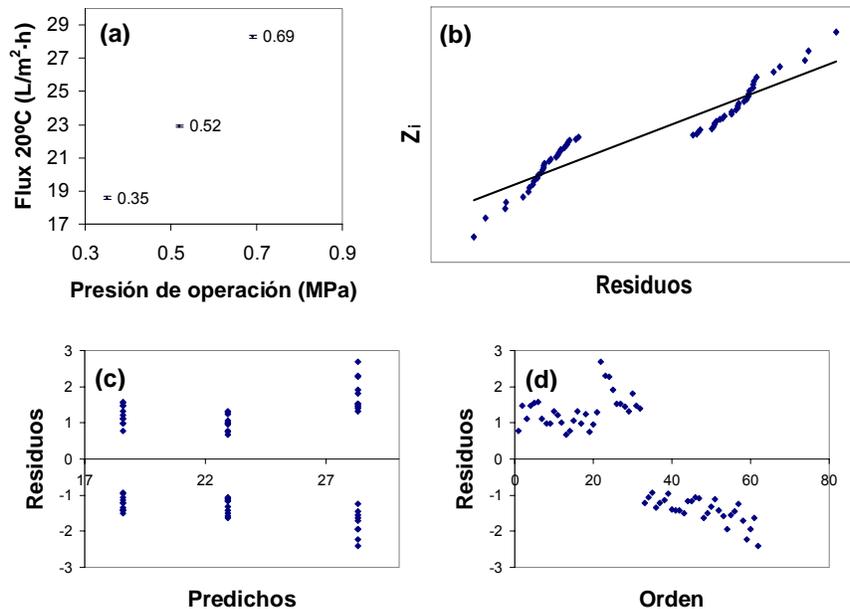


Figura A.5.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.5.2. Carbono Orgánico Total (COT)

#### A.5.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: COT (mg/L).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.5.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula. Al menos un par de medias son diferentes.
2. Las réplicas influyen en las mediciones de COT.
3. Las presiones cambian el COT del permeado.

Tabla A.5.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana YMDKSP1905

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.072	2	0.036	9.063	0.005
Réplica	0.129	1	0.129	32.355	0.000
Error	0.044	11	0.004		
Total	5.842	15			

**A.5.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.5.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}\neq\mu_{P2}$ ; (0.689<sub>0.35}</sub> $\neq$ 0.590<sub>0.52}</sub>)
- $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ; (0.689<sub>0.35}</sub> $\neq$ 0.565<sub>0.69}</sub>)
- $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; (0.590<sub>0.52}</sub> $=$ 0.565<sub>0.69}</sub>)

**Tabla A.5.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.13820(*)	0.039861	0.005	0.05047	0.22593
	0.69	0.15440(*)	0.039861	0.003	0.06667	0.24213
0.52	0.35	-0.13820(*)	0.039861	0.005	-0.22593	-0.05047
	0.69	0.01620	0.039861	0.692	-0.07153	0.10393
0.69	0.35	-0.15440(*)	0.039861	0.003	-0.24213	-0.06667
	0.52	-0.01620	0.039861	0.692	-0.10393	0.07153

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La Figura A.5.2.a ilustra el resultado del método de comparaciones múltiples. La presión 0.35 MPa produce un permeado con un contenido de COT significativamente superior a los correspondientes con las presiones de 0.52 y 0.69 MPa –que son estadísticamente iguales-. Se observa una disminución significativa del COT en el permeado producido con esta membrana en función del incremento de presión.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.2.b).
- La presión 0.35 MPa presenta más variación que las otras dos, que tienen variaciones semejantes. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.5.2.c).
- Se detecta cierta tendencia o patrón de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.2.d).

**A.5.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)**

**A.5.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$

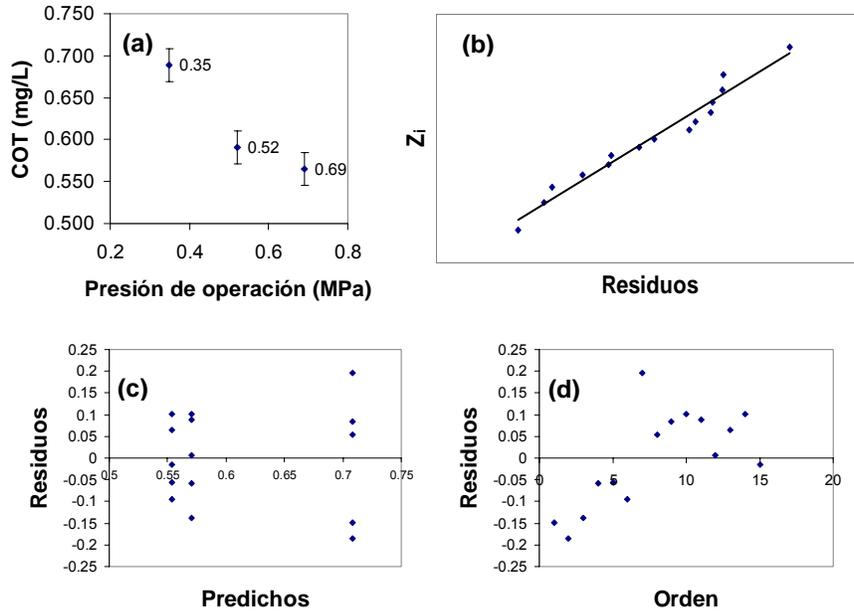


Figura A.5.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

Del análisis de variancia (Tabla A.5.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica no es significativa.
3. Las presiones cambian la absorbancia AUV<sub>254</sub> del permeado.

Tabla A.5.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana YMDKSP1905

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.000	2	0.000	26.453	0.000
Réplica	0.000	1	0.000	0.320	0.575
Error	0.000	32	0.000		
Total	0.002	36			

A.5.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.5.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (0.010<sub>0.35</sub>≠0.007<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.010<sub>0.35</sub>≠0.007<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.007<sub>0.52</sub>=0.007<sub>0.69</sub>)

Tabla A.5.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana YMDKSP1905

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.00333(*)	0.000481	0.000	0.00235	0.00431
	0.69	0.00258(*)	0.000481	0.000	0.00160	0.00356
0.52	0.35	-0.00333(*)	0.000481	0.000	-0.00431	-0.00235
	0.69	-0.00075	0.000481	0.129	-0.00173	0.00023
0.69	0.35	-0.00258(*)	0.000481	0.000	-0.00356	-0.00160
	0.52	0.00075	0.000481	0.129	-0.00023	0.00173

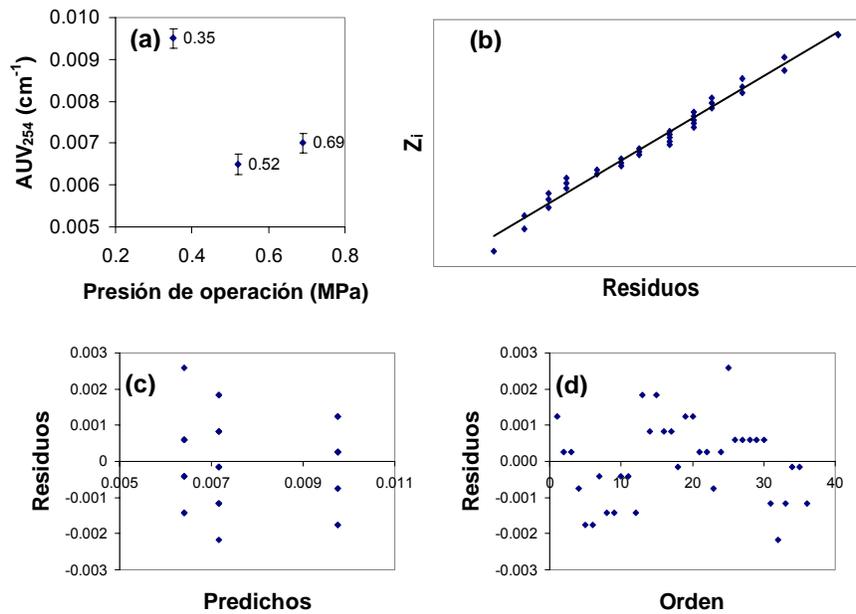
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la Figura A.5.3.a LSD se observa un decremento significativo del valor de  $AUV_{254}$  del permeado producido con esta membrana en función del aumento en la presión de operación. El valor de  $AUV_{254}$  correspondiente a la presión 0.35 MPa es significativamente superior a los valores de  $AUV_{254}$  correspondientes a las otras dos presiones (la barra LSD del primero está muy lejos de las barras LSD de los otros dos puntos). En cambio, los valores de  $AUV_{254}$  que corresponden a las presiones 0.52 y 0.69 MPa son estadísticamente equivalentes y significativamente menores respecto de la presión 0.35 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.3.b).
2. Los datos cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Los tratamientos tienen la misma variancia (Figura A.5.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.3.d).



**Figura A.5.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-  $AUV_{254}$ : (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.5.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.5.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: SDT (mg/L).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.5.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula. No es significativo el cambio en los SDT por el cambio de presión.
2. Las réplicas no influyen en los SDT medidos.

**Tabla A.5.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	4486.333	2	2243.167	11.796	0.078
Réplica	2992.667	1	2992.667	15.737	0.058
Error	380.333	2	190.167		
Total	1301492.000	6			

**A.5.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.5.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ; (446<sub>0.35</sub> = 445<sub>0.52</sub>)
- $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; (446<sub>0.35</sub> = 503<sub>0.69</sub>)
- $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; (445<sub>0.52</sub> = 503<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.5.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	1.0000	13.79009	0.949	-58.3340	60.3340
	0.69	-57.5000	13.79009	0.053	-116.8340	1.8340
0.52	0.35	-1.0000	13.79009	0.949	-60.3340	58.3340
	0.69	-58.5000	13.79009	0.051	-117.8340	0.8340
0.69	0.35	57.5000	13.79009	0.053	-1.8340	116.8340
	0.52	58.5000	13.79009	0.051	-0.8340	117.8340

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la Figura A.5.4.a se puede observar un incremento en el contenido de SDT del permeado producido con esta membrana –por efecto del aumento en la presión- que parece ser substancial. Sin embargo, con base en los intervalos de confianza de las medias de SDT, el contenido de SDT del permeado producido con la presión de 0.69 MPa (que en la gráfica parece significativamente superior) es estadísticamente equivalente al contenido de SDT de los permeado producidos con las presiones 0.35 y 0.52 MPa (que son estadísticamente iguales entre sí pero que se ven notablemente menores en la gráfica de medias LSD).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.4.b).
- No es muy claro el cumplimiento del supuesto de variancia constante. Los tratamientos no tienen la misma variación. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.5.4.c).
- Hay una tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.4.d).

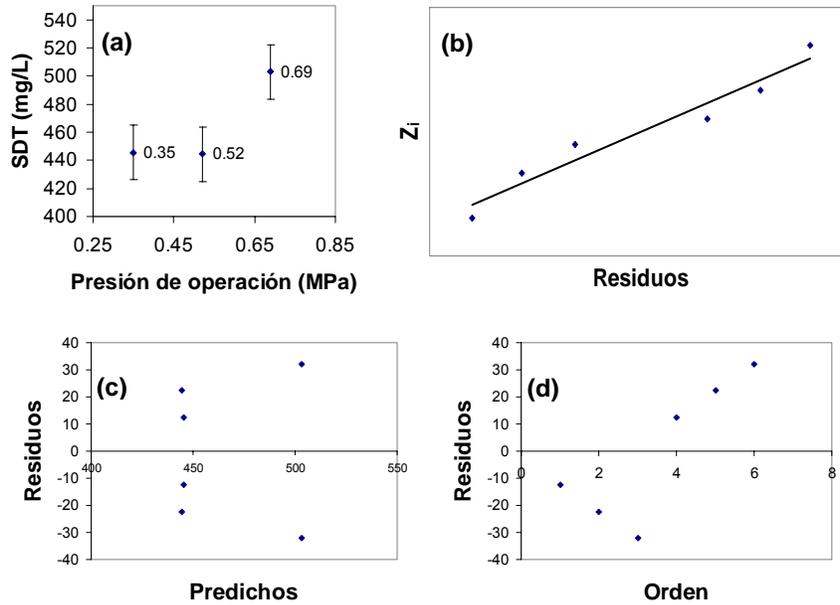


Figura A.5.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.5.5. Conductividad**

**A.5.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. La variación por réplica es significativa. Fue correcto bloquear la réplica. La réplica influye sobre las mediciones realizadas.
3. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.5.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.048	2	0.024	93.755	0.000
Réplica	0.040	1	0.040	158.729	0.000
Error	0.007	26	0.000		
Total	12.280	30			

**A.5.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta:  
 Conductividad (mS/cm).

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.5.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(0.59_{0.35} \neq 0.63_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.59_{0.35} \neq 0.69_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.63_{0.52} \neq 0.69_{0.69})$

**Tabla A.5.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0390(*)	0.00713	0.000	-0.0537	-0.0243
	0.69	-0.0970(*)	0.00713	0.000	-0.1117	-0.0823
0.52	0.35	0.0390(*)	0.00713	0.000	0.0243	0.0537
	0.69	-0.0580(*)	0.00713	0.000	-0.0727	-0.0433
0.69	0.35	0.0970(*)	0.00713	0.000	0.0823	0.1117
	0.52	0.0580(*)	0.00713	0.000	0.0433	0.0727

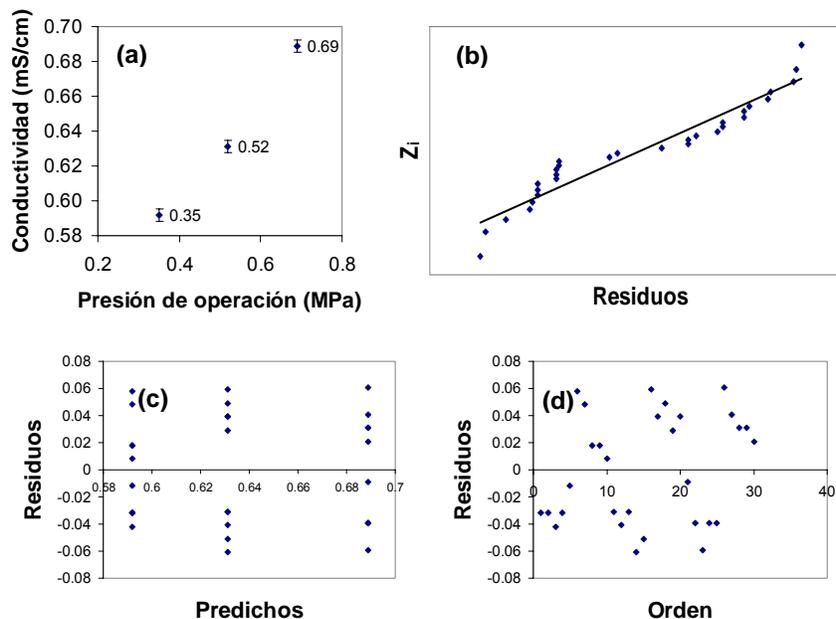
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.5.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se puede observar en la Figura A.5.5.a de medias LSD, el incremento en la presión de operación afecta (aumenta) la conductividad del permeado producido con esta membrana. Los tres puntos (presiones) están suficientemente separados y sus barras LSD no se superponen.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.5.b).
2. Los datos cumplen el supuesto de variancia constante (no se forman conos). Los tratamientos tienen la misma variancia (Figura A.5.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.5.d).



**Figura A.5.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.5.6. Turbiedad**

**A.5.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.5.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula. Al menos un par de medias son diferentes.
2. Las réplicas influyen en las turbiedades medidas.
3. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.5.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.002	2	0.001	4.017	0.026
Réplica	0.006	1	0.006	26.189	0.000
Error	0.009	38	0.000		
Total	0.053	42			

**A.5.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.5.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (0.03<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.04<sub>0.52</sub>)
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; (0.03<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.02<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; (0.04<sub>0.52</sub>  $\neq$  0.02<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.5.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0121(*)	0.00581	0.043	-0.0239	-0.0004
	0.69	0.0036	0.00581	0.543	-0.0082	0.0153
0.52	0.35	0.0121(*)	0.00581	0.043	0.0004	0.0239
	0.69	0.0157(*)	0.00581	0.010	0.0039	0.0275
0.69	0.35	-0.0036	0.00581	0.543	-0.0153	0.0082
	0.52	-0.0157(*)	0.00581	0.010	-0.0275	-0.0039

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

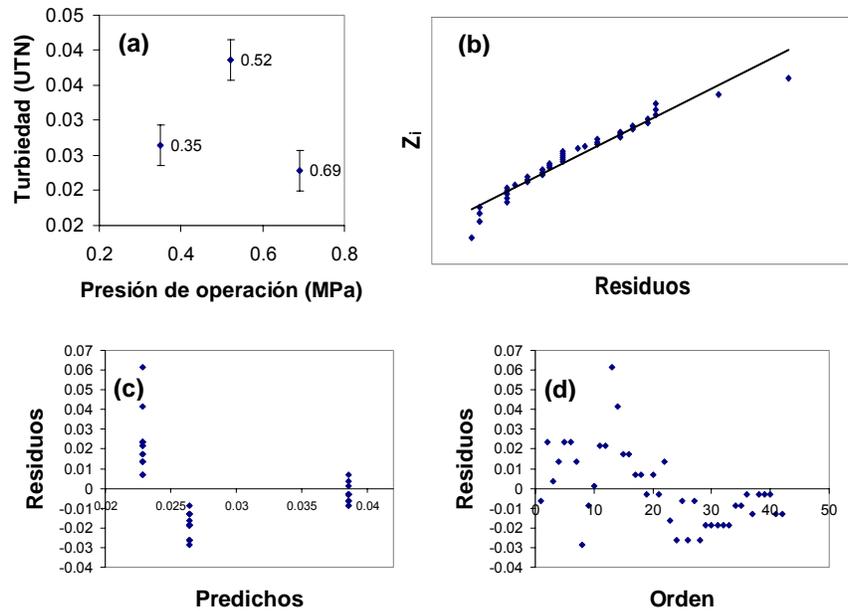
**A.5.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la Figura A.5.6.a de medias LSD se puede observar que la turbiedad de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.69 MPa (extremos) son estadísticamente iguales. Por ello, la turbiedad del permeado producido con la presión de 0.52 MPa, significativamente mayor, representa un máximo.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.6.b).

2. Se cumple el supuesto de variancia constante. Los tratamientos presentan la misma variación (Figura A.5.6.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.6.d).



**Figura A.5.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-turbiedad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

### A.5.7. pH

#### A.5.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: pH (Unidades).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.5.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La hipótesis nula se acepta. Al menos un par de medias son diferentes.
2. Las réplicas no influyen en las mediciones de pH.
3. No hay cambio significativo en el pH por el cambio de la presión.

**Tabla A.5.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	0.045	2	0.023	1.028	0.374
Réplica	0.050	1	0.050	2.278	0.145
Error	0.505	23	0.022		
Total	1651.090	27			

**A.5.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.5.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $7.8_{0.35} = 7.8_{0.52}$ )    2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $7.8_{0.35} = 7.9_{0.69}$ )    3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $7.8_{0.52} = 7.9_{0.69}$ )

**Tabla A.5.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.0556	0.06988	0.435	-0.2001	0.0890
	0.69	-0.1000	0.06988	0.166	-0.2446	0.0446
0.52	0.35	0.0556	0.06988	0.435	-0.0890	0.2001
	0.69	-0.0444	0.06988	0.531	-0.1890	0.1001
0.69	0.35	0.1000	0.06988	0.166	-0.0446	0.2446
	0.52	0.0444	0.06988	0.531	-0.1001	0.1890

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Como se puede apreciar en la Figura A.5.7.a LSD el pH del permeado producido con esta membrana aumenta ligeramente con el incremento de la presión de operación. No obstante, este incremento carece de significación por las variaciones que presentó el experimento. Los valores de pH de los permeados producidos con las presiones 0.35, 0.52 y 0.69 MPa son estadísticamente equivalentes (las barras LSD se sobreponen).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.7.b).
2. Se cumple el supuesto de variancia constante. Los tratamientos presentan la misma variación (Figura A.5.7.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.7.d).

**A.5.8. Alcalinidad**

**A.5.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$

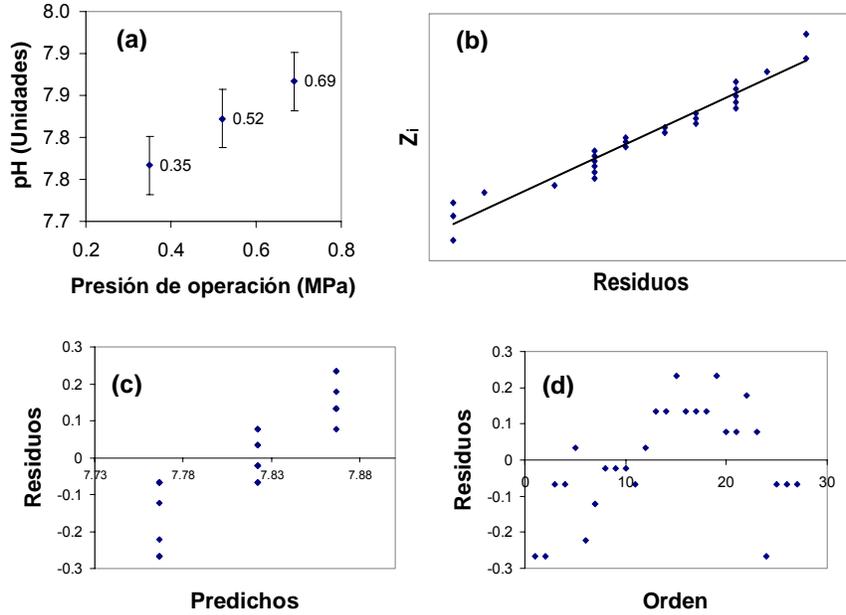


Figura A.5.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

Del análisis de variancia (Tabla A.5.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula. Al menos un par de medias son diferentes.
2. Las réplicas influyen en las mediciones de alcalinidad.
3. Las presiones cambian la alcalinidad del permeado.

Tabla A.5.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana YMDKSP1905

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	643.000	2	321.500	21.198	0.045
Réplica	620.167	1	620.167	40.890	0.024
Error	30.333	2	15.167		
Total	61895.000	6			

### A.5.8.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.5.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ; ( $91_{0.35} = 95_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $91_{0.35} \neq 115_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $95_{0.52} \neq 115_{0.69}$ ).

**Tabla A.5.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-3.5000	3.89444	0.464	-20.2564	13.2564
	0.69	-23.5000(*)	3.89444	0.026	-40.2564	-6.7436
0.52	0.35	3.5000	3.89444	0.464	-13.2564	20.2564
	0.69	-20.0000(*)	3.89444	0.036	-36.7564	-3.2436
0.69	0.35	23.5000(*)	3.89444	0.026	6.7436	40.2564
	0.52	20.0000(*)	3.89444	0.036	3.2436	36.7564

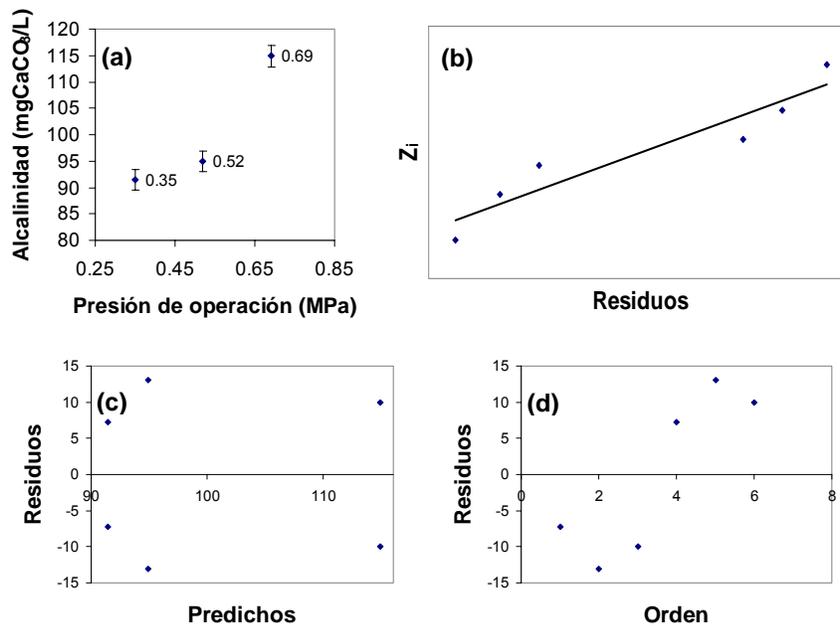
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La Figura A.5.8.a LSD confirma los resultados del método analítico de comparaciones múltiples. Las alcalinidades de los permeados producidos con las presiones de operación 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente equivalentes (las barras LSD se traslapan) y significativamente inferiores a la alcalinidad del permeado producido con la presión de 0.69 MPa. Así, se observa que la alcalinidad del permeado producido con esta membrana tiende a aumentar con el incremento de la presión de operación.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos provienen de una distribución normal (Figura A.5.8.b).
2. No se cumple el supuesto de variancia constante. Los tratamientos presentan variaciones distintas (Figura A.5.8.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.8.d).



