



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES BÁSICAS DE INGENIERÍA
PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA
POTABILIZADORA PARA CERRO COLORADO
CON UN PROCESO DE NANOFILTRACIÓN**

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 :

ARNOLD OSWALD ARCOS ARÉVALO

TUTORA:

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS

2010



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidenta: Dra. María Teresa Orta Ledesma

Secretario: Dr. Jesús Gracia Fadrique

Vocal: Dra. Blanca Jiménez Cisneros

1^{er}. Suplente: M.en I. Ana Elisa Silva Martínez

2^{do}. Suplente: Dr. Oscar González Barceló

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORA DE TESIS:

Dra. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS

A Sandra con amor

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de ser parte de ellos y seguir superándome.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada sin la cual no hubiera sido posible llevar a cabo la presente tesis.

Al Grupo de Tratamiento y Reúso, por todo el apoyo recibido para alcanzar esta meta.

A la Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros, por el privilegio de aceptarme bajo su tutela y brindarme los medios necesarios para la realización de este trabajo de grado.

A los miembros de mi jurado: M. en I. Ana Elisa Silva Martínez, Dr. Jesús Gracia Fadrique Dr. Oscar González Barceló y Dra. María Teresa Orta Ledesma por sus valiosas observaciones, comentarios y sugerencias, los cuales enriquecieron este documento.

A Marc-Antoine Soulis y Karina Leticia Acosta por toda su ayuda y apoyo para llevar a buen término este proyecto.

A David Antonio Martínez Morales y Fabián Alfredo Neira Ruíz por su compañía, motivación, consejo y los buenos momentos que hemos compartido. Pero sobre todo por su amistad.

... y a todos mis compañeros y amigos que de alguna forma han estado a mi lado.

A todos ustedes

GRACIAS

Contenido

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVO	14
METAS	14
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	15
1.1. El manantial de Cerro Colorado	15
1.2. El reúso del agua en el Valle de Tula	16
1.3. Calidad del agua del manantial de Cerro Colorado.....	18
1.4. Nanofiltración: una alternativa de tratamiento.....	21
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	23
2.1. Tecnología de membranas.....	23
2.2. Nanofiltración.....	25
2.2.1. Importancia del pretratamiento en nanofiltración	25
2.2.2. Importancia del postratamiento en nanofiltración.....	28
2.2.3. Variables de diseño en sistemas por membranas	28
2.3. Ablandamiento.....	30
2.3.1. Dureza del agua	30
2.3.2. Procesos de ablandamiento mediante la adición de cal	33
2.3.3. Re-carbonatación	34
2.3.4. Tratamiento dividido.....	36
2.4. Desinfección	38
2.4.1. Cloración.....	41
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	44
3.1. Muestreo.....	44
3.2. Caracterización.....	45
3.2.1 Índice de saturación de Langelier e índice de Ryzner.....	47
3.2.2. Índice de densidad salina.....	49
3.3. Ablandamiento.....	50
3.3.1. Tratamiento estadístico de la prueba	52
3.4. Nanofiltración.....	53
3.4.1. Determinación del ángulo de contacto.....	54

3.4.2. Determinación de permeabilidad hidráulica y remoción de compuestos inorgánicos	55
3.4.3. Tratamiento estadístico de la prueba	58
3.4.4. Determinación de la remoción de contaminantes emergentes	59
3.5. Cloración	60
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	61
4.1. Caracterización del agua del manantial de Cerro Colorado	61
4.1.1. Cálculo del índice de saturación de Langelier e índice de Ryzner.....	62
4.1.2. Determinación del índice de densidad salina (IDS)	63
4.2. Resultados Ablandamiento.....	65
4.2.1. Análisis de datos.....	65
4.3. Pruebas de nanofiltración	68
4.3.1. Determinación del ángulo de contacto.....	68
4.3.2. Permeabilidad hidráulica y remoción de compuestos inorgánicos.....	71
4.3.3. Remoción de compuestos orgánicos	81
4.3.4. Remoción de contaminantes emergentes.....	82
4.4. Desinfección	83
4.5. Diseño de la planta	86
4.5.1 Población de proyecto	88
4.5.2. Rejillas	90
4.5.3. Ablandamiento	91
4.5.4. Diseño del filtro de medios múltiples.....	93
4.5.5. Retrolavado	95
4.5.6. Filtros cartucho	96
4.5.7. Nanofiltración	97
4.5.8. Re-carbonatación	98
4.5.9. Cloración.....	100
4.5.10. Tanque de espesamiento de lodos	101
4.5.11. Deshidratación de lodos.....	102
4.5.12. Dimensionamiento de los tanques de reactivos.....	103
4.5.13. Balance de masa.....	105
4.5.14. Estimación del consumo de energía	107

4.5.15. Preliminar de costos	110
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	112
REFERENCIAS.....	113
ANEXO A	122
ANEXO B	133
ANEXO C	135
ANEXO D	142
ANEXO E	149

Lista de Tablas

Tabla 1. Calidad del agua del manantial de Cerro Colorado.....	20
Tabla 2. Características de los procesos de membrana	24
Tabla 3. Métodos de pretratamiento en nanofiltración y sus aplicaciones.....	27
Tabla 4. Resumen de parámetros de diseño en membranas	29
Tabla 5. Principales cationes causantes de la dureza en el agua y principales aniones asociados.....	31
Tabla 6. Escala de clasificación para la dureza del agua.....	32
Tabla 7. Comparación de las características de los métodos comunes de desinfección	39
Tabla 8. Características de los métodos comunes de desinfección	40
Tabla 9. Fechas de muestreos	45
Tabla 10. Parámetros medidos y técnicas analíticas.....	46
Tabla 11. Membranas comerciales seleccionadas	53
Tabla 12. Parámetros y técnicas analíticas empleadas en la cloración.....	60
Tabla 13. Caracterización del agua del manantial de Cerro Colorado	61
Tabla 14. Resumen del Cálculo del LSI y RI.....	62
Tabla 15. Criterios de evaluación de los índices LSI y RI	62
Tabla 16. Resultados IDS	64
Tabla 17. Valores de IDS recomendados para omitir pretratamiento de agua de alimentación.....	64
Tabla 18. Condición Inicial del agua.....	65
Tabla 19. Mediciones de ángulo de contacto	70
Tabla 20. Ángulo de contacto de membranas de nanofiltración	70
Tabla 21. Condiciones iniciales del agua del manantial de Cerro Colorado en promedio...	72
Tabla 22. Condiciones promedio del agua después del ablandamiento	72
Tabla 23. Condiciones promedio del permeado de nanofiltración usando la membrana NF90 de DOWFILMTEC.....	73
Tabla 24. Condiciones promedio del permeado de nanofiltración usando la membrana NF270 de DOWFILMTEC.....	73
Tabla 25. Condiciones promedio del permeado de nanofiltración usando la membrana 302986 de THOMAPOR	74
Tabla 26. Eficiencia de remoción de compuestos inorgánicos, presentada por el ablandamiento con cal y por las membranas de nanofiltración con respecto al agua cruda	76
Tabla 27. Permeabilidad en $L.m^{-2}.h^{-1}.Bar^{-1}$ para agua destilada, agua ablandada y agua de Cerro Colorado sin tratar; obtenida por cada membrana de nanofiltración	77
Tabla 28. Permeabilidades en $L.m^{-2}.h^{-1}.Bar^{-1}$ obtenidas en diversas investigaciones	77

Tabla 29. Concentración de COT en permeados de nanofiltración.....	82
Tabla 30. Concentración de compuestos seleccionados presentes en el agua del manantial de Cerro Colorado	82
Tabla 31. Eficiencia de remoción, en porcentaje, de la membrana NF270 para contaminantes emergentes seleccionados.....	83
Tabla 32. Estimación de la producción de agua potable	88
Tabla 33. Proyección de población CONAPO, 2005 - 2030.....	89
Tabla 34. Consideraciones de diseño para las rejillas	90
Tabla 35. Dimensiones de rejillas	90
Tabla 36. Características del proceso de ablandamiento.....	91
Tabla 37. Parámetros típicos para impulsores	92
Tabla 38. Consideraciones de diseño para el proceso de ablandamiento.....	92
Tabla 39. Dimensionamiento del proceso de ablandamiento.....	93
Tabla 40. Consideraciones de diseño del filtro de medios múltiples	94
Tabla 41. Dimensiones para cada uno de los cuatro filtros de medios múltiples.....	94
Tabla 42. Composición de cada uno de los 4 filtros.....	95
Tabla 43. Resumen de características del retrolavado.....	96
Tabla 44. Resumen de diseño de filtros cartucho.....	97
Tabla 45. Resumen de diseño cartuchos de nanofiltración	97
Tabla 46. Diseño de la re-carbonatación	98
Tabla 47. Dosificación de la re-mineralización.....	99
Tabla 48. Dosificación de neutralización	100
Tabla 49. Dosificación de neutralización	101
Tabla 50. Dimensionamiento del tanque de espesamiento de lodos	101
Tabla 51. Dimensionamiento del filtro prensa	102
Tabla 52. Dimensionamiento de tanques de reactivos	103
Tabla 53. Resumen del cálculo de potencia de motores.....	108
Tabla 54. Consumo energético nanofiltración.....	109
Tabla 55. Tarifa H-M media tensión	111

Lista de Figuras

Figura 1. Manantial de cerro colorado.....	15
Figura 2. Estado de Hidalgo	16
Figura 3. Distrito de Riego 03 – Tula.....	18
Figura 4. Principio de operación de membrana.....	23
Figura 5. Procesos de membrana.....	24
Figura 6. Diagrama de flujo de re-carbonatación en una sola etapa y proceso de ablandamiento por adición de cal	35
Figura 7. Diagrama de flujo de re-carbonatación dividida y proceso de ablandamiento por exceso de cal.....	35
Figura 8. Diagrama de flujo de un proceso de tratamiento dividido	36
Figura 9. Curva generalizada obtenida durante la cloración	43
Figura 10. Equipo autoSDI para determinación de IDS.....	50
Figura 11. Equipo para prueba de jarras.....	52
Figura 12. Diagrama del módulo de nanofiltración OSMONIC	56
Figura 13. Banco de pruebas	56
Figura 14. Diagrama de filtraciones	58
Figura 15. Determinación de IDS en laboratorio	64
Figura 16. Resultados obtenidos del ablandamiento	66
Figura 17. Comparativo del permeado de nanofiltración producido por cada membrana ...	75
Figura 18. Comparación Flux vs Presión: a) membrana NF90, b) membrana NF270, c) membrana 302986	79
Figura 19. Comparación Permeabilidad vs Presión: a) membrana NF90, b) membrana NF270, c) membrana 302986.....	81
Figura 20. Dosificación de hipoclorito de sodio: a) medición de Cloro total residual, b) medición de Cloro libre residual	85
Figura 21. Diagrama del tren de tratamiento propuesto	87
Figura 22. Diagrama de procesos de la Planta de Potabilización.....	104
Figura 23. Balance de masa.....	106

RESUMEN

El manantial de Cerro Colorado, ubicado en el estado de Hidalgo, surte de agua a 130,251 habitantes distribuidos en las comunidades de Francisco I. Madero, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Tetepango y Tezontepec de Aldama (Sotomayor, 1998); con solo desinfección con cloro como tratamiento. Sin embargo, se forma de las infiltraciones de agua residual al acuífero local por el riego agrícola. Por ello contiene materia orgánica (3 mg/L de COT) y compuestos clasificados como contaminantes emergentes. Por lo que la desinfección resulta insuficiente para asegurar una buena calidad de agua.

Por ello el presente trabajo de tesis propone procesos, así como las condiciones de operación apropiados para tratar esta agua, tomando como base la nanofiltración. Por su origen subterráneo, el agua del manantial presenta una alta concentración de Calcio y Magnesio, medidos como dureza total, de 415 mg/L de CaCO_3 y un índice de densidad salina (IDS) de 5.59 lo que indica que el agua es incrustante y dañaría las membranas de nanofiltración. Como resultado, dentro del proceso se incluye un ablandamiento con cal como pretratamiento, para el cual se realizaron pruebas de laboratorio para obtener las condiciones de tratamiento. Estas condiciones son, para obtener 76% eficiencia se agrega una dosis de cal 1.5 veces el valor del cálculo teórico, lo que representa 1.12 $\text{g}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{L}$ de cal. Respecto al proceso de nanofiltración se probaron tres membranas (NF90, NF270 de DOWFILMTEC y 302986 de THOMAPOR), y se eligió la NF270. Esta membrana se operó a 10 bar presentando una permeabilidad de $12.45 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$, así mismo permite remover el COT hasta 0.6 mg/L y los contaminantes emergentes en un 92%.

Con estos datos se presentó el dimensionamiento de los procesos que integrarían una planta de potabilización para el manantial de Cerro Colorado. En cuanto a costos de operación por insumos en reactivos y consumo eléctrico, se determinó en \$9.13 M.N./ m^3 de agua tratada.

INTRODUCCIÓN

La sobreexplotación y contaminación de las fuentes de abastecimiento convencionales de agua para consumo humano sumado al crecimiento poblacional de las grandes ciudades ha llevado a considerar la necesidad de utilizar fuentes no convencionales para el suministro. Para ello, el empleo de procesos avanzados de tratamiento es una componente fundamental para proporcionar una calidad óptima al agua.

En México, el reúso del agua residual doméstica para el riego agrícola ha sido una consecuencia natural de su histórico depósito final en el suelo. El origen de esta práctica proviene de finales del siglo XVIII cuando el agua residual de la ciudad de México comenzó a ser enviada a la zona del Valle de Tula, Hidalgo, con el doble propósito de desalojar rápidamente los excedentes de agua de lluvia para evitar inundaciones y deshacerse de las aguas negras. Debido a la falta de agua en el Valle de Tula, ésta comenzó a ser utilizada para el riego. Sorprendentemente el empleo de las aguas residuales mejoró la economía de la región; por ello en 1920, se construyó un sistema para distribuir y regular el flujo del agua residual para la agricultura. Una consecuencia inesperada fue la recarga del acuífero del Valle de Tula por la infiltración de las aguas residuales estimada en por lo menos 25 m³/s (Jiménez *et al.*, 2004). Como consecuencia de esta recarga artificial han aflorado manantiales con gastos de entre 100 y 600 L/s. El mayor de éstos, el “Manantial Cerro Colorado”, tiene un gasto de 600 L/s (BGS, 1998) y es usado como fuente de agua potable para los habitantes de la zona, sometiéndola únicamente a un proceso de desinfección con cloro. Este tratamiento tiene únicamente por finalidad la inactivación de microorganismos presentes en ella, pero no la remoción de compuestos químicos.

Debido a su origen, en el agua del manantial de Cerro Colorado persisten compuestos de diversa naturaleza. Por lo que, aparte de contener bacterias, contiene compuestos orgánicos que pueden ser carcinogénicos, mutagénicos,

teratogénicos o alterar el sistema endócrino. Estos compuestos se clasifican bajo el nombre genérico de contaminantes emergentes (CE), tal como demuestran los trabajos de Gibson *et al.* (2007) y Silva (2008). Por este motivo, el presente trabajo tiene por objeto el diseño de un proceso de potabilización que garantice la remoción tanto de microorganismos como de contaminantes emergentes del agua del manantial de Cerro Colorado. Para lograr este objetivo se ha considerado a la nanofiltración como el proceso apropiado para el tratamiento, dado que es capaz de remover contaminantes orgánicos de bajo peso molecular, como son pesticidas (Van der Bruggen *et al.*, 1999; Kiso *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2006), farmacéuticos (Kimura *et al.*, 2003) y disruptores del sistema endócrino (Zhang *et al.*, 2006; Yoon *et al.*, 2007).

La nanofiltración, además de ser eficiente para remover CE y materia orgánica natural (Snyder *et al.*, 2007; Chae *et al.*, 2008), produce un permeado que garantiza altos niveles de calidad en forma constante. Además posee ventajas energéticas y económicas frente a otros procesos de membranas. Sin embargo, para su empleo se requiere de conocimiento de un tema escasamente abordado en la literatura y que es el pretratamiento para eliminar los constituyentes que causan daño o afectan su funcionamiento. Este es el objeto de esta tesis, junto con la determinación de los criterios de ingeniería básicos.

Al concluir el presente trabajo se habrán elegido los procesos, operaciones unitarias y condiciones de operación que integren el sistema de potabilización mediante nanofiltración para el agua del manantial de Cerro Colorado, con objeto de asegurar su calidad para consumo humano de corto y largo plazo.

OBJETIVO

Elaborar el diseño conceptual de una planta potabilizadora para el agua del manantial Cerro Colorado que considere la remoción de contaminantes emergentes y compuestos orgánicos.

METAS

- Seleccionar las operaciones y procesos unitarios que componen una planta de potabilización para el agua de Cerro Colorado para la remoción de cinco contaminantes emergentes.

- Definir criterios de diseño que permitan dimensionar las operaciones y procesos que integran la planta de potabilización de agua.

- Realizar una estimación del consumo de energía necesario para la operación de la planta de potabilización.

- Estimar el costo por el consumo de reactivos y energía.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

1.1. El manantial de Cerro Colorado

El manantial de Cerro Colorado se encuentra en el municipio de Tezontepec de Aldama, en la parte suroeste del estado de Hidalgo a 20°07'7" de latitud norte y a 99°15'44" de longitud oeste (CNA, 2010). Es un cuerpo de agua que emergió en el año de 1968 (BGS, 1998), a causa de la recarga del acuífero por los excedentes para riego agrícola con agua residual.

Este manantial presenta un gasto de 600 L/s (BGS, 1998), y sirve como fuente de agua potable para 130,251 habitantes de la región (Sotomayor, 1998; Downs *et al.*, 1999; INEGI, 2000), Figura 1.



FIGURA 1. MANANTIAL DE CERRO COLORADO

1.2. El reúso del agua en el Valle de Tula

El Valle de Tula se encuentra 80 km al norte de la ciudad de México a una altitud media de 1,895 msnm. Está limitado al norte por el Valle de Ixmiquilpan, al este por el valle y la sierra de Actopan, al oeste por la sierra Xinthe y al sur por el Estado de México (Romero, 1994; CONAGUA, 2002), Figura 2. El clima es seco semiárido con temperatura media anual de 18.3°C. La precipitación anual es de 550 mm y la evapotranspiración de 1750 mm. La época de lluvias se limita a los meses de Junio a Septiembre (CONAGUA, 2002; Jiménez, 2004).

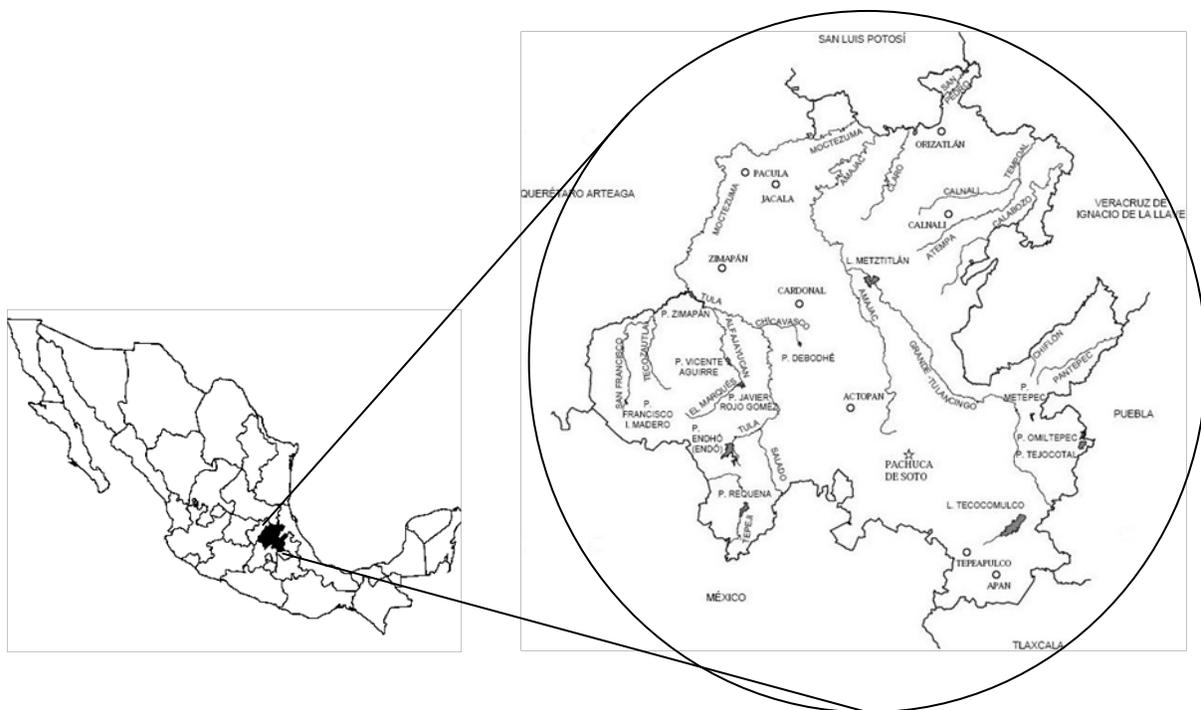


FIGURA 2. ESTADO DE HIDALGO

Por sus condiciones climatológicas, el Valle de Tula carece de agua para la agricultura. Sin embargo, a finales del siglo XVIII, el agua residual de la ciudad de México comenzó a ser enviada a la zona, con el propósito de desalojar los excedentes de agua de lluvia y deshacerse de las aguas negras. Debido a la falta de líquido, el agua que así llegaba comenzó a ser utilizada para el riego agrícola. El empleo de las aguas residuales mejoró la economía de la región; por ello en

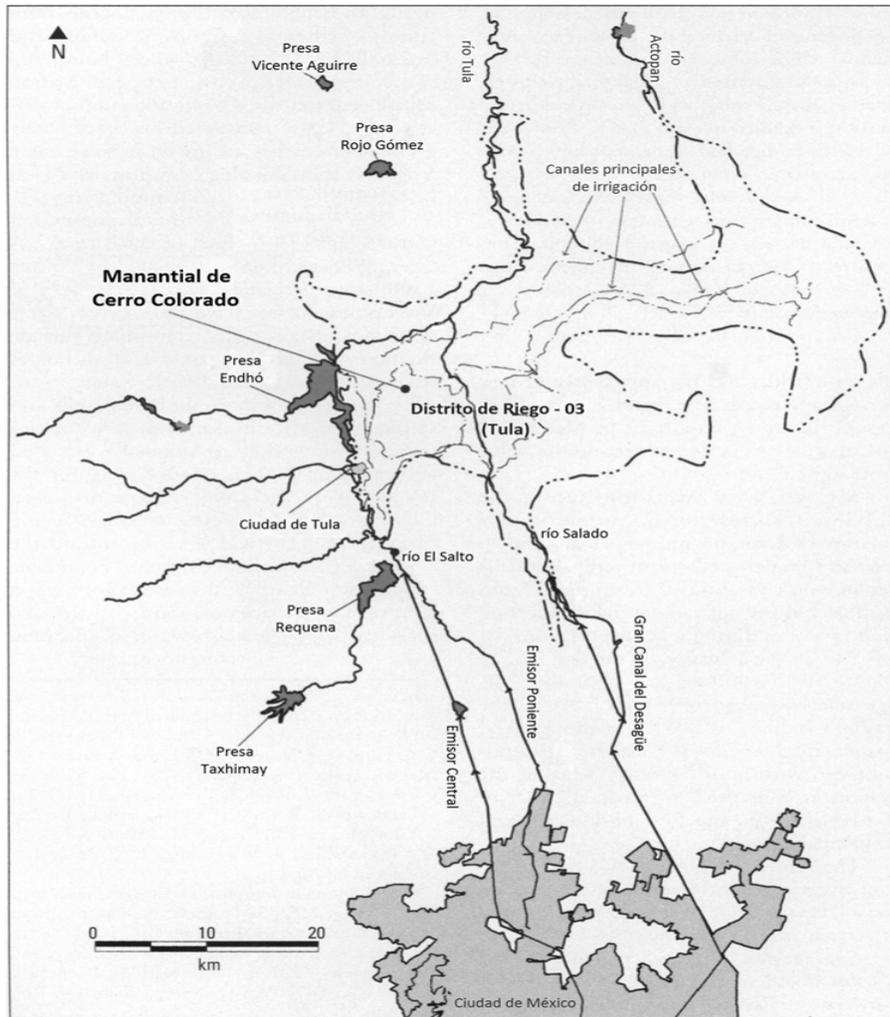
1920, se construyó un sistema para distribuir y regular el flujo del agua residual para la agricultura (Jiménez *et al.*, 2004).

Actualmente, el agua residual de la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) es enviada sin recibir ningún tratamiento previo a través de tres canales (Emisor poniente, Emisor Central y Gran canal) hacia el Valle de Tula, donde se usa para riego en los Distrito de Riego 03 – Tula y 100 – Alfajayucan. Convirtiendo al Valle del Mezquital en uno de los ejemplos de riego con aguas negras, más antiguo y de mayor extensión en el mundo (Simens *et al.*, 2007).

En el Valle de Tula se ubican los Distritos de Riego – 03 (Tula) y 100 (Alfajayucan), los cuales ocupan una área de 51,825 ha y 40,473 ha respectivamente, para el cultivo (CONAGUA, 2010). Reciben aproximadamente 45 m³/s de agua residual de la ZMVM (Blumenthal *et al.*, 2001; Downs *et al.*, 1999) que es usada, sin tratamiento alguno, en el riego agrícola de ambos distritos. Actualmente el Distrito de Riego – 03 tiene una producción anual de 3,043,023 toneladas de cultivo, de entre los que destacan la producción de alfalfa verde y maíz; en tanto que el Distrito de Riego – 100 cuenta con una producción anual de 761,795 toneladas de cultivo (CONAGUA, 2009).

El uso de agua residual provee una fuente sustancial para el riego agrícola. Además de mejorar la calidad del suelo, aporta los nutrientes necesarios para una mayor productividad agrícola. Simultáneamente, coadyuva a la preservación de las fuentes de agua para consumo humano (Cifuentes, *et al.*, 2000; Romero, 1994).

Sin embargo, el empleo de elevadas láminas de riego (1,5 a 2,2 m/ha.año) (Jiménez *et al.*, 2004) ha provocado la recarga artificial del acuífero. Como resultado, han aparecido nuevas áreas de descarga de estos excedentes, entre las que se cuenta el manantial de Cerro Colorado (Figura 3).



Adaptado de: Downs et al., 1999

FIGURA 3. DISTRITO DE RIEGO 03 – TULA

1.3. Calidad del agua del manantial de Cerro Colorado

Como ya fue mencionado, el agua del manantial de Cerro Colorado proviene de la infiltración del agua residual en el acuífero del Valle de Tula, usada en el riego agrícola de la región. Siendo el mismo suelo, el que la depura de forma natural a su paso a través de él.