**Figura A.5.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.5.9. Dureza**

**A.5.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.5.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula. Al menos un par de medias son diferentes.
2. Las réplicas no influyen en las durezas medidas.
3. Las presiones cambian la dureza del permeado.

**Tabla A.5.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de dureza obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Presión	889.000	2	444.500	35.560	0.027
Réplica	216.000	1	216.000	17.280	0.053
Error	25.000	2	12.500		
Total	10730.000	6			

**A.5.9.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Dureza (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.5.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana YMDKSP1905. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $27_{0.35} = 38_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $27_{0.35} \neq 56_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $38_{0.52} \neq 56_{0.69}$ )

**Tabla A.5.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana YMDKSP1905**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-11.0000	3.53553	0.090	-26.2122	4.2122
	0.69	-29.5000(*)	3.53553	0.014	-44.7122	-14.2878
0.52	0.35	11.0000	3.53553	0.090	-4.2122	26.2122
	0.69	-18.5000(*)	3.53553	0.035	-33.7122	-3.2878
0.69	0.35	29.5000(*)	3.53553	0.014	14.2878	44.7122
	0.52	18.5000(*)	3.53553	0.035	3.2878	33.7122

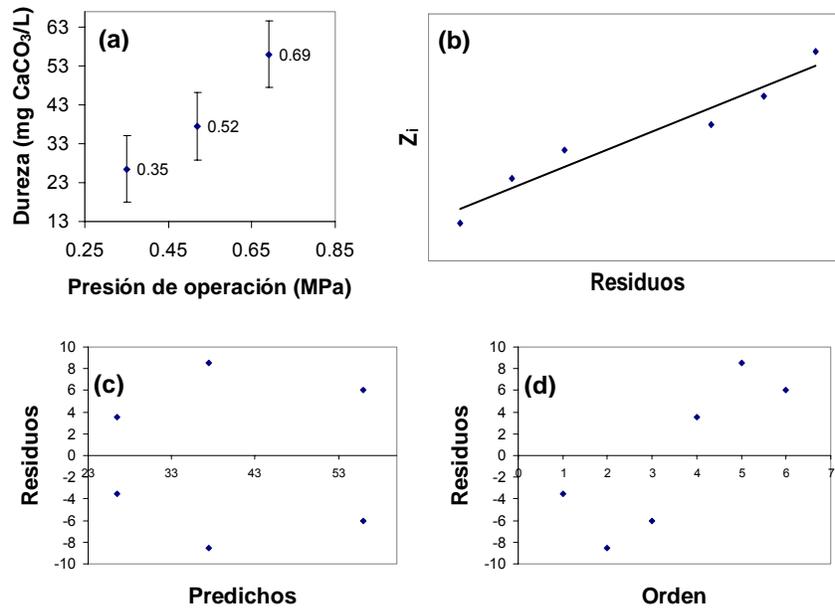
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.5.9.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Como se observa en la Figura A.5.9.a de medias (LSD), se detecta un incremento significativo en la dureza del permeado producido con esta membrana en función de la presión de operación. Las medias de la dureza de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente equivalentes pero ambas son significativamente menores a la dureza del permeado producido con la presión de 0.69 MPa. Por ello, se considera que el incremento en la presión de operación aumenta la dureza del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Se cumple el supuesto de normalidad del modelo. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.5.9.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones diferentes. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.5.9.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.5.9.d).



**Figura A.5.9 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-dureza: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.6. Membrana 302984**

**A.6.1. Flux**

**A.6.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación. Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$   
 Variable de respuesta: Flux ( $L/m^2 \cdot h$ )  
 $\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.6.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	434.652	2	217.326	1651.568	0.000
Entre tratamientos	3.421	26	0.132		
Total	438.073	28			

**A.6.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux ( $L/m^2 \cdot h$ ) Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.6.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $6_{0.35} \neq 9_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $6_{0.35} \neq 16_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $9_{0.52} \neq 16_{0.69}$ )

**Tabla A.6.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-2.751978(*)	0.154677	0.000	-3.06992	-2.43403
	0.69	-9.978676(*)	0.175388	0.000	-10.33919	-9.61816
0.52	0.35	2.751978(*)	0.154677	0.000	2.43403	3.06992
	0.69	-7.226698(*)	0.175388	0.000	-7.58721	-6.86618
0.69	0.35	9.978676(*)	0.175388	0.000	9.61816	10.33919
	0.52	7.226698(*)	0.175388	0.000	6.86618	7.58721

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.6.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La Figura A.6.1.a LSD muestra diferencias significativas en el flux de permeado de esta membrana por efecto del aumento en la presión. Las barras de error son mínimas y ninguna se superpone. Así, se puede decir que la presión de operación incrementa el volumen de agua producida por esta membrana y que dicho incremento no es lineal sino, al parecer, exponencial.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.6.1.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan variaciones semejantes pero la presión 0.35 MPa presentó una variación mucho menor. Se considera que se cumple parcialmente con el supuesto de variancia constante (Figura A.6.1.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.1.d).

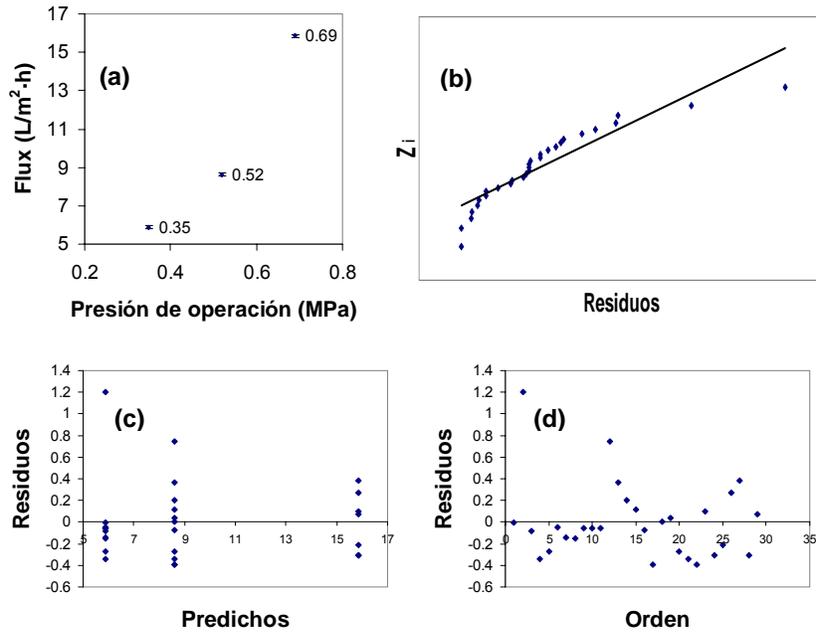


Figura A.6.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.6.2. Carbono Orgánico Total (COT)**

**A.6.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: COT (mg/L)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de todos los tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian el COT del permeado.

**Tabla A.6.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.017	2	0.008	7.088	0.073
Entre tratamientos	0.003	3	0.001		
Total	0.020	5			

### A.6.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD (Diferencia Mínima Significativa)

Variable de respuesta: COT (mg/L)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.6.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.774_{0.35} = 0.861_{0.52})$
- $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.774_{0.35} = 0.735_{0.69})$
- $\mu_{P2}\neq\mu_{P3}$ ;  $(0.861_{0.52} \neq 0.735_{0.69})$

**Tabla A.6.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.087000	0.034152	0.084	-0.19569	0.02169
	0.69	0.038500	0.034152	0.342	-0.07019	0.14719
0.52	0.35	0.087000	0.034152	0.084	-0.02169	0.19569
	0.69	0.125500(*)	0.034152	0.035	0.01681	0.23419
0.69	0.35	-0.038500	0.034152	0.342	-0.14719	0.07019
	0.52	0.125500(*)	0.034152	0.035	-0.23419	-0.01681

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.6.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

A pesar del resultado del ANOVA, el método analítico de comparación de medias detectó una diferencia significativa en la aplicación de la presión 0.69 MPa. En la gráfica LDS (Figura A.6.2.a) se puede observar que el COT de los permeados producidos con las presión de 0.52 y 0.69 MPa son significativamente diferentes aunque ambos son estadísticamente equivalentes con el COT del permeado producido con la presión 0.35 MPa (esto no se ve en la gráfica –traslape de barras- pero se puede verificar en la tabla de comparaciones múltiples). Se considera que se presentó un máximo en el COT del permeado con la aplicación de la presión de operación de 0.52 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.6.2.b).
- La presión 0.35 MPa presenta una variación diferente (menor). Por ello, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.6.2.c).
- No se detecta una tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.2.d).

### A.6.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)

#### A.6.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
- Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

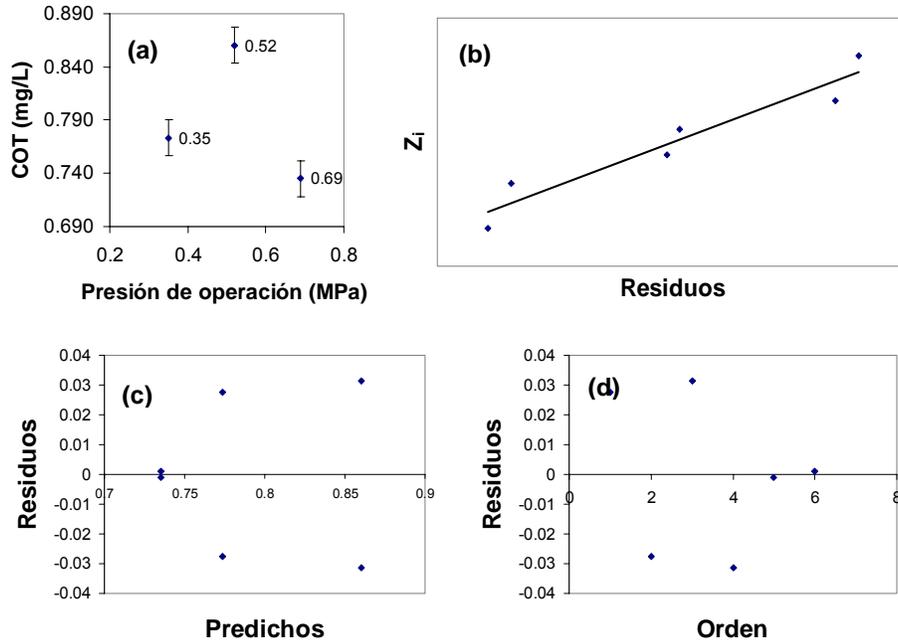


Figura A.6.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

Tabla A.6.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302984

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	31.000	0.010
Entre tratamientos	0.000	3	0.000		
Total	0.000	5			

A.6.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> cm<sup>-1</sup>

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.6.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

- μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (0.011<sub>0.35</sub>≠0.009<sub>0.52</sub>)
- μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.011<sub>0.35</sub>≠0.008<sub>0.69</sub>)
- μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.009<sub>0.52</sub>=0.008<sub>0.69</sub>)

Tabla A.6.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302984

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.002500(*)	0.000408	0.009	0.00120	0.00380
	0.69	0.003000(*)	0.000408	0.005	0.00170	0.00430
0.52	0.35	-0.002500(*)	0.000408	0.009	-0.00380	-0.00120
	0.69	0.000500	0.000408	0.308	-0.00080	0.00180
0.69	0.35	-0.003000(*)	0.000408	0.005	-0.00430	-0.00170
	0.52	-0.000500	0.000408	0.308	-0.00180	0.00080

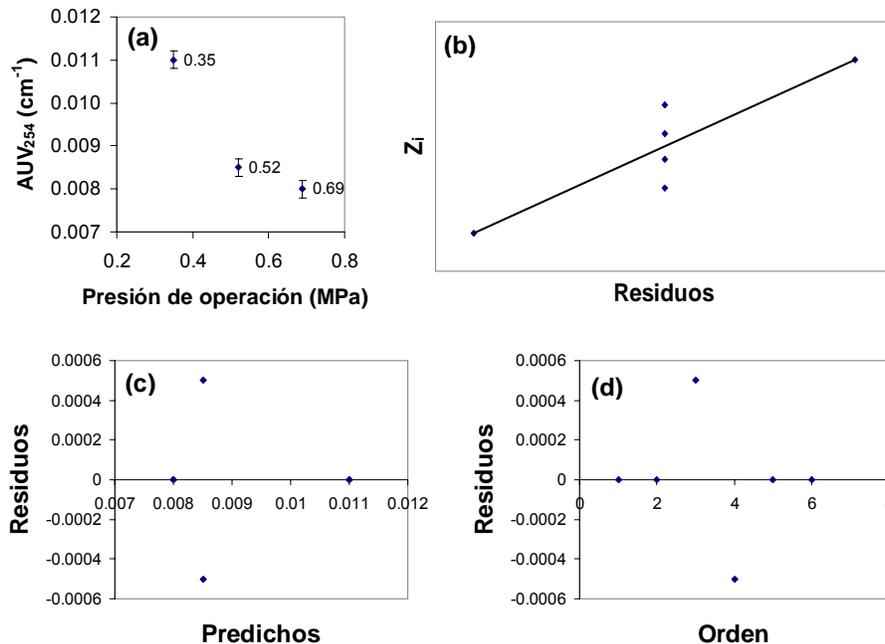
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.6.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias (Figura A.6.3.a) muestra un decremento significativo en la  $AUV_{254}$  del permeado producido con esta membrana por efecto de la presión de operación. Los valores de la  $AUV_{254}$  de los permeados producidos con las presiones 0.52 y 0.69 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD se superponen) y significativamente superiores a la  $AUV_{254}$  del permeado producido con la presión 0.35 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.6.3.b).
2. Sólo la presión 0.52 MPa presenta una variación diferente. Sin embargo, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.6.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.3.d).



**Figura A.6.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA- $AUV_{254}$ ; (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.6.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.6.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Sólidos Disueltos

Totales mg/L

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian los SDT del permeado.

**Tabla A.6.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	16361.231	2	8180.616	17.537	0.003
Entre tratamientos	2798.818	6	466.470		
Total	19160.049	8			

**A.6.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.6.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

- $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $328_{0.35} \neq 430_{0.52}$ )
- $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; ( $328_{0.35} = 361_{0.69}$ )
- $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $430_{0.52} \neq 361_{0.69}$ )

**Tabla A.6.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-102.38286(*)	17.63462	0.001	-145.5332	-59.2325
	0.69	-33.33286	17.63462	0.108	-76.4832	9.8175
0.52	0.35	102.38286(*)	17.63462	0.001	59.2325	145.5332
	0.69	69.05000(*)	17.63462	0.008	25.8996	112.2004
0.69	0.35	33.33286	17.63462	0.108	-9.8175	76.4832
	0.52	-69.05000(*)	17.63462	0.008	-112.2004	-25.8996

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.6.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.6.4.a) se observa que los SDT de los permeados producidos con las tres presiones de operación son, en apariencia, significativamente diferentes (las barras de LSD no se traslapan). Sin embargo, los intervalos de confianza (95%) detectan que los SDT de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.69 MPa son estadísticamente equivalentes. Entonces, se puede decir que se presentó un contenido de SDT máximo en el permeado producido con la presión de operación intermedia de 0.52 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.6.4.b).
- Los tratamientos presentan variaciones ligeramente distintas. Se considera que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.6.4.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.4.d).

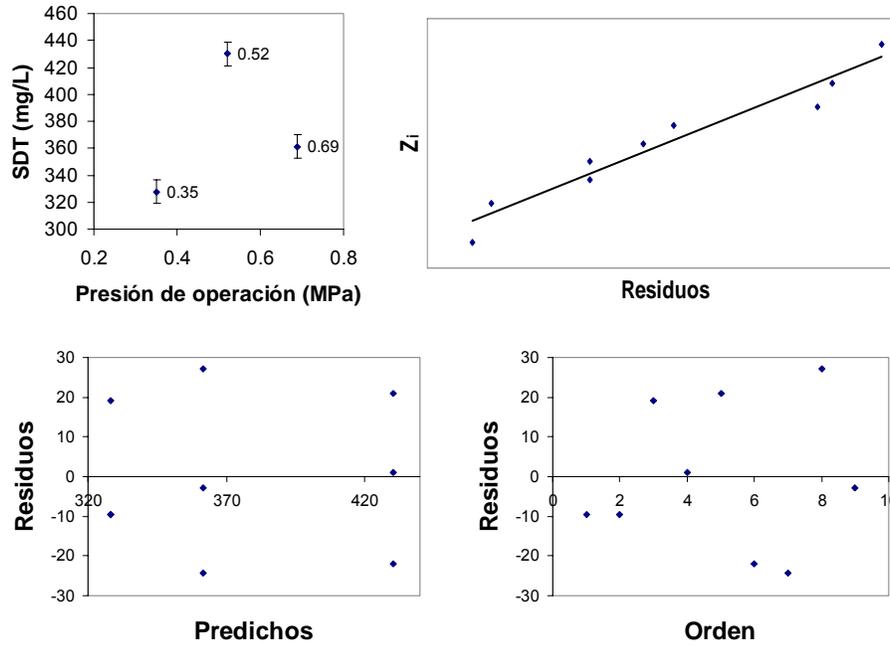


Figura A.6.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.6.5. Conductividad**

**A.6.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.6.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.004	2	0.002	27.000	0.012
Entre tratamientos	0.000	3	0.000		
Total	0.004	5			

**A.6.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.6.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (0.37<sub>.35</sub>  $\neq$  0.40<sub>.52</sub>)
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; (0.37<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.47<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; (0.40<sub>0.52</sub>  $\neq$  0.43<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.6.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.03000(*)	0.00816	0.035	-0.0560	-0.0040
	0.69	-0.06000(*)	0.00816	0.005	-0.0860	-0.0340
0.52	0.35	0.03000(*)	0.00816	0.035	0.0040	0.0560
	0.69	-0.03000(*)	0.00816	0.035	-0.0560	-0.0040
0.69	0.35	0.06000(*)	0.00816	0.005	0.0340	0.0860
	0.52	0.03000(*)	0.00816	0.035	0.0040	0.0560

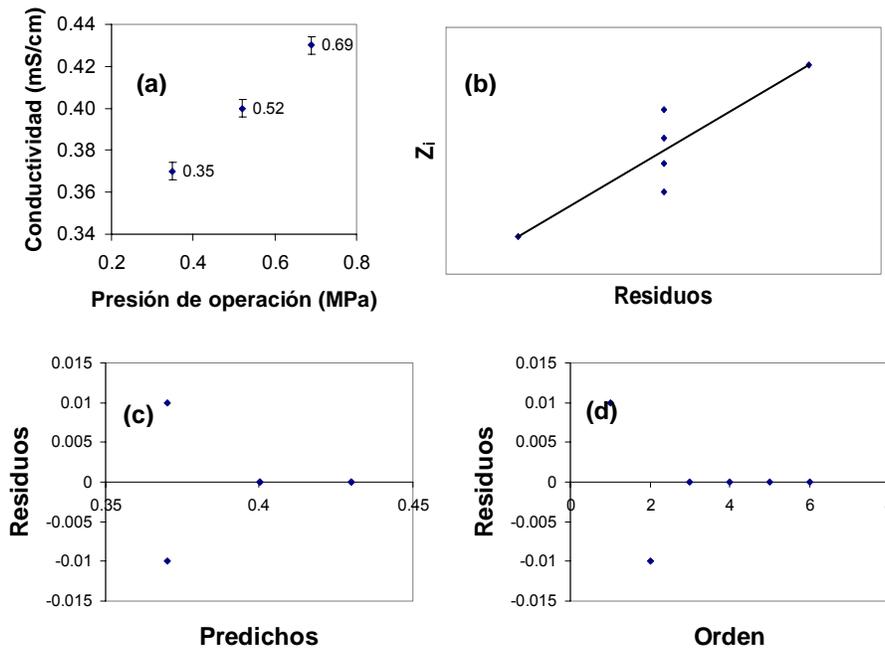
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.6.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En este caso, la gráfica muestra de medias LSD (Figura A.6.5.a) con toda claridad que la conductividad del permeado producido con esta membrana es directamente proporcional a la presión de operación. En ningún caso se traslapan las barras LSD y todas las conductividades son significativamente diferentes.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal. Los puntos que se acumulan en el centro de la gráfica se deben a que las mediciones no presentaron variación, es decir, el valor correspondiente de los residuos fue cero (Figura A.6.5.b).
2. Sólo la presión 0.35 MPa presenta variación. Los otros tratamientos (0.52 y 0.69 MPa) no presentaron variación. Esto hace que no se pueda afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia. Se considera que no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.6.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.5.d).



**Figura A.6.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.6.6. Turbiedad**

**A.6.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: Todas las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.6.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	0.044	0.957
Entre tratamientos	0.017	18	0.001		
Total	0.018	20			

**A.6.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.6.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.13_{0.35} = 0.13_{0.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.13_{0.35} = 0.12_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.13_{0.52} = 0.12_{0.69})$

**Tabla A.6.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.00000	0.01663	1.000	-0.0349	0.0349
	0.69	0.00429	0.01663	0.800	-0.0307	0.0392
0.52	0.35	0.00000	0.01663	1.000	-0.0349	0.0349
	0.69	0.00429	0.01663	0.800	-0.0307	0.0392
0.69	0.35	-0.00429	0.01663	0.800	-0.0392	0.0307
	0.52	-0.00429	0.01663	0.800	-0.0392	0.0307

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

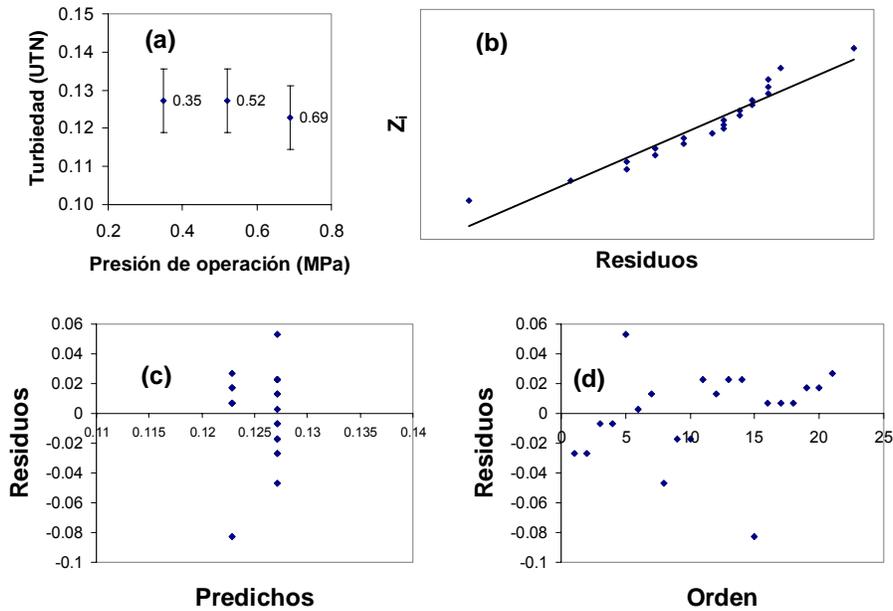
**A.6.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.6.6.a) se observa que la turbiedad del permeado producido con esta membrana no presenta cambios por el incremento en la presión. Las medias varían muy poco y las barras LSD se superponen en todos los casos. Es importante hacer notar que la turbiedad de los permeados producidos es muy baja, cercana a los límites de detección del equipo.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.6.6.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan variaciones semejantes. Se considera que se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.6.6.c).

3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.6.d).



**Figura A.6.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

**A.6.7. pH**

**A.6.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: pH (Unidades)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el pH del permeado.

**Tabla A.6.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	3.330	2	1.665	111.000	0.002
Entre tratamientos	0.045	3	0.015		
Total	3.375	5			

**A.6.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.6.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(8.9_{0.35} \neq 7.4_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ;  $(8.9_{0.35} \neq 7.3_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ;  $(7.4_{0.52} = 7.3_{0.69})$

**Tabla A.6.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	1.50000(*)	0.12247	0.001	1.1102	1.8898
	0.69	1.65000(*)	0.12247	0.001	1.2602	2.0398
0.52	0.35	-1.50000(*)	0.12247	0.001	-1.8898	-1.1102
	0.69	0.15000	0.12247	0.308	-0.2398	0.5398
0.69	0.35	-1.65000(*)	0.12247	0.001	-2.0398	-1.2602
	0.52	-0.15000	0.12247	0.308	-0.5398	0.2398

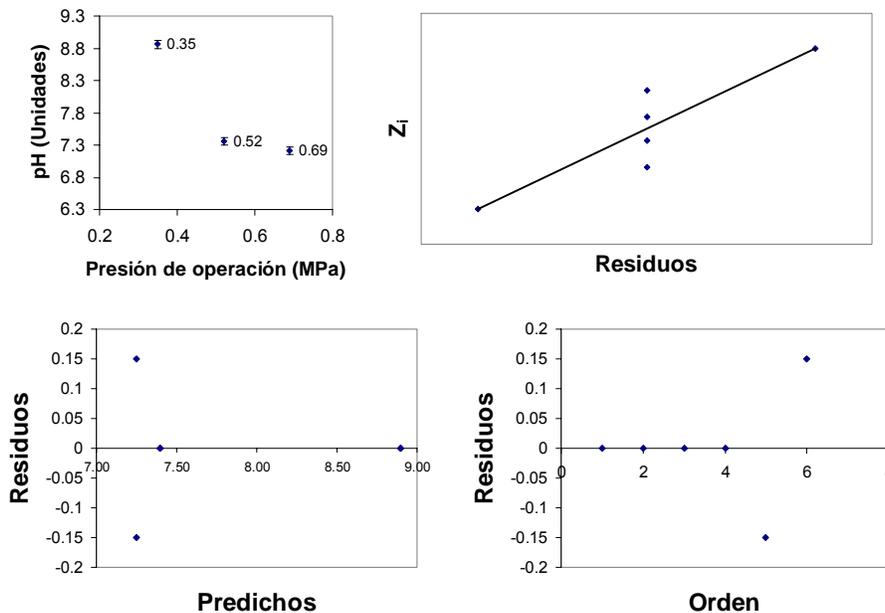
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.6.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la grafica de medias LSD (Figura A.6.7.a) se puede apreciar que el aumento en la presión de operación disminuye el pH del permeado producido con esta membrana. El pH del permeado producido con la presión de 0.35 MPa es significativamente mayor que el pH de los permeados producidos con las presiones de 0.52 y 0.69 MPa. Estos últimos son estadísticamente equivalentes (las barras LSD se sobreponen)

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal. Se acumulan algunos datos en el centro de la gráfica porque las mediciones correspondientes no presentaron variación (Figura A.6.7.b).
2. Sólo la presión 0.69 MPa presenta variación y ésta es mínima. Sin embargo, no se puede afirmar que todos los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.6.7.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.7.d).



**Figura A.6.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

### A.6.8. Alcalinidad

#### A.6.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como

CaCO<sub>3</sub>)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.6.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la alcalinidad del permeado.

**Tabla A.6.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302984**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	8025.003	2	4012.501	406.540	0.000
Entre tratamientos	59.219	6	9.870		
Total	8084.222	8			

#### A.6.8.2. Método de comparaciones múltiples

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>) Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.6.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302984. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $92_{0.35} \neq 160_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $92_{0.35} \neq 101_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $160_{0.52} \neq 101_{0.69}$ )

**Tabla A.6.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302984**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-67.27721(*)	2.56514	0.000	-73.5539	-61.0005
	0.69	-8.78233(*)	2.56514	0.014	-15.0590	-2.5057
0.52	0.35	67.27721(*)	2.56514	0.000	61.0005	73.5539
	0.69	58.49488(*)	2.56514	0.000	52.2182	64.7715
0.69	0.35	8.78233(*)	2.56514	0.014	2.5057	15.0590
	0.52	-58.49488(*)	2.56514	0.000	-64.7715	-52.2182

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

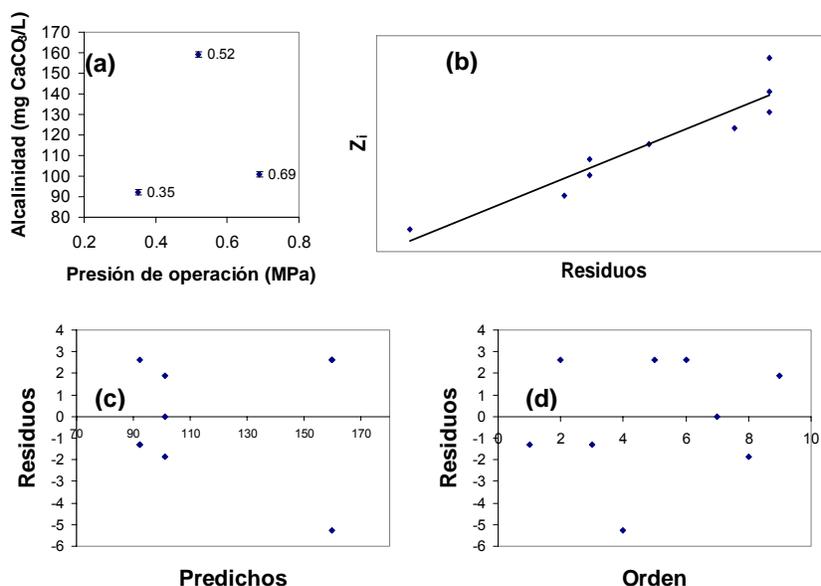
#### A.6.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En el análisis de las membranas anteriores la alcalinidad no aporta información sobre el efecto de la presión en la calidad del permeado debido a variaciones importantes en el experimento. En contraste, en este caso, la gráfica de medias LSD muestra diferencias significativas en la alcalinidad de los permeados producidos con las tres presiones aplicadas (0.35, 0.52 y 0.69 MPa) y se detecta un máximo en la presión intermedia (0.52 MPa). Sin embargo, es importante hacer notar que esta membrana se corrió sólo una vez para cada presión y por ello no se registraron variaciones por réplica. Así, las barras de error LSD son mínimas en extensión y los tratamientos (presiones) significativamente distintos (Figura A.6.8.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.6.8.b).

2. Sólo la presión 0.52 MPa presenta una variación diferente (mayor). Por ello, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.6.8.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.6.8.d).



**Figura A.6.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

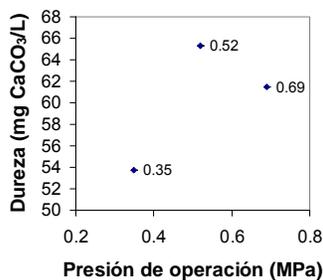
### A.6.9. Dureza (EDTA)

#### A.6.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Este parámetro no presentó variaciones. Las mediciones realizadas en la prueba de las tres presiones muestran diferencias pero dentro de la aplicación de cada presión (tratamiento) no se presentaron variaciones. Por ello, no es posible aplicar el análisis de variancia puesto que su resultado es obvio: las presiones cambian la dureza del permeado.

#### A.6.9.2. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica LSD (Figura A.6.9) muestra las medias de las durezas obtenidas en la aplicación de las tres presiones de operación (0.35, 0.52 y 0.69 MPa). Los puntos no tienen barras de error pues en este caso no se presentaron variaciones en las mediciones realizadas en la prueba de cada presión (variación dentro de tratamientos). Así, aunque esta información debe ser tomada con cautela, se observa un aumento en la dureza del permeado producido con esta membrana como efecto del aumento en la presión, o bien, un máximo (parcial) en la aplicación de la presión intermedia (0.52 MPa).



**Figura A.6.9 Gráfica de medias LSD**

**A.7. Membrana 302986**

**A.7.1. Flux**

**A.7.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)  
 α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.7.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.7.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana 302986**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	91.891	2	45.946	29.441	0.000
Entre tratamientos	40.576	26	1.561		
Total	132.467	28			

**A.7.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.7.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (13<sub>0.35</sub> ≠ 14<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (13<sub>0.35</sub> ≠ 17<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (14<sub>0.52</sub> ≠ 14<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.7.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302986**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-1.235337(*)	0.550863	0.034	-2.36765	-0.10302
	0.69	-4.338285(*)	0.570197	0.000	-5.51034	-3.16623
0.52	0.35	1.235337(*)	0.550863	0.034	0.10302	2.36765
	0.69	-3.102948(*)	0.607021	0.000	-4.35070	-1.85520
0.69	0.35	4.338285(*)	0.570197	0.000	3.16623	5.51034
	0.52	3.102948(*)	0.607021	0.000	1.85520	4.35070

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.7.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.7.1.a) se observa que el incremento en la presión de operación aumenta significativamente el flux de permeado de esta membrana. Las barras LSD no se traslapan en ningún caso y al parecer el incremento del flux con la aplicación de la presión de 0.69 MPa es mucho más sustancial que el de la presión de 0.52 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.1.b).
2. La presión 0.52 MPa presenta mayor variación que las otras dos (variancias iguales). No se puede decir que se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.7.1.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.1.d).

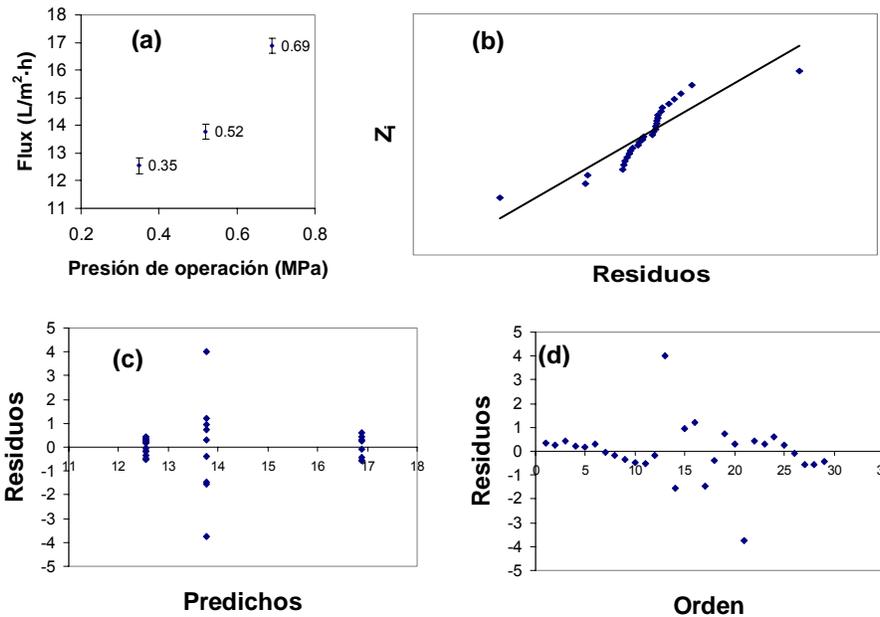


Figura A.7.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.7.2. Carbono Orgánico Total (COT)

#### A.7.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: COT (mg/L)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.7.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: todas las medias de tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian el carbono orgánico total del permeado.

Tabla A.7.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana 302986

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.006	2	0.003	1.878	0.296
Entre tratamientos	0.005	3	0.002		
Total	0.010	5			

### A.7.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD (Diferencia Mínima Significativa)

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.7.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.739_{0.35} = 0.657_{0.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.739_{0.35} = 0.648_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.657_{0.52} = 0.648_{0.69})$

**Tabla A.7.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302986**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.068500	0.039023	0.177	-0.05569	0.19269
	0.69	0.062000	0.039023	0.210	-0.06219	0.18619
0.52	0.35	-0.068500	0.039023	0.177	-0.19269	0.05569
	0.69	-0.006500	0.039023	0.878	-0.13069	0.11769
0.69	0.35	-0.062000	0.039023	0.210	-0.18619	0.06219
	0.52	0.006500	0.039023	0.878	-0.11769	0.13069

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.7.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD (Figura A.7.2.a) se observa una disminución (significativa con base en el método LSD) en el COT del permeado producido con esta membrana como efecto del incremento en la presión. No obstante, los intervalos de confianza (tabla del método de comparaciones múltiples) se superponen y por ello se decide que el cambio no es significativo.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.2.b).
2. La presión 0.52 MPa presenta mayor variación aunque las otras dos presentan variaciones semejantes. Por ello, no se puede afirmar que todos los tratamientos tengan las mismas variaciones (Figura A.7.2.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.2.d).

### A.7.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)

#### A.7.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.7.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

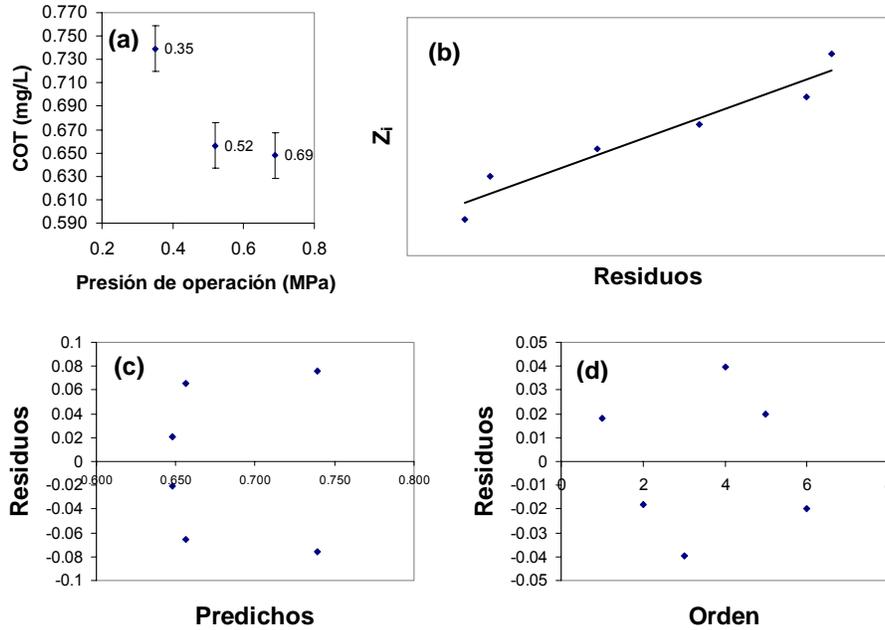


Figura A.7.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

Tabla A.7.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302986

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	26.333	0.001
Entre tratamientos	0.000	6	0.000		
Total	0.000	8			

A.7.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> cm<sup>-1</sup>

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.7.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

- μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (0.003<sub>0.35</sub>≠0.007<sub>0.52</sub>)
- μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.003<sub>0.35</sub>≠0.006<sub>0.69</sub>)
- μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.007<sub>0.52</sub>=0.006<sub>0.69</sub>)

Tabla A.7.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302986

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.003333(*)	0.000471	0.000	-0.00449	-0.00218
	0.69	-0.002333(*)	0.000471	0.003	-0.00349	-0.00118
0.52	0.35	0.003333(*)	0.000471	0.000	0.00218	0.00449
	0.69	0.001000	0.000471	0.078	-0.00015	0.00215
0.69	0.35	0.002333(*)	0.000471	0.003	0.00118	0.00349
	0.52	-0.001000	0.000471	0.078	-0.00215	0.00015

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.7.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD se observa que la presión de operación incrementa la  $AUV_{254}$  del permeado producido con esta membrana. Los valores de  $AUV_{254}$  de los permeados producidos con las presiones 0.52 y 0.69 MPa (estadísticamente equivalentes) son significativamente mayores al valor de  $AUV_{254}$  del permeado producido con la presión de 0.35 MPa (su barra LSD no se traslapan con las de los otros puntos; Figura A.7.3.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.3.b).
2. Sólo la presión 0.35 MPa presenta una variación diferente. Sin embargo, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.7.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.3.d).

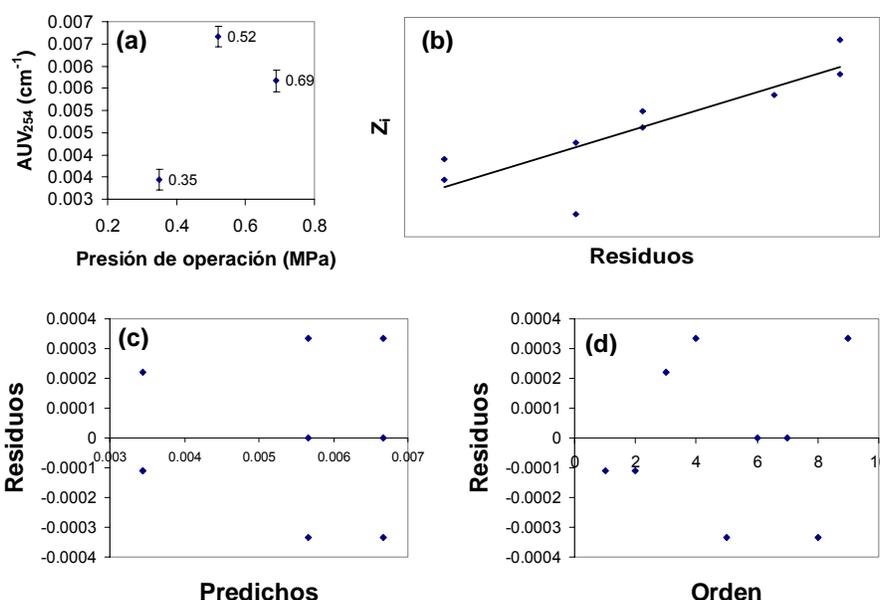


Figura A.7.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA- $AUV_{254}$ : (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.7.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)

#### A.7.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Sólidos Disueltos Totales mg/L

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.7.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian los SDT del permeado.

**Tabla A.7.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302986**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	23098.552	2	11549.276	6.420	0.042
Entre tratamientos	8994.829	5	1798.966		
Total	32093.381	7			

**A.7.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.7.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $173_{0.35} = 215_{0.52}$ )
- $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ; ( $173_{0.35} \neq 304_{0.69}$ )
- $\mu_{P2}\neq\mu_{P3}$ ; ( $215_{0.52} \neq 304_{0.69}$ )

**Tabla A.7.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302986**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-41.90643	38.71870	0.329	-141.4360	57.6232
	0.69	-130.95167(*)	38.71870	0.020	-230.4813	-31.4221
0.52	0.35	41.90643	38.71870	0.329	-57.6232	141.4360
	0.69	-89.04524(*)	34.63106	0.050	-178.0672	-0.0233
0.69	0.35	130.95167(*)	38.71870	0.020	31.4221	230.4813
	0.52	89.04524(*)	34.63106	0.050	0.0233	178.0672

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.7.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD muestra un incremento significativo en el contenido de SDT del permeado producido con esta membrana. Los SDT de los permeados producidos con las presiones de operación de 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD se traslapan). Mientras que los SDT del permeado producido con la presión de 0.69 MPa es significativamente mayor y su barra LSD no se sobrepone a ninguna de las anteriores (Figura A.7.4.a).

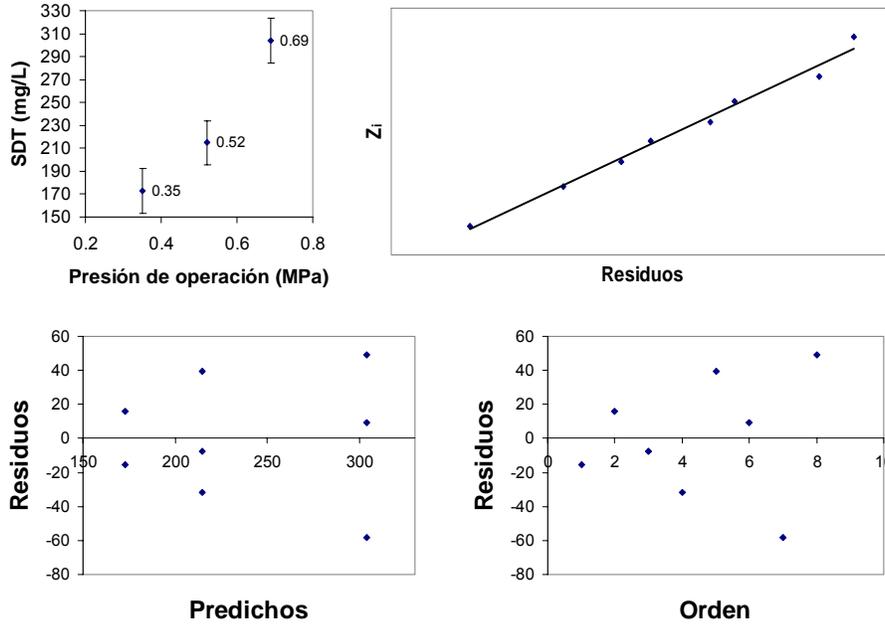
La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.4.b).
- Los tratamientos presentan variaciones distintas (se forma un cono). No se cumple el supuesto de variación constante (Figura A.7.4.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.4.d).

**A.7.5. Conductividad****A.7.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi}\neq\mu_{Pj}$  para algún  $i\neq j$



**Figura A.7.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

Del análisis de variancia (Tabla A.7.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.7.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302986**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.009	2	0.005	273.000	0.000
Entre tratamientos	0.000	3	0.000		
Total	0.009	5			

**A.7.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.7.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (0.19<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.23<sub>0.52</sub>)
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; (0.19<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.29<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; (0.23<sub>0.52</sub>  $\neq$  0.29<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.7.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302986**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.04000(*)	0.00408	0.002	-0.0530	-0.0270
	0.69	-0.09500(*)	0.00408	0.000	-0.1080	-0.0820
0.52	0.35	0.04000(*)	0.00408	0.002	0.0270	0.0530
	0.69	-0.05500(*)	0.00408	0.001	-0.0680	-0.0420
0.69	0.35	0.09500(*)	0.00408	0.000	0.0820	0.1080
	0.52	0.05500(*)	0.00408	0.001	0.0420	0.0680

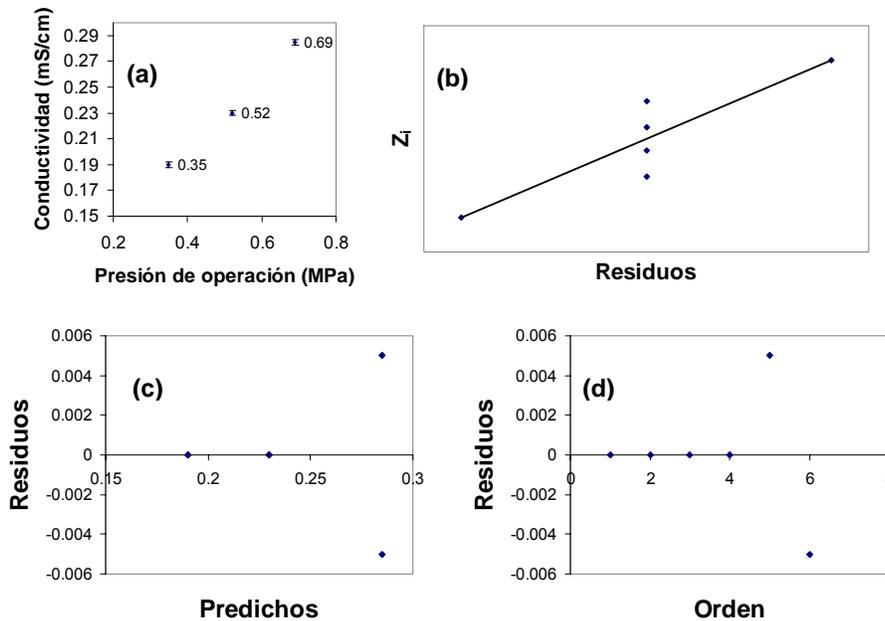
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.7.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD se puede apreciar cómo afecta la presión la conductividad del permeado producido con esta membrana. Las barras LSD no se traslapan en ningún caso. Por ello, se puede decir que el incremento en la presión de operación aumenta significativamente la conductividad del permeado (Figura A.7.5.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal. Los puntos se acumulan en el centro de la gráfica porque no presentaron variación (Figura A.7.5.b).
2. Sólo la presión 0.69 MPa presenta una variación mayor. Sin embargo, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.7.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.5.d).



**Figura A.7.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.7.6. Turbiedad**

**A.7.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.7.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.7.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302986**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.028	2	0.014	26.192	0.000
Entre tratamientos	0.010	18	0.001		
Total	0.037	20			

**A.7.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.7.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

- $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $0.02_{0.35} \neq 0.10_{0.52}$ )
- $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $0.02_{0.35} \neq 0.10_{0.69}$ )
- $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $0.10_{0.52} = 0.10_{0.69}$ )

**Tabla A.7.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302986**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.07714(*)	0.01231	0.000	-0.1030	-0.0513
	0.69	-0.07714(*)	0.01231	0.000	-0.1030	-0.0513
0.52	0.35	0.07714(*)	0.01231	0.000	0.0513	0.1030
	0.69	0.00000	0.01231	1.000	-0.0259	-0.0259
0.69	0.35	0.07714(*)	0.01231	0.000	0.0513	0.1030
	0.52	0.00000	0.01231	1.000	-0.0259	0.0259

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación &lt; 0.05.

**A.7.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Como se observa en la gráfica de medias LSD (Figura A.7.6.a), la turbiedad del permeado producido con la presión de operación de 0.35 MPa es significativamente menor a las turbiedades de los permeados producidos con las presiones de 0.52 y 0.69 MPa. Por ello, se afirma que el incremento en la presión de operación aumenta la turbiedad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.6.b).
- Los tratamientos presentan variaciones distintas. No se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.6.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.6.d).

**A.7.7. pH****A.7.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: pH (Unidades)

 $\alpha=0.05$ Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2} = \mu_{P3}$  $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

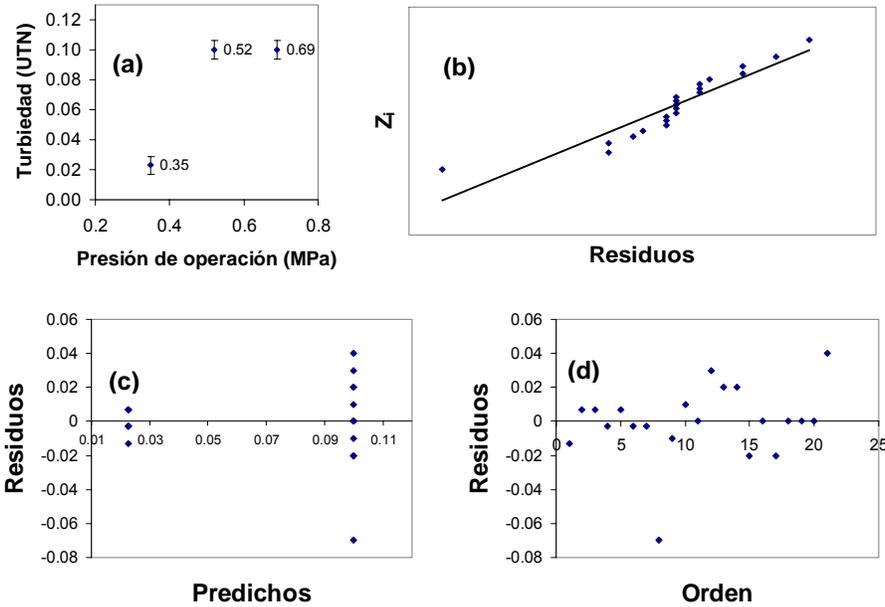


Figura A.7.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia

Del análisis de variancia (Tabla A.7.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el pH del permeado.