En consecuencia, el agua subterránea y por ende la del manantial presentan una calidad aceptable, tal como lo indican estudios previos realizados. Se observa de la Tabla 1, que los resultados correspondientes a sólidos disueltos totales en Cerro Colorado sobrepasan lo establecido por la norma oficial mexicana para agua de consumo humano, NOM-127-SSA1-1994. Así también el valor de la dureza total hace que se considere como agua “muy dura”, de acuerdo con Sawyer *et al.* (1994). Resaltan también los coliformes totales, coliformes fecales, y el carbono orgánico total (COT). La presencia de coliformes indica la necesidad de emplear desinfección por la posible presencia de microorganismos patógenos; y en ambos casos su concentración supera el valor de la norma mexicana, que establece la ausencia total de los mismos. En relación con el COT, éste es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica presente, y provee información sobre la posible formación de compuestos tóxicos en presencia de desinfectantes como el cloro.

Se infiere también de los resultados en la Tabla 1, que debido a las altas concentraciones de coliformes (fecales y totales) es fuertemente recomendado el empleo de altas dosis de cloro para asegurar la calidad biológica del agua. Sin embargo, los procesos de cloración en presencia de materia orgánica, pueden traer como consecuencia la formación de sub-productos de la desinfección (SDP), de carácter carcinogénico, mutagénico y teratogénico tanto en humanos como en animales (Sirivedhin *et al.*, 2005).

Tabla 1. Calidad del agua del manantial de Cerro Colorado

PARÁMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	RANGO		NOM-127-SSA1-1994 (modificación 2000)
			MÍNIMO	MÁXIMO	
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	489.90	231.00	949.00	
AUV _{254nm}	cm ⁻¹	0.05	0.02	0.07	
Carbón Orgánico Disuelto (COD)	mg/L	22.56	4.20	31.40	
Carbón Orgánico Total (COT)	mg/L	26.34	2.88	55.06	
Cloruros	mg/L	196.33	164.00	250.00	250
Coliformes fecales	UFC/100 mL	72.33	3.00	930.00	0
Coliformes Totales	UFC/100 mL	64.14	25.00	306.00	0
Conductividad	μS/cm	1708.28	734.00	3613.00	
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO, total)	mg/L	10.50	4.00	17.00	
Demanda Química de Oxígeno (DQO, total)	mg/L	33.50	18.00	49.00	
Dureza de Ca	mg CaCO ₃ /L	438.00	174.00	900.00	
Dureza de Mg	mg CaCO ₃ /L	123.33	59.00	202.00	
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	396.00	194.00	1009.00	500
E.Coli	UFC/100 mL	17.00	14.33	19.67	0
Enterococci	UFC/100 mL	7.17	2.67	11.67	
Fluoruros	μg/L	1320.00	822.00	1818.00	1500
Fósforo	mg/L	0.65	0.40	0.90	
Nitratos (como N)	mg/L	12.23	8.70	16.00	10
Nitritos (como N)	mg/L	0.02	0.01	0.02	1
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.09	0.03	0.22	0.50
pH	pH unit	7.15	6.70	7.70	6.5 - 8.5
Potasio	mg/L	45.73	37.46	54.00	
Sodio	mg/L	224.30	208.60	240.00	200
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	1214.00	869.00	1701.00	1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	1.50	1.00	2.00	
Sólidos Totales (ST)	mg/L	1191.00	1062.00	1320.00	
Sulfatos	mg/L	262.67	150.00	378.00	400
Temperatura	°C	19.73	19.00	21.00	
Turbiedad	UTN	0.18	0.06	1.00	5

Con información de: Torres, 2001; Trujillo, 2006; Agullar, 2006; Jiménez et al., 2008.

Aunado a lo anterior, existe también un grupo de compuestos orgánicos etiquetados bajo el nombre de contaminantes emergentes (CE), entre los que se cuentan: compuestos farmacéuticos, productos cosméticos, potenciales disruptores del sistema endócrino y pesticidas entre otros (Gibson *et al.*, 2007; Snyder *et al.*, 2007); que han llamado la atención en años recientes, por su riesgo potencial a la salud de humanos y animales (Yoon *et al.*, 2007; Esplugas *et al.*, 2007). Muchos de los cuales ingresan al medio ambiente a través de los efluentes de aguas residuales (Kim *et al.*, 2007; Kimura *et al.*, 2005).

En los trabajos realizados por Gibson *et al.* (2007) y Silva (2008), se reporta la presencia de disruptores endócrinos: triclosán, butilbencilftalato, Di-2(etilhexil) ftalato, estrona, 4-nonilfenol, bisfenol-A, 17 β -estradiol; y los fármacos: ibuprofeno y naproxeno; en concentraciones que van de 0.01 a 25.0 ng/L en el agua del manantial de Cerro Colorado. Por lo que es necesario contar con una alternativa de tratamiento que junto con la desinfección, asegure la potabilidad del agua a la población que se abastece de ella.

1.4. Nanofiltración: una alternativa de tratamiento

El uso de la tecnología de membranas en el tratamiento de agua, se ha ido incrementado en diversas regiones del planeta. Debido a que estas han demostrado ser capaces de producir permeados libres de microorganismos, turbiedad y materia orgánica, de efluentes de ríos, lagos y aguas subterráneas. Lo que a su vez reduce las dosis de cloro durante la desinfección y el riesgo de formación de SDP (Snyder *et al.*, 2007; Chae *et al.*, 2008).

La nanofiltración es una técnica prometedora, con un gran número de aplicaciones en el campo de los procesos del agua, tanto en potabilización como para el tratamiento de aguas residuales (Bodzek y Dudziak, 2006).

Diversas investigaciones han comprobado, que la nanofiltración es capaz de remover contaminantes orgánicos de bajo peso molecular, particularmente

pesticidas (Van der Bruggen *et al.*, 1999; Kiso *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2006), compuestos farmacéuticos (Kimura *et al.*, 2003) y compuestos disruptores del sistema endócrino (Zhang *et al.*, 2006; Yoon *et al.*, 2007). La nanofiltración, además (Jiménez *et al.*, 2007):

- Produce un agua de calidad constante sin importar las variaciones del agua de alimentación, lo que facilita el cumplimiento de las normas de calidad del agua.
- Presenta una gran flexibilidad, ya que las membranas se encuentran ensambladas en módulos que facilitan el escalamiento de la planta de tratamiento.
- Reducen los costos generales de producción, ya que el proceso de separación se lleva a cabo en función del tamaño molecular de las especies, lo que hace innecesario el uso de aditivos, salvo para la limpieza periódica de las membranas.
- Su creciente demanda ha generado, por una parte, nuevos métodos de fabricación que han disminuido el costo de producción, y por otra, el diseño de modos de operación más eficientes.
- Permite el paso de pequeños iones, como el sodio, lo que evita una regeneración de sales al final del tratamiento. Los iones más grandes y la mayoría de los componentes orgánicos se rechazan, aunque esto depende del tamaño y la forma de las moléculas por eliminar.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Tecnología de membranas

Un proceso de membrana se puede definir como la división de una corriente de alimentación por una película delgada (membrana) en dos fracciones: una de retenido (o concentrado) y otra de permeado. Los procesos de membrana, usan la diferencia de presión entre la alimentación y el permeado como fuerza directora para transportar el solvente (generalmente agua) a través de la membrana. Las partículas y componentes disueltos son parcialmente retenidos sobre la base de características tales como tamaño, forma y carga (Van der Bruggen *et al.*, 2003), Figura 4.

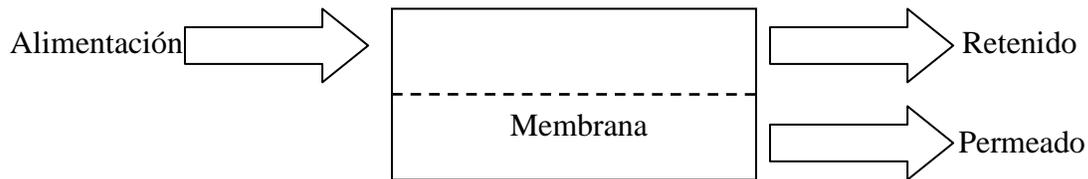


FIGURA 4. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE MEMBRANA

Los procesos de membrana se pueden clasificar por varios criterios como: (a) características de la membrana (diámetro de poro); (b) tamaño y carga de las partículas o moléculas retenidas; y, (c) presión ejercida sobre la membrana. Actualmente, se distinguen cuatro procesos de membrana (Figura 5): microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Las características de estos procesos se resumen en la Tabla 2.

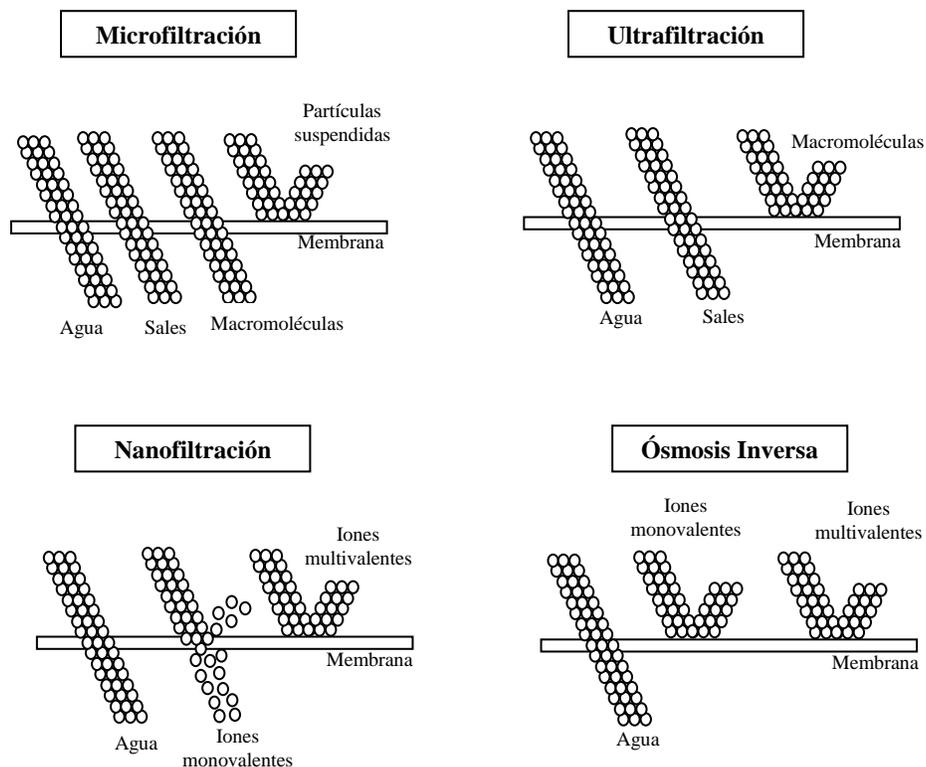


FIGURA 5. PROCESOS DE MEMBRANA

Tabla 2. Características de los procesos de membrana

	Microfiltración (MF)	Ultrafiltración (UF)	Nanofiltración (NF)	Ósmosis Inversa (OI)
Permeabilidad (L/h.m ² .bar)	>1,000	10 – 1,000	1.5 - 30	0.05 – 1.5
Presión (bar)	0.1 - 2	0.1 - 5	5 - 20	5 - 120
Tamaño de poro (nm)	100 – 10,000	2 - 100	0.5 - 2	< 0.5
Rechazo <ul style="list-style-type: none"> • Iones monovalentes • Iones multivalentes • Compuestos orgánicos pequeños • Macromoléculas • Partículas 	✓	✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
Mecanismo de separación	Tamizado	Tamizado	Tamizado Difusión	Difusión
Aplicaciones	Clarificación; pretratamiento; remoción de bacterias.	Remoción de macromoléculas, bacterias y virus.	Remoción de iones multivalentes y pequeños compuestos orgánicos.	Agua ultra pura; desalación.

Adaptado de: Van der Bruggen *et al.*, 2003

2.2. Nanofiltración

La nanofiltración, es un proceso usualmente considerado como intermedio entre la ultrafiltración (UF) y la ósmosis inversa (OI), debido a que su selectividad se atribuye tanto a mecanismos de tamizado, característicos de la UF, como a mecanismos de difusión característicos de la OI (García-Aleman *et al.*, 2004; Al-Amoudia y Lovitt, 2007).

Las membranas de nanofiltración usualmente son compuestas, con una película delgada de poliamida; lo que las hace semejantes en su estructura química a las membranas de OI. Sin embargo, éstas a diferencia de las membranas de OI tienen un bajo rechazo de iones monovalentes, pero alto para iones divalentes. Además producen caudales de permeado mayores que los de OI. En general, las membranas de nanofiltración tienen una alta carga y poros del orden de 1nm (Schäfer *et al.*, 2005; Al-Amoudia y Lovitt, 2007).

La nanofiltración tiene un principio de rechazo basado en efectos estéricos y de carga, por lo que requiere presiones de operación relativamente bajas (0.5 a 2 MPa) y produce un flux de permeado aceptable, ello representa una ventaja energética y económica frente a la OI (AWWA, 1998). Su peso molecular de corte se ubica en un rango de 200 a 1,000 Da (Meylan *et al.*, 2007), lo que garantiza la retención de contaminantes con bajo peso molecular como los contaminantes emergentes, la materia orgánica natural y los precursores de subproductos de la desinfección (Hilal *et al.*, 2004; Meylan *et al.*, 2007).

2.2.1. Importancia del pretratamiento en nanofiltración

El pretratamiento del agua, es necesario para proteger la membrana y mejorar su rendimiento. La protección, usualmente se refiere a prevenir el ensuciamiento de las membranas.

En muchos casos, la reducción en el caudal de permeado durante la operación de filtración es debido al ensuciamiento de las membranas. El

ensuciamiento afecta la duración de vida útil de las membranas, mientras que la limpieza continua o cambio de ellas, provoca retrasos y tiempos muertos. Los intervalos de limpieza son función de la calidad del agua de alimentación, el equipo de filtración y las condiciones del proceso. Además, cada tipo de configuración de los sistemas de membranas presenta un grado diferente de dificultad para su limpieza, y susceptibilidad al ensuciamiento (Schäfer *et al.*, 2005).

Los principales responsables del ensuciamiento en nanofiltración son las sales inorgánicas poco solubles, los coloides o materia particulada, los compuestos orgánicos disueltos y los microorganismos. El ensuciamiento puede ser parcialmente controlado a través de la optimización del proceso de filtración: mediante la adecuada elección del tipo y material de la membrana de nanofiltración, la configuración de los módulos y los parámetros de filtración (caudal, presión y temperatura). Sin embargo, lo más apropiado es realizar un pretratamiento del agua de alimentación (AWWA, 1998; Schäfer *et al.*, 2005).

El esquema adecuado de pretratamiento depende de la composición del influente de alimentación. Los requerimientos son diferentes de acuerdo con el tipo de módulo de nanofiltración y su densidad de empaque, por ejemplo, una membrana enrollada en espiral requiere menos pretratamiento que un módulo de fibra hueca. En nanofiltración el pretratamiento es usado para:

- Reducir sólidos suspendidos y minimizar el efecto de coloides.
- Reducir el ensuciamiento microbiológico en la superficie de la membrana.
- La adición de químicos (antiescalantes, ajuste de pH).
- Remoción de compuestos oxidantes si es requerido (para proteger las membranas).

Algunos métodos de pretratamiento usados en nanofiltración se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos de pretratamiento en nanofiltración y sus aplicaciones

Pretratamiento	Sales poco solubles	Coloides	Sólidos	Tratamiento biológico	Agentes oxidantes	Materia orgánica
Ajuste de pH		●				●
Inhibidores de incrustaciones	●	●				
Intercambio iónico	●	●				
Ablandamiento con cal	●					
Unidad de desaturación	●					
Filtro media		●	●			
Oxidación-filtración		●				
Coagulación en línea		●				●
Coagulación floculación		●	●			●
Micro o Ultrafiltración		●	●			●
Filtro cartucho		●	●			
Decloración					●	
Desinfección				●		
Carbón activado granular				●	●	●
Tratamiento biológico		●				●
Tratamiento electromagnético	●	●	●			

Adaptado de: Schäfer *et al.*, 2005.

2.2.2. Importancia del postratamiento en nanofiltración

Muchos fabricantes de membranas de Ósmosis Inversa y de Nanofiltración, proclaman que no deberían encontrarse virus en el agua tratada debido a que el tamaño del poro de éstas es menor. No obstante, en la práctica los virus atraviesan las membranas. Los rendimientos de remoción de virus varían entre el 99.2 y 100% (AWWA, 1998). La diferencia se debe a imperfecciones en la superficie de la membrana, daños producidos en ellas, o por un sellado deficiente de las unidades de filtración. Debido a este tipo de situaciones, la mayoría de los trenes de tratamiento de membranas incluyen algún tipo de método de desinfección como medida de seguridad contra posibles infiltraciones de microorganismos en el permeado.

2.2.3. Variables de diseño en sistemas por membranas

Las variables que se consideran, durante el diseño de un sistema de tratamiento de agua, mediante el uso de tecnología de membranas, se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de parámetros de diseño en membranas

Parámetro	Descripción
Presión	Altas presiones producen alto flujo de permeado, pero la capacidad para soportar alta presión por la membrana es limitada.
Temperatura	Altas temperaturas originan grandes flujos de permeado. Sin embargo, la vida de las membranas se reduce.
Densidad de empaque	Es el área de membrana que puede ser aprovechado por cada módulo.
Permeado	Es la recuperación de producto agua por unidad de área de la membrana por unidad de tiempo. El flujo del permeado tiende a decrecer con el tiempo.
Factor de recuperación	Es la razón entre el volumen de agua recuperado y el volumen total tratado.
Rechazo de sales	El rechazo de sales depende del tipo de membrana y el gradiente de concentración de sales.
Pretratamiento y agua de alimentación.	<p>El agua de alimentación debe estar libre de compuestos incrustantes (Calcio, Magnesio, Hierro, Manganeso, silicio, etc.). Estos iones deben ser reducidos mediante pretratamiento.</p> <p>Compuestos orgánicos, los SDT, microorganismos, grasas y aceites deben ser removidos del agua de alimentación con el fin de prevenir ensuciamiento y taponamiento de las membranas.</p> <p>Las membranas de acetato de celulosa están expuestas a hidrólisis a altos y bajos pH.</p> <p>La turbiedad y el tamaño de las partículas deben ser controlados.</p>
Velocidad del caudal del agua de alimentación	Altas velocidades y flujos turbulentos son necesarios para minimizar las concentraciones por polarización en la superficie de la membrana.
Vida útil	La vida útil de la membrana depende de la calidad del agua de alimentación.
Limpieza	Las membranas deben recibir un tratamiento de limpieza periódicamente.
Potencia	Es necesario considerar la potencia que requerirán las bombas para el agua de alimentación.

Adaptado de: Qasim, 1999.

2.3. Ablandamiento

El ablandamiento del agua es el proceso mediante el cual se produce una reducción de la dureza del agua. Durante el ablandamiento, el Calcio es removido del agua en la forma de precipitado de $\text{CaCO}_{3(s)}$, mientras que el Magnesio es removido como precipitado de $\text{Mg(OH)}_{2(s)}$.

La dureza de carbonatos es removida a través de la adición de iones Hidroxilo y el aumento en el pH de la solución, con lo que los iones bicarbonato son convertidos a carbonatos (incremento del pH a aproximadamente 10.3). El incremento en la concentración de carbonato provoca que el producto iónico del Calcio y el Carbonato $[\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}]$, exceda la constante del producto solubilidad para el Carbonato de Calcio, $\text{CaCO}_{3(s)}$, y ocurra la precipitación. Como resultado, la concentración de iones de Calcio originalmente asociados a los aniones bicarbonato se reducen. De igual modo la dureza de carbonatos y no carbonatos de Magnesio es removida mediante el incremento en la concentración de iones hidroxilo, hasta que el producto iónico del Magnesio y el hidroxilo $[\text{Mg}^{2+}] [\text{OH}]^2$ exceda la constante de solubilidad del producto para Hidróxido de Magnesio, $\text{Mg(OH)}_{2(s)}$, y ocurra la precipitación del mismo (AWWA, 1990).

2.3.1. Dureza del agua

La dureza del agua describe la presencia de ciertos minerales disueltos que provocan incrustaciones en calderas, depósitos en tuberías, y causan el consumo excesivo de jabones hechos a base de grasa animal. Los minerales responsables de este fenómeno son referidos como iones de dureza (Droste, 1997; Sawyer *et al.*, 1994).

El término dureza, surge originalmente debido a la referencia coloquial de la dificultad de lavar usando agua con una alta concentración de iones minerales. Es por ello que la dureza se define como la capacidad del agua para consumir jabón. Además de provocar incrustaciones en tuberías de agua caliente, calentadores,

calderas, y otras unidades en las cuales la temperatura del agua es incrementada apreciablemente (Droste, 1997; Sawyer *et al.*, 1994; Seyrig *et al.* 2007).

La dureza del agua varía considerablemente de un sitio a otro. En general las aguas superficiales son más “suaves” que las subterráneas. La dureza en el agua es causada por la presencia de cationes metálicos multivalentes, y es un reflejo de la naturaleza de las formaciones geológicas con las cuales ha estado en contacto. Tales iones, son capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones. Los principales cationes causantes de la dureza en el agua y los más importantes aniones asociados con ellos, se muestran en la Tabla 5 en el orden de su relativa abundancia en las aguas naturales (Sawyer *et al.*, 1994; AWWA, 1990).

Tabla 5. Principales cationes causantes de la dureza en el agua y principales aniones asociados

Principales cationes causantes de la dureza	Aniones
Ca^{2+}	HCO_3^-
Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Sr^{2+}	Cl^-
Fe^{2+}	NO_3^-
Mn^{2+}	SiO_3^{2-}

Adaptado de: Sawyer *et al.*, 1994

Debido a que las especies dominantes son los cationes divalentes de Calcio y Magnesio, la *dureza total* es a menudo definida como la suma de las concentraciones de estos dos elementos, la cual es usualmente expresada en términos de miligramos por litro de CaCO_3 .

La aceptación pública de la dureza varía de una comunidad a otra, la sensibilidad de los consumidores a ella, está relacionada al grado de dureza al cual se encuentran acostumbrados. A causa de estas variaciones en la aceptación

pública, la dureza final dada al agua por las diferentes plantas que brindan el servicio de ablandamiento, varía en un rango comprendido que va de los 50 a los 150 mg/L de CaCO₃ (AWWA, 1990). De acuerdo con la escala de clasificación para la dureza del agua presentada por Sawyer y McCarty (1994), el agua varía de suave a dura. En la Tabla 6 se presenta dicha clasificación.

Tabla 6. Escala de clasificación para la dureza del agua

Rango de dureza, mg/L de CaCO₃	Tipo de dureza
0 - 75	Suave
75 – 150	Moderadamente Dura
150 – 300	Dura
> 300	Muy Dura

Adaptado de: Sawyer *et al.*, 1994

En México, el límite máximo permisible para la dureza establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 es de 500 mg/L de CaCO₃ (NOM, 2000). La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda durezas comprendidas en un rango de 100 a 200 mg/L de CaCO₃, con el fin de evitar problemas de corrosión e incrustación (WHO, 2006).

La dureza se clasifica en dos formas, la primera por los iones metálicos y la segunda por los aniones asociados con los iones metálicos. A continuación se discuten ambas clasificaciones:

1. *Dureza Total.* La dureza total representa la suma de cationes metálicos multivalentes. Normalmente se considera que únicamente son el Calcio y el Magnesio. Los análisis químicos generalmente se realizan para determinar la dureza total y la dureza de Calcio del agua. La dureza de Magnesio luego es calculada como la diferencia entre la dureza total y la dureza de Calcio.

2. *Dureza de Carbonatos y No Carbonatos.* La dureza de Carbonatos, también conocida como dureza temporal es la dureza debida a los carbonatos y bicarbonatos de Calcio o Magnesio. La dureza de carbonatos es químicamente equivalente a la alcalinidad, dado que la mayor parte de la alcalinidad en las aguas naturales es causada por los iones de carbonato y bicarbonato. La dureza de No Carbonatos o dureza permanente, se refiere a la diferencia entre la dureza total menos la dureza de carbonatos y representa principalmente los Sulfatos, Cloruros, Nitratos y Silicatos de Calcio o Magnesio. En consecuencia, cuando la dureza total excede la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos (alcalinidad total), la dureza equivalente a la alcalinidad corresponde a la dureza de carbonatos, y la cantidad en exceso, corresponderá a la dureza de No Carbonatos. Cuando la dureza total es igual o menor que la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos (alcalinidad total), implica que la dureza total es equivalente a la dureza de Carbonatos y en consecuencia la dureza de No Carbonatos es cero (AWWA, 1990; Kirchmer, 1973).

2.3.2. Procesos de ablandamiento mediante la adición de cal

Los métodos más comunes para ablandar el agua son el de ablandamiento con cal ("*lime softening*") y el de cal-carbonato sódico ("*lime-soda ash*"). La razón de esto es que la cal, Ca(OH)_2 , y el carbonato sódico (soda), Na_2CO_3 se pueden conseguir fácilmente y son más rentables para suavizar las grandes cantidades de agua procesada en una planta de agua.

Las características de la fuente de agua determinan el tipo de ablandamiento a realizar. En general los procesos de ablandamiento mediante adición de cal, se pueden clasificar en cuatro tipos diferentes. El nombre de cada uno de estos procesos se deriva del tipo y cantidad de precipitante químico que es agregado (AWWA, 1990; Hammer *et al.*, 2008). Estos procesos se mencionan a continuación:

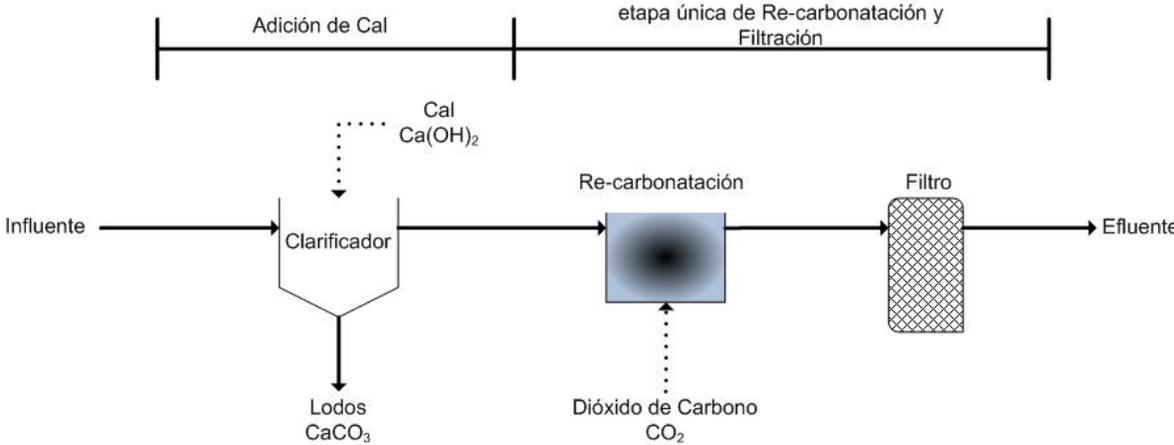
- 1) *“Proceso de adición directa de cal” (“single-stage lime process” o “straight lime”)*. La fuente de agua presenta alta dureza de Carbonato Calcio y baja dureza de Carbonato Magnesio (menor a 40 mg/L CaCO_3). No hay dureza de No Carbonatos.
- 2) *“Proceso de adición de Cal en exceso” (excess lime process)*. La fuente de agua presenta una dureza alta de carbonato de Calcio y de carbonato de Magnesio. No hay dureza de No Carbonatos. Se puede llevar a cabo en un proceso de una o dos etapas.
- 3) *“Proceso de adición de cal-soda en etapa única” (single-stage lime-soda ash process)*. La fuente de agua presenta alta dureza de Carbonato Calcio y baja dureza de Carbonato Magnesio (menor a 40 mg/L CaCO_3). Presenta una parte de dureza de No Carbonatos de Calcio.
- 4) *“Proceso de adición de Cal-soda en exceso” (excess lime-soda ash process)*. La fuente de agua presenta una dureza alta de carbonato de Calcio y de carbonato de Magnesio. Presenta algo de dureza de No Carbonatos de Calcio y de Magnesio. Se puede llevar a cabo en un proceso de una o dos etapas.