Tabla A.7.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana 302986

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	1.925	2	0.963	106.963	0.000
Entre tratamientos	0.108	12	0.009		
Total	2.033	14			

**A.7.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.7.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $7.6_{0.35} \neq 7.4_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.6_{0.35} \neq 8.3_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.4_{0.52} \neq 8.3_{0.69}$ )

Tabla A.7.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302986

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.20000(*)	0.06000	0.006	0.0693	0.3307
	0.69	-0.64000(*)	0.06000	0.000	-0.7707	-0.5093
0.52	0.35	-0.20000(*)	0.06000	0.006	-0.3307	-0.0693
	0.69	-0.84000(*)	0.06000	0.000	-0.9707	-0.7093
0.69	0.35	0.64000(*)	0.06000	0.000	0.5093	0.7707
	0.52	0.84000(*)	0.06000	0.000	0.7093	0.9707

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.7.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se observa en la gráfica de medias LSD (Figura A.7.7.a), se detectaron diferencias significativas en el pH de los permeados producidos con las tres presiones de operación (las barras LSD no se traslapan en ningún caso). La presión de 0.52 MPa produjo un permeado con un pH significativamente inferior al de los permeado producidos con las otras presiones. Sin embargo, la presión más alta (0.69 MPa) produjo un permeado con un pH muy superior a los otros (además de significativamente mayor). Entonces, si bien se presenta un mínimo en la presión intermedia, también se puede decir que el incremento en la presión de operación incrementa el pH del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.7.b).
2. Las variaciones de los tratamientos forman un cono. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.7.7.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.7.d).

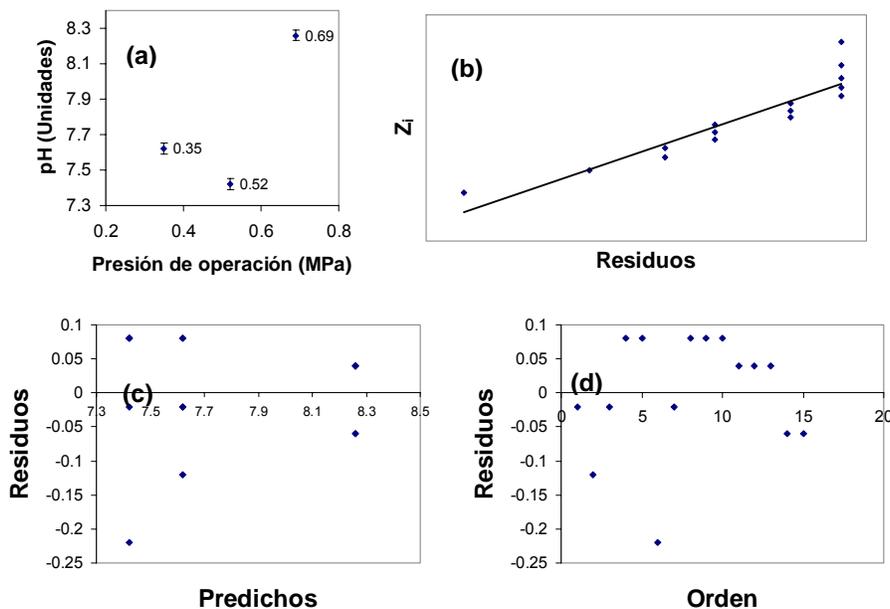


Figura A.7.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia

### A.7.8. Alcalinidad

#### A.7.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como  $\text{CaCO}_3$ )

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.7.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la alcalinidad del permeado.

**Tabla A.7.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302986**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	1133.892	2	566.946	326.090	0.000
Entre tratamientos	10.432	6	1.739		
Total	1144.324	8			

#### A.7.8.2. Método de comparaciones múltiples

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.7.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302986. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $40_{0.35} \neq 49_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $40_{0.35} \neq 67_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $49_{0.52} \neq 67_{0.69}$ )

**Tabla A.7.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302986**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-9.23580(*)	1.07661	0.000	-11.8702	-6.6014
	0.69	-27.04492(*)	1.07661	0.000	-29.6793	-24.4106
0.52	0.35	9.23580(*)	1.07661	0.000	6.6014	11.8702
	0.69	-17.80912(*)	1.07661	0.000	-20.4435	-15.1748
0.69	0.35	27.04492(*)	1.07661	0.000	24.4106	29.6793
	0.52	17.80912(*)	1.07661	0.000	15.1748	20.4435

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

#### A.7.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En general –en el análisis de todas las membranas- este parámetro no presentó cambios significativo por efecto de la presión de operación. No obstante, en este caso, debido a la ausencia de variación por réplica (la membrana se probó en una réplica) se detectan cambios significativos. La alcalinidad del permeado producido con esta membrana se incrementa significativamente con el aumento en la presión de operación (Figura A.7.8.a).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.7.8.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan diferentes variaciones. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.7.8.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.7.8.d).

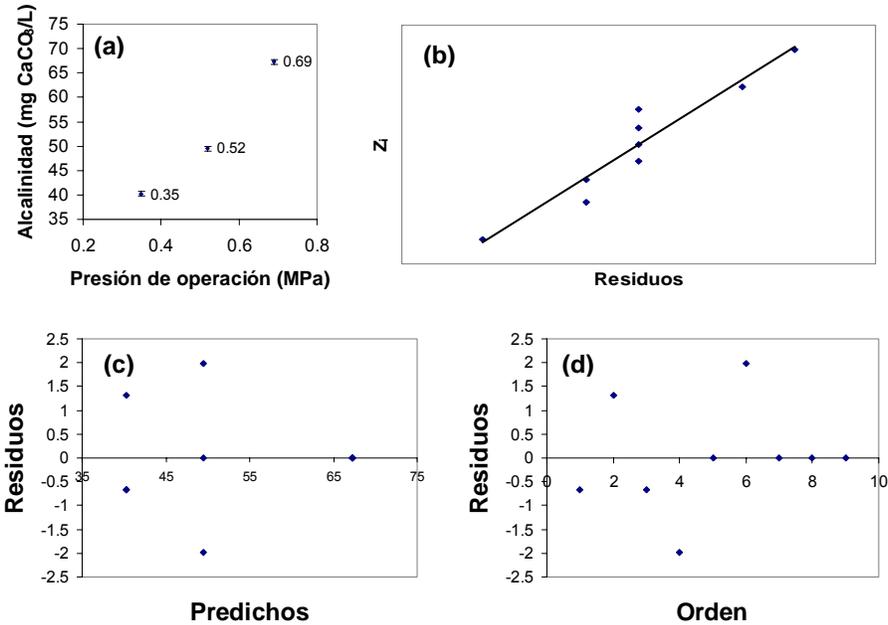


Figura A.7.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.7.9. Dureza (EDTA)**

**A.7.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación) y gráfica de medias**

Este parámetro no presentó variaciones dentro de las presiones aplicadas. Por ello, no tiene sentido aplicar el análisis de variancia. Sin embargo, se puede observar el incremento de la dureza en función de la presión de operación como se muestra en la gráfica siguiente (Figura A.7.9).

- 1.  $\mu_{P1}$  = 14 mg/L como  $\text{CaCO}_3$
- 2.  $\mu_{P1}$  = 21 mg/L como  $\text{CaCO}_3$
- 3.  $\mu_{P2}$  = 29 mg/L como  $\text{CaCO}_3$

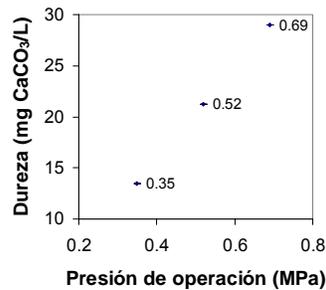


Figura A.7.9 Gráfica de medias

## A.8. Membrana 302988

### A.8.1. Flux

#### A.8.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.8.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana 302988**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	729.570	2	364.785	1880.123	0.000
Entre tratamientos	5.821	30	0.194		
Total	735.390	32			

#### A.8.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $17_{0.35} \neq 21_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $17_{0.35} \neq 29_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $21_{0.52} \neq 29_{0.69}$ )

**Tabla A.8.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-3.236941(*)	0.183866	0.000	-3.61245	-2.86144
	0.69	-11.34859(*)	0.188602	0.000	-11.73377	-10.96341
0.52	0.35	3.236941(*)	0.183866	0.000	2.86144	3.61245
	0.69	-8.111649(*)	0.192459	0.000	-8.50470	-7.71860
0.69	0.35	11.348590(*)	0.188602	0.000	10.96341	11.73377
	0.52	8.111649(*)	0.192459	0.000	7.71860	8.50470

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

#### A.8.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se observa en la gráfica de medias LSD (Figura A.8.1.a), el flux de permeado aumenta significativamente con el incremento en la presión de operación. La aplicación de la presión de 0.69 MPa produce un aumento más substancial que la aplicación de la presión de 0.52 MPa. Así, la relación parece exponencial

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.1.b).

- Los tratamientos (presiones) presentan la misma variación. Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.1.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.1.d).

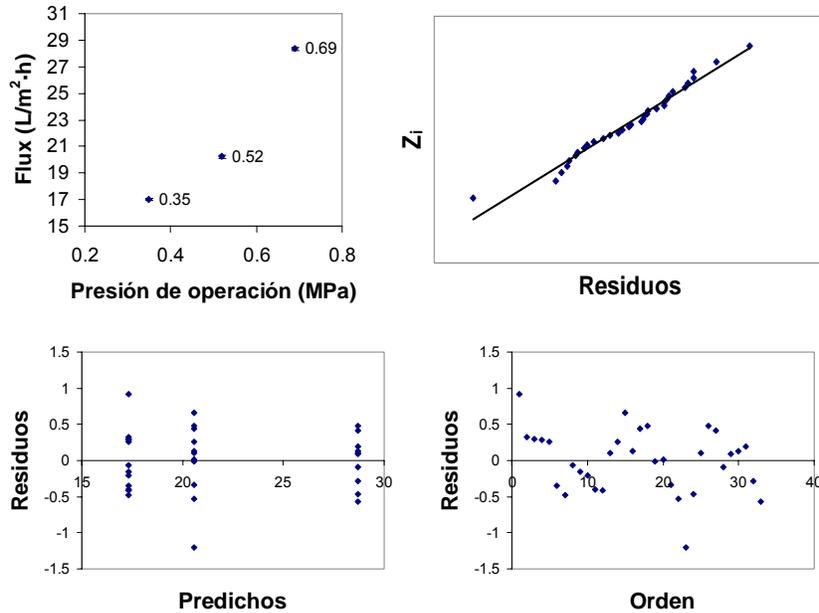


Figura A.8.1(a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.8.2. Carbono Orgánico Total (COT)

#### A.8.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: COT (mg/L).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se acepta la hipótesis nula: todas las medias de tratamientos (presiones) son iguales.
- Las presiones no cambian el carbón orgánico total del permeado.

Tabla A.8.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana 302988

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.243	2	0.122	7.521	0.068
Entre tratamientos	0.049	3	0.016		
Total	0.292	5			

#### A.8.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(1.766_{0.35} \neq 1.433_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ;  $(1.766_{0.35} = 1.335_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ;  $(1.433_{0.52} = 1.335_{0.69})$

**Tabla A.8.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.486000(*)	0.127207	0.032	0.08117	0.89083
	0.69	0.316500	0.127207	0.089	-0.08833	0.72133
0.52	0.35	0.486000(*)	0.127207	0.032	-0.89083	-0.08117
	0.69	-0.169500	0.127207	0.275	-0.57433	0.23533
0.69	0.35	-0.316500	0.127207	0.089	-0.72133	0.08833
	0.52	0.169500	0.127207	0.275	-0.23533	0.57433

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.8.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Se detecta (gráfica de medias LSD; Figura A.8.2.a) una disminución significativa en el COT del permeado producido con esta membrana por efecto del incremento en la presión de operación a pesar de que el ANOVA resultó no significativo. El contenido de COT de los permeados obtenidos con 0.35 y 0.52 MPa son significativamente diferentes, no obstante, el COT de los permeados obtenidos con 0.35 y 0.69 MPa es estadísticamente equivalente. Este resultado parece incongruente con la gráfica y por eso es importante hacer notar lo siguiente. Cada cantidad LSD tiene un intervalo de confianza calculado en base en la comparación respectiva, es decir, en este caso por ejemplo, el intervalo de confianza del número LSD para la comparación entre 0.35 y 0.52 MPa es mucho menor que el intervalo de confianza del LSD para la comparación entre 0.35 y 0.69 MPa. Por ello, de la primera comparación resulta una diferencia significativa y de la segunda una equivalencia estadística.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.2.b).
2. Los tratamientos tienen aproximadamente la misma variación. Se toma como válido el supuesto de variancia constante (Figura A.8.2.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.2.d).

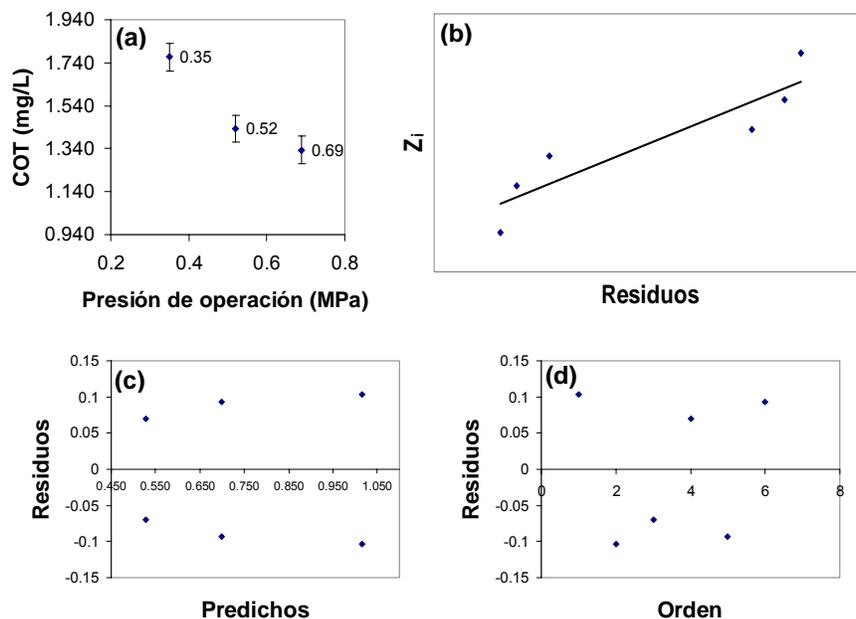


Figura A.8.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.8.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)

#### A.8.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>

H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.8.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula. Las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

Tabla A.8.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302988

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	1.653	0.268
Entre tratamientos	0.000	6	0.000		
Total	0.000	8			

#### A.8.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.8.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>; (0.004<sub>0.35</sub>=0.005<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.004<sub>0.35</sub>=0.004<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.005<sub>0.52</sub>=0.004<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.8.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.000667	0.002357	0.787	-0.00643	0.00510
	0.69	0.003333	0.002357	0.207	-0.00243	0.00910
0.52	0.35	0.000667	0.002357	0.787	-0.00510	0.00643
	0.69	0.004000	0.002357	0.141	-0.00177	0.00977
0.69	0.35	-0.003333	0.002357	0.207	-0.00910	0.00243
	0.52	-0.004000	0.002357	0.141	-0.00977	0.00177

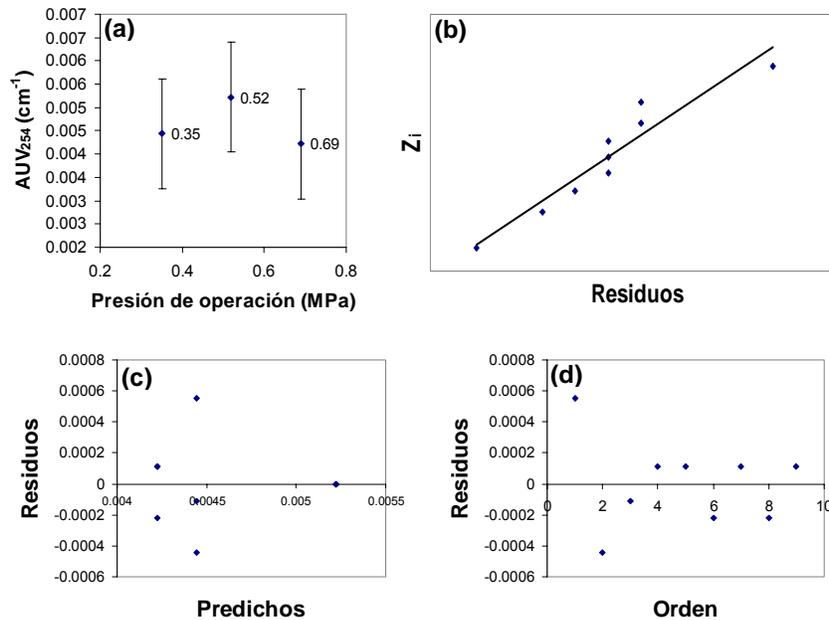
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.8.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.8.3.a) muestra con toda claridad el traslape de las barras LSD en todos los puntos. Esto corrobora los resultados obtenidos con el método analítico de comparaciones múltiples: las medias de todos los tratamientos son estadísticamente equivalentes.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.3.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones distintas. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.3.d).



**Figura A.8.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-AUV<sub>254</sub>: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.8.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.8.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: SDT (mg/L).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: todas las medias de tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones (a) cambian los sólidos disueltos (b) totales del permeado.

**Tabla A.8.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302988**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	1866.452	2	933.226	0.313	0.753
Entre tratamientos	8949.449	3	2983.150		
Total	10815.901	5			

**A.8.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; ( $286_{0.35} = 254_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; ( $286_{0.35} = 294_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; ( $254_{0.52} = 294_{0.69}$ )

**Tabla A.8.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	32.86000	54.61822	0.590	-140.9595	206.6795
	0.69	-7.86000	54.61822	0.895	-181.6795	165.9595
0.52	0.35	-32.86000	54.61822	0.590	-206.6795	140.9595
	0.69	-40.72000	54.61822	0.510	-214.5395	133.0995
0.69	0.35	7.86000	54.61822	0.895	-165.9595	181.6795
	0.52	40.72000	54.61822	0.510	-133.0995	214.5395

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.8.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.8.4.a) se observa con claridad la superposición de las barras LSD que confirman el resultado del ANOVA y del método de comparaciones múltiples: las medias de todos los tratamientos (presiones) son estadísticamente iguales.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.4.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones distintas. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.4.c).

3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.4.d).

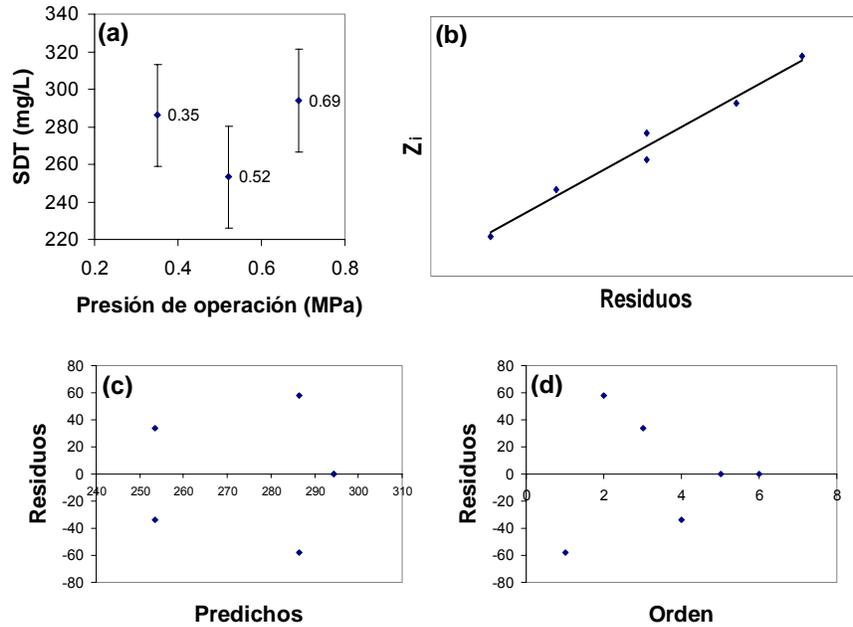


Figura A.8.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.8.5. Conductividad**

**A.8.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)**

Hipótesis:

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).  
 $\alpha=0.05$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.8.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302988**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.004	2	0.002	21.444	0.002
Entre tratamientos	0.001	6	0.000		
Total	0.005	8			

**A.8.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta:  
 Conductividad (mS/cm).

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(0.27_{0.35} \neq 0.30_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.27_{0.35} \neq 0.33_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.30_{0.52} \neq 0.33_{0.69})$

**Tabla A.8.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.02333(*)	0.00816	0.029	-0.0433	-0.0034
	0.69	-0.05333(*)	0.00816	0.001	-0.0733	-0.0334
0.52	0.35	0.02333(*)	0.00816	0.029	0.0034	0.0433
	0.69	-0.03000(*)	0.00816	0.010	-0.0500	-0.0100
0.69	0.35	0.05333(*)	0.00816	0.001	0.0334	0.0733
	0.52	0.03000(*)	0.00816	0.010	0.0100	0.0500

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.8.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

La gráfica (Figura A.8.5.a) muestra un incremento significativo en la conductividad del permeado producido con esta membrana por el aumento en la presión de operación. Las barras LSD no se traslapan. Esto corrobora los resultados del método de comparaciones múltiples.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.5.b).
2. Sólo la presión 0.35 MPa presenta una variación mayor. Por ello, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.8.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.5.d).

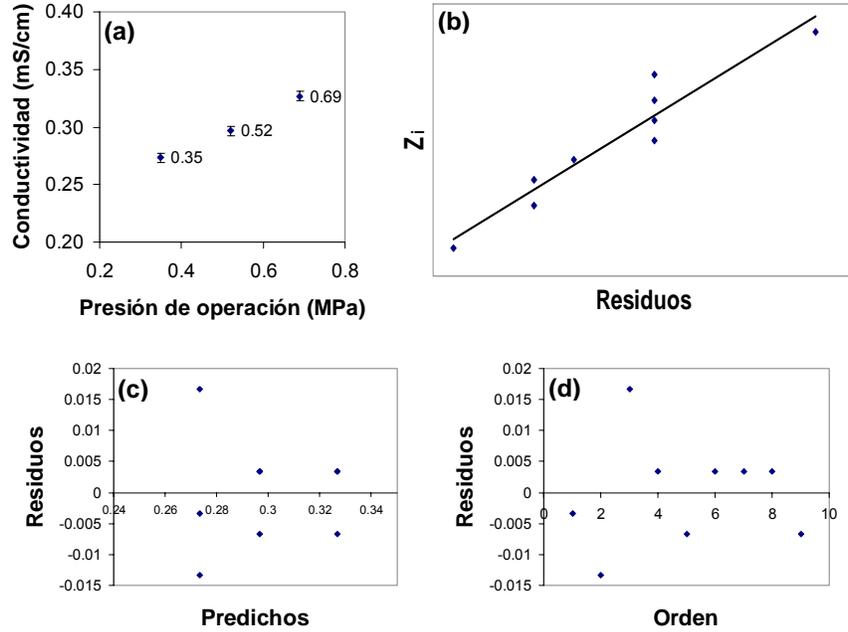


Figura A.8.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.8.6. Turbiedad**

**A.8.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.8.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302988**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.002	2	0.001	2.630	0.100
Entre tratamientos	0.008	18	0.000		
Total	0.011	20			

**A.8.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.07_{0.35} = 0.07_{.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.07_{0.35} = 0.09_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.07_{0.52} = 0.09_{0.69})$

**Tabla A.8.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.00000	0.01151	1.000	-0.0242	0.0242
	0.69	-0.02286	0.01151	0.062	-0.0470	0.0013
0.52	0.35	0.00000	0.01151	1.000	-0.0242	0.0242
	0.69	-0.02286	0.01151	0.062	-0.0470	0.0013
0.69	0.35	0.02286	0.01151	0.062	-0.0013	0.0470
	0.52	0.02286	0.01151	0.062	-0.0013	0.0470

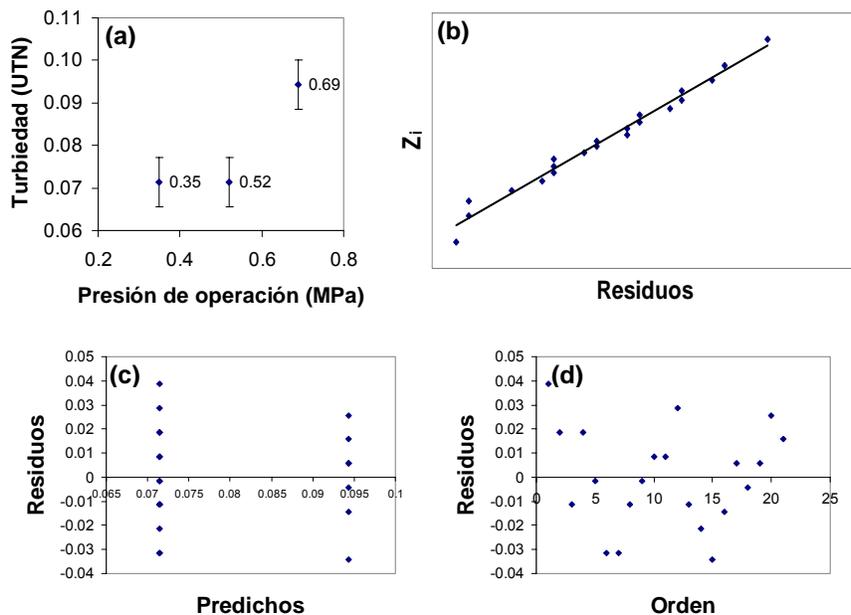
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.8.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.8.6.a) se observa que la turbiedad del permeado producido con la presión de 0.69 MPa es, en apariencia, substancialmente mayor que las turbiedades obtenidas con las otras dos presiones (0.52 y 0.69 MPa). Sin embargo, el método analítico no detectó esta diferencia. Esto se debe a que los intervalos de confianza (95%, tabla de comparaciones múltiples) se superponen y anulan la significación de dicha diferencia. Así, se decide que las medias de la turbiedad obtenida con los tres tratamientos (presiones) es estadísticamente la misma.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.6.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones semejantes. Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.6.c).
3. Se detecta cierta tendencia de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se considera que no se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.6.d).