2.3.3. Re-carbonatación

Para algunos procesos de ablandamiento, el agua tratada tiene un pH alto, generalmente entre 10 y 11. Un agua con este pH no es propia para el consumo humano y, por tanto, resulta necesario reducir el pH antes de que el agua llegue al consumidor. Generalmente el pH se reduce antes de la filtración, para prevenir la precipitación del carbonato de Calcio, CaCO_3 , en los filtros y las líneas de distribución. El proceso de disminución de pH se llama re-carbonatación. Este proceso consiste en agregar Dióxido de Carbono, CO_2 , en cantidad suficiente al agua para reducir el pH al rango de 8.4 a 8.6 (AWWA, 1990; Kirchmer, 1973).

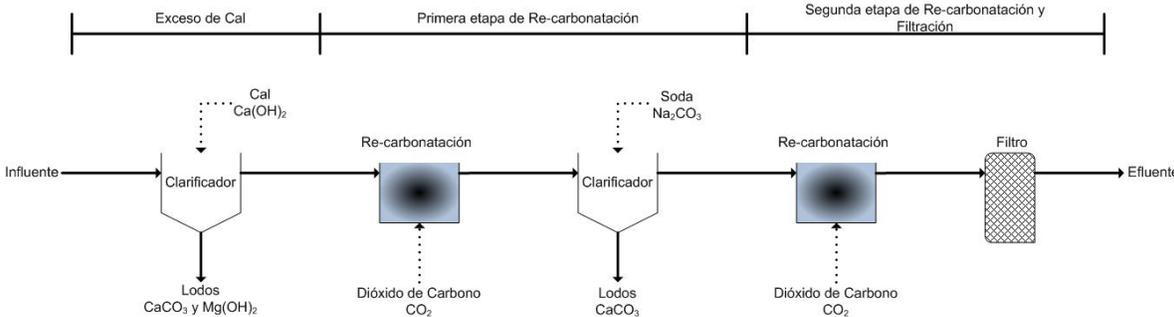
Dos tipos de proceso de re-carbonatación pueden ser usados, en combinación con los cuatro tipos de procesos de ablandamiento, previamente

citados. Para los procesos con una baja concentración de Magnesio, donde una adición de cal en exceso no es requerida, es posible llevar a cabo una re-carbonatación de etapa única (*single-stage*), como se muestra en la Figura 6. Mientras que para tratamientos de agua, con un alto contenido de Magnesio en ella, y donde una adición de cal en exceso es requerida; se lleva a cabo un re-carbonatación en dos etapas (*two-stage*) o re-carbonatación dividida (AWWA, 1990), tal como se presenta en la Figura 7.



Adaptado de: Hammer *et al.*, 2008.

FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DE RE-CARBONATACIÓN EN UNA SOLA ETAPA Y PROCESO DE ABLANDAMIENTO POR ADICIÓN DE CAL



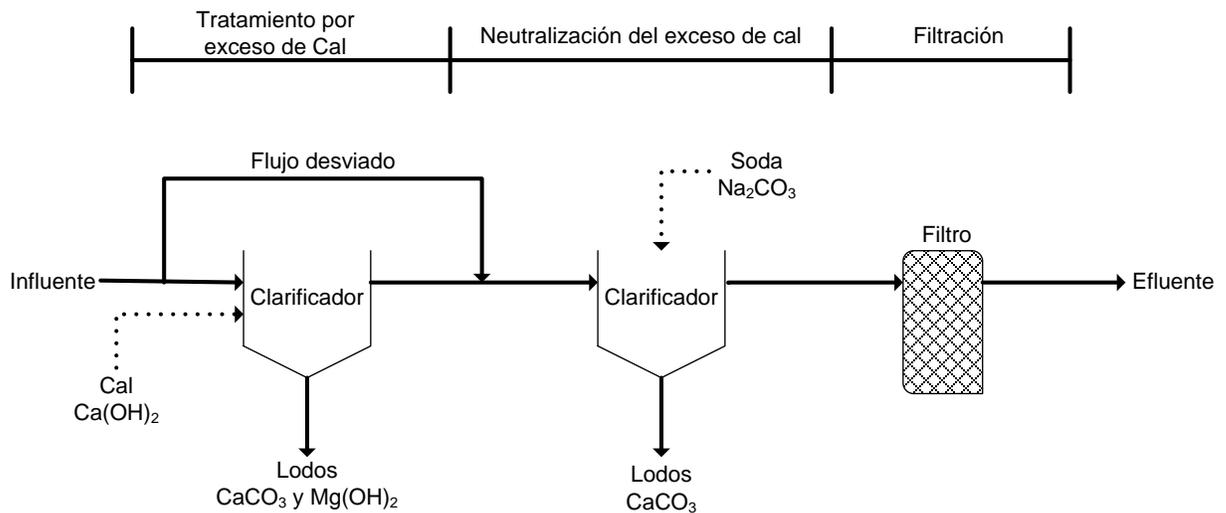
Adaptado de: Hammer *et al.*, 2008.

FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO DE RE-CARBONATACIÓN DIVIDIDA Y PROCESO DE ABLANDAMIENTO POR EXCESO DE CAL

2.3.4. Tratamiento dividido

Varios tipos de proceso entran dentro de la categoría de tratamiento dividido. Esta categoría incluye procesos donde dos o más flujos de agua son tratados por separado y después combinados.

Este proceso consiste en desviar parte del caudal de entrada de agua dura, y tratar con un exceso de cal el volumen mayor para reducir la dureza al máximo en una primera etapa. Posteriormente, neutralizar el exceso de cal en una segunda etapa, a través de la adición de soda y el agua cruda que fue desviada. El exceso de cal usado en la primera etapa, precipita al Magnesio. El efluente obtenido de esta primera etapa se mezcla con el agua cruda desviada antes del primer sedimentador. En el segundo sedimentador se precipita carbonato de Calcio puro. La re-carbonatación no es normalmente requerida en este proceso, pero puede ser deseable en el tratamiento de algunos tipos de agua para estabilizarlas (Hammer *et al.*, 2008; Kirchmer, 1973). Este proceso se presenta en la Figura 8.



Adaptado de: Hammer *et al.*, 2008.

FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO DIVIDIDO

Se pueden destacar las siguientes ventajas para el proceso de tratamiento dividido:

- 1) Remoción del Magnesio en exceso.
- 2) Toda la cal es utilizada en el ablandamiento. No hay desgaste en la utilización de cal, como ocurre en un proceso convencional, donde el exceso de cal tiene que ser removido mediante un proceso de re-carbonatación.
- 3) La alcalinidad lograda es muy baja, al igual que en el caso de la re-carbonatación dividida.
- 4) Se reduce la cantidad de Na_2CO_3 , utilizada para la remoción de la dureza no carbonatada.
- 5) Resulta en ahorros considerables en reactivos. Los costos derivados del uso de cal y re-carbonatación son menores que en el tratamiento por exceso de cal, y aún es posible la reducción de la dureza de Magnesio hasta 40 mg/L.
- 6) Los lodos de Carbonato de Calcio, CaCO_3 , obtenidos en el segundo sedimentador pueden ser re-calcinados para la generación de dióxido de carbono, CO_2 , que puede ser usado en la re-carbonatación.

2.4. Desinfección

El propósito de la desinfección, es reducir sustancialmente el número de organismos perjudiciales o indeseables presentes en el agua. Los procesos de desinfección se han empleado con la finalidad de destruir o inactivar los microorganismos patógenos y, muy especialmente, las bacterias de origen intestinal. Los principales factores que influyen sobre la eficacia de la desinfección son los siguientes:

- Tipo y concentración de los organismos que deben destruirse.
- Tipo y concentración del desinfectante.
- Tiempo de contacto.
- Características químicas y temperatura del agua que se va a tratar.

Los métodos comunes de desinfección incluyen el uso de ozono, Cloro, o luz UV, siendo utilizables aquellas con un alto poder bactericida. Las propiedades ideales que se buscan en el compuesto de desinfección abarcan un amplio rango de características. Aunque tal compuesto puede no existir, tales características son consideradas para propósitos de evaluación. Es también importante que el método de desinfección, sea seguro en su manejo y aplicación, y que su intensidad o concentración en aguas tratadas sean medibles. Éste último punto no es posible cuando se hace uso de Ozono o de la radiación UV, ya que estos no dejan una concentración o efecto residual en el agua tratada como el Cloro. En la Tabla 7 se presentan las características a considerarse al evaluar un método de desinfección para el agua.

Tabla 7. Comparación de las características de los métodos comunes de desinfección

Característica	Propiedad
Disponibilidad	Debe estar disponible en grandes cantidades y a un precio razonable.
Habilidad desodorizante	Debe desodorizar mientras desinfecta.
Homogeneidad	Debe tener una composición uniforme.
Interacción con material externo	No debe ser absorbido por alguna otra materia orgánica que no sea la célula bacterial.
No corrosivo y no mancha	No debe dañar los metales ni manchar la ropa.
No tóxico para formas de vida superiores	Debe ser tóxico para microorganismos, pero no tóxico hacia humanos y animales.
Penetración	Debe tener la capacidad de penetrar a través de las superficies.
Seguridad	Debe ser seguro en su transporte, almacenamiento, manejo, y uso.
Solubilidad	Debe ser soluble en el agua o tejido celular.
Estabilidad	Debe tener baja pérdida de acción bactericida con el tiempo en almacenamiento.
Toxicidad hacia microorganismos	Debe ser efectivo en diluciones.
Toxicidad a temperatura ambiente	Debe ser efectivo en el rango de temperatura ambiental.

Adaptado de: Metcalf & Eddy, Inc., 2003

En la Tabla 8, se presenta una comparación entre diferentes métodos de desinfección.

Tabla 8. Características de los métodos comunes de desinfección

Característica	Cloro	Hipoclorito de sodio	Hipoclorito de Calcio	Dióxido de Cloro	Ozono	Radiación UV
Disponibilidad / Costo	Bajo costo	Moderadamente bajo costo	Moderadamente bajo costo	Moderadamente bajo costo	Moderadamente alto costo	Moderadamente alto costo
Habilidad desodorizante	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta	No aplica
Homogeneidad	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	No aplica
Interacción con material externo	Oxida materia orgánica	Oxidante activo	Oxidante activo	Alta	Oxida materia orgánica	Absorbancia de radiación UV
No corrosivo y no mancha	Altamente corrosivo	Corrosivo	Corrosivo	Altamente corrosivo	Altamente corrosivo	No aplica
Toxicidad para formas de vida superiores	Altamente tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico ¹	Tóxico ²
Penetración	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Moderada
Seguridad	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Baja
Solubilidad	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta	No aplica
Estabilidad	Estable	Ligeramente inestable	Relativamente estable	Inestable, debe ser generado in situ	Inestable, debe ser generado in situ	No aplica
Toxicidad hacia microorganismos	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Toxicidad a temperatura ambiente	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

Adaptado de: Metcalf & Eddy, Inc., 2003

¹ el ozono es un compuesto tóxico por lo que se debe tener precaución en su manejo, sin embargo no deja residual por lo que su aplicación en el agua es segura.

² la exposición directa a radiación UV es riesgosa dependiendo la intensidad y dosis de esta.

2.4.1. Cloración

La cloración es un proceso muy utilizado para el tratamiento de agua. Es la forma más común de desinfección de las aguas residuales en todo el mundo debido a su bajo costo y eficacia. La finalidad principal de la cloración es destruir las bacterias por la acción germicida del Cloro. También son importantes otros efectos secundarios como la oxidación del hierro, del manganeso y de los sulfuros de hidrógeno y destrucción de algunos compuestos que producen olores y sabores.

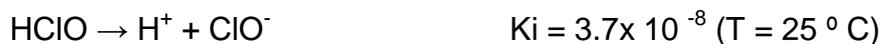
Los principales compuestos de cloro disponibles son el cloro gas (Cl_2), el hipoclorito de Sodio (NaOCl), hipoclorito de Calcio [$\text{Ca}(\text{OCl})_2$], y el dióxido de cloro. La mayoría de las plantas tratadoras han cambiado del uso del cloro gas al del hipoclorito de Sodio, esto debido a que es más fácil y seguro su manejo y almacenamiento, además de cumplir con las normas de calidad de agua.

Reacciones del Cloro con el agua.

Cuando el Cloro gas (Cl_2) se añade al agua tienen lugar dos reacciones: hidrólisis e ionización.



Como el valor de la constante de equilibrio K es elevado se pueden disolver grandes cantidades de Cl_2 en agua. La ionización puede definirse como:

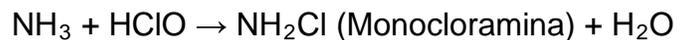


Esta ecuación explica que la proporción de ácido hipocloroso (HClO) disociado es función del pH. A pH bajos, el Cloro se encuentra predominantemente como HClO , mientras que, a pH 8 predominan los iones hipoclorito (ClO^-), existiendo éstos exclusivamente para valores de pH del orden de 9.5 ó superiores. El Cloro que existe en el agua en forma de ácido hipocloroso (HClO) o de iones hipoclorito (ClO^-) se conoce con el nombre de Cloro libre disponible. La distribución relativa de estas dos formas es muy importante ya que la eficacia de la mortandad del HClO es de 40 a 80 veces del ClO^- . Un tiempo de

contacto de 30 min se consideran generalmente como satisfactorios con dosis de Cloro residual ($\text{HClO} + \text{ClO}^-$) del orden de 0.5 mg/L.

Reacción del Cloro con los compuestos minerales disueltos en el agua.

El agua residual no tratada contiene nitrógeno en forma de amoníaco y de nitrógeno orgánico (asociado a la materia orgánica). El efluente procedente de la mayoría de las plantas de tratamiento también contiene cantidades significativas de nitrógeno, generalmente en forma de amoníaco. Dada que el ácido hipocloroso es un agente oxidante muy activo, reaccionará rápidamente con el amoníaco presente en el agua residual y formará tres tipos de cloraminas en las reacciones sucesivas.



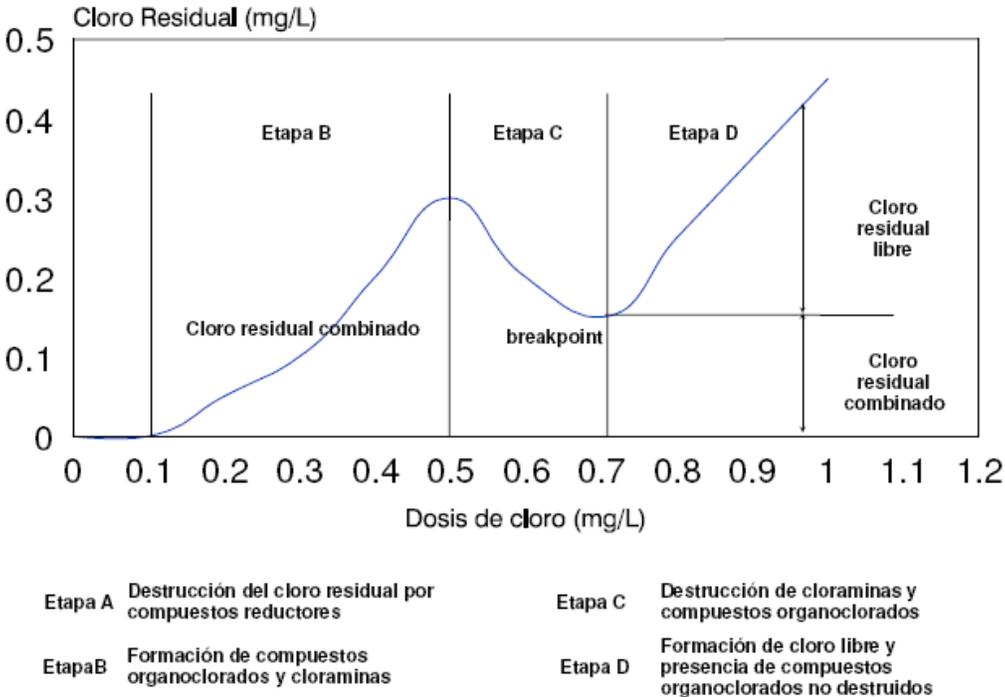
Estas reacciones son altamente dependientes del pH, temperatura, tiempo de contacto y de la relación inicial entre el Cloro y el amoníaco. Las dos especies que predominan en la mayoría de los casos son la monocloramina (NH_2Cl) y la dicloramina (NHCl_2). El Cloro presente en estos compuestos se llama Cloro combinado disponible. Estas cloraminas sirven también como desinfectantes, a pesar de que reaccionan con extrema lentitud.

El hecho de que el Cloro libre reaccione con el amoníaco, junto con que sea además un fuerte agente oxidante, complica el mantenimiento de una cantidad residual (combinado o libre) para la desinfección de las aguas residuales. Los fenómenos que resultan al añadir Cloro a un agua que contenga amoníaco pueden explicarse consultando la Figura 9.

Capacidad bactericida del Cloro.

Actualmente se cree que la acción bactericida del Cloro es de tipo físico-químico. La relativa eficacia de los distintos agentes oxidantes es función de su velocidad de difusión a través de la pared celular. Después de traspasar la pared celular, el compuesto tiene capacidad para atacar al grupo enzimático, cuya

inactivación provoca la muerte del organismo. La rapidez de la desinfección con Cloro es proporcional a la temperatura del agua, de manera que, a condiciones similares de operación, la eficacia de la cloración aumentará con el incremento en la temperatura. Sin embargo, en agua fría el Cloro es más estable y permanece durante más tiempo; esto compensa hasta cierto punto la menor rapidez de la desinfección en agua a baja temperatura.



Adaptado de: Qasim, 1999.

FIGURA 9. CURVA GENERALIZADA OBTENIDA DURANTE LA CLORACIÓN

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proyecto de diseño de la planta de potabilización para el manantial de Cerro Colorado se realizó como primera actividad una revisión bibliográfica de los estudios previos existentes en cuanto a la calidad físico-química del agua de este manantial. Posteriormente, se realizaron muestreos en la zona de estudio para complementar los datos.

Así, una vez que se contó con una caracterización apropiada, el siguiente paso fue seleccionar las operaciones y procesos unitarios que integraran el tren de tratamiento. Una vez elegidos los procesos para dimensionar, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio de los principales procesos, con el objeto de recabar los datos necesarios que permitan determinar las condiciones de operación que tendrá la planta con agua del manantial.

Posteriormente, se procedió a realizar el dimensionamiento de los elementos que integran la planta de potabilización así como un estudio preliminar de costos.

3.1. Muestreo

Con el objeto de elegir los procesos que integrarían la planta de potabilización, fue necesario realizar en principio, muestreos en el área de estudio. Esto con la finalidad de conocer las características físico-químicas del agua.

Los muestreos se llevaron a cabo en el manantial de Cerro Colorado (latitud Norte 20°07'7" y longitud Oeste 99°15'44"), el cual se ubica en el municipio de Tlahuelilpan, en el estado de Hidalgo. Las fechas de los muestreos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Fechas de muestreos

Año	Mes	Día
2008	Noviembre	18
		24
	Diciembre	1
		8
		15

3.2. Caracterización

Los parámetros determinados fueron: Sólidos disueltos totales (SDT), Carbono orgánico total (COT), Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno de Nitritos, Nitrógeno de Nitratos, Alcalinidad, temperatura, pH, Cloruros, Sulfatos, conductividad, Dureza total, Dureza de Calcio, Dureza de Magnesio, Sulfatos, así como la absorbancia de luz ultravioleta a 254 nanómetros (AUV₂₅₄).

Las técnicas usadas para ello son las descritas en el “*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*” (APHA *et al.*, 2005), “*Water analysis handbook*” (HACH) y las normas mexicanas correspondientes. En la Tabla 10 se muestran los parámetros y las técnicas analíticas correspondientes.

Los parámetros de pH, temperatura y conductividad se midieron en sitio. En tanto que los otros parámetros fueron medidos en laboratorio.

Tabla 10. Parámetros medidos y técnicas analíticas

Parámetro	Método	Equipo
Alcalinidad	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 2320 B	-
AUV₂₅₄	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 5910 B	Espectrofotómetro HACH, DR 5000
Carbón Orgánico Total (COT)	Water analysis handbook, HACH, Método 10129	Espectrofotómetro HACH, DR 5000
Cloruros	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 4500-Cl ⁻ B	-
Conductividad	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 2510 A	Potenciómetro digital HACH, sension 156
Dureza de Ca	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 3500-Ca D	-
Dureza de Mg	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 3500-Mg E	-
Dureza total	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 2340 C	-
Nitrógeno amoniacal	Water analysis handbook, HACH, Método 10023	Espectrofotómetro HACH, DR 5000
Nitrógeno de Nitratos	Water analysis handbook, HACH, Método 10020	Espectrofotómetro HACH, DR 5000
Nitrógeno de Nitritos	Water analysis handbook, HACH, Método 10019	Espectrofotómetro HACH, DR 5000
pH	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 4500-H ⁺ B	Potenciómetro digital HACH, sension 156
Temperatura	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 2550 B	Potenciómetro digital HACH, sension 156
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 2540 C	-
Sulfatos	Standard Methods, APHA <i>et al.</i> 2005, 4500-SO ₄ ²⁻ C	-

Las muestras se recolectaron en frascos de polietileno y se preservaron a 4° C hasta su posterior análisis en el laboratorio, el cual se realizó dentro de las 24 horas siguientes. Además, para las determinaciones de dureza y carbono orgánico total, las muestras se acidificaron hasta pH de 2 para su preservación hasta el momento de su análisis.

3.2.1 Índice de saturación de Langelier e índice de Ryzner

Una vez realizada la caracterización del agua del manantial de Cerro Colorado, se calculó el índice de saturación de Langelier (LSI), así como el índice Ryzner (RI). Ambos índices se determinaron con el fin de conocer el carácter incrustante del agua.

Para calcular el LSI se usó la siguiente ecuación 3.1 (Metcalf & Eddy, 2003):

$$LSI = pH - pHs \quad (3.1)$$

Y para el RI la ecuación 3.2 (Metcalf & Eddy, 2003):

$$RI = 2 pHs - pH \quad (3.2)$$

Donde

pH : es el pH de la muestra de agua.

pHs: es el pH de saturación para el carbonato de calcio.

El pH de saturación (pHs) se calcula mediante la ecuación 3.3 (Metcalf & Eddy, 2003):

$$pHs = -\log \left(\frac{K_{a2} \gamma_{Ca^{2+}} [Ca^{2+}] \gamma_{HCO_3^-} [HCO_3^-]}{K_{sp}} \right) \quad (3.3)$$

Donde

Ca^{2+} : Concentración de Calcio (mol/L).

HCO_3^- : Concentración de Bicarbonato (mol/L).

K_{a2} : Constante de equilibrio para la disociación del Bicarbonato.

$\gamma_{Ca^{2+}}$: Coeficiente de actividad del Calcio.

$\gamma_{\text{HCO}_3^-}$: Coeficiente de actividad del Bicarbonato.

K_{sp} : Constante del producto de solubilidad para la disociación del CaCO_3 .

El criterio usado en el análisis del LSI es:

- LSI > 0 El agua está sobresaturada con respecto a la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3) y existirá incrustación.
- LSI < 0 El agua no está saturada con respecto a la concentración de carbonato de calcio. Este tipo de agua tiene tendencia a remover la ligera capa de carbonato de Calcio que protege a la tubería y el equipamiento.
- LSI = 0 El agua es considerada como neutra.

Mientras que para el RI el criterio utilizado es el siguiente:

- RI < 5,5 El agua es muy incrustante.
- 5,5 < RI < 6,2 El agua es incrustante.
- 6,2 < RI < 6,8 El agua no presentará dificultades
- 6,8 < RI < 8,5 El agua es agresiva (removerá la capa protectora en tuberías y equipo).
- RI > 8,5 El agua es muy agresiva.

3.2.2. Índice de densidad salina

Adicionalmente al cálculo de los índices de Langelier y Ryzner, otra herramienta usada para la determinación del ensuciamiento de membranas por constituyentes inorgánicos, es el Índice de densidad salina (IDS). La prueba, estandarizada por la norma ASTM D4189–07, consiste en determinar dos tiempos, mientras se hace pasar el agua en estudio a través de un filtro millipore de 47 mm de diámetro y 0,45µm de poro, a una presión constante de 30 psi (2,07 bar). El primer tiempo (t_i), corresponde al tiempo que tardan en atravesar el filtro 500 mL de agua al inicio de la prueba, con el filtro limpio. El segundo tiempo (t_f), es el tiempo que tardan en colectarse otros 500 mL de agua, luego de haber transcurrido 15 minutos de filtración del inicio de la prueba. Una vez obtenidos estos datos, el cálculo del IDS se realiza mediante la ecuación 3.4:

$$IDS = \frac{100 \left(1 - \left(\frac{t_i}{t_f} \right) \right)}{t} \quad (3.4)$$

Donde

t_i : tiempo que tarda en filtrarse 500 mL de agua al inicio de la prueba.

t_f : tiempo que tarda en filtrarse 500 mL de agua tras 15 minutos.

t : tiempo de la prueba, estandarizado a 15 minutos.

Esta prueba se llevó a cabo usando un equipo autoSDI de marca Osmonics, Figura 10, y se realizó con agua del manantial de Cerro Colorado sin tratamiento alguno.



FIGURA 10. EQUIPO AUTOSDI PARA DETERMINACIÓN DE IDS

Una vez realizada la caracterización del agua y las pruebas para determinar su potencial incrustante. Se procedió a llevar a cabo las pruebas con los procesos principales que integran la planta de potabilización.

3.3. Ablandamiento

Las pruebas con el proceso de ablandamiento por adición de exceso de cal, se realizaron para determinar la cantidad de cal necesaria a aplicar para reducir la dureza total que presenta el agua del manantial de Cerro Colorado. Esta prueba se llevo a cabo siguiendo el procedimiento que a continuación se describe.

Se tomaron muestras del agua en estudio, y se determinaron los parámetros físico-químicos concernientes a dureza total, dureza debida al Calcio, dureza debida al Magnesio, alcalinidad, pH y temperatura. Con estos datos se realizó el cálculo estequiométrico para la dosis teórica de cal por agregar para el proceso de ablandamiento mediante adición de cal en exceso.