**Figura A.8.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.8.7. pH**

**A.8.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)**

Factor: Presión de operación. Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2} = \mu_{P3}$   
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$   
 Variable de respuesta: pH (Unidades).  
 $\alpha = 0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el pH del permeado.

**Tabla A.8.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana 302988**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.515	2	0.258	34.333	0.000
Entre tratamientos	0.068	9	0.008		
Total	0.583	11			

**A.8.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades). Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $7.8_{0.35} \neq 7.6_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.8_{0.35} \neq 7.3_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $7.6_{0.52} \neq 7.3_{0.69}$ )

**Tabla A.8.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.17500(*)	0.06124	0.019	0.0365	0.3135
	0.69	0.50000(*)	0.06124	0.000	0.3615	0.6385
0.52	0.35	-0.17500(*)	0.06124	0.019	-0.3135	-0.0365
	0.69	0.32500(*)	0.06124	0.000	0.1865	0.4635
0.69	0.35	-0.50000(*)	0.06124	0.000	-0.6385	-0.3615
	0.52	-0.32500(*)	0.06124	0.000	-0.4635	-0.1865

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.8.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.8.7.a) muestra un decremento significativo del valor de pH del permeado producido con esta membrana en función del aumento de la presión de operación (las barras LSD no se traslapan en ningún caso).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.7.b).

- Los tratamientos no presentan variancia constante. Se forma un cono. Por lo tanto, no se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.7.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.7.d).

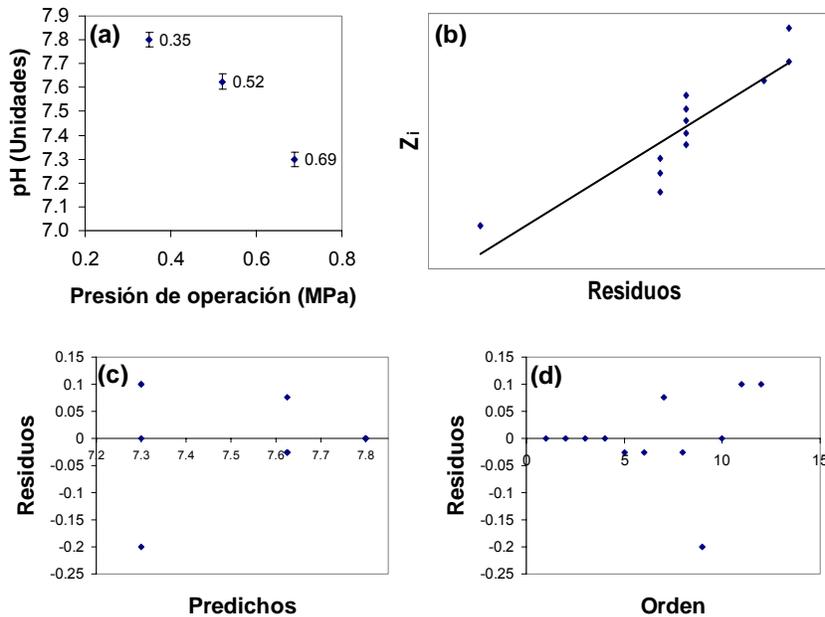


Figura A.8.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.8.8. Alcalinidad

#### A.8.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
- Las presiones cambian la alcalinidad del permeado.

Tabla A.8.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302988

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	637.796	2	318.898	244.642	0.000
Entre tratamientos	7.821	6	1.304		
Total	645.617	8			

### A.8.8.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como CaCO<sub>3</sub>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.8.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (58<sub>0.35</sub> ≠ 71<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (58<sub>0.35</sub> ≠ 78<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (71<sub>0.52</sub> ≠ 78<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.8.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-12.5312(*)	0.93221	0.000	-14.8123	-10.2502
	0.69	-20.4474(*)	0.93221	0.000	-22.7285	-18.1664
0.52	0.35	12.53121(*)	0.93221	0.000	10.2502	14.8123
	0.69	-7.91622(*)	0.93221	0.000	-10.1973	-5.6352
0.69	0.35	20.44744(*)	0.93221	0.000	18.1664	22.7285
	0.52	7.91622(*)	0.93221	0.000	5.6352	10.1973

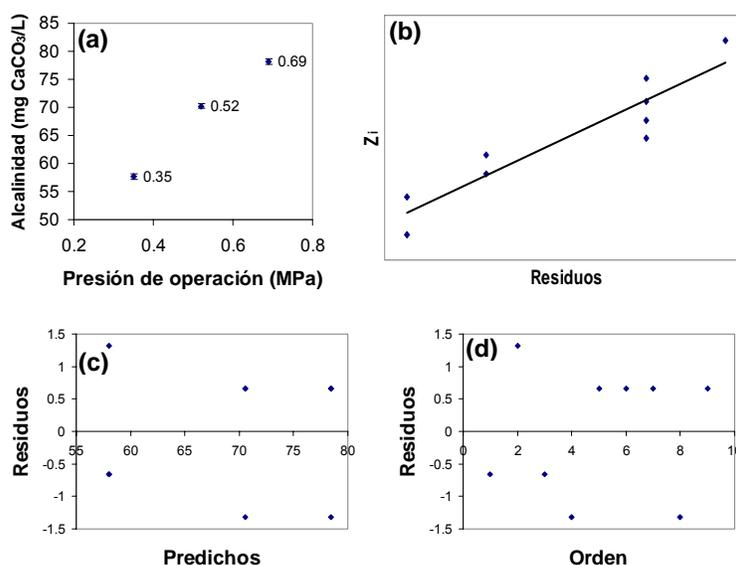
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.8.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD (Figura A.8.8.a) se observa que el incremento de presión en la presión de operación aumenta significativamente la alcalinidad del permeado producido con esta membrana (las barras LSD no se superponen en ningún caso).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.8.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones iguales. Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.8.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.8.d).



**Figura A.8.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.8.9. Dureza**

**A.8.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con un criterio de clasificación)**

Factor: Presión de operación. Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$   
 Variable de respuesta: Dureza (mg/L como  $CaCO_3$ ).  
 $\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.8.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la dureza del permeado.

**Tabla A.8.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de dureza obtenidos con la membrana 302988**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	261.707	2	130.853	158.000	0.000
Entre tratamientos	4.969	6	.828		
Total	266.676	8			

**A.8.9.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Dureza (mg/L como  $CaCO_3$ ). Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.8.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana 302988. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (19<sub>0.35</sub>  $\neq$  28<sub>0.52</sub>)
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; (19<sub>0.35</sub>  $\neq$  32<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; (28<sub>0.52</sub>  $\neq$  32<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.8.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de dureza obtenidos con la membrana 302988**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-9.00901(*)	0.74305	0.000	-10.8272	-7.1908
	0.69	12.87001(*)	0.74305	0.000	-14.6882	-11.0518
0.52	0.35	9.00901(*)	0.74305	0.000	7.1908	10.8272
	0.69	-3.86100(*)	0.74305	0.002	-5.6792	-2.0428
0.69	0.35	12.87001(*)	0.74305	0.000	11.0518	14.6882
	0.52	3.86100(*)	0.74305	0.002	2.0428	5.6792

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.8.9.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.8.9.a) se puede observar que el incremento de la presión afecta (aumenta) significativamente la dureza del permeado producido con esta membrana (las barras LSD no se superponen).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.8.9.b).

2. La presión de 0.35 MPa no presenta variación. Los otros dos tratamientos presentan variaciones semejantes. No se puede afirmar que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.8.9.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.8.9.d).

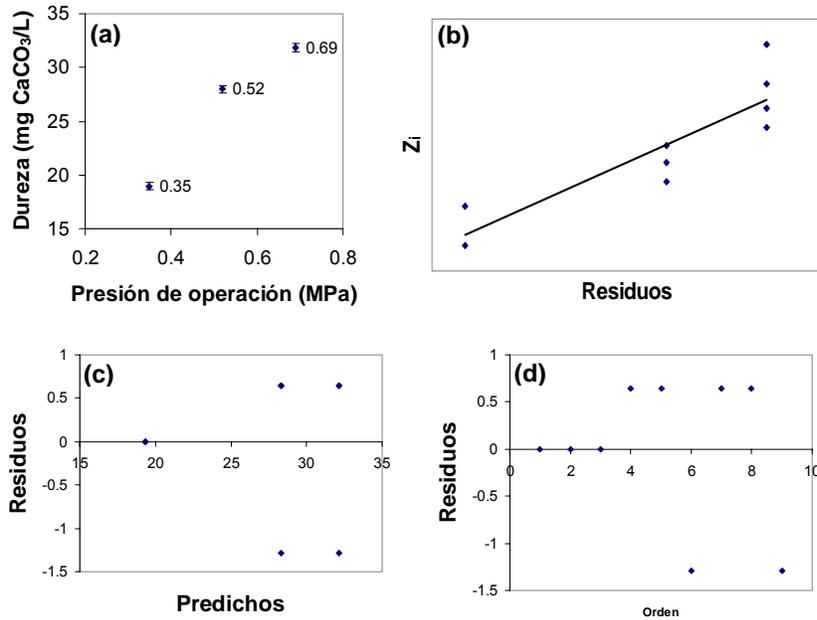


Figura A.8.9 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Dureza: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.9. Membrana 302990**

**A.9.1. Flux**

**A.9.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.9.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	29323.003	2	14661.502	908.198	0.000
Entre tratamientos	920.180	57	16.144		
Total	30243.183	59			

**A.9.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $56_{0.35} \neq 70_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $56_{0.35} \neq 107_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $70_{0.52} \neq 107_{0.69}$ )

**Tabla A.9.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-14.132077(*)	1.341371	0.000	-16.81813	-11.44603
	0.69	-51.183677(*)	1.273681	0.000	-53.73418	-48.63317
0.52	0.35	14.132077(*)	1.341371	0.000	11.44603	16.81813
	0.69	-37.051600(*)	1.233817	0.000	-39.52228	-34.58092
0.69	0.35	51.183677(*)	1.273681	0.000	48.63317	53.73418
	0.52	37.051600(*)	1.233817	0.000	34.58092	39.52228

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.9.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Como se observa en la gráfica de medias (Figura A.9.1.a), el incremento en la presión aumenta significativamente el flux de permeado. El aumento del flux resultó lineal, la aplicación de la presión de 0.69 MPa produjo un cambio mucho más importante que el de la presión 0.52 MPa. Al parecer, el incremento en la presión de operación afecta exponencialmente el flux de permeado.

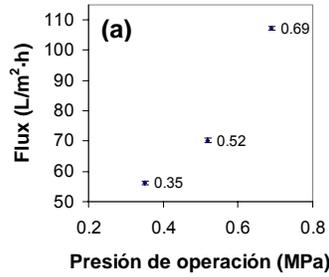


Figura A.9.1 (a) Gráfica de medias LSD

**A.9.2. Carbono Orgánico Total (COT)**

**A.9.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: COT (mg/L)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: todas las medias de tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian el carbono orgánico total del permeado.

**Tabla A.9.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	31.588	2	15.794	4.973	0.112
Entre tratamientos	9.527	3	3.176		
Total	41.116	5			

**A.9.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD (Diferencia Mínima Significativa)**

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

4.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; (19.49<sub>0.35} = 17.20<sub>0.52}</sub>)    5.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ; (19.49<sub>0.35} = 22.79<sub>0.69}</sub>)    6.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ; (17.20<sub>0.52} = 22.79<sub>0.69}</sub>)</sub></sub></sub>

**Tabla A.9.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	2.290000	1.782077	0.289	-3.38137	7.96137
	0.69	-3.300000	1.782077	0.161	-8.97137	2.37137
0.52	0.35	-2.290000	1.782077	0.289	-7.96137	3.38137
	0.69	-5.590000	1.782077	0.052	-11.26137	0.08137
0.69	0.35	3.300000	1.782077	0.161	-2.37137	8.97137
	0.52	5.590000	1.782077	0.052	-0.08137	11.26137

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.9.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias (Figura A.9.2.a) se puede observar que el COT del permeado producido con la presión de 0.69 MPa es substancialmente mayor que los valores de COT correspondientes a las otras presiones (0.35 y 0.52 MPa). No obstante, el método analítico de comparación de medias no detecta dicho valor como significativamente diferente (esto con base en los intervalos de confianza al 95%, tabla de resultados del método de comparaciones múltiples). Entonces, se determina que la presión no afecta significativamente el contenido de COT del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.9.2.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones diferentes. No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.9.2.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.2.d).

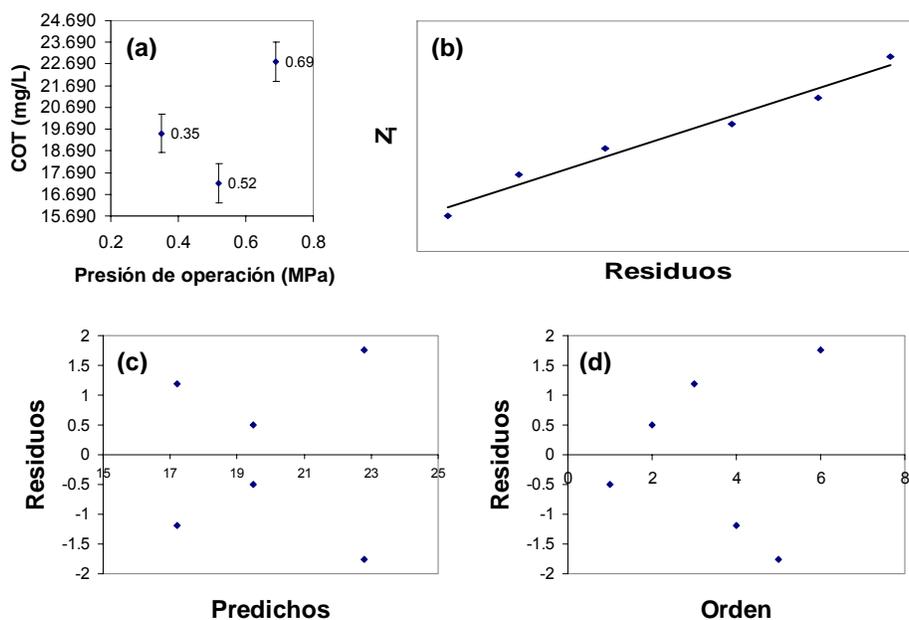


Figura A.9.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.9.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)

#### A.9.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

**Tabla A.9.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	74.789	0.000
Entre tratamientos	0.000	15	0.000		
Total	0.000	17			

### A.9.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> cm<sup>-1</sup>

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.9.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (0.011<sub>0.35</sub>≠0.010<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.011<sub>0.35</sub>≠0.016<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.010<sub>0.52</sub>≠0.016<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.9.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.001833(*)	0.000558	0.005	0.00064	0.00302
	0.69	-0.004778(*)	0.000558	0.000	-0.00597	-0.00359
0.52	0.35	-0.001833(*)	0.000558	0.005	-0.00302	-0.00064
	0.69	-0.006611(*)	0.000558	0.000	-0.00780	-0.00542
0.69	0.35	0.004778(*)	0.000558	0.000	0.00359	0.00597
	0.52	0.006611(*)	0.000558	0.000	0.00542	0.00780

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.9.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias (Figura A.9.3.a) se observa la presencia de un mínimo en la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con la presión 0.52 MPa. La AUV<sub>254</sub> correspondiente a la presión 0.69 MPa es substancialmente mayor a los valores de AUV<sub>254</sub> de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.52 MPa. Así, aunque se presenta una disminución significativa en la aplicación de la presión de 0.52 MPa respecto de la de 0.35 MPa, se determina que el aumento de presión incrementa la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.9.3.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones semejantes (excepto por dos puntos en la presión 0.69 MPa). Se considera que se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.9.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.3.d).

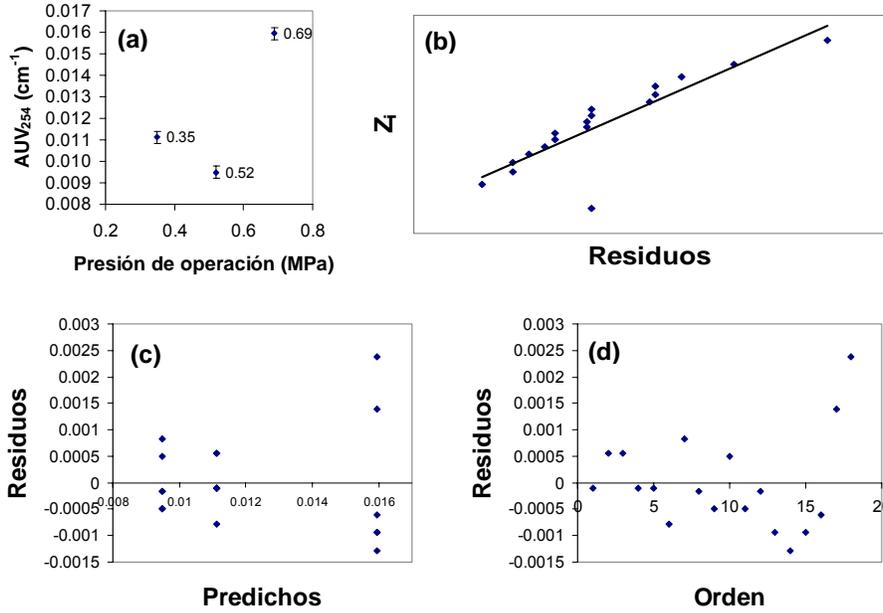


Figura A.9.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-AUV<sub>254</sub>: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.9.4. Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

**A.9.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Sólidos Disueltos

Totales mg/L

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian los SDT del permeado.

**Tabla A.9.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	604145.109	2	302072.554	13.331	0.017
Entre tratamientos	90640.763	4	22660.191		
Total	694785.871	6			

**A.9.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: SDT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $758_{0.35} \neq 1254_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $758_{0.35} \neq 1421_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $1254_{0.52} = 1421_{0.69}$ )

**Tabla A.9.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de SDT obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-496.66452(*)	137.41722	0.022	-878.1959	-115.1332
	0.69	-663.09452(*)	137.41722	0.008	-1044.6259	-281.5632
0.52	0.35	496.66452(*)	137.41722	0.022	115.1332	878.1959
	0.69	-166.43000	150.53302	0.331	-584.3767	251.5167
0.69	0.35	663.09452(*)	137.41722	0.008	281.5632	1044.6259
	0.52	166.43000	150.53302	0.331	-251.5167	584.3767

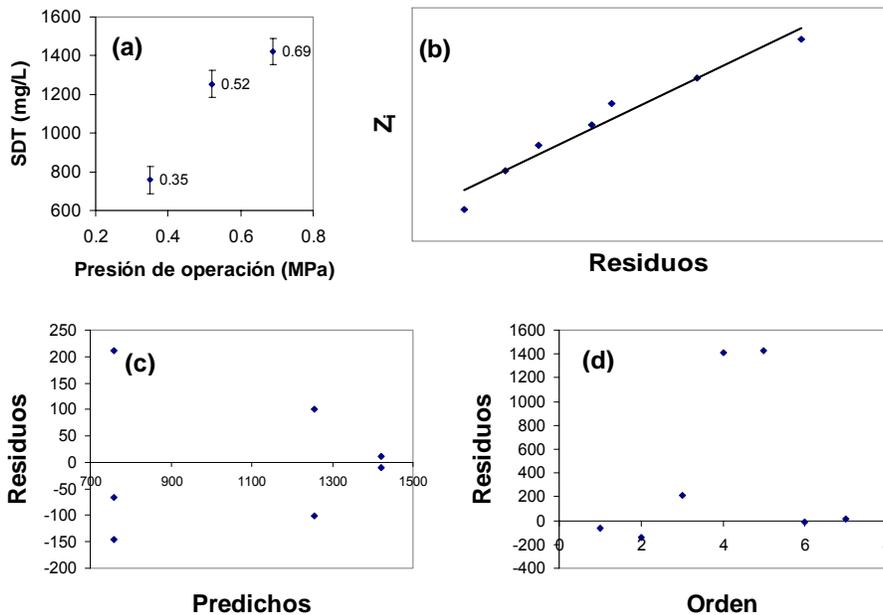
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.9.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias (Figura A.9.4.a) confirma el resultado del método analítico de comparaciones múltiples. Los SDT del permeado producido con la presión de 0.35 MPa es significativamente menor a los SDT de los permeados producidos con las presiones de operación de 0.52 y 0.69 MPa. Estos últimos, resultaron estadísticamente equivalentes (las barras LSD correspondientes se traslapan). Entonces, se determina que el incremento de la presión de operación aumenta los SDT del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.9.4.b).
2. Los tratamientos no presentan variaciones semejantes (se forma un cono). No se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.9.4.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.4.d).



**Figura A.9.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-SDT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.9.5. Conductividad**

**A.9.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.9.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.047	2	0.024	61.700	0.000
Entre tratamientos	0.005	12	0.000		
Total	0.052	14			

**A.9.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(1.37_{.35} = 1.29_{.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(1.37_{0.35} = 1.42_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(1.29_{0.52} = 1.42_{0.69})$

**Tabla A.9.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.08800(*)	0.01236	0.000	0.0611	0.1149
	0.69	-0.04733(*)	0.01236	0.002	-0.0743	-0.0204
0.52	0.35	-0.08800(*)	0.01236	0.000	-0.1149	-0.0611
	0.69	-0.13533(*)	0.01236	0.000	-0.1623	-0.1084
0.69	0.35	0.04733(*)	0.01236	0.002	0.0204	0.0743
	0.52	0.13533(*)	0.01236	0.000	0.1084	0.1623

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.9.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias (Figura A.9.5.a) se observa la presencia de un mínimo en la conductividad del permeado producido con la presión de operación de 0.52 MPa. En ningún caso se superponen las barras LSD, por lo tanto, se corrobora el resultado del método de comparaciones múltiples: todos los cambios son significativos.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.9.5.b).
2. Los tratamientos presentan la misma variación (excepto por un punto en la presión 0.69MPa). Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.9.5.c).

3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.5.d).