Una vez realizada la caracterización inicial del agua, se tomaron siete muestras de un litro cada una en vasos de precipitado. A cada muestra se le aplicó una dosis de cal diferente en un rango de 0% a 180% (30%, 60%, 90%, 100%, 120%, 150% y 180%) de la dosis teórica requerida para reducir la dureza total (siendo 100% el valor obtenido del cálculo estequiométrico) y se llevó a cabo el proceso de ablandamiento en un dispositivo de pruebas de jarras marca Kemira modelo Flocculator 2000, Figura 11.

Posteriormente, se colectaron los sobrenadantes de cada muestra mediante filtración, para lo cual se usó papel filtro marca millipore, catálogo No. AP4004705 de 0,7 μm . Se determinan la dureza total, la dureza de Calcio, la dureza de Magnesio, alcalinidad y pH que presenta cada muestra para cada dosis de cal, se analizaron los resultados y se calculó la eficiencia. Cada ensayo del proceso de ablandamiento se realizó por triplicado. El procedimiento seguido se lista a continuación:

- 1) Determinar del agua cruda, dureza total, dureza debida al Calcio, dureza debida al Magnesio, alcalinidad, pH y temperatura.
- 2) Calcular dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ según condiciones iniciales del agua .
- 3) Tomar un muestra de 1000 mL, depositar en un vaso de precipitado y agregar las cantidades calculadas de reactivos precipitantes, con una dosis de cal diferente en cada vaso (0%, 30%, 60%, 90%, 100%, 120%, 150% y 180%).
- 4) Realizar la prueba de jarras de acuerdo a la siguiente secuencia:

1 minuto a 100 rpm

10 minutos a 20 rpm

- 5) Al finalizar el proceso de mezclado, dejar sedimentar por 15 minutos.
- 6) Después finalizado el tiempo de sedimentado se filtra el sobrenadante de la mezcla de cada muestra.

- 7) Tomar 50 mL de cada filtrado y caracterizar de cada uno dureza total, dureza debida al Calcio, dureza debida al Magnesio, alcalinidad, pH.
- 8) Calcular la eficiencia de remoción del procedimiento.



FIGURA 11. EQUIPO PARA PRUEBA DE JARRAS

3.3.1. Tratamiento estadístico de la prueba

Para evaluar la significancia de la dosis de cal agregada al agua, se llevó a cabo un análisis de varianza tomando como variable de respuesta la dureza total obtenida de cada muestra, y haciendo las consideraciones siguientes:

Factor: Dosis de cal.

Niveles: 30%, 60%, 90%, 100%, 120%, 150% y 180%

Variable de respuesta: Dureza total (mg CaCO₃ /L)

$\alpha=0,01$

Hipótesis: $H_0: \tau_{30} = \tau_{60} = \tau_{90} = \tau_{100} = \tau_{120} = \tau_{150} = \tau_{180}$

$H_a: \tau_i \neq \tau_j$ para algún $i \neq j$

3.4. Nanofiltración

Las membranas para el diseño se eligieron con base en datos obtenidos en trabajos previos (Aguilar, 2006; Jiménez, 2007), los cuales están relacionados con la evaluación de membranas usando agua del manantial de Cerro Colorado. Del análisis de esos datos se seleccionaron tres membranas para realizar las pruebas de nanofiltración y de entre estas tres opciones seleccionar la mejor. En la Tabla 11 se presentan las membranas seleccionadas y las características de cada una de ellas.

Tabla 11. Membranas comerciales seleccionadas

Fabricante	Modelo	Composición	Aplicación	Peso Molecular de Corte (Da)	pH de operación	Tolerancia al Cloro libre (ppm)	Rechazo % (Especie, mg/L)
DOW-FILMTEC	NF270	Poliamida	Remoción de COT	200	2 - 11	< 0.1	40-60 (CaCl ₂ , 500) >97 (MgSO ₄ , 2000)
	NF90	Poliamida	Remoción compuestos orgánicos	200	2 - 11	< 0.1	85-95 (NaCl, 2000) >97 (MgSO ₄ , 2000)
Thomapor HIGH CHEM POLYMER MEMBRANE PA	302986	Poliamida	Separación de fructosa	100	4 - 11	ND	ND

Adaptado de: Jiménez et al., 2007

Para poder elegir la mejor membrana, las pruebas que se llevaron a cabo consistieron en la determinación y comparación de sus características básicas. Por lo que, se realizó la medición del ángulo de contacto para cada una de ellas, así como también se corrieron pruebas para determinar la cantidad de flux de permeado que cada una es capaz de producir. Además, se caracterizaron los permeados obtenidos a fin de evaluar el desempeño de cada membrana.

3.4.1. Determinación del ángulo de contacto

La medición del ángulo de contacto consistió en verter una micro-gota de agua destilada de aproximadamente 10 μL sobre la superficie de cada membrana. A continuación se tomó una fotografía de la gota de agua sobre la superficie de la membrana para con ella medir el ángulo de contacto.

El procedimiento es el siguiente:

1. Colocar una muestra de membrana limpia y seca de manera que quede horizontal a la superficie del porta-objetos.
2. Colocar una micro-gota (volumen aproximado de 10 μL) sobre la superficie de la membrana.
3. Tomar una fotografía de la gota sobre la membrana.
4. Medir el ángulo formado entre la tangente a la superficie de la gota de agua y la línea paralela a la superficie de la membrana.
5. Repetir el procedimiento en diferentes secciones de la membrana; el valor del ángulo de contacto reportado es el promedio de las diferentes mediciones.

Dada la variación de las mediciones experimentales en la determinación del valor del ángulo de contacto, éste se calculó a partir del promedio de trece mediciones experimentales para cada una de las membranas en estudio (NF90, NF270 y 302986). Para medir el ángulo se usó el software gráfico "ImageJ 1.41o" de dominio público, a partir de la digitalización de las trece fotografías tomadas por cada membrana.

3.4.2. Determinación de permeabilidad hidráulica y remoción de compuestos inorgánicos

Para las pruebas de determinación de la permeabilidad hidráulica de cada una de las membranas de nanofiltración en estudio, se compararon tres tipos de agua de alimentación.

- 1) Agua destilada.
- 2) Agua del manantial de Cerro Colorado sin tratar.
- 3) Agua del manantial de Cerro Colorado a la cual se ha aplicado el proceso de ablandamiento con cal.

Para este procedimiento se usó una unidad de prueba de membranas marca OSMONICS, tipo CEPA CF II, una bomba de alta presión marca HYDRACELL modelo M03 BRS GSSEC acoplada a motor BLADOR CAT PCL 3514M de 1 1/2 HP voltaje 115/220, que proporciona presiones de hasta 40 bar. Y un tanque de alimentación de 30 L de capacidad, el cual cuenta con un sistema de enfriamiento mediante un intercambiador de calor y compresor, conectado a un termómetro digital A419 marca CONTROL JOHNSON, que funciona como arrancador del sistema de enfriamiento, para mantener la temperatura constante. La celda es de flujo cruzado y tiene un área efectiva de filtración 138 cm^2 y soporta una presión máxima de 70 bar. El sistema opera mediante la recirculación del concentrado. La Figura 12 presenta el diagrama de la unidad de nanofiltración. Mientras que en la Figura 13 se puede ver el banco de pruebas de membranas.

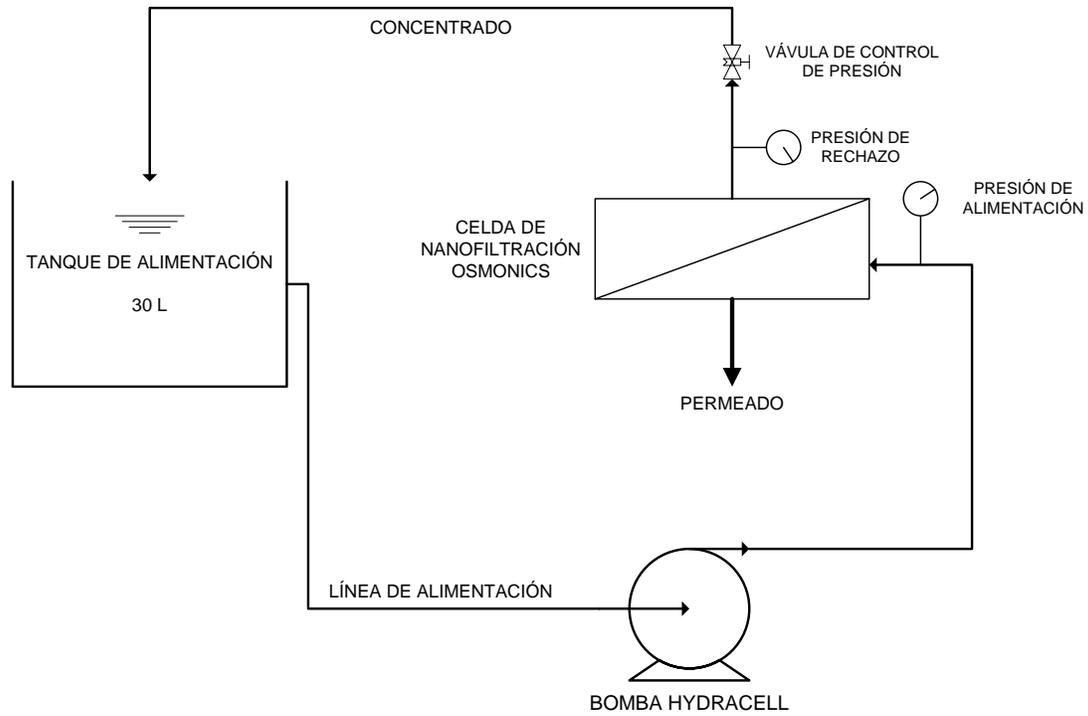


FIGURA 12. DIAGRAMA DEL MÓDULO DE NANOFILTRACIÓN OSMONIC



FIGURA 13. BANCO DE PRUEBAS

Las membranas de nanofiltración se cortaron a 9,5 x 14,5 cm y se dejaron remojando en agua destilada por 24 horas antes de su uso. El procedimiento para la determinación de la permeabilidad hidráulica de las membranas de nanofiltración fue el siguiente:

- 1) Inicio de la circulación del agua en el sistema.
- 2) Fijar la velocidad tangencial del agua; fijar $Re \sim 1700$.
- 3) Fijar la temperatura de operación (20 °C).
- 4) Fijar la presión de operación a través de la membrana (PTM), mediante la ecuación 3.5:

$$PTM = \frac{P_{alimentación} + P_{rechazo}}{2} - P_{permeado} \quad (3.5)$$

- 5) Esperar la estabilización del sistema (~ 20 minutos).
- 6) Tomar muestra de permeado en un vaso de precipitado previamente pesado y cronometrar el tiempo en recolectarse la muestra.
- 7) Tomar lecturas del flux del permeado (J_p), presión de alimentación (P_a), presión de rechazo (P_r) y temperatura de la solución en la alimentación.
- 8) Calcular de la permeabilidad hidráulica, Lp_0 , a través de la curva J vs PTM.
- 9) Fijar una nueva presión de operación y repetir el procedimiento a partir del punto número 5.

El trazo de la curva J vs PTM requiere de por lo menos cuatro puntos experimentales (4 valores diferentes de PTM). Los valores de las PTM con los que se realizó la prueba estuvieron repartidos dentro del intervalo de presión mínima aplicable del sistema y máxima de 10 bar. La prueba se realiza por triplicado para cada tipo de agua de alimentación previamente citado, y con cada membrana.

Adicionalmente, se recolectó el permeado producido por cada una de las membranas de la corrida con agua de alimentación a la cual se había aplicado previamente el proceso de ablandamiento con cal, así como muestras del ablandamiento. Las muestras se caracterizaron, en términos de la dureza total,

dureza de Calcio, dureza de Magnesio, sólidos disueltos totales y alcalinidad en cada etapa del proceso, como se muestra en el diagrama de la Figura 14. Esto sirvió para comparar la eficiencia del proceso de ablandamiento, y el desempeño que presentó cada una de las membranas al pretratamiento. Al concluir esta serie de pruebas se eligió una de las tres membranas, de acuerdo con los datos obtenidos. La membrana seleccionada se usó para realizar las pruebas restantes de esta tesis, así como para el diseño de la planta de potabilización.

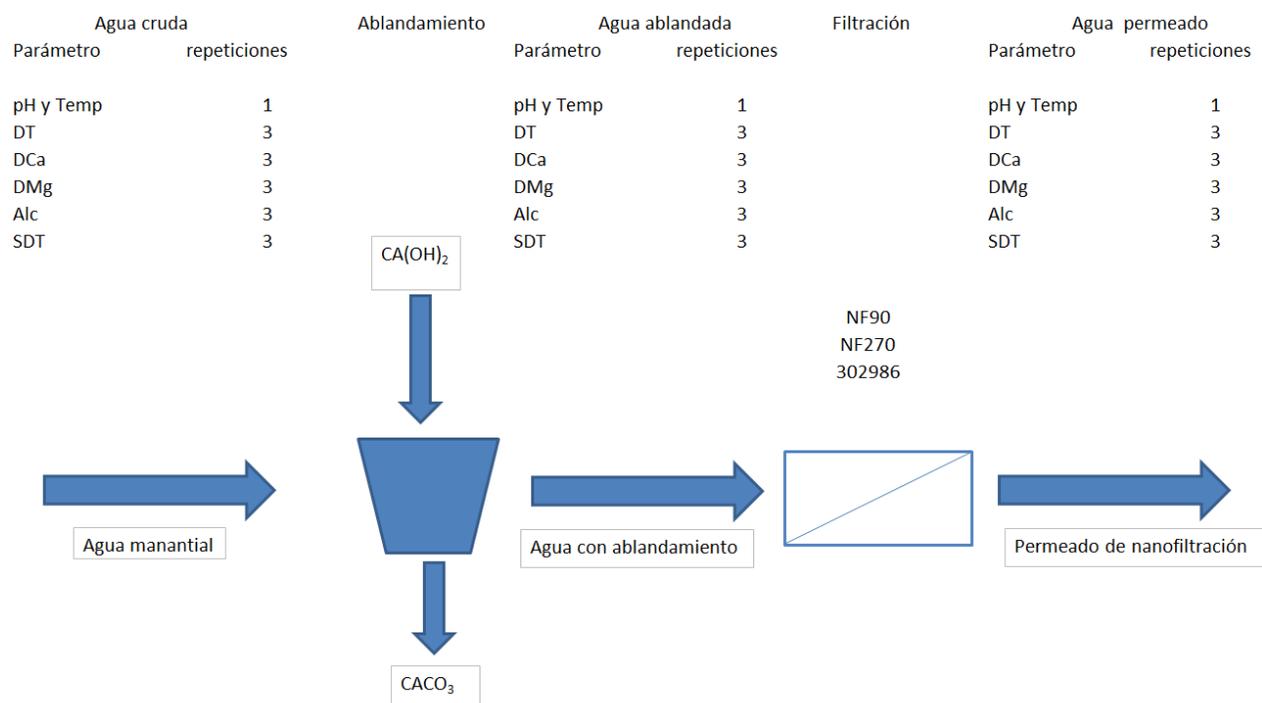


FIGURA 14. DIAGRAMA DE FILTRACIONES

3.4.3. Tratamiento estadístico de la prueba

El análisis estadístico para la pruebas de nanofiltración de las tres membranas consistió en analizar la permeabilidad que presenta cada membrana a través de la curva J vs PTM. Una vez obtenidos estos datos se aplicó el diseño de experimentos siguiente:

- Diseño factorial axb.
- 2 factores:

Membrana.

Presión.

- Variable de respuesta:

Flux de permeado

- Niveles de factores:

Nivel a del Factor A.

Tipo de membrana (NF270, NF90, 302986).

Nivel b del Factor B.

Presión (P1, P2, P3, P4).

3.4.4. Determinación de la remoción de contaminantes emergentes

Se procedió a determinar con la membrana seleccionada, la eficiencia que tiene para remover contaminantes emergentes que pudieran estar presentes en agua del Manantial de Cerro Colorado. Para ello se realizaron tres muestreos en el manantial, donde se colectaron muestras del efluente a las cuales se les realizó el proceso de nanofiltración, a fin de evaluar en el permeado producido el contenido de contaminantes emergentes. La cuantificación de emergentes se realizó por triplicado antes y después de la filtración con membrana. Para ello, se utilizó un cromatógrafo de gases HP 6890N acoplado a un detector selectivo de masas HP 5973N.

Los compuestos que se determinaron, se seleccionaron con base en los trabajos realizados por Gibson *et al.* (2007), y Silva (2008); los cuales demuestran la presencia de contaminantes emergentes en el agua del manantial. De estos se eligieron cinco: Bisfenol A, Butilbenzil ftalato, 4-Nonilfenol, Triclosán y Carbamazepina.

3.5. Cloración

La última prueba que se realizó fue determinar la dosis de desinfectante necesario para contar con una cantidad de cloro libre residual. Para la realización de esta prueba, se contó con tres tipos de agua diferentes:

- a) Agua destilada.
- b) Agua del manantial de Cerro Colorado sin tratar.
- c) Agua del manantial de Cerro Colorado, a la cual se aplicó el proceso de ablandamiento, nanofiltración, y neutralización de pH.

A continuación se llevó a cabo el procedimiento siguiente, por cada tipo de agua.

- 1) A 17 vasos de precipitado de 250 mL, se agregaron 100 mL de una misma muestra de agua.
- 2) Se adicionó en cada vaso una cantidad de hipoclorito de sodio diferente. Dosis que iban desde 0.1 mg/L hasta 8 mg/L de hipoclorito de sodio.
- 3) Posteriormente, se dejaron reposar los vasos con muestra por 30 minutos.
- 4) Una vez pasados los 30 minutos. Se tomaron 10 mL de cada vaso de precipitado y se determinó la cantidad de Cloro residual libre y Cloro total presentes. Las técnicas usadas para ello, se muestran en la Tabla 12.
- 5) Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a graficar los datos.

Tabla 12. Parámetros y técnicas analíticas empleadas en la cloración

Parámetro	Método	Equipo
Cloro Libre	Water analysis handbook, HACH, Método 8021	Espectrofotómetro HACH, DR 5000
Cloro Total	Water analysis handbook, HACH, Método 8167	Espectrofotómetro HACH, DR 5000

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1. Caracterización del agua del manantial de Cerro Colorado

El resumen de los resultados obtenidos de la caracterización se muestran en la Tabla 13, para una consulta más detallada de los datos obtenidos por fecha ver Anexo A.

Tabla 13. Caracterización del agua del manantial de Cerro Colorado

Parámetro	Unidad	Fecha de muestreo					Promedio	Desv. estándar
		18/11/08	24/11/08	01/12/08	08/12/08	15/12/08		
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	1083	1063	1087	1141	1081	1091	30
Carbón Orgánico Total (COT)	mg/L	2.93	2.47	2.80	2.87	2.40	2.69	0.2
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.10	0.08	0.06	0.07	0.03	0.07	0.03
Nitritos (como N)	mg/L	0.01	0.15	0.01	0.01	0.01	0.04	0.06
Nitratos (como N)	mg/L	0.13	0.11	0.11	0.09	0.13	0.11	0.02
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	461	629	475	546	495	521	68
Temperatura	°C	15.93	19.77	18.57	18.53	19.50	18.46	1.52
pH	pH	7.04	7.01	6.98	7.10	6.99	7.02	0.05
Cloruros	mg/L	166	150	164	162	161	161	6
Conductividad	µS/cm	974	970	941	875	853	922	55
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	387	443	433	413	400	415	23
Dureza de Ca	mg CaCO ₃ /L	247	337	230	227	153	239	66
Dureza de Mg	mg CaCO ₃ /L	140	107	203	187	247	177	55
Calcio	mg/L	99	135	92	91	61	96	26
Magnesio	mg/L	34	26	49	45	60	43	13
Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	36	119	39	77	36	61	37
Bicarbonatos	mg CaCO ₃ /L	425	511	436	469	459	460	33
Sulfatos	mg/L	94	137	196	171	144	149	38

Se puede apreciar de los resultados de la Tabla 13, que tal como se esperaba por la revisión bibliográfica, los principales parámetros que pueden afectar el funcionamiento de las membranas de nanofiltración son los compuestos inorgánicos, representados por la dureza total (415 ± 23 mg CaCO_3/L), dureza de Calcio (238 ± 65 mg CaCO_3/L), dureza de Magnesio (176 ± 54 mg CaCO_3/L), alcalinidad (521 ± 68 mg CaCO_3/L) y SDT (1091 ± 29 mg CaCO_3/L).

4.1.1. Cálculo del índice de saturación de Langelier e índice de Ryzner.

En lo que respecta a la determinación de los índices de Langelier y Ryzner, el cálculo se realizó tomando los valores obtenidos en la Tabla 13. El resultado de éste análisis se presenta en la Tabla 14. Para una consulta más detallada del cálculo ver el Anexo A. Los criterios para cada índice se presentan en la Tabla 15.

Tabla 14. Resumen del Cálculo del LSI y RI

	18/11/2008	24/11/2008	01/12/2008	08/12/2008	15/12/2008	PROMEDIO
LSI	3.83	4.19	3.87	4.03	3.72	3.97
RI	-0.63	-1.37	-0.75	-0.97	-0.45	-0.91

Tabla 15. Criterios de evaluación de los índices LSI y RI

LSI	LSI > 0	El agua está sobresaturada con respecto a la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3), y existirá incrustación.
	LSI < 0	El agua no está saturada con respecto a la concentración de carbonato de calcio. Este tipo de agua tiene tendencia a remover la ligera capa de carbonato de Calcio que protege a la tubería y el equipamiento.
	LSI = 0	El agua es considerada como neutra.

RI	RI < 5,5	El agua es muy incrustante.
	5,5 < RI < 6,2	El agua es incrustante.
	6,2 < RI < 6,8	El agua no presentará dificultades
	6,8 < RI < 8,5	El agua es agresiva (removerá la capa protectora en tuberías y equipo).
	RI > 8,5	El agua es muy agresiva.

De los resultados obtenidos de los índices LSI y RI y los criterios dados en la Tabla 15, se puede concluir que:

- A) El valor del LSI en promedio es mayor a cero, por lo que el agua está sobresaturada con respecto a la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3), y existirá incrustación.
- B) El resultado del RI es en promedio menor a 5.5, lo cual implica que el agua es muy incrustante.

4.1.2. Determinación del índice de densidad salina (IDS)

Los resultados obtenidos de esta prueba (Figura 15) se muestran en la Tabla 16. En tanto que los valores recomendados para procesos de membrana, para no tener la necesidad de implementar pretratamiento para el influente de alimentación, se presentan en la Tabla 17.

De los datos de la Tabla 16, se puede concluir que el agua del manantial de Cerro Colorado, causará taponamiento en las membranas de nanofiltración si no recibe ningún tratamiento previo al proceso de membranas.

Tabla 16. Resultados IDS

<i>Prueba</i>	<i>t_i</i>	<i>t_f</i>	<i>IDS</i>
1	0.37 min	2.3 min	5.59
2	0.41 min	3.2 min	5.8
3	0.39 min	2.7 min	5.7

Tabla 17. Valores de IDS recomendados para omitir pretratamiento de agua de alimentación

Proceso de membrana	Valor de IDS
Nanofiltración	0 – 2
Ósmosis inversa	0 – 2

Adaptado de: Metcalf & Eddy, Inc., 2003



FIGURA 15. DETERMINACIÓN DE IDS EN LABORATORIO

4.2. Resultados Ablandamiento

Se caracterizó inicialmente el agua a fin de conocer su alcalinidad, dureza total, dureza debida al Calcio y dureza debida al Magnesio, así como, también su pH y temperatura. Los valores obtenidos se reportan en la Tabla 18.

Tabla 18. Condición Inicial del agua

Alcalinidad, mg CaCO ₃ /L	520
Dureza total, mg CaCO ₃ /L	392
Dureza debida al Calcio, mg CaCO ₃ /L	258
Dureza debida al Magnesio, mg CaCO ₃ /L	134
pH	7.126
Temperatura, °C	19.3

De esta caracterización se puede inferir que la fuente de agua tiene una elevada de concentración Calcio (258 mg/L como CaCO₃), así como también una elevada dureza debida al carbonato de Magnesio (134 mg/L como CaCO₃). Además, puesto que la dureza total es menor que la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos, ello implica que la dureza total es equivalente a la dureza de carbonatos y, la dureza de no-carbonatos es cero. Sobre la base de esta caracterización, el tipo de proceso necesario para ablandar el agua es el tratamiento mediante exceso de cal, tal como se había previsto.

4.2.1. Análisis de datos

El Calcio y el Magnesio fueron removidos por el proceso de ablandamiento con cal, en el cual precipitan los iones no deseados mediante la adición de cal apagada. Este reactivo produce un precipitado de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio, que actúa mediante captura por barrido, por lo que las partículas

suspendidas capturadas forman el precipitado. Se midió la alcalinidad, pH, dureza total y dureza debida al calcio (véase la Figura 16). La dosis de cal se calculó en proporción 100% estequiométrica con la cantidad de dureza total inicialmente presente en el agua del manantial de cerro Colorado. La dosis resultante fue 623 mg/L como $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La descripción de los cálculos para determinar la dosis de cal del ablandamiento se puede consultar en el Anexo B.

A continuación, la cal se añadió a las distintas muestras en proporciones que oscilan entre 0 y 180% del valor estequiométrico. Los resultados para el pH, la dureza y la alcalinidad se midieron después de la filtración del agua ablandada en las anteriores condiciones. Esos resultados se representan en el gráfico que se muestra en la Figura 16. Para consultar los valores obtenidos para cada uno de los parámetros remitirse al Anexo C.

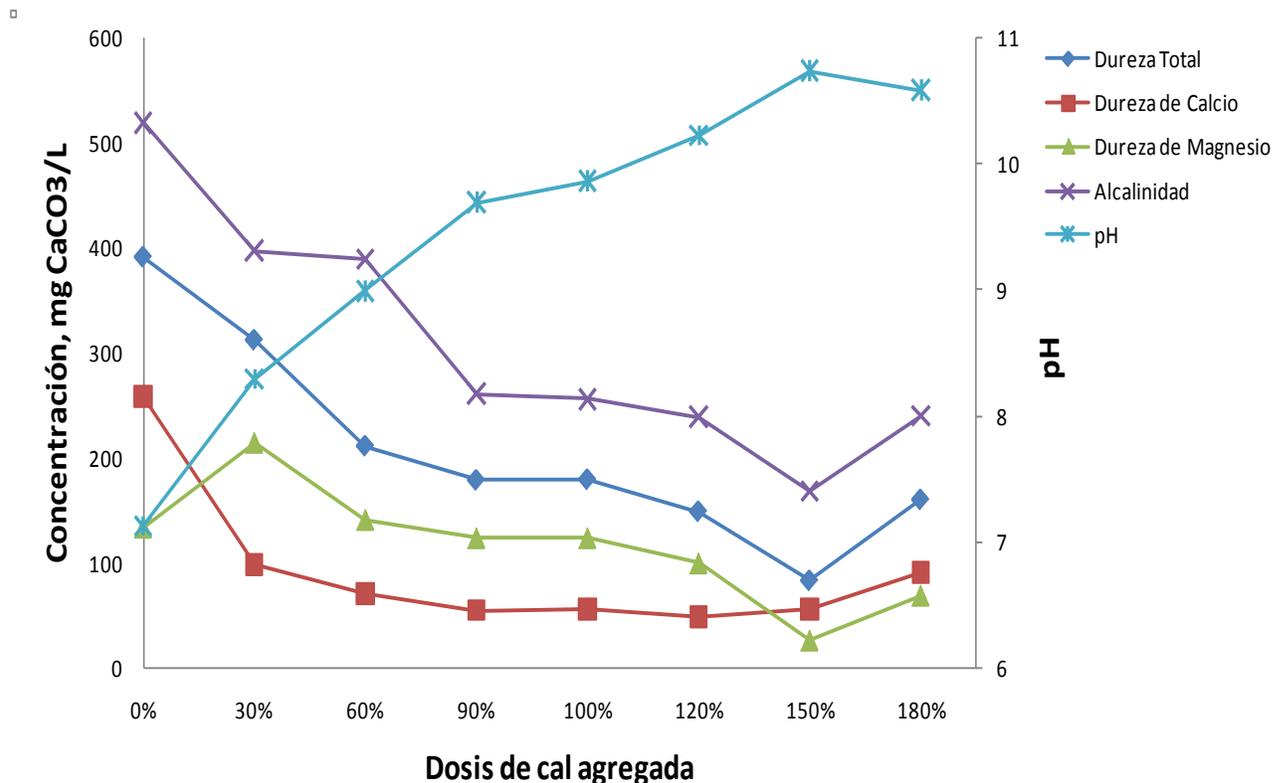


FIGURA 16. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ABLANDAMIENTO

En la Figura 16, como se esperaba, se observa que el pH aumenta al aumentar la dosis de cal. Esto corrobora con el hecho de que la cal es un componente básico cuya dosis aumenta el pH de la solución.

También se observa que la dureza total disminuye de manera significativa con el aumento de la dosis de cal. Esta tendencia de decrecimiento de la dureza total se observa para dosis de cal que van del 30% al 150%. Con el 150% de dosis de cal, el valor mínimo de dureza total que se logra es del 21.17% del valor inicial, lo cual indica una eficiencia en la reducción de la dureza total es del 78.83%. Cuando la dosis excede el 150%, la dureza total comienza a incrementarse fuertemente con el aumento de la dosis de cal. En estudios similares Seyrig y Shan (2007), así como Dey *et al.* (2007), obtienen que con una dosis de cal del 120% se alcanza la reducción mínima de la dureza total de un agua dura. La diferencia se explica, ya que el agua del manantial de Cerro Colorado presenta una alta cantidad de SDT, los cuales también consumen cal durante la precipitación química.

En cuanto a la dureza debida al Calcio se observó que, la dosis de cal con la cual se obtuvo la mayor disminución en la concentración de Calcio, fue cercana al 120%. El mínimo de dureza de calcio obtenido fue del 19% del valor inicial, lo que representa una eficiencia del proceso del 80%. También se observa que a partir de esta dosis, la dureza debida al Calcio comienza a aumentar de nuevo en el agua. Se puede apreciar que, aunque la dureza debida al Calcio sigue la misma tendencia que la dureza total, la concentración de Calcio disminuye rápidamente en los puntos de 30% y 60%, hasta alcanzar el punto de 90% de dosis de cal; más allá de éste punto no hay un cambio apreciable en la concentración de Calcio para dosis de 90% al 120%. Por ello se concluye que la mejor remoción de Calcio se obtiene con una dosis de 90% de cal, esto se puede explicar ya que en éste punto el pH es el ideal para precipitar la dureza de carbonato de calcio, el cual se ha determinado a ser de aproximadamente 9.5 (Reynolds & Richards, 1996), lo cual corresponde con la observación del experimento.

En lo que se refiere a la dureza debida al Magnesio, la máxima remoción se logró con el 150% de la dosis de cal. Siendo la mejor tasa de eliminación en éste punto del 20,14%. Esto se explica por el hecho de que, el pH ideal para precipitar hidróxido de Magnesio requiere un pH más alto que el requerido para la eliminación de dureza debida al Calcio.

En cuanto a la alcalinidad, ésta fue inicialmente disminuyendo desde su valor inicial 520 mg/L (como CaCO_3), hasta un valor mínimo de 168 mg/L para una dosis de cal de 150%. Esta observación es coherente con el hecho de que la alcalinidad se supone será consumida por la cal y las especies precipitantes. Más allá de la dosis de cal de 150%, la alcalinidad aumenta con la dosis de cal y alcanza una concentración de 240 mg/L (como CaCO_3) para una dosis de cal de 180%. Esta observación corrobora el hecho de que después de alcanzar la dosificación ideal de cal, la cal proporciona iones OH^- libres, los cuales son responsables del incremento de la alcalinidad.

4.3. Pruebas de nanofiltración

Tal como se mencionó en la metodología, se seleccionaron tres membranas de nanofiltración, para realizar las pruebas concernientes a la operación de membranas, a fin de elegir una sola para la planta de potabilización. Estas membranas son, de DOWFILMTEC las membranas NF90 y NF270; y de THOMAPOR la membrana 302986.

4.3.1. Determinación del ángulo de contacto

Los resultados de las mediciones del ángulo de contacto se muestran en la Tabla 19. Se observa que las tres membranas son hidrofílicas, siendo la membrana NF270 (DOWFILMTEC) la que presenta un carácter hidrofílico más alto; seguida en este aspecto, de la membrana NF90 (DOWFILMTEC); y finalmente, la membrana 302986 (THOMAPOR) es la que presenta la menor

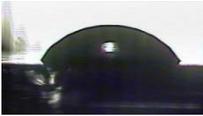
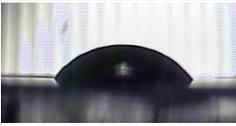
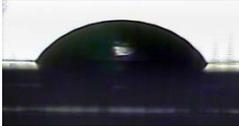
hidrofilicidad. Lo cual indica preliminarmente, que la membrana NF270, es la que va a oponer una menor resistencia a ser atravesada por el agua; en tanto que la membrana 302986 será la que oponga mayor resistencia. Estos resultados se comprobarían posteriormente en la pruebas de permeabilidad, ya que la membrana que presentó un mayor flux de permeado fue la membrana NF270; mientras que la membrana 302986, fue la que presentó el menor flux de permeado.

A su vez, los resultados obtenidos para ángulo de contacto en este trabajo, tienen las mismas tendencias que las presentadas en diversas investigaciones. Park *et al.* (2005), en su estudio realizaron la determinación de ángulo de contacto para comparar las membranas NF90 y NF270, obteniendo para la primera un valor $<30^\circ$ y para la segunda, $<20^\circ$. Por su parte Boussu, Zhang, Cocquyt *et al.* (2006), indican un ángulo de 54° para la membrana NF90 y de 27° para la NF270. Norberg, Hong, Taylor y Zhao (2007), en su estudio presentan un valor de ángulo de contacto de 38.7° para la NF90 y 51.4° en cuanto a la membrana NF270. Finalmente, Mondal y Ranil (2008) obtienen 54.6° y 42.7° para las membranas NF90 y NF270, respectivamente. De lo anterior se puede observar, 1) en la mayoría de las investigaciones (salvo Norberg *et al.*, 2007), se indica a la membrana NF270 con un carácter más hidrofílico sobre la membrana NF90; 2) existe una gran variación en cuanto a los valores de ángulo de contacto obtenidos, por cada estudio, para una misma membrana. En la Tabla 20 se pueden observar las diferencias entre los ángulos de contacto de las membranas utilizadas en este trabajo.

Tabla 19. Mediciones de ángulo de contacto

		Membrana		
Ángulo de contacto	Medición	NF90 (DOWFILMTEC)	NF270 (DOWFILMTEC)	302986 (THOMAPOR)
	1	45.04°	36.07°	48.61°
	2	44.38°	27.51°	50.05°
	3	41.40°	35.69°	46.98°
	4	39.12°	34.43°	46.23°
	5	39.56°	28.29°	46.70°
	6	39.54°	29.43°	48.39°
	7	43.01°	30.95°	49.30°
	8	40.25°	27.76°	49.33°
	9	39.91°	31.12°	46.37°
	10	39.06°	28.83°	47.16°
	11	40.76°	35.66°	48.05°
	12	39.49°	30.95°	50.33°
	13	39.18°	30.74°	47.70°
	Promedio	41°	31°	48°
	Desviación estándar	2.05°	3.12°	1.38°

Tabla 20. Ángulo de contacto de membranas de nanofiltración

Membrana	Ángulo de contacto			Promedio
NF90				41°
NF270				31°
302986				48°

4.3.2. Permeabilidad hidráulica y remoción de compuestos inorgánicos

Las pruebas de permeabilidad se llevaron a cabo usando agua del manantial de Cerro Colorado, a la cual se ha aplicado previamente el proceso de ablandamiento con cal. Se monitorearon los parámetros de dureza total, dureza de Calcio, dureza de Magnesio, así como sólidos disueltos totales y alcalinidad en cada etapa del proceso, tal como se describe en la metodología.

Esta prueba se realizó usando cada una de las tres membranas de nanofiltración (NF90, NF270, 302986).

De entrada se tomó una muestra de agua del manantial de Cerro Colorado y se le realizó la caracterización físico-química, para conocer las condiciones iniciales. Posteriormente, se realizó un ablandamiento del agua de Cerro Colorado, estableciendo una dosis fija del 150% de cal para agregarle al agua. Una vez realizado el proceso de ablandamiento con cal se volvieron a medir los parámetros fisicoquímicos del agua, con el fin de conocer la eficiencia del proceso de ablandamiento y las condiciones en que ingresaría al módulo de nanofiltración.

Este procedimiento se llevó a cabo en tres fechas diferentes. La primera el 26 de septiembre del 2009, la segunda el 2 de noviembre del 2009 y la tercera prueba el 6 de enero del 2010. Las condiciones iniciales del agua del manantial de Cerro Colorado, en promedio de las tres pruebas, se muestran en la Tabla 21, en tanto que las condiciones después de aplicado el ablandamiento con cal, se pueden observar en la Tabla 22.

Tabla 21. Condiciones iniciales del agua del manantial de Cerro Colorado en promedio

Condiciones Iniciales Agua cruda						
Parámetro	Unidad	Muestreo			promedio	Desviación estándar
		26/09/2009	02/11/2009	06/01/2010		
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	402	377	357	379	22
Dureza de Calcio	mg/L CaCO ₃	256	244	229	243	14
Dureza de Magnesio	mg/L CaCO ₃	146	133	129	136	9
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	597	492	491	526	61
SDT	mg/L	1195	1147	1015	1119	93
ST	mg/L	1195	1157	1099	1150	48
pH		6.85	7.39	7.39	7.21	0.31
Temperatura	°C	18.7	19.8	16.6	18.4	2

Tabla 22. Condiciones promedio del agua después del ablandamiento

Condiciones Agua ablandada						
Parámetro	Unidad	Muestreo			promedio	Desviación estándar
		26/09/2009	02/11/2009	06/01/2010		
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	89	95	22	92	3
Dureza de Calcio	mg/L CaCO ₃	36	36	14	41	9
Dureza de Magnesio	mg/L CaCO ₃	53	59	9	51	9
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	190	165	61	182	15
SDT	mg/L	788	763	93	805	53
pH		10.30	10.52	0	10.48	0.16

Una vez obtenidos los datos anteriores se procedió a realizar el ciclo de nanofiltración con cada una de las membranas elegidas (NF90, NF270, 302986). Se colectó una muestra del permeado de cada una de estas membranas y se caracterizó. A continuación, en las Tablas 23, 24 y 25, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de cada uno de los permeados.

Tabla 23. Condiciones promedio del permeado de nanofiltración usando la membrana NF90 de DOWFILMTEC

Condiciones Permeado de nanofiltración NF90					
Parámetro	Unidad	Muestreo			promedio
		26/09/2009	02/11/2009	06/01/2010	
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	20	51	55	42
Dureza de Calcio	mg/L CaCO ₃	3	2	5	3
Dureza de Magnesio	mg/L CaCO ₃	17	49	51	39
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	33	29	33	31
SDT	mg/L	42	50	53	48
pH		9.90	9.26	9.94	9.70

Tabla 24. Condiciones promedio del permeado de nanofiltración usando la membrana NF270 de DOWFILMTEC

Condiciones Permeado de nanofiltración NF270					
Parámetro	Unidad	Muestreo			promedio
		26/09/2009	02/11/2009	06/01/2010	
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	33	53	57	48
Dureza de Calcio	mg/L CaCO ₃	10	16	18	15
Dureza de Magnesio	mg/L CaCO ₃	23	37	39	33
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	56	37	67	53
SDT	mg/L	249	199	225	224
pH		8.72	9.41	9.54	9.22

Tabla 25. Condiciones promedio del permeado de nanofiltración usando la membrana 302986 de THOMAPOR

Condiciones Permeado de nanofiltración 302986					
Parámetro	Unidad	Muestreo			promedio
		26/09/2009	02/11/2009	06/01/2010	
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	39	30	49	39
Dureza de Calcio	mg/L CaCO ₃	10	12	14	12
Dureza de Magnesio	mg/L CaCO ₃	29	18	35	27
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	115	28	115	86
SDT	mg/L	65	81	81	76
pH		7.84	8.75	8.91	8.50

La Figura 17, muestra la comparación de los parámetros de la calidad del agua en cada una de las etapas que se llevaron a cabo en esta prueba, con cada una de las tres membranas de nanofiltración.

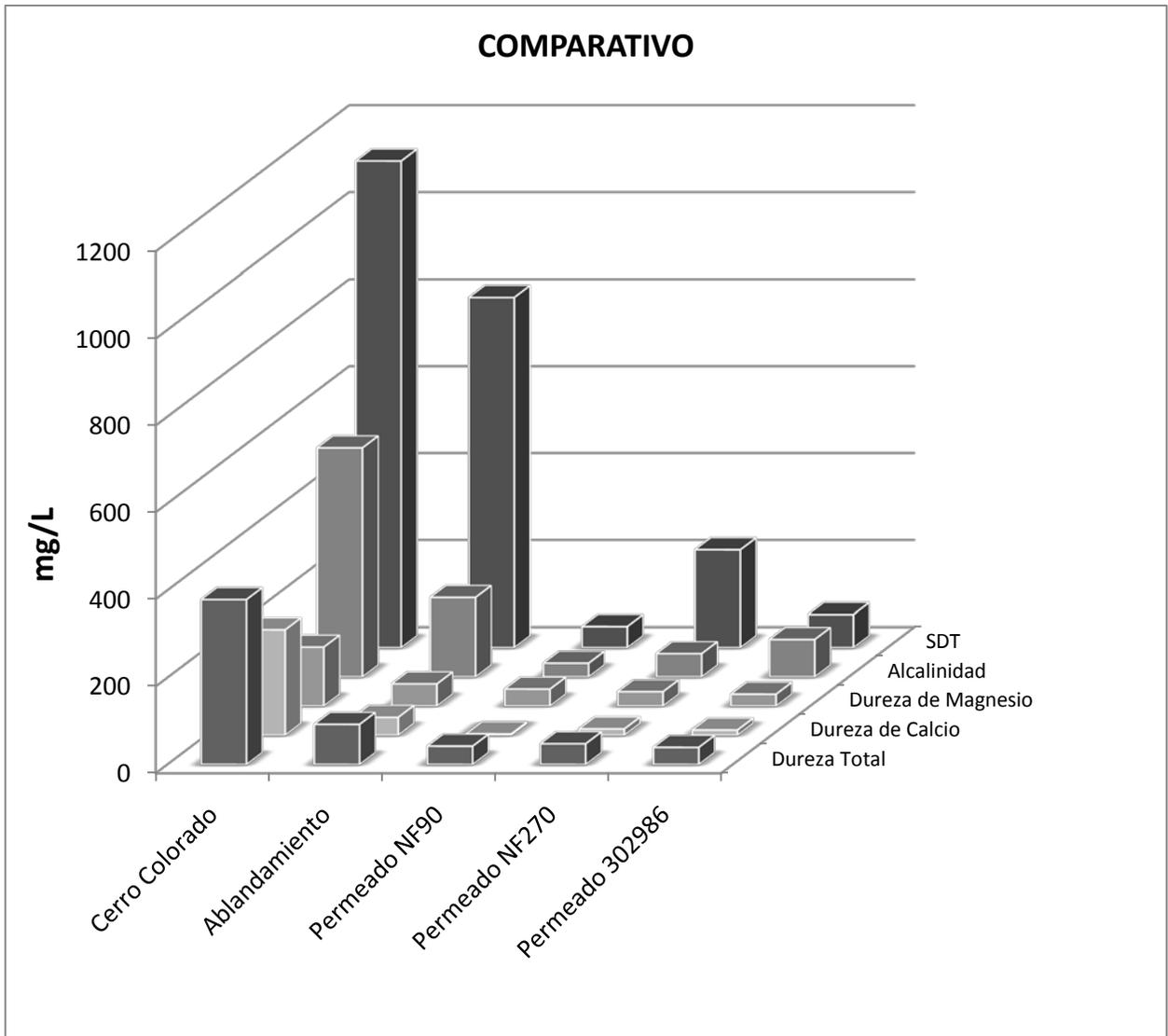


FIGURA 17. COMPARATIVO DEL PERMEADO DE NANOFILTRACIÓN PRODUCIDO POR CADA MEMBRANA

Debido a que el agua del manantial usada para realizar las corridas de las pruebas, se recolectó en fechas distintas, esta presentaba una variación natural en cada ocasión que se caracterizaba el agua inicialmente. Por lo que resulta difícil realizar una comparación de los parámetros físico-químicos entre cada corrida. Sin embargo, se puede calcular la eficiencia de remoción que presentó cada membrana, así como el proceso de ablandamiento y compararlas para poder elegir la mejor membrana. Dicha comparación se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26. Eficiencia de remoción de compuestos inorgánicos, presentada por el ablandamiento con cal y por las membranas de nanofiltración con respecto al agua cruda

Parámetro	Eficiencias Promedio			
	Eficiencia del ablandamiento	Permeado NF90	Permeado NF270	Permeado 302986
Dureza Total	76%	89%	87%	90%
Dureza de Calcio	81%	99%	94%	95%
Dureza de Magnesio	67%	71%	75%	80%
Alcalinidad	61%	94%	90%	84%
SDT	30%	96%	80%	93%

Conjuntamente se realizaron pruebas de permeabilidad, esto con el propósito de evaluar el desempeño de la membrana con agua de alimentación sin recibir el pre-tratamiento con cal y agua a la que se le aplicó el proceso de ablandamiento con cal previamente. Los resultados de esta prueba muestran que, la mayor permeabilidad con agua destilada, la presenta la membrana NF270 de DOWFILMTEC ($12.45 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{Bar}^{-1}$), seguida por la membrana NF90 de DOWFILMTEC ($10.34 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{Bar}^{-1}$), y la membrana con menos permeabilidad fue la 302986 de THOMAPOR ($2.71 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{Bar}^{-1}$). Además se comprobó, que el flux específico (flux/presión [$\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{Bar}^{-1}$]) que presentan las membranas cuando se usa agua de alimentación que fue ablandada, es en todos los caso superior al flux específico que presentan cuando se alimenta agua sin ningún tratamiento. En la Tabla 27 se presentan los valores promedio de las permeabilidades obtenidas por cada membrana. Mientras que en las gráficas de la Figura 18, se puede ver la variación del flux de permeado con respecto a la presión para cada una de las membranas en prueba. Los resultados para cada ensayo se presentan en el Anexo D. Adicionalmente, en la Tabla 28, se incluyen los resultados de permeabilidad obtenidos en diferentes investigaciones. En donde, se puede observar que, 1) existe variación entre los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones, en especial para la membrana NF90; 2) en todos los casos, la

permeabilidad de la membrana NF270, es mayor que la de la membrana NF90; 3) los valores de permeabilidad obtenidos en este trabajo, son semejantes a los obtenidos por otros grupos de investigación.

Tabla 27. Permeabilidad en $L.m^{-2}.h^{-1}.Bar^{-1}$ para agua destilada, agua ablandada y agua de Cerro Colorado sin tratar; obtenida por cada membrana de nanofiltración

Membrana	Agua Destilada		Agua Ablandada		Agua sin tratar	
	Promedio	Desv. Estándar	Promedio	Desv. Estándar	Promedio	Desv. Estándar
NF90	10.34	0.13	9.04	0.17	8.41	0.38
NF270	12.45	0.15	11.31	0.21	10.80	0.18
302986	2.71	0.11	2.48	0.10	2.31	0.08

Tabla 28. Permeabilidades en $L.m^{-2}.h^{-1}.Bar^{-1}$ obtenidas en diversas investigaciones

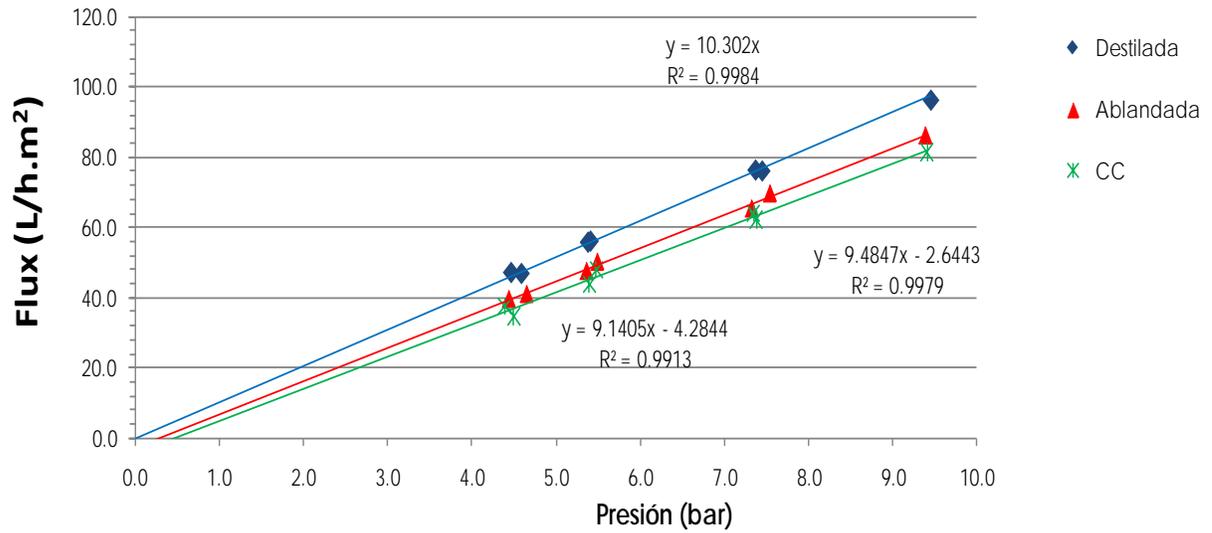
Autor	NF90	NF270	Agua Utilizada
Nyström, Butylina y Platt, 2004 ^a		20	Agua pura ^b
Cornelis, Boussu, Van der Bruggen, <i>et al.</i> , 2005		27.5	Agua pura ^b
Park, Kwon, Sun, <i>et al.</i> , 2005	2.6	13.3	Agua pura ^b
Park, Kwon, Kim y Cho, 2005		13.3	Agua pura ^b
Boussu, Zhang, Cocquyt, <i>et al.</i> 2006	5.2	8.5	Agua pura ^b
Braeken, Van der Bruggen, y Vandecasteele, 2006		11	Datos fabricante
Braeken, Bettens, <i>et al.</i> , 2006		11	Datos fabricante
Xu, Drewes, <i>et al.</i> , 2006	10.4		Grado milliQ
Boussu, De Baerdemaeker, Dauwe, <i>et al.</i> 2007		8.5	Agua pura ^b
Nghiem y Hawkes, 2007	6.4	13.5	Agua pura ^b
Lin, Chiang y Chang, 2007		14.79	des-ionizada
Mondal y Ranil, 2008	6.5	22	des-ionizada
Braeken y Van der Bruggen, 2009		13	Solución preparada
Yangali - Quintanilla, Sadmani, <i>et al.</i> , 2009	9.29		Agua pura ^b
Bes-Piá, Cuartas-Urbe, <i>et al.</i> , 2010		8.8	destilada

a: el autor indica que la prueba se realizo a una temperatura de 40° C.

b: el autor no da otra referencia del agua utilizada.