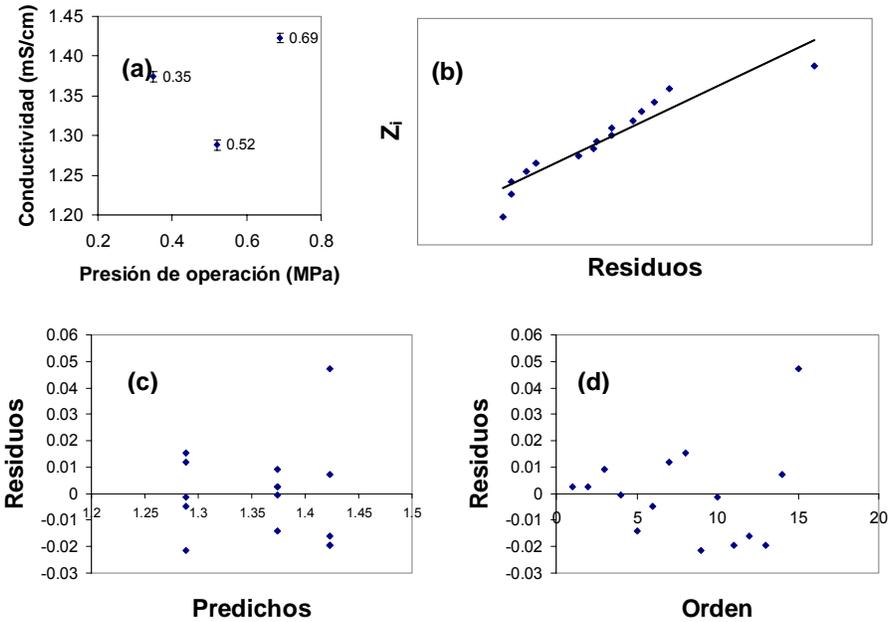


Figura A.9.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.9.6. Turbiedad

#### A.9.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.9.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.001	2	0.001	27.965	0.000
Entre tratamientos	0.000	18	0.000		
Total	0.001	20			

### A.9.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.9.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ; (0.02<sub>0.35</sub> = 0.01<sub>0.52</sub>)
2.  $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ; (0.02<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.03<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2}\neq\mu_{P3}$ ; (0.01<sub>0.52</sub>  $\neq$  0.03<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.9.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.00381	0.00241	0.131	-0.0012	0.0089
	0.69	-0.01333(*)	0.00241	0.000	-0.0184	-0.0083
0.52	0.35	-0.00381	0.00241	0.131	-0.0089	0.0012
	0.69	-0.01714(*)	0.00241	0.000	-0.0222	-0.0121
0.69	0.35	0.01333(*)	0.00241	0.000	0.0083	0.0184
	0.52	0.01714(*)	0.00241	0.000	0.0121	0.0222

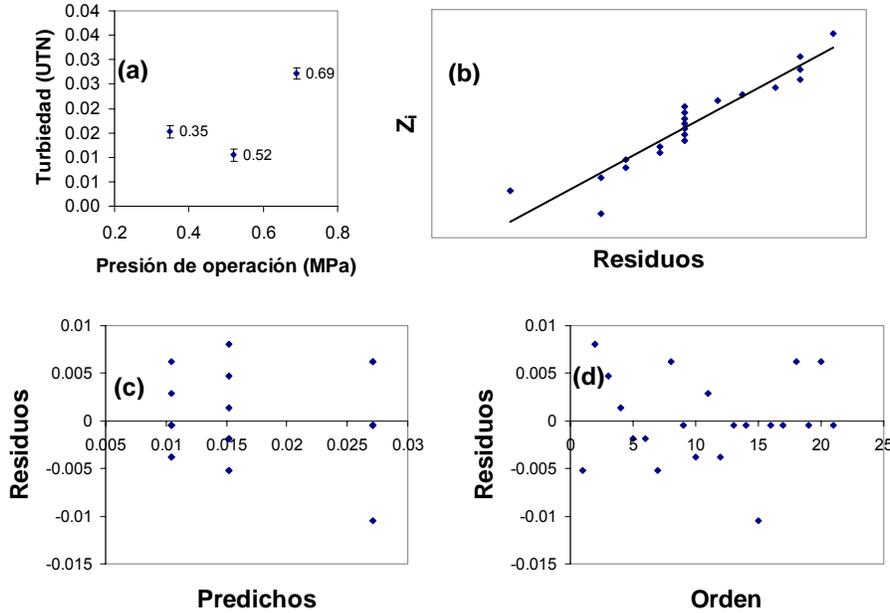
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

### A.9.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se observa en la gráfica de medias (Figura A.9.6.a), las turbiedades de los permeados producidos con las presiones de 0.35 y 0.52 MPa son estadísticamente iguales (las barras LSD se sobreponen). Por otro lado, la turbiedad correspondiente a la presión de 0.69 MPa es significativamente mayor y por ello se establece que el incremento de la presión aumenta la turbiedad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.9.6.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan variaciones semejantes. Se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.9.6.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.6.d).



**Figura A.9.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

**A.9.7. pH**

**A.9.7.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: pH (Unidades)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.13) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el pH del permeado.

**Tabla A.9.13 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.189	2	0.095	5.124	0.050
Entre tratamientos	0.111	6	0.018		
Total	0.300	8			

**A.9.7.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.14 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $7.7_{0.35} \neq 8.1_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; ( $7.7_{0.35} = 8.0_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $8.1_{0.52} = 8.0_{0.69}$ )

**Tabla A.9.14 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.33667(*)	0.11099	0.023	-0.6082	-0.0651
	0.69	-0.26667	0.11099	0.053	-0.5382	0.0049
0.52	0.35	0.33667(*)	0.11099	0.023	0.0651	0.6082
	0.69	0.07000	0.11099	0.551	-0.2016	0.3416
0.69	0.35	0.26667	0.11099	0.053	-0.0049	0.5382
	0.52	-0.07000	0.11099	0.551	-0.3416	0.2016

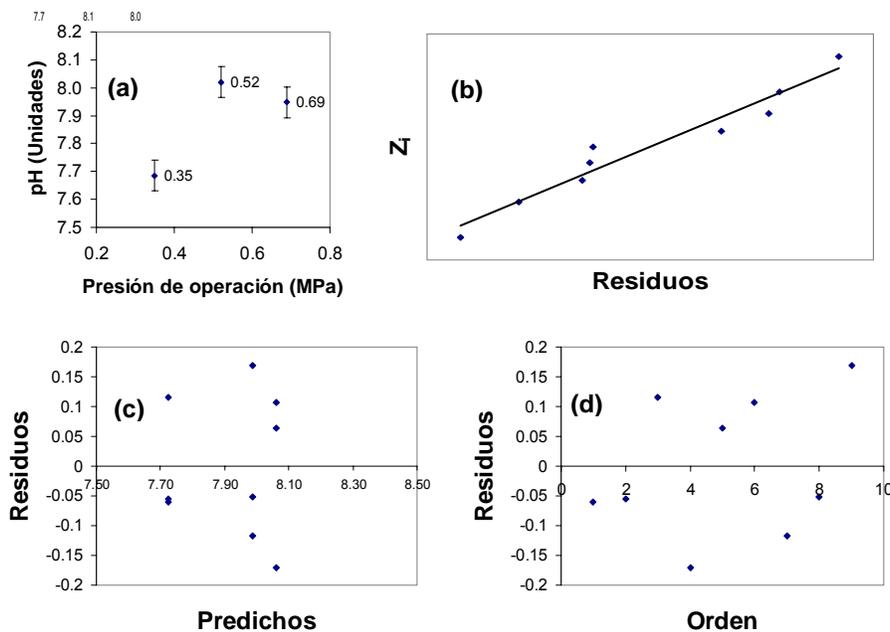
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.9.7.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias (Figura A.9.7.a) se observa que el pH del permeado producido con la presión de operación 0.35 MPa es significativamente menor a los valores de pH correspondientes a las otras presiones (0.52 y 0.69 MPa) que son estadísticamente equivalentes. Entonces, se determina que el incremento en la presión de operación aumenta el pH del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.9.7.b).
2. La presión 0.35 MPa presenta menor variación que las otras dos (variaciones semejantes). Por ello, no se puede afirmar que todos los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.9.7.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.7.d).



**Figura A.9.7 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

### A.9.8. Alcalinidad

#### A.9.8.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Sólidos Disueltos

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2} = \mu_{P3}$

Totales mg/L

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

$\alpha = 0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.9.15) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la alcalinidad del permeado.

**Tabla A.9.15 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	1448.513	2	724.256	1448.513	0.000
Entre tratamientos	2.000	4	0.500		
Total	1450.513	6			

#### A.9.8.2. Método de comparaciones múltiples

Variable de respuesta: Alcalinidad (mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ) Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.16 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $393_{0.35} \neq 380_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $393_{0.35} \neq 414_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $380_{0.52} \neq 414_{0.69}$ )

**Tabla A.9.16 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de alcalinidad obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	13.00000(*)	0.70711	0.000	11.0368	14.9632
	0.69	-20.82000(*)	0.64550	0.000	-22.6122	-19.0278
0.52	0.35	-13.00000(*)	0.70711	0.000	-14.9632	-11.0368
	0.69	-33.82000(*)	0.64550	0.000	-35.6122	-32.0278
0.69	0.35	20.82000(*)	0.64550	0.000	19.0278	22.6122
	0.52	33.82000(*)	0.64550	0.000	32.0278	35.6122

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

#### A.9.8.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

Como se observa en la gráfica (Figura A.9.8.a), se presenta un mínimo en la alcalinidad producida con esta membrana en la aplicación de la presión intermedia de 0.52 MPa. Por otro lado, la alcalinidad correspondiente a la presión de 0.69MPa es la mayor y significativamente diferente a las otras dos. Por ello, es probable que el incremento de la presión de operación aumente la alcalinidad del permeado en la operación de esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal. Los datos se concentran alrededor del cero por la ausencia de variación (Figura A.9.8.b).
2. Los tratamientos presentan variaciones distintas. No se cumple el supuesto de variancia constante. Dos no presentaros variación (puntos sobre el eje de la abscisas; Figura A.9.8.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.8.d).

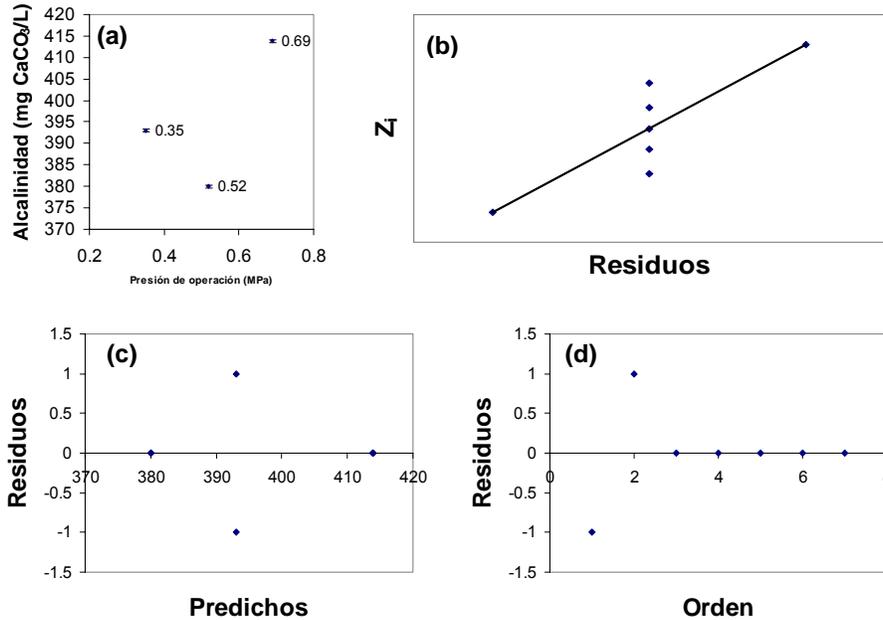


Figura A.9.8 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Alcalinidad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.9.9. Dureza (EDTA)**

**A.9.9.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación) y gráfica de medias**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)  
 α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>  
 H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.9.17) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.9.17 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana 302990**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	2130.100	2	1065.050	2572.006	0.000
Entre tratamientos	2.485	6	0.414		
Total	2132.585	8			

**A.9.9.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux (L/m<sup>2</sup>·h)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.9.18 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302990. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (270<sub>0.35</sub>  $\neq$  25<sub>0.52</sub>)
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; (270<sub>0.35</sub>  $\neq$  293<sub>0.69</sub>)
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; (256<sub>0.52</sub>  $\neq$  293<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.9.18 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana 302990**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	14.15673(*)	0.52542	0.000	12.8711	15.4424
	0.69	-23.16630(*)	0.52542	0.000	-24.4520	-21.8807
0.52	0.35	-14.15673(*)	0.52542	0.000	-15.4424	-12.8711
	0.69	-37.32304(*)	0.52542	0.000	-38.6087	-36.0374
0.69	0.35	23.16630(*)	0.52542	0.000	21.8807	24.4520
	0.52	37.32304(*)	0.52542	0.000	36.0374	38.6087

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.9.9.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias (Figura A.9.9.a) de las durezas de los permeados producidos con las diferentes presiones de operación muestra un comportamiento de la dureza similar al de la alcalinidad. Es decir, se presenta un mínimo significativo y la presión más alta (0.69MPa) produce el permeado con mayor dureza. Por ello, de esta gráfica se puede decir que el incremento en la presión probablemente siga incrementando la dureza del permeado.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos forman una distribución normal. Por lo tanto, los datos provienen de una distribución normal. Los datos se acumulan alrededor de cero porque no presentaron variación (Figura A.9.9.b).
2. Los tratamientos no presentan la misma variación. No se cumple con el supuesto de variancia constante. Los puntos sobre el eje de las abscisas corresponden a los tratamientos que no presentaron variación (Figura A.9.9.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.9.9.d).

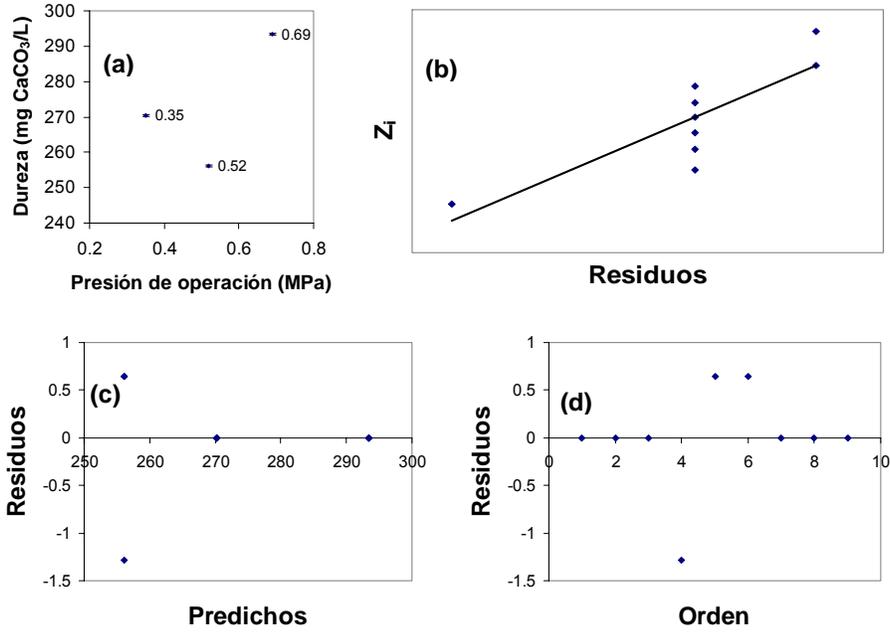


Figura A.9.9 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

**A.10. Membrana UCB**

**A.10.1. Flux**

**A.10.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación. Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3)  $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$   
 MPa.  
 Variable de respuesta: Flux ( $L/m^2 \cdot h$ ).  
 $\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.10.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el flux del permeado.

**Tabla A.10.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de flux obtenidos con la membrana UCB**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	112.768	2	56.384	101.474	0.000
Entre tratamientos	13.891	25	0.556		
Total	126.659	27			

**A.10.1.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Flux ( $L/m^2 \cdot h$ ). Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.10.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana UCB. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $3_{0.35} \neq 4_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $3_{0.35} \neq 8_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $4_{0.52} \neq 8_{0.69}$ )

**Tabla A.10.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de flux obtenidos con la membrana UCB**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-1.05815(*)	0.362208	0.007	-1.80414	-0.31217
	0.69	-4.58201(*)	0.346366	0.000	-5.29537	-3.86866
0.52	0.35	1.058155(*)	0.362208	0.007	0.31217	1.80414
	0.69	-3.52386(*)	0.335041	0.000	-4.21389	-2.83383
0.69	0.35	4.582013(*)	0.346366	0.000	3.86866	5.29537
	0.52	3.523858(*)	0.335041	0.000	2.83383	4.21389

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.10.1.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

Como se observa en la gráfica de medias LSD (Figura A.10.1.a), el incremento en la presión de operación aumenta significativamente el flux de permeado producido con esta membrana. La aplicación de la presión de 0.69 MPa ocasionó un incremento mayor del flux que el provocado por la presión 0.52 MPa. Así, se puede decir que el incremento del flux de permeado en función de la presión de operación es exponencial (en el intervalo de presiones probadas).

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.10.1.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan variaciones semejantes. Se considera que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.10.1.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.10.1.d).

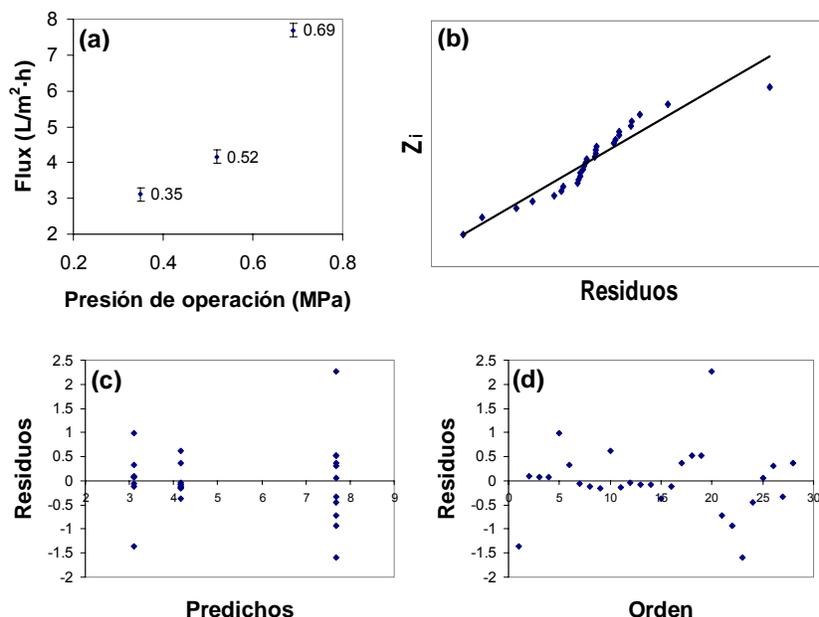


Figura A.10.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Flux: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.10.2. Carbono Orgánico Total (COT)

#### A.10.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: COT (mg/L).

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.10.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: las medias de todos los tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian el COT del permeado.

Tabla A.10.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de COT obtenidos con la membrana UCB

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	22.804	2	11.402	0.128	0.880
Entre tratamientos	1332.091	15	88.806		
Total	1354.895	17			

#### A.10.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: COT (mg/L)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.10.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana UCB. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(13.441_{0.35} = 11.597_{0.52})$
- $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(13.441_{0.35} = 10.744_{0.69})$
- $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(11.597_{0.52} = 10.744_{0.69})$

**Tabla A.10.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de COT obtenidos con la membrana UCB**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	1.844167	5.440774	0.739	-9.75257	13.44090
	0.69	2.697000	5.440774	0.627	-8.89974	14.29374
0.52	0.35	-1.844167	5.440774	0.739	-13.44090	9.75257
	0.69	-.852833	5.440774	0.878	-10.74390	12.44957
0.69	0.35	-2.697000	5.440774	0.627	-14.29374	8.89974
	0.52	-.852833	5.440774	0.878	-12.44957	10.74390

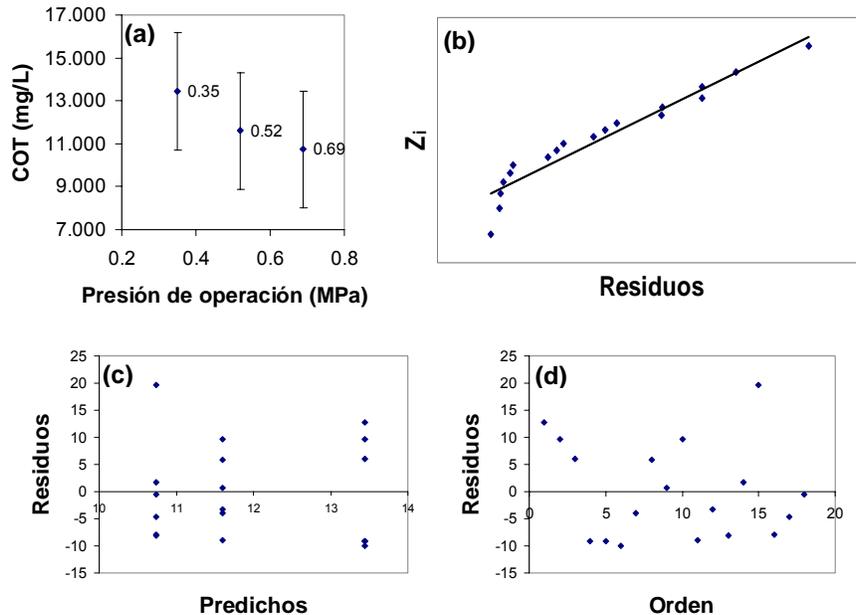
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.10.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.10.2.a) se corrobora el resultado del ANOVA y del método de comparaciones múltiples. Todas las barras LSD se traslapan, por ello los cambios no son significativos. La presión de operación no afecta el COT del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.10.2.b).
- Los tratamientos presentan variaciones semejantes. Se considera que se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.10.2.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.10.2.d).



**Figura A.10.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-COT: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.10.3. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)**

**A.10.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>

H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.10.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

**Tabla A.10.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana UCB**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	26.000	0.013
Entre tratamientos	0.000	3	0.000		
Total	0.000	5			

**A.10.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.10.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana UCB. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>; (0.034<sub>0.35</sub>=0.032<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.034<sub>0.35</sub>≠0.026<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.032<sub>0.52</sub>≠0.026<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.10.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana UCB**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.002000	0.001155	0.182	-0.00167	0.00567
	0.69	0.008000(*)	0.001155	0.006	0.00433	0.01167
0.52	0.35	-0.002000	0.001155	0.182	-0.00567	0.00167
	0.69	0.006000(*)	0.001155	0.014	0.00233	0.00967
0.69	0.35	-0.008000(*)	0.001155	0.006	-0.01167	-0.00433
	0.52	-0.006000(*)	0.001155	0.014	-0.00967	-0.00233

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.10.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.10.3.a) se observa que las presiones de operación de 0.35 y 0.52 MPa producen permeados con valores de AUV<sub>254</sub> estadísticamente iguales. En cambio, la presión de 0.69 MPa produce un permeado con un valor de AUV<sub>254</sub> significativamente inferior a los anteriores. Por ello, se determina que el incremento en la presión de operación disminuye la AUV<sub>254</sub> del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.10.3.b).
2. La presión 0.52 MPa no presenta variación. Las otras dos tienen la misma variación. Por ello, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.10.3.c).

3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.10.3.d).

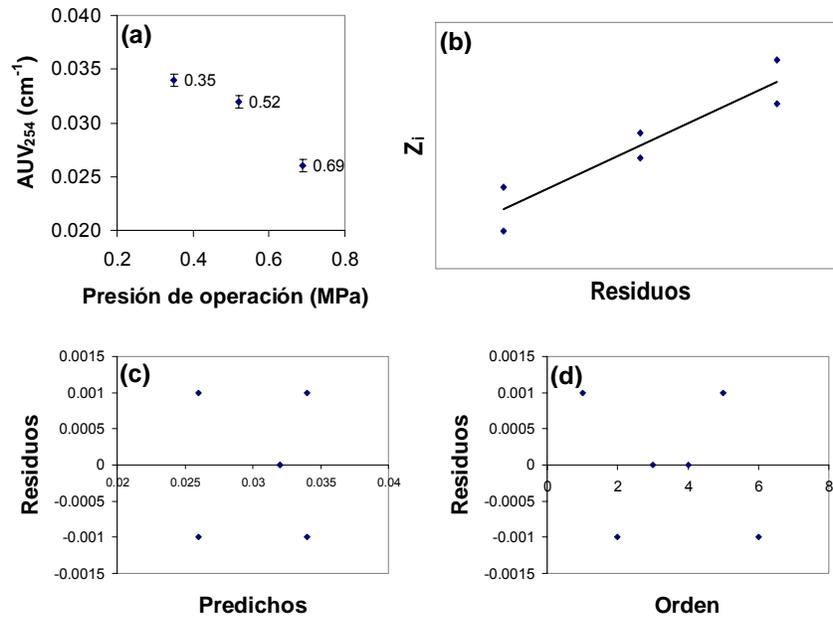


Figura A.10.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-AUV<sub>254</sub>: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

#### A.10.4. Conductividad

##### A.10.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.10.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

Tabla A.10.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana UCB

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.019	2	0.009	559.000	0.000
Entre tratamientos	0.000	3	0.000		
Total	0.019	5			

**A.10.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta:  
Conductividad (mS/cm).

Hipótesis:

$H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2} = \mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.10.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana UCB. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; (1.59<sub>0,35</sub>  $\neq$  1.45<sub>0,52</sub>)
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; (1.59<sub>0,35</sub>  $\neq$  1.50<sub>0,69</sub>)
3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; (1.45<sub>0,52</sub>  $\neq$  1.50<sub>0,69</sub>)

**Tabla A.10.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana UCB**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.13500(*)	0.00408	0.000	0.1220	0.1480
	0.69	0.08500(*)	0.00408	0.000	0.0720	0.0980
0.52	0.35	-0.13500(*)	0.00408	0.000	-0.1480	-0.1220
	0.69	-0.05000(*)	0.00408	0.001	-0.0630	-0.0370
0.69	0.35	-0.08500(*)	0.00408	0.000	-0.0980	-0.0720
	0.52	0.05000(*)	0.00408	0.001	0.0370	0.0630

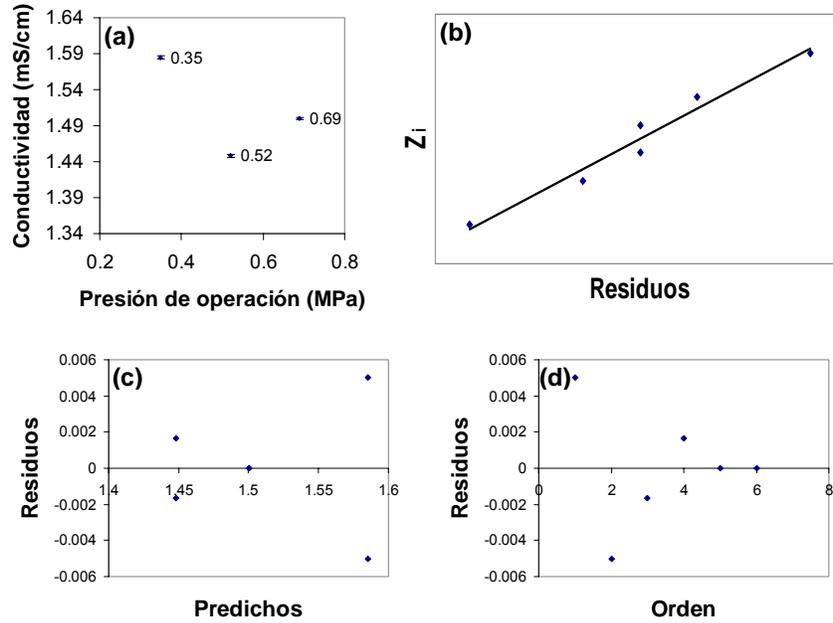
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.10.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.10.4.a) se detectaron diferencias significativas en la conductividad del permeado producido con esta membrana. Se observa un mínimo en la presión de 0.52 MPa. En general se puede decir que el incremento en la presión disminuye significativamente la conductividad del permeado.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.10.4.b).
2. Los tratamientos presentan diferentes variaciones. El supuesto de variancia constante no se cumple (Figura A.10.4.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.10.4.d).



**Figura A.10.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.10.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.10.9) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se acepta la hipótesis nula: Todas las medias de los tratamientos (presiones) son iguales.
2. Las presiones no cambian la turbiedad del permeado.

**Tabla A.10.9 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana UCB**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.039	2	0.019	1.071	0.446
Entre tratamientos	0.055	3	0.018		
Total	0.093	5			

**A.10.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.10.10 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana UCB. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1}=\mu_{P2}$ ;  $(0.39_{0.35} = 0.21_{0.52})$
2.  $\mu_{P1}=\mu_{P3}$ ;  $(0.39_{0.35} = 0.23_{0.69})$
3.  $\mu_{P2}=\mu_{P3}$ ;  $(0.21_{0.52} = 0.23_{0.69})$

**Tabla A.10.10 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana UCB**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.18000	0.13485	0.274	-0.2491	0.6091
	0.69	0.16000	0.13485	0.321	-0.2691	0.5891
0.52	0.35	-0.18000	0.13485	0.274	-0.6091	0.2491
	0.69	-0.02000	0.13485	0.892	-0.4491	0.4091
0.69	0.35	-0.16000	0.13485	0.321	-0.5891	0.2691
	0.52	0.02000	0.13485	0.892	-0.4091	0.4491

(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

### A.10.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)

En la gráfica de medias LSD (Figura A.10.5.a) se observa que la presión de operación de 0.35 MPa parece ser significativamente mayor. Sin embargo, el método analítico de comparaciones múltiples, a través del análisis de los intervalos de confianza (95%) detecta que las medias de la turbiedad de los permeados producidos con las tres presiones (0.35, 0.52 y 0.69 MPa) son estadísticamente iguales. Entonces, se corrobora el resultado del ANOVA: la presión no afecta la turbiedad del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal. Los puntos se acumulan en el centro porque los residuos son pequeños o nulos (Figura A.10.5.b).
2. Los tratamientos (presiones) no presentan variaciones semejantes. No se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.10.5.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.10.5.d).

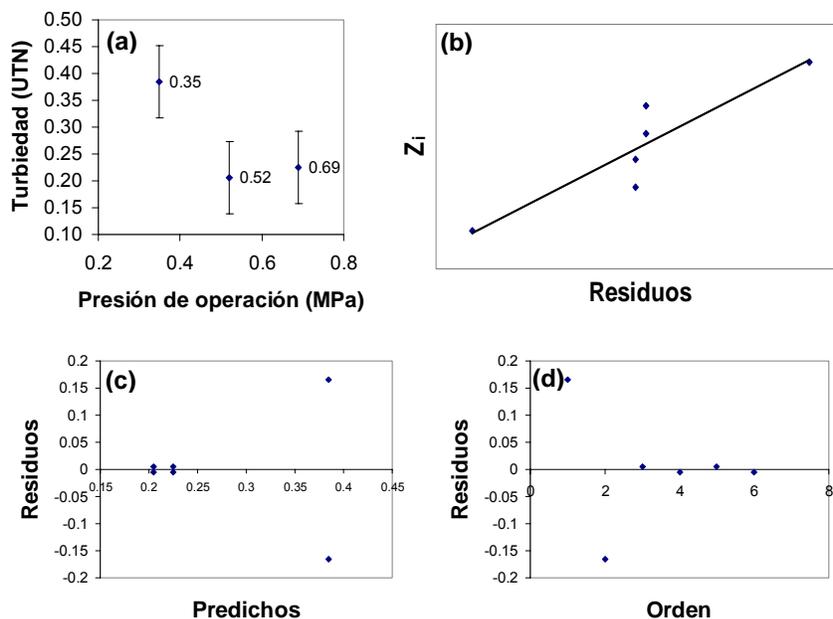


Figura A.10.5 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

### A.10.6. pH

#### A.10.6.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.  
 Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.  
 Variable de respuesta: pH (Unidades).  
 $\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$   
 $H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.10.11) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el pH del permeado.

Tabla A.10.11 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana UCB

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.225	2	0.112	2249.333	0.000
Entre tratamientos	0.000	3	0.000		
Total	0.225	5			

#### A.10.6.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: pH (Unidades).

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.10.12 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana UCB. De ella, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} = \mu_{P2}$ ; ( $8.6_{0.35} = 8.1_{0.52}$ )    2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ; ( $8.6_{0.35} \neq 8.4_{0.69}$ )    3.  $\mu_{P2} \neq \mu_{P3}$ ; ( $8.1_{0.52} \neq 8.4_{0.69}$ )

**Tabla A.10.12 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana UCB**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.47000(*)	0.00707	0.000	0.4475	0.4925
	0.69	0.18000(*)	0.00707	0.000	0.1575	0.2025
0.52	0.35	-0.47000(*)	0.00707	0.000	-0.4925	-0.4475
	0.69	-0.29000(*)	0.00707	0.000	-0.3125	-0.2675
0.69	0.35	-0.18000(*)	0.00707	0.000	-0.2025	-0.1575
	0.52	0.29000(*)	0.00707	0.000	0.2675	0.3125

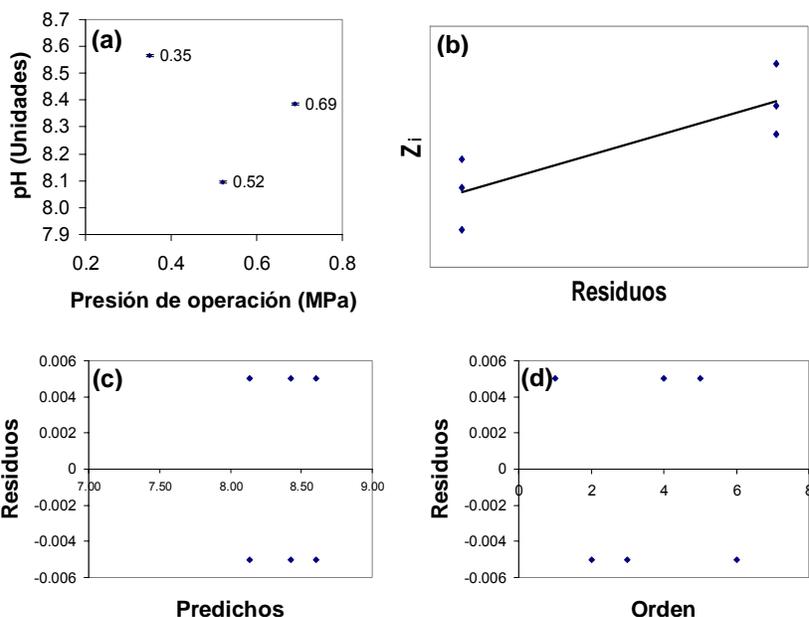
(\*) La diferencia de medias es significativa: Significación < 0.05.

**A.10.6.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias LSD (Figura A.10.6.a) se observa que la presión de operación tuvo efectos significativos en el pH del permeado (las barras LSD no se traslapan) producido con esta membrana. Se detectó un mínimo en el pH del permeado producido con la presión de 0.52 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos fueron muy semejantes y se acumulan en los extremos de la gráfica. No se puede afirmar que estos datos sigan una distribución normal con media cero (Figura A.10.6.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan la misma variación. Se cumple con el supuesto de variancia constante (Figura A.10.6.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.10.6.d).



**Figura A.10.6 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.11. Membrana ESPA4**

**A.11.1. Carbono Orgánico Total (COT)**

**A.11.1.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

No se llevó a cabo el análisis de variancia de este parámetro por falta de datos. La producción de permeado de esta membrana fue muy limitada (el flux de la membrana es muy bajo) por lo que la toma de muestras para el análisis de COT fue mínima.

**A.11.2. Absorbancia UV<sub>254</sub> (AUV<sub>254</sub>)**

**A.11.2.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> (cm<sup>-1</sup>).

α=0.05

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>

H<sub>A</sub>: μ<sub>Pi</sub>≠μ<sub>Pj</sub> para algún i≠j

Del análisis de variancia (Tabla A.11.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la AUV<sub>254</sub> del permeado.

**Tabla A.11.1 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana ESPA4**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.000	2	0.000	1014.000	0.000
Entre tratamientos	0.000	6	0.000		
Total	0.000	8			

**A.11.2.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: AUV<sub>254</sub> cm<sup>-1</sup>

Hipótesis: H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P2</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P1</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>

H<sub>0</sub>: μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub> vs. H<sub>A</sub>: μ<sub>P2</sub>≠μ<sub>P3</sub>

En la Tabla A.11.2 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana ESPA4. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P2</sub>; (0.032<sub>0.35</sub>≠0.017<sub>0.52</sub>)
2. μ<sub>P1</sub>≠μ<sub>P3</sub>; (0.032<sub>0.35</sub>≠0.017<sub>0.69</sub>)
3. μ<sub>P2</sub>=μ<sub>P3</sub>; (0.017<sub>0.52</sub>=0.017<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.11.2 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de AUV<sub>254</sub> obtenidos con la membrana ESPA4**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.015333(*)	0.000385	0.000	0.01439	0.01628
	0.69	0.014667(*)	0.000385	0.000	0.01372	0.01561
0.52	0.35	-0.015333(*)	0.000385	0.000	-0.01628	-0.01439
	0.69	-0.000667	0.000385	0.134	-0.00161	0.00028
0.69	0.35	-0.014667(*)	0.000385	0.000	-0.01561	-0.01372
	0.52	0.000667	0.000385	0.134	-0.00028	0.00161

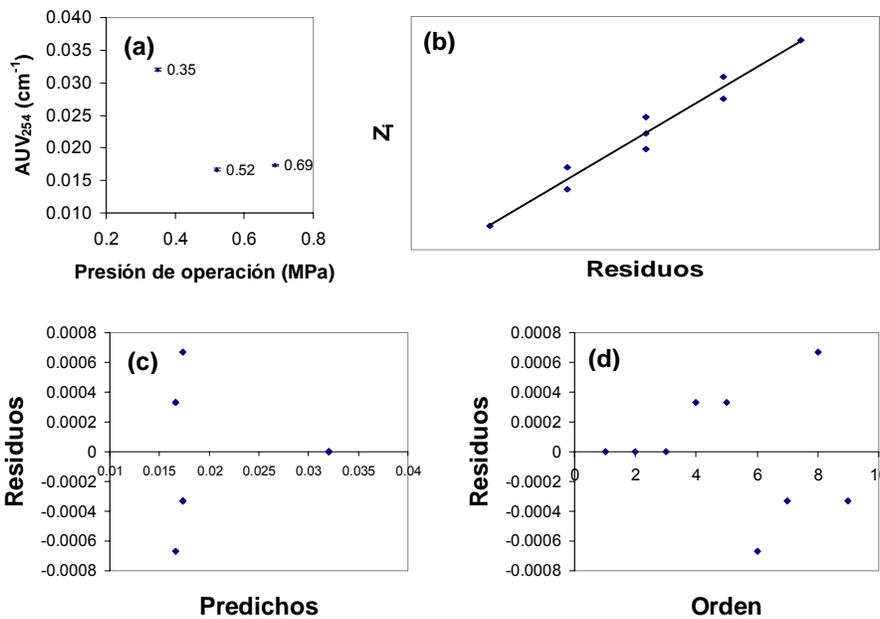
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.11.2.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias (Figura A.11.1.a) muestra una disminución significativa de la  $AUV_{254}$  del permeado como consecuencia del incremento en la presión de operación. Los valores de  $AUV_{254}$  de los permeados producidos con las presiones de 0.52 y 0.69 MPa (estadísticamente iguales) son significativamente inferiores a aquel correspondiente a la presión 0.35 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.11.1.b).
2. Sólo la presión 0.35 MPa presenta una variación diferente. Sin embargo, no se puede afirmar que los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.11.1.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.11.1.d).



**Figura A.11.1 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA- $AUV_{254}$ : (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia**

**A.11.3. Conductividad**

**A.11.3.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.11.3) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la conductividad del permeado.

**Tabla A.11.3 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de conductividad obtenidos con la membrana ESPA4**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.159	2	0.079	2380.333	0.000
Entre tratamientos	0.000	6	0.000		
Total	0.159	8			

**A.11.3.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: Conductividad (mS/cm)      Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P2}$   
 $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1}\neq\mu_{P3}$   
 $H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2}\neq\mu_{P3}$

En la Tabla A.11.4 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana ESPA4. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

- $\mu_{P1}\neq\mu_{P2}$ ; (0.51<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.25<sub>0.52</sub>)
- $\mu_{P1}\neq\mu_{P3}$ ; (0.51<sub>0.35</sub>  $\neq$  0.20<sub>0.69</sub>)
- $\mu_{P2}\neq\mu_{P3}$ ; (0.25<sub>0.52</sub>  $\neq$  0.20<sub>0.69</sub>)

**Tabla A.11.4 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de conductividad obtenidos con la membrana ESPA4**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.25333(*)	0.00471	0.000	0.2418	0.2649
	0.69	0.30333(*)	0.00471	0.000	0.2918	0.3149
0.52	0.35	-0.25333(*)	0.00471	0.000	-0.2649	-0.2418
	0.69	0.05000(*)	0.00471	0.000	0.0385	0.0615
0.69	0.35	-0.30333(*)	0.00471	0.000	-0.3149	-0.2918
	0.52	-0.05000(*)	0.00471	0.000	-0.0615	-0.0385

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.11.3.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias (Figura A.11.2.a) muestra un decremento significativo de la conductividad del permeado producido con esta membrana en función del incremento de presión. En ningún caso se superponen las barras LSD.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

- Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.11.2.b).
- Los tratamientos presentan variaciones iguales. Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.11.2.c).
- No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.11.2.d).

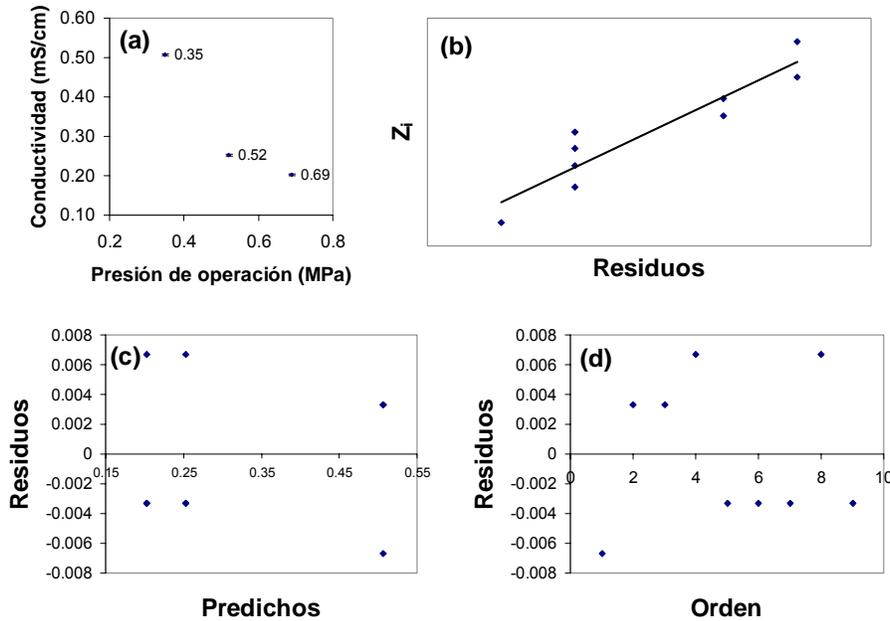


Figura A.11.2 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Conductividad: (b) Normalidad, (c) Variancia constante y (d) Independencia

A.11.4. Turbiedad

A.11.4.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

$H_A: \mu_{P_i} \neq \mu_{P_j}$  para algún  $i \neq j$

$\alpha=0.05$

Del análisis de variancia (Tabla A.11.5) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian la turbiedad del permeado.

Tabla A.11.5 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana ESPA4

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.115	2	0.058	1728.000	0.000
Entre tratamientos	0.000	6	0.000		
Total	0.115	8			

A.11.4.2. Método de comparaciones múltiples LSD

Variable de respuesta: Turbiedad (UTN)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.11.6 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana ESPA4. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ;  $(0.39_{0.35} \neq 0.15_{0.52})$
2.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P3}$ ;  $(0.39_{0.35} \neq 0.15_{0.69})$
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ;  $(0.15_{0.52} = 0.15_{0.69})$

**Tabla A.11.6 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de turbiedad obtenidos con la membrana ESPA4**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	0.24000(*)	0.00471	0.000	0.2285	0.2515
	0.69	0.24000(*)	0.00471	0.000	0.2285	0.2515
0.52	0.35	-0.24000(*)	0.00471	0.000	-0.2515	-0.2285
	0.69	0.00000	0.00471	1.000	-0.0115	0.0115
0.69	0.35	-0.24000(*)	0.00471	0.000	-0.2515	-0.2285
	0.52	0.00000	0.00471	1.000	-0.0115	0.0115

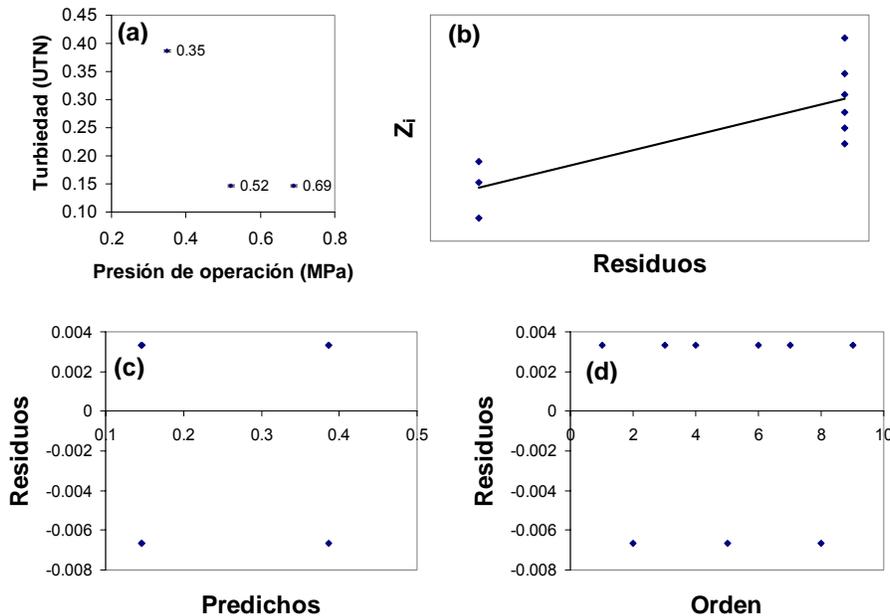
(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.11.4.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

En la gráfica de medias (Figura A.11.3.a) se puede apreciar que el incremento de la presión de operación reduce la turbiedad del permeado. Las turbiedades de los permeados producidos con las presiones de 0.52 y 0.69 MPa son estadísticamente iguales y significativamente inferiores a la turbiedad del permeado producido con la presión de 0.35 MPa.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos se acumulan en los extremos de la gráfica. Esto ocurre por la semejanza en las variaciones de los tratamientos. No se puede afirmar que estos datos procedan de una distribución normal (Figura A.11.3.b).
2. Los tratamientos (presiones) presentan la misma variación. Se cumple el supuesto de variancia constante (Figura A.11.3.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.11.3.d).



**Figura A.11.3 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-Turbiedad: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia**

**A.11.5. pH**

**A.11.5.1. Análisis de variancia (ANOVA con dos criterios de clasificación)**

Factor: Presión de operación.

Niveles: 0.35 (P1), 0.52 (P2) y 0.69 (P3) MPa.

Variable de respuesta: pH (Unidades)

$\alpha=0.05$

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}=\mu_{P3}$

$H_A: \mu_{Pi} \neq \mu_{Pj}$  para algún  $i \neq j$

Del análisis de variancia (Tabla A.11.7) se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula: al menos hay un par de medias de tratamientos (presiones) que son diferentes.
2. Las presiones cambian el pH del permeado.

**Tabla A.11.7 Análisis de variancia con dos criterios de clasificación de los datos de pH obtenidos con la membrana ESPA4**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor-p
Dentro de tratamientos	0.616	2	0.308	177.776	0.000
Entre tratamientos	0.010	6	0.002		
Total	0.627	8			

**A.11.5.2. Método de comparaciones múltiples LSD**

Variable de respuesta: pH (Unidades)

Hipótesis:  $H_0: \mu_{P1}=\mu_{P2}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$

$H_0: \mu_{P1}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P1} \neq \mu_{P3}$

$H_0: \mu_{P2}=\mu_{P3}$  vs.  $H_A: \mu_{P2} \neq \mu_{P3}$

En la Tabla A.11.8 se presentan los resultados del método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana ESPA4. De ella, se obtienen los siguientes resultados:

1.  $\mu_{P1} \neq \mu_{P2}$ ; ( $8.2_{0.35} \neq 8.4_{0.52}$ )
2.  $\mu_{P1} = \mu_{P3}$ ; ( $8.2_{0.35} = 7.5_{0.69}$ )
3.  $\mu_{P2} = \mu_{P3}$ ; ( $8.4_{0.52} = 7.8_{0.69}$ )

**Tabla A.11.8 Método de comparaciones múltiples LSD de los datos de pH obtenidos con la membrana ESPA4**

(I) Presión de operación (Factor)	(J) Presión de operación (Factor)	Diferencia de medias (I-J)	LSD	Significación	Intervalo de confianza (95%)	
					Límite inferior	Límite superior
0.35	0.52	-0.1967(*)	0.03399	0.001	-0.2798	-0.1135
	0.69	0.43000(*)	0.03399	0.000	0.3468	0.5132
0.52	0.35	0.19667(*)	0.03399	0.001	0.1135	0.2798
	0.69	0.62667(*)	0.03399	0.000	0.5435	0.7098
0.69	0.35	-0.43000(*)	0.03399	0.000	-0.5132	-0.3468
	0.52	-0.62667(*)	0.03399	0.000	-0.7098	-0.5435

(\*) La diferencia de medias es significativa : Significación < 0.05.

**A.11.5.3. Gráfica de medias LSD y verificación de los supuestos del modelo (ANOVA)**

La gráfica de medias LSD (Figura A.11.4.a) muestra que los valores de pH obtenidos con las presiones de operación 0.35, 0.52 y 0.69 MPa son significativamente diferentes. Es notable que aunque la presión de 0.52 MPa produjo un pH máximo para las presiones probadas, la presión 0.69 MPa produjo un permeado con un pH mucho menor que los correspondientes a las otras presiones. Por ello, se determina que el incremento en la presión de operación disminuye significativamente el pH del permeado producido con esta membrana.

La comprobación de los supuestos del ANOVA produjo las siguientes conclusiones:

1. Los residuos siguen una distribución normal con media cero. Los datos proceden de una distribución normal (Figura A.11.4.b).

2. Sólo la presión 0.69 MPa presenta una variación diferente (mayor). Sin embargo, no se puede afirmar que todos los tratamientos tengan la misma variancia (Figura A.11.4.c).
3. No se detecta tendencia o patrón claramente definidos de los residuos con respecto al orden en que fueron obtenidas las observaciones. Se cumple el supuesto de independencia (Figura A.11.4.d).