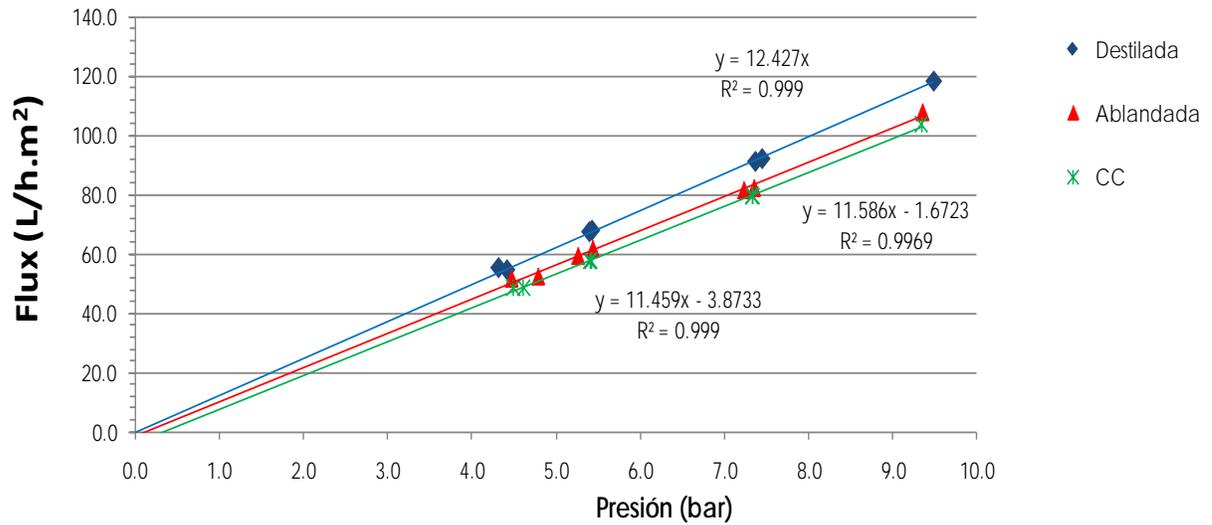
a)

COMPARACIÓN FLUX vs PRESIÓN - MEMBRANA NF90



b)

COMPARACIÓN FLUX vs PRESIÓN - MEMBRANA NF270



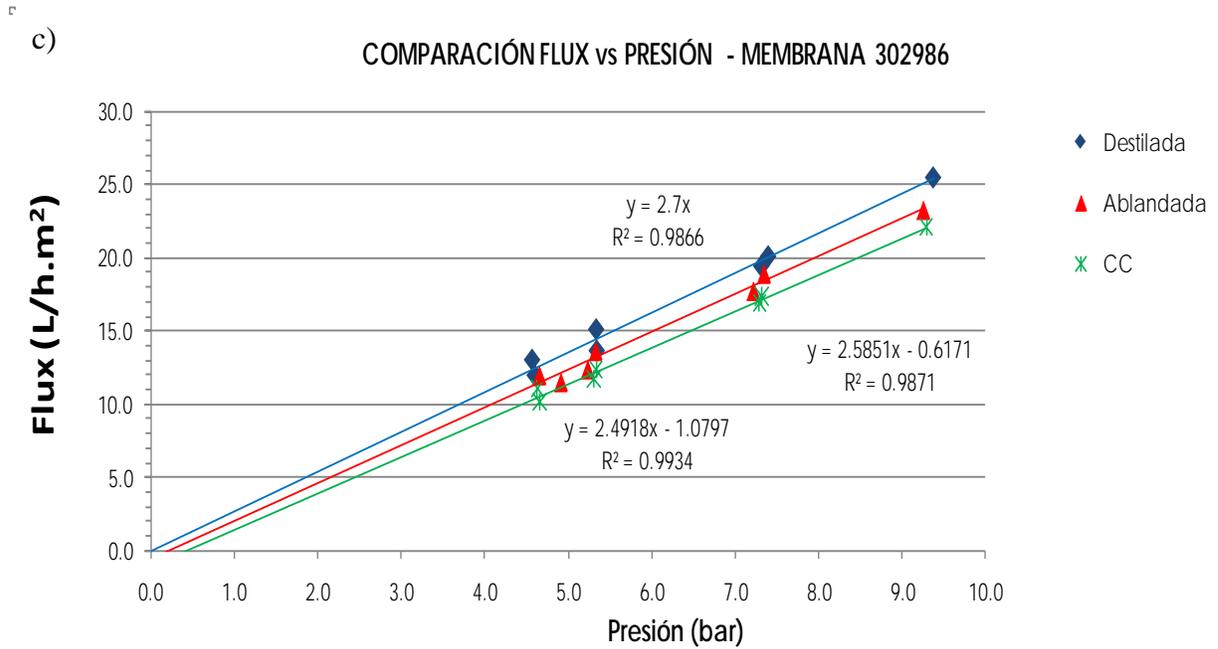


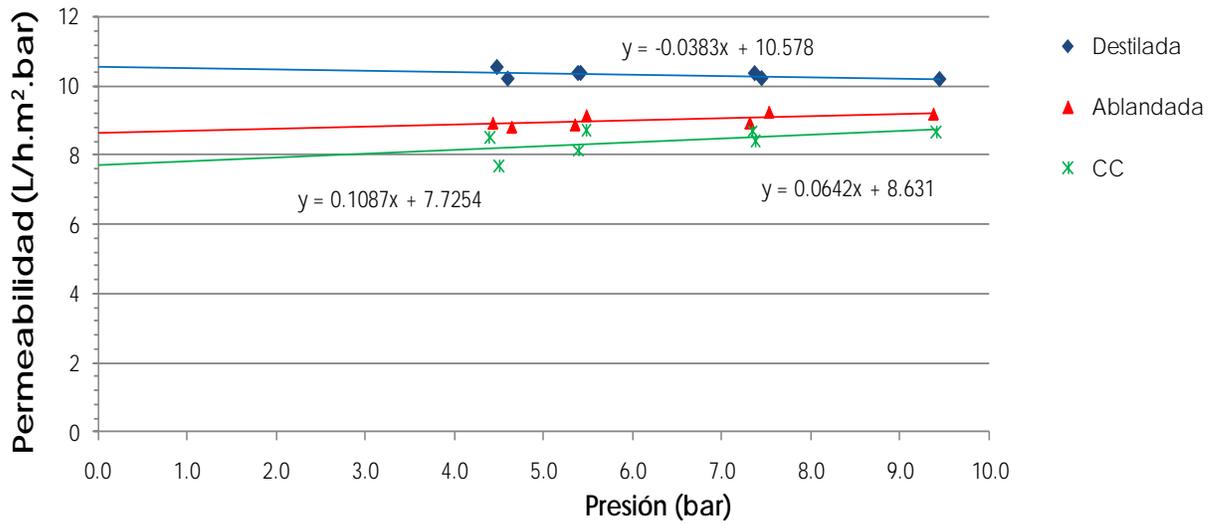
FIGURA 18. COMPARACIÓN FLUX VS PRESIÓN: A) MEMBRANA NF90, B) MEMBRANA NF270, C) MEMBRANA 302986

Como se puede apreciar de las gráficas de la Figura 18, el flux de permeado del agua con ablandamiento es superior al flux de permeado del agua sin tratamiento para todas las membranas. Siendo además, la membrana NF270 la que mayor permeado produce. Esto se puede verificar al graficar la permeabilidad de la membrana contra la presión para cada una de las membranas, la cual se presenta en la Figura 19. Se puede observar que la permeabilidad del agua con ablandamiento es superior a la del agua sin tratamiento y también que, la permeabilidad que presenta la membrana NF270 es la superior a la de las otras dos membranas de nanofiltración.

5

a)

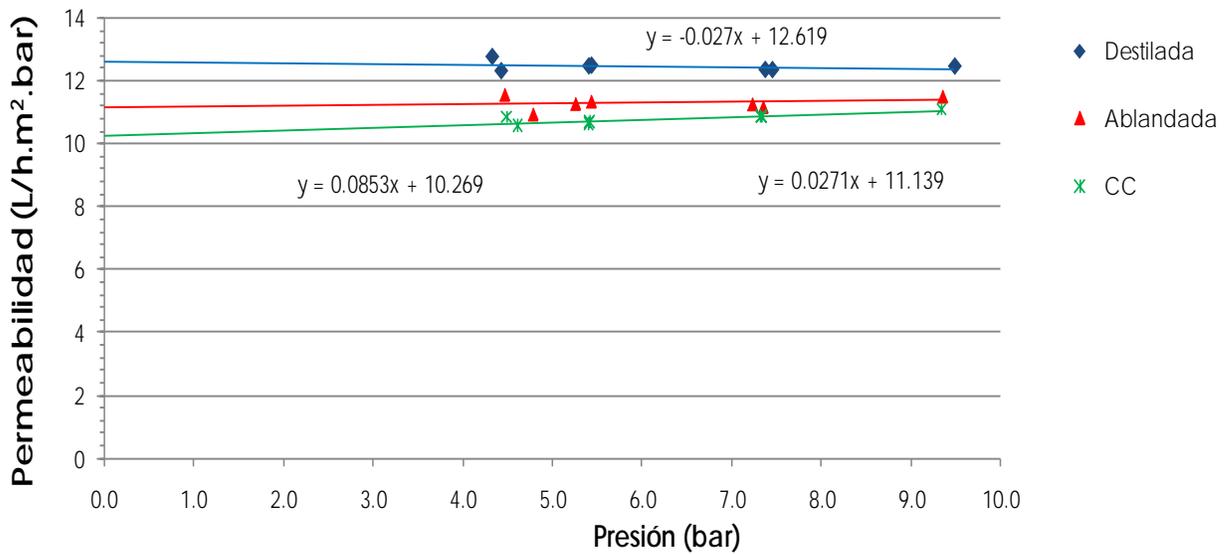
COMPARACIÓN PERMEABILIDAD vs PRESIÓN - MEMBRANA NF90



6

b)

COMPARACIÓN PERMEABILIDAD vs PRESIÓN - MEMBRANA NF270



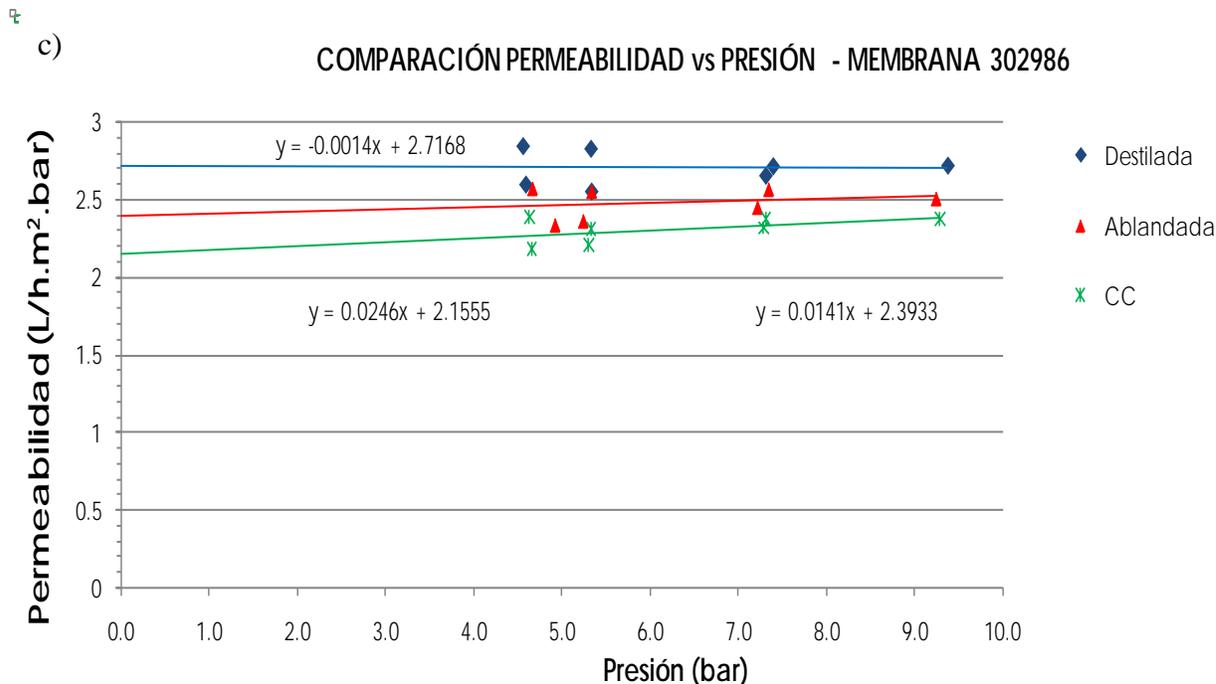


FIGURA 19. COMPARACIÓN PERMEABILIDAD VS PRESIÓN: A) MEMBRANA NF90, B) MEMBRANA NF270, C) MEMBRANA 302986

4.3.3. Remoción de compuestos orgánicos

Adicionalmente, y con el fin de evaluar la eficiencia que presenta cada una de las membranas de nanofiltración para remover compuestos orgánicos, se midió COT en cada uno de los permeados. Para esto, inicialmente se midió el COT en muestras del agua del manantial de Cerro Colorado sin ningún tratamiento, y posteriormente se realizaron filtraciones con cada una de las membranas (sin aplicar ningún tratamiento al agua) y se caracterizó el filtrado producido para determinar la reducción en el COT que ocurrió.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 29. En donde se puede apreciar que todas las membranas presentan efluentes con COT menores a 1.0 mg/L, con lo que se evita la formación de sub-productos de la desinfección durante la cloración. Los resultados indican que las tres membranas son eficientes para reducir material orgánico del agua. Para una consulta detallada de los resultados de esta prueba ver el Anexo E.

De las pruebas anteriores, se puede concluir que las tres membranas comparadas en este trabajo, producen permeados de buena calidad. De manera que, el criterio utilizado para elegir la membrana ideal para los propósitos de este trabajo fue la mayor generación de flux de permeado. Siendo esta la membrana NF270 de DOWFILMTEC, por lo que se concluye que esta membrana es la óptima para tratar el agua del manantial de Cerro Colorado.

Tabla 29. Concentración de COT en permeados de nanofiltración

	Concentración Cerro Colorado	Permeado NF90	Permeado NF270	Permeado 302986
COT (mg/L)	2.3 ± 0.4	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.03	0.4 ± 0.1

4.3.4. Remoción de contaminantes emergentes

Tal como se menciona en la metodología, se caracterizó inicialmente el agua del manantial de Cerro Colorado, con el propósito de determinar la concentración de los compuestos, considerados como contaminantes emergentes, 4-Nonilfenoles, Triclosán, Bisfenol-A, Butilbencil ftalato y Carbamazepina; presentes en ella. La Tabla 30 muestra los resultados obtenidos para cada uno de estos compuestos, así como también una comparación con los datos obtenidos por Gibson *et al.* (2007) y Silva (2008).

Tabla 30. Concentración de compuestos seleccionados presentes en el agua del manantial de Cerro Colorado

Compuesto	Concentración determinada (ng/L)	Gibson <i>et al.</i> , 2007 (ng/L)	Silva 2008 (ng/L)
4-Nonilfenoles	16	8	1.8
Bisfenol A	1.08	0.4	2.1
Butilbencil ftalato	16.7	2	4.5
Carbamazepina	nd.	0.9	-
Triclosán	8.9	1.3	0.76

nd. No detectable

Como se observa en la Tabla 30, salvo la carbamazepina, se detectó la presencia en el agua de los compuestos seleccionados, tal como se esperaba de la revisión de los estudios de Gibson *et al.* (2007) y Silva (2008). Sin embargo, las concentraciones de estos parámetros son muy bajas para poder evaluar la eficiencia de remoción, que presenta la membrana NF270 para este tipo de componentes del agua. Por lo que fue necesario, fortificar las muestras de agua antes de realizar las filtraciones con membrana.

El resultado de las pruebas de remoción, utilizando la membrana NF270 de DOWFILMTEC, se presenta en la Tabla 31, donde se puede apreciar la eficiencia obtenida para cada compuesto.

Tabla 31. Eficiencia de remoción, en porcentaje, de la membrana NF270 para contaminantes emergentes seleccionados

Compuesto	Concentración Inicial	Concentración agua fortificada	Concentración permeado NF270	Eficiencia de remoción
Bisfenol-A (ng/L)	1.08	73 ± 7.9	6 ± 1.2	92±0.6
Butilbenzilftalato (ng/L)	16.7	171 ± 2.9	3 ± 1.2	98±0.4
Carbamazepina (ng/L)	nd	287 ± 57.2	8 ± 1.9	97±0.3
4-Nonilfenoles (ng/L)	16	1502 ± 54.7	61±19	96±1.3
Triclosán (ng/L)	8.9	59 ± 0.98	4±2.3	94±1.0

nd. No detectable

4.4. Desinfección

Como se indica en la metodología, se realizaron pruebas de desinfección agregando hipoclorito de Sodio a tres tipos de agua para su comparación: a) agua destilada, la cual sirvió como blanco; b) agua a la cual se le aplicó el proceso de ablandamiento y nanofiltración, en este caso con la membrana NF270, así como también se le estabilizó el pH; y c) agua del manantial de Cerro Colorado sin ningún tratamiento.

Los resultados de estas pruebas se muestran en las gráficas de la Figura 20. En la Figura 20a, se muestran los resultados como cloro total residual, en donde se puede apreciar que los valores para el permeado de la membrana NF270, presentan una tendencia similar a los del agua destilada; en tanto que los del agua de manantial tienen una tendencia menor, así como también presentan una mayor dispersión. Esto se explica por el hecho de que el agua del manantial presenta compuestos que son susceptibles a reaccionar con el cloro. En tanto que en el agua que ha sido tratada, la nanofiltración ha removido gran cantidad de los elementos (como se ha demostrado en las secciones precedentes) contenidos en ella.

En la Figura 20b, se muestran los resultados como Cloro libre residual y como se puede apreciar, para el permeado de la membrana NF270, es casi idéntico que para el Cloro total residual; lo que indica que la mayor parte del Cloro agregado esta en forma de Cloro libre y solo un pequeño porcentaje está presente como Cloro combinado residual. Además, de esta Figura se observa que basta agregar 2 mg/L de hipoclorito de Sodio para obtener una cantidad de Cloro libre residual de 0.5 mg/L, como indica la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006).

Con esta prueba, se comprueba indirectamente que la nanofiltración es un tratamiento efectivo para eliminar del agua los compuestos que pueden reaccionar durante la cloración y producir sub-productos de la desinfección (SPD), lo cual es posible en el caso del efluente del manantial de Cerro Colorado ya que presenta un COT promedio de 2.69 mg/L, que de acuerdo a la *Environmental Protection Agency* (EPA, 2007), con valores > 2 mg/L es posible que exista la formación de SPD. La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006) por su parte indica que se debe contar con procesos que sean capaces de reducir la generación de SPD, sin que por ello se vea comprometida la desinfección. Siendo la nanofiltración una operación capaz de cumplir con estos requerimientos.

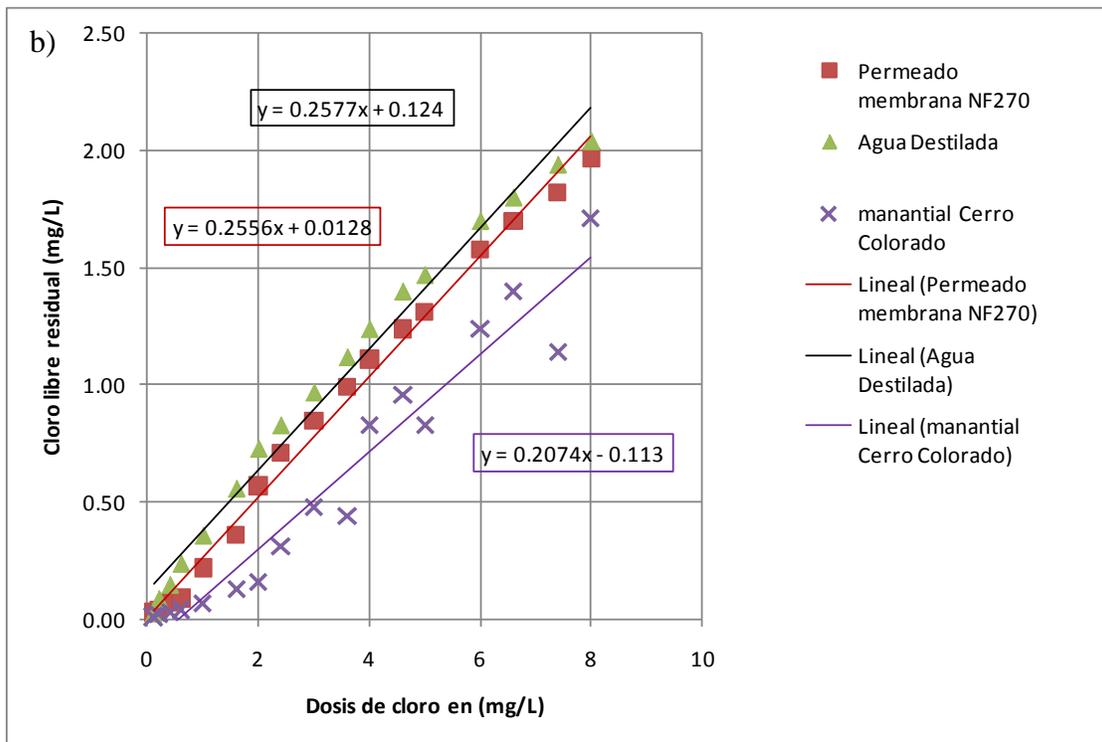
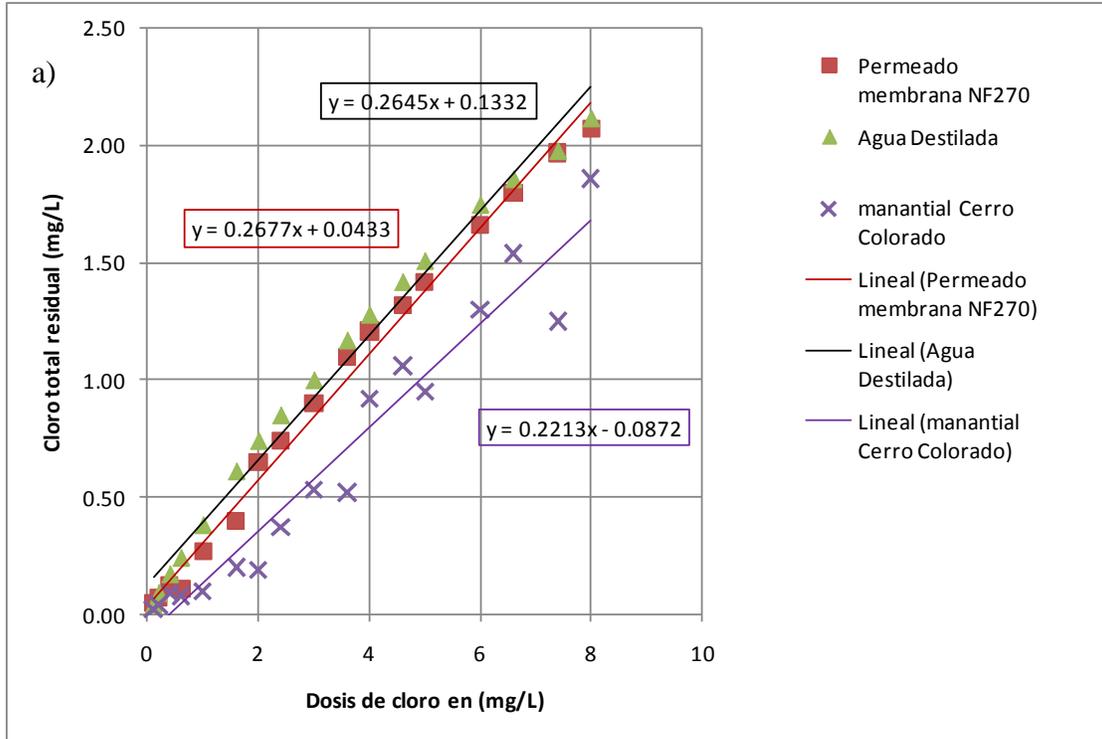


FIGURA 20. DOSIFICACIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO: A) MEDICIÓN DE CLORO TOTAL RESIDUAL, B) MEDICIÓN DE CLORO LIBRE RESIDUAL

4.5. Diseño de la planta

Para el diseño de la planta de potabilización del agua del manantial de Cerro Colorado, como ya se ha discutido previamente en este trabajo, se ha considerado como proceso principal a la filtración mediante membranas de nanofiltración. Motivo por el cual el tren de tratamiento, de acuerdo con las características de esta agua, ha sido elegido de manera que provea protección al proceso de nanofiltración; principalmente a través de la remoción de los compuestos inorgánicos (alta dureza debida al Calcio y Magnesio) que pueden provocar daño mecánico a las membranas.

Es por ello que el diseño consta en general tres etapas:

- 1) Pretratamiento, el cual se compone de un cribado inicial mediante rejillas que removerá materia mayor a 0.5 mm; un proceso de ablandamiento del agua a través de adición de cal el cual consta de un reactor de mezclado rápido, un reactor subsecuente de mezclado lento y un tanque de sedimentación; posteriormente sigue una operación de filtración mediante filtro de medios múltiples, la cual removerá el material mayor a 10 μ m que no haya sedimentado y evitar que pueda llegar a la nanofiltración; la última etapa del pretratamiento, es una filtración del influente a través de filtros cartucho de 5 μ m, la cual es recomendada previa a los procesos de nanofiltración y Ósmosis Inversa (AWWA, 1998; Schäfer *et al.*, 2005).
- 2) Tratamiento por membranas de nanofiltración, el cual removerá principalmente, compuestos orgánicos disueltos y contaminantes emergentes presentes en el agua de alimentación.
- 3) Post-tratamiento, el cual comprende dos procesos, el primero de ellos es una re-carbonatación a fin reducir el pH del agua y neutralizarla para su distribución. El segundo proceso es el de desinfección mediante la adición de hipoclorito de sodio, debido a que su efecto residual es una medida de precaución contra posibles contaminaciones microbiológicas dentro de la red de distribución.

El diagrama del tren de tratamiento de la planta de potabilización se muestra en la Figura 21.

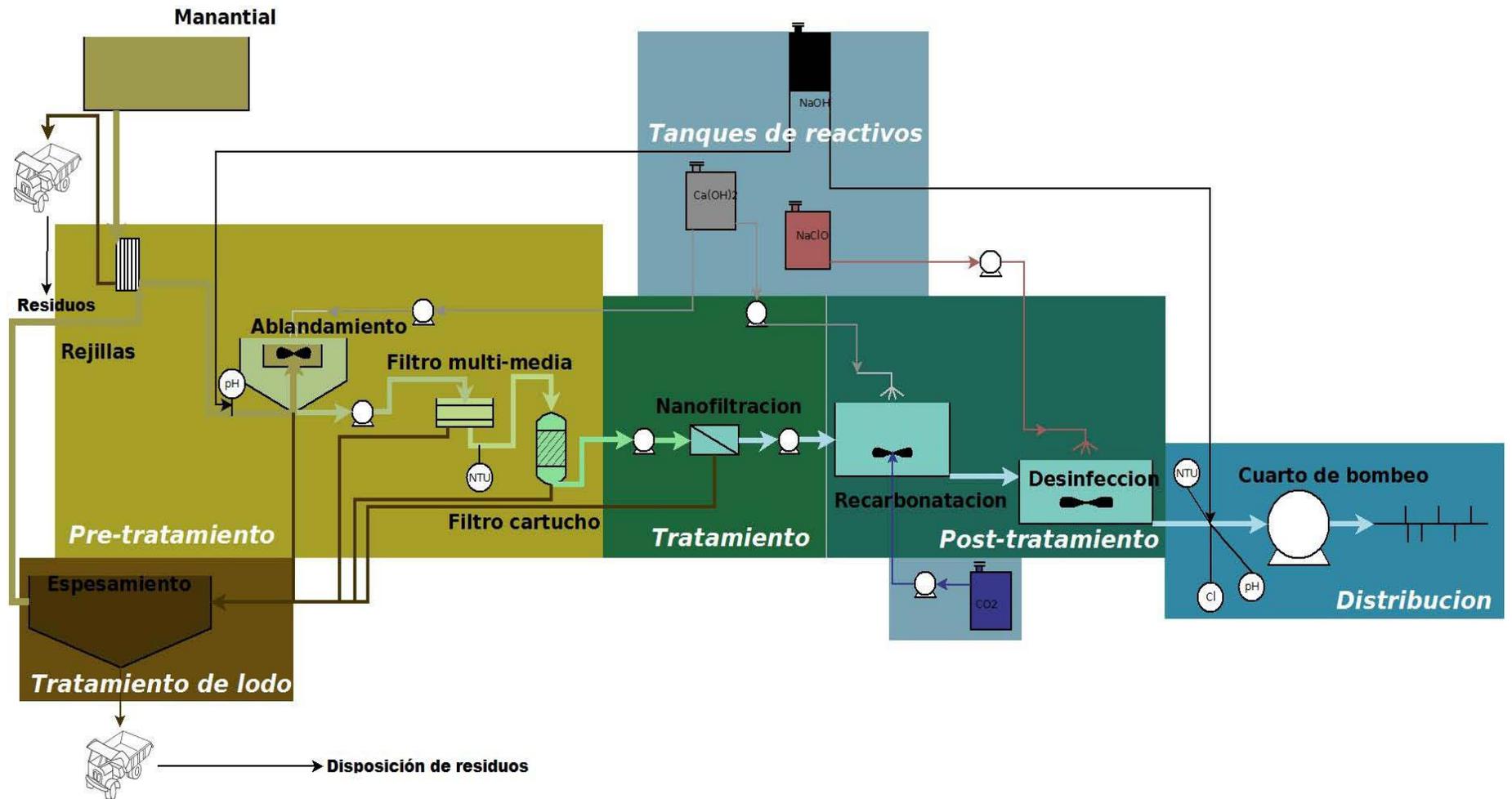


FIGURA 21. DIAGRAMA DEL TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO

4.5.1 Población de proyecto

Se ha elegido, para la planta de potabilización, un periodo de diseño de 15 años. El cual de acuerdo con los manuales técnicos de la Comisión Nacional del Agua, es un periodo que se puede clasificar como de largo plazo (10 a 20 años) (CONAGUA, 2007).

Es por ello que la proyección de la población, para las comunidades que se abastecen del manantial de Cerro Colorado: Francisco I. Madero, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Tetepango y Tezontepec de Aldama (Sotomayor, 1998); solo toma en cuenta los años del 2010 hasta el 2025.

Para la estimación de la población en dichas comunidades de Hidalgo, se recurrió a los datos de proyección de población del Consejo Nacional de Población (CONAPO), los cuales se presentan en la Tabla 33. Se puede observar de estas proyecciones, que el año en el cual se presenta el mayor número de población es en el 2013, con 141,413 habitantes de estas comunidades. Por lo que este es el número de consumidores, para los cuales se realizó el cálculo de producción de agua en este proyecto.

Otras consideraciones que se tomaron en cuenta para, obtener la cantidad de agua que serviría como caudal de entrada para el diseño de la planta de potabilización, son 40% de pérdidas y un consumo de agua para clase socioeconómica popular de 180 L/hab/día (CONAGUA, 2007). Lo cual arroja una producción de agua para la planta potabilizadora de 412 L/s. Lo anterior se resume en la Tabla 32.

Tabla 32. Estimación de la producción de agua potable

Consumo por habitante	L/hab/día	180
Población máxima (periodo de diseño 2010 a 2025)	habitantes	141448
Pérdidas	1	0.4
Producción de agua necesaria	L/s	412

Tabla 33. Proyección de población CONAPO, 2005 - 2030

Entidad federativa o municipio	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Total Hidalgo	2369307	2382691	2396201	2409162	2421606	2433563	2445032	2455995	2466494	2476511	2486077	2495222	2503967
Francisco I. Madero	29 673	29 728	29 446	29 154	28 853	28 543	28 226	27 903	27 574	27 238	26 898	26 556	26 210
Mixquiahuala de Juárez	37 919	38 273	38 277	38 259	38 222	38 164	38 088	37 995	37 885	37 758	37 617	37 462	37 293
Progreso de Obregón	19 810	19 841	19 635	19 422	19 201	18 974	18 742	18 503	18 260	18 013	17 764	17 512	17 257
Tetepango	9 788	9 905	10 078	10 246	10 411	10 572	10 729	10 882	11 031	11 176	11 316	11 452	11 585
Tezontepec de Aldama	42 287	42 775	43 389	43 983	44 557	45 112	45 649	46 165	46 663	47 142	47 601	48 043	48 468
Total	139 477	140 522	140 825	141 064	141 244	141 365	141 434	141 448	141 413	141 327	141 196	141 025	140 813
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Total Hidalgo	2512261	2520102	2527491	2534433	2540878	2546771	2552067	2556750	2560769	2564138	2566780	2568702	2569852
Francisco I. Madero	25 862	25 511	25 157	24 802	24 444	24 085	23 723	23 360	22 996	22 630	22 262	21 894	21 524
Mixquiahuala de Juárez	37 111	36 916	36 710	36 492	36 262	36 021	35 768	35 504	35 227	34 939	34 641	34 332	34 011
Progreso de Obregón	17 001	16 744	16 486	16 227	15 967	15 707	15 447	15 186	14 926	14 664	14 403	14 141	13 880
Tetepango	11 714	11 839	11 959	12 075	12 188	12 297	12 399	12 496	12 588	12 675	12 757	12 832	12 901
Tezontepec de Aldama	48 875	49 264	49 633	49 984	50 316	50 629	50 920	51 189	51 436	51 660	51 861	52 039	52 192
Total	140 563	140 274	139 945	139 580	139 177	138 739	138 257	137 735	137 173	136 568	135 924	135 238	134 508

4.5.2. Rejillas

La inclusión de rejillas, dentro del diseño de la planta, tiene la función de preparar el agua, limpiándola de todas aquellas partículas cuyas dimensiones puedan obstruir o dificultar los procesos consecuentes.

Las características de entrada para el diseño de las rejillas se presentan en la Tabla 34. Las consideraciones de diseño, fueron elegidas a partir de los valores comunes de una rejilla fina. El coeficiente de ensuciamiento corresponde a rejillas del tipo automáticas.

Se tomó en consideración también, el contar con dos canales para proporcionar flexibilidad a la planta, en caso de ser necesario dar mantenimiento a las instalaciones. Siendo la medida del largo del canal tres veces la medida de su ancho. Una vez antes de las rejillas y dos veces después de ellas. Las dimensiones para las rejillas se muestran en la Tabla 35.

Tabla 34. Consideraciones de diseño para las rejillas

Consideraciones de diseño		
Caudal medio	m ³ /h	1498.6
Velocidad del agua en el canal	m/s	0.6
Coeficiente de ensuciamiento		0.6
Espaciamiento de barras	mm	5
Diámetro de barras	mm	5
Tirante de agua	m	0.8
	°	60
Ángulo	rad	1.04

Tabla 35. Dimensiones de rejillas

Dimensiones de rejillas		
Superficie de rejillas	m ²	1.2
Ancho de rejillas	m	1.2
largo de rejillas	m	0.9
Dimensiones del canal		
Altura del canal	m	1.8
Ancho del canal	m	1.2
Largo del canal	m	3.7

4.5.3. Ablandamiento

Las características principales para el diseño de los tanques de ablandamiento por adición de cal provienen de las pruebas de laboratorio. En la Tabla 36 se resumen las principales características de este proceso.

Tabla 36. Características del proceso de ablandamiento

Característica		Unidad	Valor
Mezclado rápido	Tiempo	min	1
	Velocidad de rotación	rpm	100
Mezclado lento	Tiempo	min	10
	Velocidad de rotación	rpm	20
Sedimentación	Tiempo	min	15
Mejor rendimiento	$\frac{\text{Tasa real del tratamiento}}{\text{Tasa teórica del tratamiento}}$	1	1,5

Adaptado de: Metcalf & Eddy, Inc., 2003

Las pruebas de jarras se realizaron con el fin de obtener la relación óptima de dosis de cal que precipitara la dureza total del agua del manantial de Cerro Colorado $\frac{\text{Tasa real del tratamiento}}{\text{Tasa teórica del tratamiento}}$.

Además del dimensionamiento de los tanques de ablandamiento. Fue necesario diseñar los impulsores que llevarían a cabo el mezclado del producto químico en los reactores. Para ello se utilizaron los valores recomendados para el diseño de impulsores se muestran en la Tabla 37, así como la ecuación 4.1 para mezcladores mecánicos.

$$G = \sqrt[2]{\frac{P}{\mu V}} \quad (4.1) \text{ (Reynolds \& Richards, 1996)}$$

Tabla 37. Parámetros típicos para impulsores

Proceso	Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango
Mezclado rápido	Gradiente de Velocidad	G	1/s	500 a 2500
	Velocidad de rotación	N	rpm	40 a 125
	Relación diámetro impulsor/diámetro reactor	$\frac{D_{impulsores}}{D_{reactor}}$	1	0.25 a 0.40
Mezclado lento	Gradiente de Velocidad	G	1/s	100 a 500
	Velocidad de rotación	N	rpm	10 a 30
	Relación diámetro impulsor/diámetro reactor	$\frac{D_{impulsores}}{D_{reactor}}$	1	0.35 a 0.45
	Relación altura impulsor/diámetro reactor	$\frac{H_{impulsores}}{D_{reactor}}$	1	0.9 a 1.1

Adaptado de: Metcalf & Eddy, Inc., 2003

Con lo anterior, se dimensionaron tanto los tanques para el proceso de ablandamiento como los impulsores de cada reactor. Esto se llevó a cabo tomando en cuenta las consideraciones que se presentan en la Tabla 38, que fueron obtenidas de las pruebas de ablandamiento. Las dimensiones de los tanques, e impulsores se presentan en la Tabla 39. En este caso también se consideró necesario dividir el proceso en dos líneas, por lo que las dimensiones de la Tabla 39 corresponden a una línea y son idénticas para la otra. Siendo el caudal de la Tabla 38 el que llega de rejillas y se divide en dos para cada línea.

Tabla 38. Consideraciones de diseño para el proceso de ablandamiento

Consideraciones de diseño		
Caudal medio	m ³ /h	2192.4
mezclado rápido	min	1.0
mezclado lento	min	10.0
tiempo de sedimentado	min	15.0
$D_{impulsor\ rápido}/D_{reactor}$	1	0.35
$D_{impulsor\ lento}/D_{reactor}$	1	0.40
$H_{impulsor\ lento}/D_{reactor}$	1	1.0

Tabla 39. Dimensionamiento del proceso de ablandamiento

Dimensiones de impulsores			
Mezclado rápido	Diámetro	m	0.97
	Altura	m	1.0
Mezclado lento	Diámetro	m	2.5
	Altura	m	6.2
Dimensiones de reactores			
Reactor de mezclado rápido	Volumen	m ³	18.3
	Altura	m	3.0
	Diámetro	m	2.8
Reactor de mezclado lento	Volumen	m ³	182.8
	Altura	m	6
	Diámetro	m	6.2
Sedimentador	Volumen	m ³	274
	Altura	m	8
	Diámetro	m	6.6

4.5.4. Diseño del filtro de medios múltiples

Un elemento importante en esta parte del tren de tratamiento, es el diseño del filtro de medios múltiples. Ya que es el dispositivo principal, para evitar el taponamiento de las membranas de nanofiltración.

El diseño geométrico se basa en la velocidad de filtración. Este valor se encuentra entre 5 y 25 m.h⁻¹ (AWWA, 1990). Una vez que se cuenta con la velocidad de filtración y el caudal es posible calcular la superficie del filtro de medios múltiples mediante la ecuación 4.2:

$$S = \frac{Q}{v} \quad (4.2) \text{ (Hendricks, 2006)}$$

Donde:

Q, es el caudal (m³.h⁻¹)

v, es la velocidad de filtración (m.h⁻¹)

Para determinar la altura del filtro es necesario conocer las alturas de la arena y el medio granular (grava). La altura del filtro se calculó como 1.4 veces la suma de la altura de los medios arenoso y granular (Cheremisinoff, 1995).

Las alturas de los medios arenoso y granular, debe ser suficiente para prevenir la posible infiltración de flóculos de procesos anteriores. Generalmente es suficiente con un alto de 75 cm de arena y 40 cm de medio granular. Además, con esto se obtienen los volúmenes de arena y medio granular, mediante el producto de la altura y la superficie (Cheremisinoff, 1995).

Las consideraciones de diseño supuestas para el filtro de medios múltiples se muestran en la Tabla 40, en tanto que el dimensionamiento del mismo se presenta en la Tabla 41. Se debe hacer notar que, se decidió tener cuatro filtros de medios múltiples, dos por cada línea de ablandamiento. Es por ello, que las dimensiones mostradas en la Tabla 41 corresponden a un filtro y son idénticas para los otros tres restantes. En tanto que la composición de cada filtro se muestra en la Tabla 42.

Tabla 40. Consideraciones de diseño del filtro de medios múltiples

Consideraciones de diseño		
Caudal medio	m ³ /h	1973.7
Velocidad de filtración	m/h	15.0
Altura de arena	m	0.75
Altura de medio granular	m	0.4
razón entre Altura de agua/Altura de arena+grava	1.0	1.4

Tabla 41. Dimensiones para cada uno de los cuatro filtros de medios múltiples

Dimensiones de los Filtros			
Filtro de medios múltiples	Superficie	m ²	9.1
	Altura	m	1.6
	Largo	m	4.5
	Ancho	m	2.0

Tabla 42. Composición de cada uno de los 4 filtros

Composición del Filtro			
Filtro de medios múltiples	Volumen arena	m ³	6.9
	Volumen medio granular	m ³	3.7

4.5.5. Retrolavado

Un elemento importante para el funcionamiento del filtro de medios múltiples, es el retrolavado. Este se compone de tres etapas:

- Inyección de aire para revertir obstrucciones en la arena.
- Inyección de aire+agua para el lavado.
- Inyección de agua para el enjuague.

Inyección de aire. Para revertir las obstrucciones en la arena, es necesaria una inyección de aire con una velocidad entre 12 y 36 m/h, esto de acuerdo con la composición del medio. Si la arena es gruesa, la velocidad de inyección debe ser alta (AWWA, 1990). El flujo de aire necesario se obtiene como el producto de la velocidad y la superficie del filtro.

Inyección de aire+agua. Para llevar a cabo el lavado de la arena, es necesaria una velocidad de inyección de aire de 110 a 150 m/h; y una velocidad de inyección de agua entre 15 y 20 m/h (AWWA, 1990). Los flujos de aire y agua necesarios se obtienen de la multiplicación de la velocidad y la superficie del filtro.

Inyección de agua. El volumen típico de agua requerido para retrolavar un filtro de medios múltiples es de 4 a 6 m³.m⁻² (AWWA,1990). Este es el flujo de agua por unidades de superficie durante esta etapa. Es posible obtener el caudal necesario para esta operación, mediante la fórmula 4.3:

$$Q_{Wash} = \frac{Q Q_s}{v} \quad (4.3)$$

Donde:

Q, caudal ($m^3 \cdot h^{-1}$) Q_{wash} , caudal de lavado ($m^3 \cdot h^{-1}$)
V, velocidad de filtración ($m \cdot h^{-1}$) Q_s , flujo de lavado por unidad de superficie ($m^3 \cdot m^{-2}$)

De lo anterior, se realizó el cálculo del sistema de retrolavado para el filtro de medios múltiples, el cual se resume en la Tabla 43. Donde se puede observar que son necesarios $350 m^3 \cdot d^{-1}$ de agua para el retrolavado de los cuatro filtros. Esto significa que el 1% del agua producida será usada para retrolavar.

Tabla 43. Resumen de características del retrolavado

Consideraciones de diseño		
Velocidad de aire I	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	36
Velocidad de aire II	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	150
Velocidad de agua I	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	20
Velocidad de agua II	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	36
Superficie del filtro	m^2	37
Tiempo etapa 1	min	10
Tiempo etapa 2	min	10
Tiempo etapa 3	min	10
Caudal de retrolavado		
Flujo de aire etapa 1	$m^3 \cdot h^{-1}$	1332
Flujo de aire etapa 2	$m^3 \cdot h^{-1}$	5550
Flujo de agua etapa 2	$m^3 \cdot h^{-1}$	740
Flujo de agua etapa 3	$m^3 \cdot h^{-1}$	1332
Caudal por día		
Flujo de aire etapa 1	$m^3 \cdot d^{-1}$	222
Flujo de aire etapa 2	$m^3 \cdot d^{-1}$	925
Flujo de agua etapa 2	$m^3 \cdot d^{-1}$	123
Flujo de agua etapa 3	$m^3 \cdot d^{-1}$	222

4.5.6. Filtros cartucho

Para los filtros cartucho se consideró el uso de filtros modelo FA BIG ONE de 40 pulgadas de la marca AQUA. El pretratamiento del agua requiere de 70

filtros cartucho para que el agua de alimentación pueda ingresar a los cartuchos de nanofiltración. Las consideraciones de diseño se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44. Resumen de diseño de filtros cartucho

Consideraciones de diseño		
Caudal medio de entrada al proceso	m ³ /h	1914.5
Caudal por filtro cartucho	m ³ /h	28
Número de filtros requeridos		70

4.5.7. Nanofiltración

Los cartuchos de nanofiltración que se eligieron a ser usados en esta operación, son filtros enrollados en espiral NF270 de DOWFILMTEC. El número de filtros necesarios es 418, con una presión de operación de 10 bares. En la Tabla 45 se presentan el resumen del cálculo de filtros de nanofiltración.

Tabla 45. Resumen de diseño cartuchos de nanofiltración

Consideraciones de diseño		
Caudal	m ³ /h	1857.1
Flux de permeado	L.m ⁻² .h ⁻¹	120
Caudal_{max}/Filtro	m ³ /h	15.9
Presión de operación	bar	10
Superficie de membrana/filtro	m ²	37.0
Número de filtros		
Caudal de permeado producido/filtro	m ³ /h	4.44
Número de filtros necesarios		418

4.5.8. Re-carbonatación

Posteriormente a la nanofiltración, se considera conveniente llevar a cabo dentro de la cadena de tratamiento del agua, el proceso de re-carbonatación. Ya que este proceso reducirá el pH alcalino que se genera durante el ablandamiento y se producirán carbonatos con lo que aumentará la alcalinidad y se reducirá el pH.

Este proceso consta de dos pasos: (a) en el primer paso, conocido como re-mineralización, se agrega CO_2 al agua con el propósito de reducir el pH; (b) en el segundo pasó se llevará a cabo una neutralización mediante la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Para el diseño geométrico de la re-carbonatación, se ha optado por contar con dos líneas para llevar a cabo esta operación. Por lo que en la Tabla 46, se muestran las dimensiones que tendrá cada uno de los tanques de re-carbonatación.

Tabla 46. Diseño de la re-carbonatación

Consideraciones de diseño			
caudal		m^3/h	1485.2
Tiempo de re-carbonatación		min	10.0
$D_{\text{impulsor}}/D_{\text{reactor}}$		1	0.35
Dimensiones de cada reactor			
Reactor de re-carbonatación	volumen	m^3	123.8
	Altura	m	5.0
	Diámetro	m	5.6
Dimensiones de impulsores			
Impulsores del reactor	Diámetro	m	1.97
	Altura	m	1.67

En la Tabla 47, se presenta el resumen del cálculo para la dosificación de CO₂ durante la re-mineralización, en tanto que en la Tabla 48 se hace lo propio para la neutralización. Donde se determina, que son necesarios 130 L/h de CO₂ líquido y 40 L/h de cal para completar la re-carbonatación.

Tabla 47. Dosificación de la re-mineralización

Permeado de nanofiltración		
Alcalinidad	mg _{CaCO3} /L	70
Dureza Mg	mg _{CaCO3} /L	42
Dureza Ca	mg _{CaCO3} /L	20
Dureza Total	mg _{CaCO3} /L	62
Dureza Mg deseada	mg _{CaCO3} /L	20
Dureza Ca deseada	mg _{CaCO3} /L	30
Dosis de exceso de cal	mg _{CaCO3} /L	60
Tasa del tratamiento		
Tasa del tratamiento de CO₂	mg _{CO2} /L	92.4
Cantidad requerida CO₂ por agua	L _{CO2} /L _{agua}	0.09
Flujos del tratamiento		
Caudal de entrada	m ³ /h	1485.2
Flujo de CO₂	m ³ _{CO2 líquido} /h	0.13

Tabla 48. Dosificación de neutralización

Agua Re-carbonatada		
Alcalinidad	mg _{CaCO3} /L	70
Dureza Mg	mg _{CaCO3} /L	42
Dureza Ca	mg _{CaCO3} /L	20
Dureza Total	mg _{CaCO3} /L	62
Temperatura	°C	19.7
Alcalinidad/Dureza Ca	1	3.5
pH		7.5
Tasa del tratamiento		
Alcalinidad final	mg _{CaCO3} /L	410
Δalk	kg _{Ca(OH)2} /m ³	0.25
Flujos del tratamiento		
Caudal de entrada	m ³ /h	1485.2
Flujo másico Ca(OH)₂	kg _{Ca(OH)2} /h	373.68
Concentración Ca(OH)₂	g _{Ca(OH)2} /L	10
Flujo de cal	L _{Ca(OH)2} /h	37.4

4.5.9. Cloración

Las características para el diseño del proceso de desinfección, son las determinadas por las pruebas de laboratorio. Se ha elegido contar con dos líneas para realizar la cloración del agua. En la Tabla 49 se presenta el dimensionamiento de esta operación. El hipoclorito de sodio, se agregará en un gasto de 107 L/h.

Tabla 49. Dosificación de neutralización

Consideraciones de diseño			
	caudal	m ³ /h	1485.65
	Tiempo de retención	min	30
	D_{impulsor}/D_{reactor}	1	0.35
Dimensiones de cada reactor			
Reactor de desinfección	volumen	m ³	371.4
	Altura	m	8.0
	Diámetro	m	7.7
Dimensiones de impulsores			
Impulsores del reactor	Diámetro	m	2.7
	Altura	m	2.7

4.5.10. Tanque de espesamiento de lodos

Es necesario también considerar en el diseño, el tratamiento de los residuos producidos por los procesos de potabilización. Por ello se ha incluido un tanque de espesamiento de lodos. Para el dimensionamiento de este tanque, se ha calculado una producción de lodos de 4000 kg.h⁻¹. El resumen de las consideraciones de diseño, así como el dimensionamiento se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50. Dimensionamiento del tanque de espesamiento de lodos

Consideraciones de diseño			
	Caudal de entrada	m ³ /h	707.36
	Altura de Lodo	m	1
	Carga de entrada	kg.h ⁻¹	4000
	Carga de superficie	kg.m ⁻² . h ⁻¹	2
	Superficie	m ²	2000
	Tiempo de sedimentación	h	11.31

Dimensiones del tanque			
Tanque de sedimentación	volumen	m ³	1000
	Altura	m	4
	Diámetro	m	17.84

4.5.11. Deshidratación de lodos

Debido a que la producción de residuos sólidos será generada por el proceso de Ablandamiento del agua, la composición principal del lodo producido es carbonato de Calcio (CaCO₃). Por lo que, resulta viable llevar a cabo la incineración de estos residuos, con lo el fin de obtener nuevamente cal, la cual podrá ser reutilizada dentro del proceso. Sin embargo para poder ser incinerado, se debe aplicar al lodo un proceso de deshidratación para reducir la cantidad de agua contenida en el lodo, y proporcionar la calidad adecuada para incinerar.

Para el diseño de esta operación se ha considerado el uso de un filtro prensa, donde 2 L/s de lodo son rechazados con una concentración de 300 g_{MS}/L, y 193 L/s de agua será recirculada al inicio del la planta de tratamiento. En la Tabla 51 se presenta el dimensionamiento para el filtro prensa. En donde se puede observar que son necesarios 270 filtros para obtener una sequedad del 30%, es decir 300 g_{MS}/L de material sólido.

Tabla 51. Dimensionamiento del filtro prensa

Consideraciones de diseño			
Carga de entrada		kg.h ⁻¹	4000
Carga de superficie		kg.m ⁻² . h ⁻¹	10
Altura de filtro		m ²	1.5
Dimensiones del filtro			
Banda del filtro prensa	Superficie	m ²	400
	Número	1	267

4.5.12. Dimensionamiento de los tanques de reactivos

Es necesario dimensionar los tanques que almacenarán los reactivos que serán usados por los diferentes procesos que integran el tren de tratamiento, ya que esto asegura la disponibilidad de consumibles y el funcionamiento continuo de la planta. Siendo en este caso los reactivos considerados, 1) hipoclorito de Sodio (NaOCl), para la desinfección; 2) cal $[Ca(OH)_2]$, para el proceso de ablandamiento del agua; y 3) Dióxido de carbono (CO_2) para la re-carbonatación. Se han hecho las siguientes consideraciones diseño:

- El tanque de NaOCl, tendrá una capacidad de almacenamiento de reactivo para 40 días.
- La característica del tanque de $Ca(OH)_2$, es que presenta capacidad para 7 días de almacenamiento de reactivos antes que sea necesario rellenar. Al igual que el tanque de CO_2 .
- Se debe considerar que estos tanques deben ser herméticos para evitar la reacción de los reactivos con los elementos del medio.

En la Tabla 52, se resume el dimensionamiento de estos tanques. Mientras que en la Figura 22 se muestra el diagrama de la planta de potabilización.