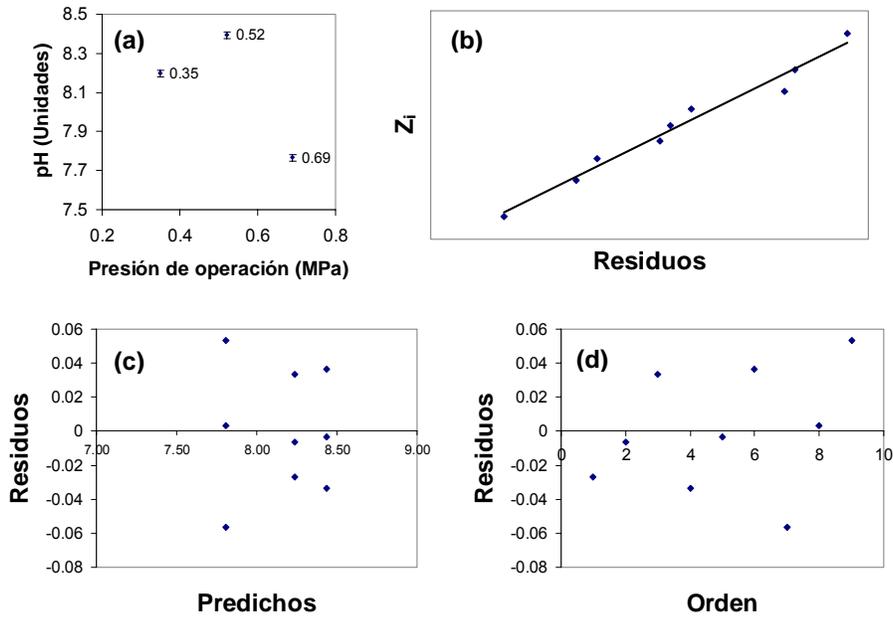


Figura A.11.4 (a) Gráfica de medias LSD; Verificación de los supuestos del modelo ANOVA-pH: (a) Normalidad, (b) Variancia constante y (c) Independencia

## ANEXO B: DATOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL MANANTIAL CERRO COLORADO (VALLE DE TULA)

Tabla B.1 Calidad del agua del manantial Cerro Colorado

Muestreo	Fecha	Coliformes Totales UFC/100 mL	Coliformes Fecales UFC/100 mL	COT (mg/L)	COT <sub>s</sub> (mg/L)	AUV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	SDT (mg/L)	Conductividad (mS/cm)	Turbiedad (UTN)	pH (Unidades)	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Temperatura (°C)
1	28-Sep-04	48±0	82±8	3.539±0.005	-	0.041±0.001	1127±9	1.63±0.0163	0.06±0.05	7.2±0	-	374±3	20
2	10-Nov-04	33±6	32±3	2.875±0.004	-	0.021±0.001	1166±20	1.73±0.0173	0.3±0.3	-	469±1	362±4	19
3	30-Nov-04	62±1	40±1	3.477±0.005	-	0.054±0	1338±20	1.75±0.0175	0.1±0.1	7.05±0	949±0	382±1	19
4	18-Ene-05	57±8	26±0	8.305±0.012	-	0.06±0	1180±2	1.71±0.0171	0.13±0.15	7.1±0	470±1	396±10	19
5	22-Feb-05	-	-	15.41±0.023	-	0.06±0	1224±34	1.72±0.0172	0.06±0.01	7.2±0	468±1	382±2	19
6	28-Feb-05	-	-	6.267±0.009	-	0.056±0	1150±4	1.59±0.17	0.14±0.02	7.2±0	478±7	386±1	-
7	07-Mar-05	59±22	25±5	7.718±0.012	-	0.062±0.002	1198±13	1.62±0.01	0.11±0.03	7.1±0	474±1	405±2	21
8	14-Mar-05	40±4	6±1	18.2±0.027	-	0.058±0.001	1252±7	1.57±0.09	0.33±0.09	7.1±0	231±0	378±0	21
9	28-Mar-05	41±11	14±0	5.016±0.008	-	0.065±0.001	1701±146	1.67±0.04	0.1±0.01	7±0	459±4	194±1	20
10	11-Abr-05	55±0	23±0	42.13±0.063	-	0.06±0.001	1191±10	1.75±0.01	0.1±0.01	6.7±0.2	527±2	376±2	20
11	25-Abr-05	121±9	21±3	39.19±0.17	-	0.055±0.001	1358±20	1.58±0.13	0.2±0.02	7.1±0	475±1	388±0	20
12	11-May-05	306±28	284±23	36.55±0.034	-	-	1382±42	1.48±0.22	0.13±0.02	7.3±0	475±1	390±3	20
13	15-Jun-05	29±6	24±3	40.07±0.088	41.35±0.093	0.057±0.001	1253±16	1.63±0.05	0.16±0.06	-	479±1	374±1	20
14	28-Jun-05	44±15	25±6	36.87±0.11	38.12±0.009	0.054±0.001	1246±16	1.72±0.01	0.2±0.02	-	461±2	358±1	20
15	06-Jul-05	25±1	22±5	33.76±0.212	10.87±0.083	0.055±0.001	1219±5	1.71±0.02	0.2±0.02	7.4±0	440±0	372±2	20
16	15-Jul-05	54±2	11±5	30.91±0.009	40.45±0.254	0.053±0.001	1208±20	1.71±0.01	0.15±0.02	7.1±0	443±4	359±1	20
17	23-Ago-05	38±10	22±14	38.62±0.2	39.41±0.189	-	906±26	1.6	0.1±0.01	7.2±0.1	480±0	375±1	19
18	07-Sep-05	34±1	3±0	27.56±0.095	2.252±0.003	-	1127±5	-	-	-	468±1	381±1	-

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Adams M. (1959). **Bacteriophages**. Nueva York (NY). Interscience Pub.

Afonso, M. D. y Bórquez, R. (2002) **Nanofiltration of wastewaters from the fish meal industry**. *Desalination*, **151** (2), 131-138.

Agenson, K. O.; Oh, J. I. y Urase, T. (2003) **Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process**. *J. Membr. Sci.*, **225**, 91-103.

Aguayo, S.; Muñoz, M. J.; De la Torre, A.; Roset, J.; De la Peña, E. y Carballo, M. (2004) **Identification of organic compounds and ecotoxicological assessment of sewage treatment plants (STP) effluents**. *Sci Total Environ.*, **328** (1-3), 69-81.

Aleem, A. y Malik, A. (2005) **Genotoxicity of Yamuna River water at Okela (Delhi), India**. *Ecotox. Environ. Saf.*, **61** (3), 404-412.

Alfa Laval [en línea, citado el 16 de noviembre de 2005] Disponible en World Wide Web: [http://www.alfalaval.com/membraneinstitute/aboutsp/intro\\_about.htm](http://www.alfalaval.com/membraneinstitute/aboutsp/intro_about.htm).

AMC (2004) **El agua en México vista desde la academia**. Academia Mexicana de Ciencias, Editores: Jiménez, B. y Marín, L. Primera edición, D.F., México. 15-55 pp.

APHA, AWWA y WEF (1998) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation 20va. edición. Washington DC. Estados Unidos de América.

Aptula, A. O.; Patlewicz, G.; Roberts, D. W. y Schultz, T. W. (2005) **Non-enzymatic glutathione reactivity and in vitro toxicity: A non- animal approach to skin sensitization**. *Toxicology in Vitro*, **20** (2), 239-247.

Aquious, ITT Industries [en línea, citado el 16 de noviembre de 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.pciproducts.com/images/Aquious%20Main%20Brochure.pdf>.

Asano, T. y Cotruvo, J. A. (2004) **Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations**. *Water Res.*, **38**, 1941-1951.

Asano, T. y Levine, A. D. (1996) **Wastewater reclamation, recycling y reuse: Past, present y future**. *Wat. Sci. Tech.*, **33** (10-11), 1-14.

AWWA (1998) **Tratamiento del agua por procesos de membrana: Principios, procesos y aplicaciones**. American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa. Primera edición en español, McGraw-Hill, México D.F., México, 1-126, 293-477 y 673-714 pp.

Bargeman, G.; Vollenbroek, J. M.; Straatsma, J.; Schoën, C. G. P. H. y Boom, R. M. (2005) **Nanofiltration of multi-component feeds. Interactions between neutral and charged components and their effect on retention**. *J. Membr. Sci.*, **247** (1-2), 11-20.

Bellona, C. y Drewes, J. E. (2005) **The role of membrane surface charge and solute physico-chemical properties in the rejection of organic acids by NF membranes**. *J. Membr. Sci.*, **249** (1-2), 227-234.

BIBRA (1994) **Diethyl phthalate**. BIBRA working group. Toxicity profile, BIBRA Toxicology International, 9 pp.

Bogaerts, P.; Bohatier, J. y Bonnemoy, F. (2001) **Use of the ciliated protozoan *Tetrahymena pyriformis* for the assessment of toxicity and quantitative structure-activity relationships of xenobiotics: coparison with the Microtox Test**. *Ecotox. Environ. Saf.*, **49** (3), 293-301.

Bonnet, J. L.; Guiraud, P.; Dusser, M.; Kadri, M.; Laffosse, J.; Steiman, R. y Bohatier, J. (2003) **Assessment of anthracene toxicity environmental eukaryotic microorganisms: *Tetrahymena pyriformis* and selected micromycetes**. *Ecotox. Environ. Saf.*, **60** (1), 87-100.

BUA (1994) **Butylated Hydroxytoluene**. Beratergremium fuer umweltrelevante Altstoffe. Vol:58, 124 pp.

Chang, E. E.; Chiang, P. C. y Lin, T. F. (1998) **Development of surrogate organic contaminant parameters for source water quality standards in Taiwán, ROC**. *Chemosphere*, **37** (4), 593-606.

Chávez, A. (2004) **Optimización del tratamiento primario avanzado vía distribución de tamaño de partícula**. Tesis de doctorado, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM. México D.F. México.

Choi, K. S.; Kim, S. H.; Kim, S. S.; Rhee, G. S.; Sohn, K. H.; Kwack, S. J.; Chae, S. Y.; Choi, Y. W.; Won, Y. H. y Lee, S. J. (2002) **Di-n-butyl phthalate and its metabolite mono-n-butyl phthalate induced G1 cell cycle arrest and apoptosis in cultured rat embryonic limb bud cells**. *Environmental Sciences: an International Journal of Environmental Physiology and Toxicology*, **9** (2-3), 188.

CICAD (2003) **Diethyl phthalate**. Concise International Chemical Assessment Document. **52**, 32.

Cronin, M. T. D.; Aptula, A. O.; Duffy, J. C.; Netzeva, T. I.; Rowe, P. H.; Valkova, I. V. y Schultz, T. W. (2002) **Comparative assessment of methods to develop QSARs for the prediction of the toxicity of phenols to *Tetrahymena pyriformis***. *Chemosphere*, **49** (10), 1201-1221.

Culp, R. L., Wesner, G. M. y Culp, G. L. (1978) **Handbook of advanced wastewater treatment**. Segunda edición, Van Nostrand Reinhold Company, Estados Unidos de América, p. 8.

Darcy, P.; Kelly, J. P.; Leonard, B. E. y Henry, J. A. (2002) **The effect of lofepramine and other related agents on the motility of *Tetrahymena pyriformis***. *Toxicol. Lett.*, **128** (1-3), 207-214.

Davis, M. y Cornwell, D. (1998) **Introduction to environmental engineering**. Tercera edición, McGraw-Hill, Estados Unidos de América, 169, 178-198 pp.

Dias, N.; Mortara, R. A. y Lima, N. (2003) **Morphological and physiological changes in *Tetrahymena pyriformis* for the in vitro cytotoxicity assessment of Triton X-100**. *Toxicology in Vitro*, **17** (3), 357-366.

Downs, T. J.; Cifuentes, E. G. y Suffet, I. M. (1999) **Risk screening for exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico City region**. *Environ Health Perspect*, **107** (7), 553-561.

Edzwald, J. K.; Becker, W. C. y Wattier, K. L. (1985) **Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors**. *J. Am. Water Works Assoc.*, **77** (4), 122-132.

Ema, M.; Kurosaka, R.; Amano, H. y Ogawa, Y. (1995) **Phase specificity of the developmental toxicity of mono-n-butyl phthalate in rats**. *International Toxicologist*, **7** (1), AB, 74-P-3.

EPA (2002) **Ground water and drinking water**. U. S. Environmental Protection Agency. List of drinking water contaminants and MCLs. EPA 816-F-02-013, 12 pp. [en línea, citado el 20 de enero de 2006] Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/cgi-bin/epaprintonly.cgi>.

EPA (2004): **Guidelines for Water Reuse**. Environmental Protection Agency. EPA 625/R-04/108, 445 pp. [en línea, citado el 25 de octubre de 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.htm>.

Galambos, I.; Molina, J. M.; Járay, P.; Vatai, G. y Bekássy, E. M. (2004) **High organic content industrial wastewater treatment by membrane filtration**. *Desalination*, **162**, 117-120.

GE Osmonics, Inc. [en línea, citado el 16 de noviembre de 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.osmolabstore.com/OsmoLabPage.dll?BuildPage&1&1&5>.

Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2004) **Análisis y diseño de experimentos**. Primera edición, McGraw-Hill, México D.F., México, 1-190 pp.

Gutiérrez, L. (2002) **Determinación de trihalometanos como subproductos de un proceso de cloración de una fuente de agua potable subterránea**. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, 33-49 pp. México D.F. México.

Gwon, E.; Yu, M.; Oh, H. y Ylee, Y. (2003) **Fouling characteristics of NF and RO operated for removal of dissolved matter from groundwater**. *Water Res.*, **37**, 2989-2997.

IARC (1986) **Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans**. Vol:40, 161-206 pp.

IRIS (1996) **U.S. EPA database on toxic substances**. Integrated Risk Information System.

Jiménez, B. (2001) **La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada**. Primera edición, LIMUSA, México D.F., México, 183-204 pp.

Jiménez, B. y Chávez, A. (2004) **Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case**. *Wat. Sci. Tech.*, **50** (2), 269-276.

Jiménez, B. y Landa, H. (1998) **Physico-chemical and bacteriological characterization of wastewater from Mexico City**. *Wat. Sci. Tech.*, **37** (1), 1-8.

Jiménez, B.; Cruickshank, C., Capella, S.; Chávez, A.; Palma, A.; Pérez, R. y García, V. (1999) **Estudio de la factibilidad de empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México**. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 8384, (diciembre), 1500 pp.

Kimura, K.; Amy, G.; Drewes, J. E.; Heberer, T.; Kim, T. y Watanabe, Y. (2003a) **Rejection of micropollutants (disinfection by-products, endocrine disrupting compounds, and pharmaceutically active compounds) by NF/RO membranes**. *J. Membr. Sci.*, **227**, 113-121.

Kimura, K.; Amy, G.; Drewes, J. y Watanabe, Y. (2003b) **Adsorption of hydrophobic compounds onto NF/RO membranes: an artifact leading to overestimation of rejection**. *J. Membr. Sci.*, **221**, 89-101.

Koch Membrane Systems, Inc. [en línea, citado el 16 de noviembre de 2005] Disponible en World Wide Web: <http://www.kochmembrane.com/index.html>.

Korn, C.; Andrews, R. C. y Escobar, M. D. (2002) **Development of chlorine dioxide-related by-product models for drinking water treatment.** *Water Res.*, **36**, 330-342.

Koyuncu, I.; Turan, M.; Topacik, D. y Ates, A. (2000) **Application of low pressure nanofiltration membranes for the recovery and reuse of dairy industry effluents.** *Wat. Sci. Tech.*, **41** (1), 213-221.

Ku, Y.; Lee, P. y Wang, W. (2005) **Removal of dyestuffs in aqueous solution by nanofiltration.** *J. Membr. Sci.*, **250** (1-2), 159-165.

Langonne, I.; Saillenfait, A. M. y Payan, J. P. (1998) **Comparative embryotoxicity of di-n-butyl phthalate and its main metabolite mono-n-butyl phthalate at midgestation.** *Teratology*, **58** (1), 22A.

Lazarova, V.; Levine, B.; Sack, J.; Cirelli, G.; Jeffrey, P.; Muntau, H.; Salgot, M. y Brissaud, F. (2001) **Role of water reuse for enhancing integrated water management in Europe and Mediterranean countries.** *Wat. Sci. Tech.*, **43** (10), 25-33.

Lee, S.; Cho, J. y Elimelech, M. (2005) **Combined influence of natural organic matter (NOM) and colloidal particles on nanofiltration membrane fouling.** *J. Membr. Sci.*, **262** (1-2) 27-41.

LGEEPA (1998) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Título Primero: Disposiciones Generales, Capítulo I: Normas Preliminares, Artículo 92. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Dirección General de Bibliotecas, Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, 49 pp. México D.F. México.

Li, Q. y Elimelech, M. (in press) **Synergistic effects in combined fouling of a loose nanofiltration membrane by colloidal materials and natural organic matter.** *J. Membr. Sci.*, MEMSCI-6948, 11 pp.

Liikanen, R.; Miettinen, I. y Laukkanen, R. (2003) **Selection of membrane to improve quality of chemically treated surface water.** *Water Res.*, **37** (4) 864-872.

Lin, C.; Shirazi, S.; Rao, P. y Agarwal, S. (2006) **Effects of operational parameters on cake formation of CaSO<sub>4</sub> in nanofiltration.** *Water Res.*, **40** (4), 806-816.

Marecos do Monte, M. H. F.; Angelakis, A. N. y Asano, T. (1996) **Necessity and basis for establishment of European guidelines for reclaimed wastewater in the Mediterranean region.** *Wat. Sci. Tech.*, **33** (10-11), 303-316.

Matsumoto, H.; Chen, Y.; Yamamoto, R.; Konosu, Y.; Minagawa, M. y Tanioka, A. (2005) **Membrane potential across nanofiltration membranes: Effect of nanoscaled cavity structure.** *J. Mol. Struct.*, **739** (1-3), 99-104.

McGhee, T. (1991) **Water supply and sewerage.** Sexta edición, McGraw-Hill, Singapur, 163 pp.

Metcalf y Eddy, Inc. (2003) **Wastewater engineering: Treatment and reuse.** Cuarta edición, McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos de América, 1345-1438 pp.

MWD (2005) Merriam-Webster on Line Dictionary. Merriam-Webster Inc., USA, [en línea, citado el 27 de marzo de 2006] Disponible en World Wide Web: <http://www.m-w.com/>.

MWH (2005) **Water treatment: Principles and design.** Segunda edición, John Wiley and Sons, Inc., Nueva Jersey, Estados Unidos de América, 955-1034 pp.

Nakao, S. I. (1994) **Determination of pore size distribution. 3. Filtration membranes.** *J. Membr. Sci.*, **96**, 131.

Netzeva, T. I. y Schultz, T. W. (2005) **QSARs for aquatic toxicity of aromatic aldehydes from Tetrahymena data.** *Chemosphere*, **61** (11), 1632-1643.

NOM (1998) Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Secretaría del Medio Ambiente, Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998, 10 pp. México D.F. México.

NOM (2000) Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud, Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de junio de 2000, 10 pp. México D.F. México.

Novotny, C.; Dias, N. ; Kapanen, A.; Malachova, K.; Nádrovcova, M.; Itävaara, M. y Lima, N. (in press) **Comparative use of bacterial, algal and protozoan test to study toxicity of azo- and anthraquinone dyes.** *Chemosphere*, Corrected Proof.

OMS (2004) Organización Mundial de la Salud: **Guías para la calidad del agua potable**. Tercera edición, Volumen 1: Recomendaciones, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 121-143 y 210-220 pp.

Ozaki, H. y Li, H. (2002) **Rejection of organic compounds by ultra-low pressure reverse osmosis membrane**. *Water Res.*, **36**, 123-130.

Peavy, H.; Rowe, D. y Tchobanoglous, G. (1985) **Environmental Engineering**. McGraw-Hill, Estados Unidos de América, 1-62 pp.

Petersen, R. J. (1993) **Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes**. *J. Membr. Sci.*, **83**, 81.

Raman, L. P.; Cheryan, M.; Rajagopalan, N. (1994) **Consider nanofiltration for membrane separations**. *Chem. Eng. Progr.*, **90** (3), 68.

RLGEEPARP (1998) Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos. Capítulo I, Disposiciones Generales, Artículo 3º. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Dirección General de Bibliotecas, Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de noviembre de 1998, 2 pp. México D.F. México.

Sawyer, C.; McCarty, P. y Parkin, G. (2001) **Química para ingeniería ambiental**. Cuarta edición, McGraw-Hill, Colombia, 475-479, 508-531, 613-623 pp.

Schaep, J.; Van der Bruggen, B.; Uytterhoeven, S.; Croux, R.; Vandecasteele, C.; Wilms, D.; Van Houtte, E. y Vanlerberghe, F. (1998) **Removal of hardness from groundwater by nanofiltration**. *Desalination*, **119** (1-3), 295-302.

Scott, K. y Hughes, R. (1996) **Industrial membrane separation technology**. Blackie Academic & Professional, Gran Bretaña, 1-112 y 151-180 pp.

Shalan, H. F. (2002) **Development of fouling control strategies pertinent to nanofiltration membranes**. *Desalination*, **153** (1-3), 125-131.

Siebe, C. y Cifuentes, E. (1995) **Environmental impact of wastewater irrigation in cenral Mexico: An overview**. *Int J Health Res*, **5** (2), 161-173.

Singer, P. C.; Barry III, J. J.; Palen, G. M. y Scrivner, A. E. (1981) **Trihalomethane formation in North Carolina drinking waters**. *J. Am. Water Works Assoc.*, **73** (8), 392-401.

- Snoeyink, V. y Jenkins D. (1999) **Química del agua**. Limusa, México D.F., México, 13-35 pp.
- Sotomayor, C. (1998) **Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Distrito de Riego 03**. Tesis de maestría. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, 1 pp. México D.F. México.
- Sujbert, L.; Rácz, G.; Szende, B.; Schröder, H. C.; Müller, W. E. G. y Török, G. (2006) **Genotoxic potential of by-products in drinking water in relation to water disinfection: Survey of pre-ozonated and post-chlorinated drinking water by Ames-test**. *Toxicology*, **219** (1-3), 106-112.
- Tchobanoglous, G. y Angelakis, A. N. (1996) **Technologies for wastewater treatment appropriate for reuse: Potential for applications in Greece**. *Wat. Sci. Tech.*, **33** (10-11), 15-24.
- Thanuttamavong, M; Yamamoto, K.; Oh, J. I.; Choo, K. H. y Choi, S. J. (2002) **Rejection characteristics of organic and inorganic pollutants by ultra low-pressure nanofiltration of surface water for drinking water treatment**. *Desalination*, **145** (1-3), 257-264.
- TOCA Instruction manual. Total organic carbon analyzer. Model TOC-5050. Shimadzu Corporation. Environmental analysis instruments plant. 114-115, 122 pp.
- Torres, J. (2001) **Potabilización del agua subterránea del Valle del Mezquital mediante membranas para el suministro a la ciudad de México**. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 70 pp. México D.F. México.
- UE (1998) **On the quality of water intended for human consumption**. Council Directive 98/83/EC. Official Journal of European Communities, L330/32-L330-46. Bruselas, Bélgica.
- Velázquez, M. A.; Ortega, M.; Martínez, A.; Kohashi, J. y García, N. (2002) **Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mexquital, Hidalgo, México**. *Terra*, **20**, 459-464.
- Wang, K. Y. y Chung, T. (2005) **The characterization of flat composite nanofiltration membranes and their applications in the separation of Cephalexin**. *J. Membr. Sci.*, **247** (1-2), 37-50.
- Wang, Z.; Zhao, Y.; Wang, J. y Wang, S. (2005) **Studies on nanofiltration membrane fouling in the treatment of water solutions containing humic acids**. *Desalination*, **178** (1-3), 171-178.
- Weber, S.; Gallenkemper, M.; Melin, T.; Dot, W. y Hollender, J. (2004) **Efficiency of nanofiltration for the elimination of steroids from water**. *Wat. Sci. Tech.*, **50** (5), 9-14.

WHO (1996) **Analysis of wastewater for use in agriculture: A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques**. World Health Organization. Editado por Ayres, R. y Mara, D., 31 pp.

WHO (2003) **Health risks in aquifer recharge using reclaimed water: State of the art report**. World Health Organization. Editado por Aertgeerts, R. y Angelakis, A. Copenhagen. Dinamarca. 280 pp.

Williams, G. M.; Iatropoulos, M. J. y Whysner, J. (1999) **Safety assessment of butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene as antioxidant food additives**. *Food Chem Toxicol*, **37** (9-10), 1027-1038.

Xu, P.; Drewes, J. E.; Kim, T.; Bellona, C. y Amy, G. (in press) **Effect of membrane fouling on transport of organic contaminants in NF/RO membrane applications**. *J. Membr. Sci.*, MEMSCI-7015, 11 pp.

Zani, C.; Reretti, D.; Buschini, A.; Poli, P.; Rossi, C.; Guzzella, L.; Di Caterino, F. y Monarca, S. (2005) **Toxicity and genotoxicity of surface water before and after various potabilization steps**. *Mutat. Res.*, **587** (1-2), 26-37.

Zhang, Z; Bright, V. M. y Greenberg, A. R. (in press) **Use of capacitive microsensors and ultrasonic time-domain reflectometry for in-situ quantification of concentration polarization and membrane fouling in pressure-driven membrane filtration**. *Sens. Actuators B*, SNB-8987, 9 pp.