Tabla 52. Dimensionamiento de tanques de reactivos

		Reactivo		
		NaOCl	Ca(OH) ₂	CO ₂
Volumen	m ³	103.15	47.7	22.35
Altura	m	10	5	5
Diámetro	m	3.62	3.49	2.39

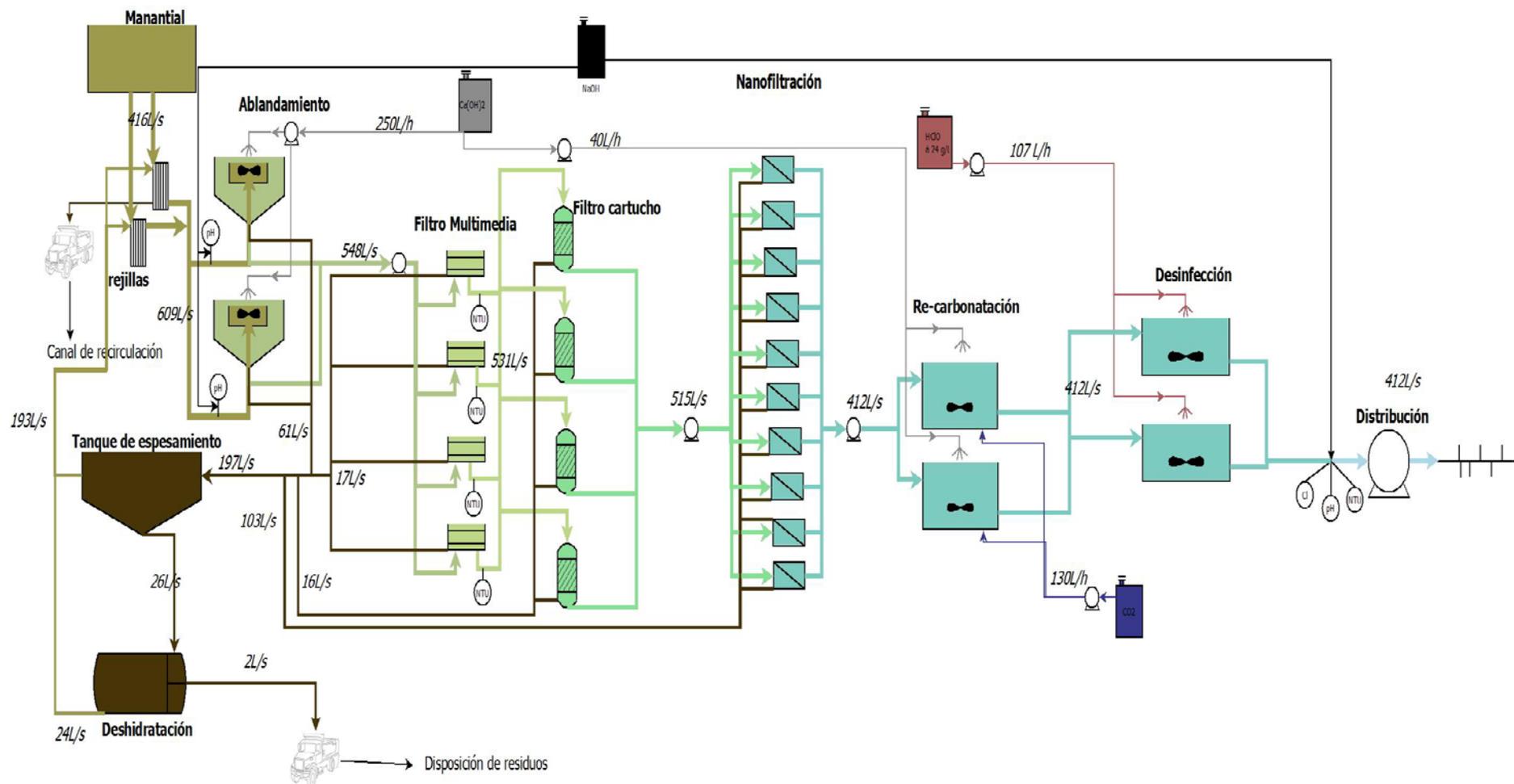
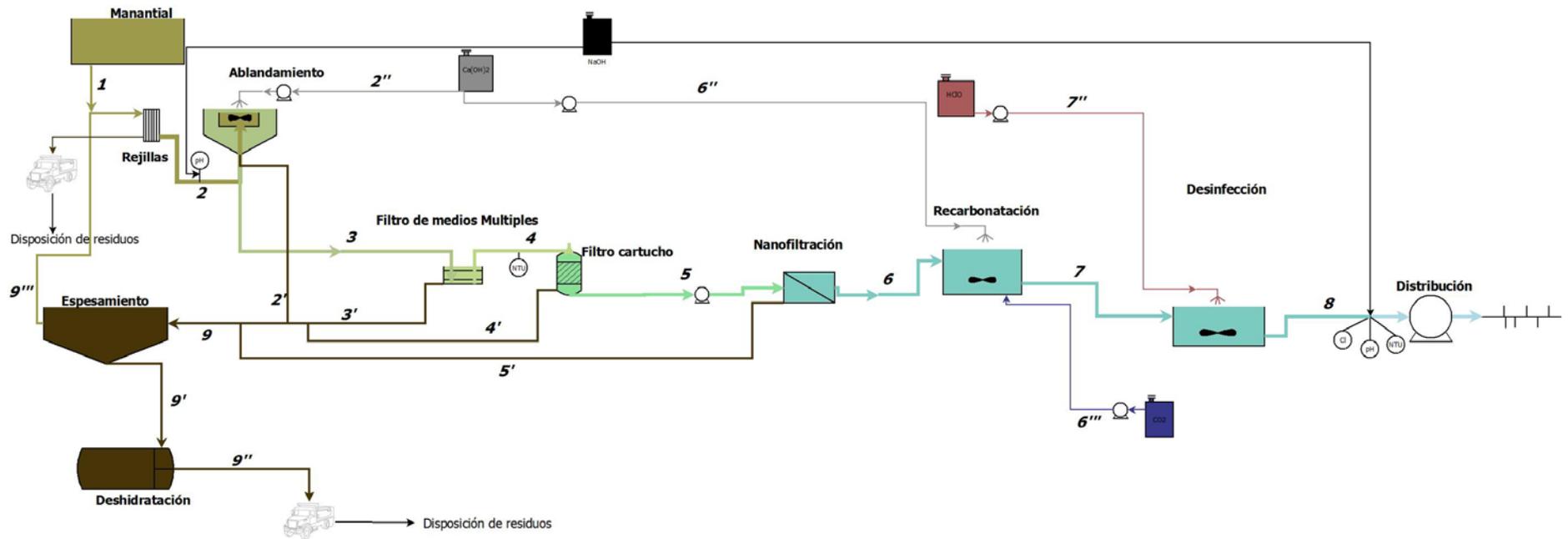


FIGURA 22. DIAGRAMA DE PROCESOS DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN

4.5.13. Balance de masa

Para determinar la confiabilidad de la planta, es importante llevar a cabo el balance de masa de los procesos que la integran. Por lo que en la Figura 23, se muestra el resumen de este balance. Donde el caudal se muestra en unidades de L/s. La Alcalinidad, la dureza total y las durezas de Calcio y Magnesio, están en unidades de ton/día de CaCO_3 . Los sólidos totales (ST) en ton/día. Además, de este balance se puede mencionar:

- La producción de agua de propuesta a la salida de la planta es de 412 L/s, la cual es alcanzada con un caudal de entrada 416 L/s y una recirculación de agua clara proveniente de los lodos del 95%.
- La alcalinidad del agua para distribución es de 1900 kg CaCO_3 /día. Lo que implica una concentración promedio de 50 mg CaCO_3 /L. No existe un valor estándar para éste parámetro, sin embargo, valores muy bajos pueden causar un agua corrosiva. Para evitar lo anterior, la Organización Mundial de Salud (WHO, 2006) recomienda un valor mínimo de alcalinidad de 40 mg CaCO_3 /L.
- La cantidad de ST en el agua para distribución es de 800 kg/d. Lo que se traduce como un concentración media de 220 mg/L; valor que representa únicamente un 22% del límite admitido por la NOM-127-SSA1-1994 (1000 mg/L). Cabe mencionar además, que estos sólidos se encontrarían como sólidos disueltos debido a los procesos que integran la planta.
- La dureza total del agua de distribución es de 1710 kg CaCO_3 /día. Lo que significa una concentración promedio de 50 mg CaCO_3 /L, que representa tan solo un 10% del valor establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (500 mg CaCO_3 /L). Lo que implica que el tratamiento para este parámetro es confiable.
- En cuanto a la dureza de Calcio, el agua de distribución contiene 520 kg CaCO_3 /día. Lo que arroja una concentración promedio en el agua de 15 mg CaCO_3 /L. En tanto que para la dureza de magnesio se tienen 1200 kg CaCO_3 /día en el agua para distribución. Lo que se traduce en una concentración de 35 mg CaCO_3 /L.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2'	3'	4'	5'	2''	6''	7''	6'''	9'	9''	9'''
Q	416	609	545	531	515	412	412	412	197	61	17	16	109	250	40	207	150	26	2	193
Alk	27.4	27.4	-	-	9.5	1.9	1.9	1.9	25.5	17.9			7.6	0	0	0	0	25.5	25.5	0
D_{TOTAL}	21.9	21.9	-	-	4.4	1.7	1.71	1.71	20.26	17.56			2.7	60	10	0	0	20.26	20.26	0
D_{Ca}	12.6	12.6	-	-	2.3	0.5	0.51	0.51	12.16	10.36			1.8	60	10	0	0	12.16	12.16	0
D_{Mg}	9.3	9.3	-	-	2.1	1.2	1.2	1.2	8.1	7.2			0.9	0	0	0	0	8.1	8.1	0
ST	57.4	57.4	-	-	37.6	8	8	8	49.4	19.8			29.6	0	0	0	0	49.4	49.4	0

FIGURA 23. BALANCE DE MASA

4.5.14. Estimación del consumo de energía

Para estimar el consumo de energía necesaria para el funcionamiento de las operaciones de la planta. Se tomaron en cuenta los motores que estarían funcionando en los procesos principales del tren de tratamiento. Siendo en el caso del proceso de ablandamiento necesarios dos motores para el mezclado rápido en la coagulación y dos motores más para el mezclado lento durante la floculación. Así mismo es necesario el empleo de una bomba que suministre la presión necesaria para la operación de nanofiltración. De igual manera, para la re-carbonatación y desinfección, son necesarios dos motores más por cada proceso. Para el cálculo de la potencia de cada motor, excepto nanofiltración, se utilizó la ecuación 4.4:

$$P = \mu * G^2 * V \quad (4.4) \text{ (Reynolds \& Richards, 1996)}$$

Donde:

P: Potencia requerida por el motor (W).

μ : Viscosidad dinámica del agua (N.s/m²).

G: Gradiente de velocidad (s⁻¹).

V: Volumen del reactor (m³).

En la Tabla 53 se resume el cálculo de la potencia requerida por los motores. En todos los casos se usó el valor de la viscosidad dinámica del agua a 10° C, debido a que de acuerdo con datos de INEGI (2009), la mínima temperatura de acuerdo a las condiciones climatológicas del Valle del Mezquital es de 9.4° C. En la Tabla 53 se muestra además, el consumo de energía de estas operaciones.

Tabla 53. Resumen del cálculo de potencia de motores

Proceso	μ (N.s/m ²)	G (s ⁻¹)	V (m ³)	P (kW)	x 2 motores
Ablandamiento Mezclado rápido	1.3097x10 ⁻³	700 para tiempo de detención de 60s (reynolds,1996)	18.3	11.744	23.488
Ablandamiento Mezclado lento	1.3097x10 ⁻³	150 para tiempo de detención de 10min (metcalf&eddy, 2003)	182.8	5.387	10.774
Re-carbonatación	1.3097x10 ⁻³	150 para tiempo de detención de 10min (metcalf&eddy, 2003)	123.8	3.648	7.296
Desinfección	1.3097x10 ⁻³	50 para tiempo de detención de 30min (metcalf&eddy, 2003)	371.4	1.216	2.432
Consumo de energía (kWh)					44

Para el cálculo del consumo energético de la operación de nanofiltración se hizo uso de del procedimiento sugerido por la *American Water Works Association* (AWWA, 1998), el cual hace uso de la fórmula siguiente, ecuación 4.5:

$$E = \frac{(H)(0.00315)}{\eta_r \eta_p \eta_m} \quad (4.5) \text{ (AWWA, 1998)}$$

Donde:

E: Consumo de energía (kW/kgal).

H: Altura de presión en pies (ft).

η_i : rendimiento de recuperación, bomba y motor.

El consumo energético, así como las consideraciones para el cálculo se muestran en la Tabla 54. Donde se puede apreciar que la demanda energética por parte del proceso de nanofiltración en conjunto es de 840 kWh, que aunque puede parecer alto, se encuentra dentro de lo aceptable para este tipo de tecnología. Tal como se puede apreciar en investigaciones como la de Ventresque y Bablon

(1997), en donde reportan una potencia instalada para el sistema de nanofiltración de la planta Méry-sur-Oise que va de los 1500 kW a los 2500 kW, dependiendo de la producción de agua requerida. En tanto que Reddy y Ghaffour (2007), reportan consumos de energía de 3.6 kWh/m³ para procesos con membranas de filtración. Por su parte, Costa y De Pinho (2006), indican que para un sistema de nanofiltración de 1.158 m³/s, es necesaria una demanda energética de 0.54 kWh/m³. Finalmente para el presente trabajo, el consumo de energía de la Planta de Potabilización para el manantial de Cerro Colorado se estima en 884 kWh.

Tabla 54. Consumo energético nanofiltración

Consideraciones de entrada	
Caudal de entrada	0.515 m ³ /s (11.75 mgd)
Presión de operación	10 bar (145 psi)
η_r	0.85
η_p	0.85
η_m	0.85
Consumo energético	
E	0.453 kWh/m ³
Consumo de energía nanofiltración	840 kWh

4.5.15. Preliminar de costos

El análisis preliminar de costos en el presente trabajo, se limita únicamente a los costos por reactivos utilizados en los procesos que integran el tren de tratamiento y los cargos por consumo eléctrico para el funcionamiento del proceso de nanofiltración. Esto debido a lo extenso que resultaría hacer un análisis más a fondo, lo cual está fuera del alcance de esta tesis.

El proceso de ablandamiento por adición de cal, se ha estimado que requiere $1.12 \text{ kg}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{m}^3$ de agua a tratar. En tanto que la neutralización requiere de $0.25 \text{ kg}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{m}^3$. Lo que da un total de cal a utilizar por la planta de potabilización de $1.37 \text{ kg}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{m}^3$ de agua que se trate. El precio de la cal para tratamiento de agua a mayo del 2009, es de \$3.90 M.N. por kg de Ca(OH)_2 , lo que implica un costo por este reactivo de \$5.34 M.N./ m^3 de agua.

En cuanto, al hipoclorito de Sodio usado en la desinfección, este tiene un valor comercial a noviembre del 2009 de \$20.00 M.N. por litro. La cantidad proyectada en el presente trabajo para el proceso de cloración es de $0.072 \text{ L}_{\text{NaOCl}}/\text{m}^3$. Lo que significa un costo de \$1.44 M.N./ m^3 de agua.

Para el Dióxido de Carbono usado durante la re-carbonatación, se calculó que son necesarios $0.0924 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{m}^3_{\text{agua}}$. El costo de este compuesto a julio del 2010 es de \$20.00 M.N. por kilogramo de CO_2 , lo que da un total de \$1.85 M.N./ m^3 de agua tratada en este proceso.

Para el caso de la nanofiltración, se ha calculado un consumo energético de $0.453 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Se ha calculado el costo de los kWh para una tarifa H-M de mediana tensión, de acuerdo a las tarifas aplicables para la región central a enero del 2010, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2010). La Tabla 55 muestra el costo de la energía para las diferentes regiones en la tarifa antes mencionada. El costo se calculó de la siguiente manera, se tomaron 4 horas de periodo en punta, 6 horas de periodo base y 14 horas de periodo intermedio. Se

multiplicaron las horas antes mencionadas por su respectivo costo para cada periodo indicado en la Tabla 55, y la suma se dividió entre 24 horas.

$$\frac{(4)(1.7809) + (6)(0.8513) + (14)(1.0184)}{24}$$

Dando como resultado un costo promedio de \$1.104 M.N. / kWh. Lo que a su vez implica un valor de \$0.500 M.N./m³ de agua tratada por este proceso.

De lo anterior, se puede concluir que el costo total por insumos en reactivos y consumo eléctrico es de \$9.13 M.N./m³ de agua tratada.

Tabla 55. Tarifa H-M media tensión

Región	Cargo por kilowatt - hora de energía de punta	Cargo por kilowatt - hora de energía intermedia	Cargo por kilowatt - hora de energía de base
Baja California	\$ 1.8580	\$ 0.9196	\$ 0.7227
Baja California Sur	\$ 1.4907	\$ 1.2763	\$ 0.9030
Central	\$ 1.7809	\$ 1.0184	\$ 0.8513
Noreste	\$ 1.6450	\$ 0.9455	\$ 0.7746
Noroeste	\$ 1.6545	\$ 0.9383	\$ 0.7862
Norte	\$ 1.6566	\$ 0.9547	\$ 0.7767
Peninsular	\$ 1.7422	\$ 0.9568	\$ 0.7882
Sur	\$ 1.7442	\$ 0.9732	\$ 0.8097

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

1. La nanofiltración demostró ser un proceso capaz de remover compuestos orgánicos medidos como COT, a cantidades menores a 1mg/L (0.6 mg/L en promedio); y contaminantes emergentes con eficiencia superior al 92% para el agua del manantial de Cerro Colorado. Con ello se produce un agua con la calidad necesaria para consumo humano.
2. La membrana óptima para éste propósito es la NF270 de DOWFILMTEC, la cual presenta una permeabilidad de $12.45 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$.
3. La caracterización físico-química del agua del manantial de Cerro Colorado demuestra la necesidad de aplicar un pretratamiento a fin de poder utilizar una filtración por membrana.
4. El proceso de ablandamiento mediante adición de cal es capaz de dar al agua la calidad necesaria para la nanofiltración, mostrando una eficiencia de remoción de dureza total del agua del 76%. Siendo la dosis de cal necesaria para tratar esta agua de 1.5 veces el valor del cálculo estequiométrico.
5. El consumo energético de los proceso de tratamiento del agua es de 884 kWh.
6. Se estima un costo por cal, hipoclorito de sodio, dióxido de carbono y energía de \$9.13 M.N./m³ de agua tratada mediante éste tipo de tecnología.

REFERENCIAS

1. Aguilar, A. (2006). *Determinación del tipo de membrana óptimo para potabilizar el agua del acuífero de Tula*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F. México.
2. Al-Amoudi A. y Lovitt R.W. (2007). Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency. *Journal of membrane science* **303** pp. 4-28, Elsevier Ltd.
3. AWWA (1990). *Water Quality and treatment: a handbook of community water supplies*. Fourth edition. American Water Works Association. Ed. McGraw-Hill, Inc.
4. AWWA (1998). American Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa. *Tratamiento del agua por procesos de membrana: Principios, procesos y aplicaciones*. Primera edición en español. Ed. McGraw-Hill.
5. APHA, AWWA, WEF (2005). *Standar Methods for examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation 20^{va} Edición. Washington D.C.
6. Bes-Piá A., Cuartas-Uribe B., Mendoza-Roca J., Alcaina-Miranda M. (2010) Study of the behaviour of different NF membranes for the reclamation of a secondary textile effluent in rinsing processes. *Journal of Hazardous Materials*, in press.
7. BGS (1998). *Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico*. Final Report. Comisión Nacional del Agua, British Geological Survey, London School of Hygiene and Tropical Medicine and University of Birmingham. November.
8. Blumenthal U., Cifuentes E., Bennett S., Quigley M., Ruiz-Palacios G. (2001). The risk of enteric infections associated with wastewater reuse: the effect of season and degree of storage of wastewater. *Transactions of the royal society of tropical medicine and hygiene* **95** pp. 131-137.
9. Bodzek M. y Dudziak M. (2006). Elimination of steroidal sex hormones by conventional wáter treatment and membrane processes. *Desalination* **198** pp. 24-32, Elsevier Ltd.
10. Boussu K., De Baerdemaeker J., Dauwe C., Weber M., Lynn K.G., Depla D., Aldea S., Vankelecom I.F.J., Vandecasteele C., Van der Bruggen B. (2007). Physico-

- Chemical Characterization of Nanofiltration Membranes. *ChemPhysChem* Vol.8 pp. 370 – 379. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
11. Boussu K., Zhang Y., Cocquyt J., Van der Meeren P., Volodin A., Van Haesendonck C., Martens J.A., Van der Bruggen B. (2006). Characterization of polymeric nanofiltration membranes for systematic analysis of membrane performance. *Journal of Membrane Science* **278** pp. 418–427. Elsevier Ltd.
 12. Braeken L., Bettens B., Boussu K. y Van der Meeren P. (2006). Transport mechanisms of dissolved organic compounds in aqueous solution during nanofiltration. *Journal of Membrane Science* **279** pp. 311–319. Elsevier Ltd.
 13. Braeken L., Van der Bruggen B. y Vandecasteele C. (2006). Flux Decline in Nanofiltration Due to Adsorption of Dissolved Organic Compounds: Model Prediction of Time Dependency. *Journal Phys. Chem. B*, 110 pp. 2957-2962. American Chemical Society.
 14. Braeken L. y Van der Bruggen B. (2009). Feasibility of nanofiltration for the removal of endocrine disrupting compounds. *Desalination* **240** pp. 127-131. Elsevier Ltd.
 15. Chae S., Yamamura H., Ikeda K., Watanabe Y. (2008). Comparison of fouling characteristics of two different poly-vinylidene fluoride microfiltration membranes in a pilot-scale drinking water treatment system using pre-coagulation/sedimentation, sand filtration, and chlorination. *Water Research* **42** pp. 2029 – 2042. Elsevier Ltd.
 16. Cheremisinoff Paul N. (1995). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. Ed. Marcel Dekker, Inc. New York.
 17. Cifuentes E., Gomez M., Blumenthal U., Tellez-Rojo M., Romieu I., Ruiz-Palacios G., Ruiz-Velazco S. (2000). Risk factors for giardia intestinalis infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in Mexico. *American Journal of tropical medicine and hygiene* **62** pp. 388-392.
 18. CNA (2010). Página consultada en internet el 21 de Abril de 2010.
<http://www.conagua.gob.mx>
 19. CONAGUA (2009). *Estadísticas Agrícolas de los distritos de Riego. Año Agrícola 2007-2008*. Comisión Nacional del Agua. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
 20. CONAGUA (2010). *Estadísticas del Agua en México, edición 2010*. Comisión Nacional del Agua. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México

21. CONAGUA (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle del mezquital, estado de Hidalgo*. Comisión Nacional del Agua. México.
22. CONAGUA (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Comisión Nacional del Agua. México.
23. Cornelis G., Boussu K., Van der Bruggen B., Devreese I., y Vandecasteele C. (2005). Nanofiltration of Nonionic Surfactants: Effect of the Molecular Weight Cutoff and Contact Angle on Flux Behavior. *Ind. Eng. Chem. Res.* **44**, pp. 7652-7658. American Chemical Society.
24. Costa A.R. y De Pinho M.N. (2006). Performance and cost estimation of nanofiltration for surface water treatment in drinking water production. *Desalination* **196** pp. 55–65. Elsevier Ltd.
25. Dey Dipa, Herzog Amanda, Srinivasan Vidya (2007). Chemical precipitation: water softening. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University.
<http://www.egr.msu.edu/~hashsham/courses/ene806/docs/Water%20Softening%2001.pdf>
26. Downs T.J., Cifuentes-Garcia E., Suffet I.M. (1999). Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region. *Environmental Health Perspectives Vol. 107* No. 7 pp. 553-561. Brogan & Partners.
27. Droste Ronald L. (1997). *Theory and practice of water and wastewater treatment*. Ed. John Wiley & Sons, Inc.
28. EPA (2007). Simultaneous compliance guidance manual for the long term 2 and Stage 2 DBP rules. United States Environmental Protection Agency. March.
<http://www.epa.gov/safewater/disinfection/stage2/compliance.html>
29. Esplugas S., Bila D.M., Krause L.G., Dezotti M. (2007). Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. *Journal of Hazardous Materials* **149** pp. 631–642. Elsevier Ltd.
30. Garcia-Aleman J., Dickson J., Mika A. (2004). Experimental analysis, modeling, and theoretical design of McMaster pore-filled nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science* **240** pp. 237–255. Elsevier Ltd.
31. Gibson R., Becerril-Bravo E., Silva-Castro V., Jiménez B. (2007). Determination of acidic pharmaceuticals and potential endocrine disrupting compounds in

- wastewaters and spring waters by selective elution and analysis by gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* **1169** pp. 31–39. Elsevier Ltd.
32. Hendricks David (2006). *Water treatment unit processes: physical and chemical*. Ed. CRC Press, Taylor and Francis group.
33. Hammer Mark J. and Hammer Mark J., Jr. (2008). *Water and wastewater technology*. Sixth edition. Ed. Pearson Prentice Hall.
34. Hilal N., Al-Zoubi H., Darwish N.A., Mohammad A.W., Abu Arabi M. (2004). A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. *Desalination* **170** pp. 281-308, Elsevier Ltd.
35. INEGI (2000). XII Censo General de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
<http://www.inegi.gog.mx>
36. INEGI (2009). Página consultada en internet el 11 de Febrero de 2009.
<http://www.inegi.gog.mx/Tipos de Clima - Hidalgo>
37. Jiménez Cisneros Blanca, Quezada Jiménez Laura, Aguilar Ortega Andrés (2007). *Selección de membranas para remover contaminantes emergentes en una fuente de suministro de agua*. Proyecto 6347, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, Instituto de Ingeniería-UNAM, Primer informe.
38. Jiménez Cisneros Blanca, Quezada Jiménez Laura, Chávez Mejía Alma, Becerril Bravo Elías, Aguilar Ortega Andrés, Arcos Arévalo Arnold, Neira Ruíz Fabián, Lemus Flores Verónica, Martínez Chavarría Jorge (2008). *Selección de membranas para remover contaminantes emergentes en una fuente de suministro de agua*. Proyecto 6347, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, Instituto de Ingeniería-UNAM, Segundo informe.
39. Jiménez B., Siebe C., Cifuentes E. (2004). El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula. pp 33-55, en *El agua en México vista desde la Academia*. Jiménez B. y Marín L. Editores, Academia Mexicana de Ciencias, México.
40. Kim J., DiGiano F.A., Reardon R.D. (2008). Autopsy of high-pressure membranes to compare effectiveness of MF and UF pretreatment in water reclamation. *Water Research* **42** pp. 697-706. Elsevier Ltd.

41. Kim S.D., Cho J., Kim I.S., Vanderford B.J., Snyder S.A. (2007). Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters. *Water Research* **41** pp. 1013 – 1021. Elsevier Ltd.
42. Kimura K., Amy G., Drewes J.E., Heberer T., Kim T., Watanabe Y. (2003). Rejection of organic micropollutants (disinfection by-products, endocrine disrupting compounds, and pharmaceutically active compounds) by NF/RO membranes. *Journal of Membrane Science* **227** pp. 113–121. Elsevier Ltd.
43. Kimura K., Hara H., Watanabe Y. (2005). Removal of pharmaceutical compounds by submerged membrane bioreactors (MBRs). *Desalination* **178** pp. 135-140. Elsevier Ltd.
44. Kimura K., Toshima S., Amy G., Watanabe Y. (2004). Rejection of neutral endocrine disrupting compounds (EDCs) and pharmaceutical active compounds (PhACs) by RO membranes. *Journal of Membrane Science* **245** pp. 71–78. Elsevier Ltd.
45. Kirchmer Cliff J., CEPIS (1973). Teoría y diseño de sistemas de tratamiento de agua potable. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil. Sección Ingeniería Sanitaria y Ambiental. p. 401-431. Santiago; Universidad de Chile; 1973. (Publicación C, 23).
<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan2/03490/03490-02.pdf>
46. Kiso Y., Sugiura Y., Kitao T., Nishimura K. (2001). Effects of hydrophobicity and molecular size on rejection of aromatic pesticides with nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science* **192** pp. 1-10. Elsevier Ltd.
47. Lin Y.-L., Chiang P.-C., Chang E.-E. (2007). Removal of small trihalomethane precursors from aqueous solution by nanofiltration. *Journal of Hazardous Materials* **146** pp. 20-29. Elsevier Ltd.
48. Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. Fourth edition. Ed. McGraw-Hill.
49. Meylan S., Hammes F., Traber J., Salhi E., Von Gunten U., Pronk W. (2007). Permeability of low molecular weight organics through nanofiltration membranes. *Water Research* **41** pp. 3968 – 3976. Elsevier Ltd.
50. Mondal S. y Wickramasinghe S.R. (2008). Produced water treatment by nanofiltration and reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* **322** pp. 162–170. Elsevier Ltd.

51. Nghiem L.D. y Hawkes S. (2007). Effects of membrane fouling on the nanofiltration of pharmaceutically active compounds (PhACs): Mechanisms and role of membrane. *Separation and Purification Technology* **57** pp. 176-184. Elsevier Ltd.
52. 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, publicado en el diario oficial de la federación el 20 de Junio del 2000. México D.F., México.
53. Norberg D., Hong S., Taylor J., Zhao Y. (2007). Surface characterization and performance evaluation of commercial fouling resistant low-pressure RO membranes. *Desalination* **202** pp. 45–52. Elsevier Ltd.
54. Nyström M., Butylina S. y Platt S. (2004). NF retention and critical flux of small hydrophilic/hydrophobic molecules. Lappeenranta University of Technology. *Membrane Technology* October pp. 5-8.
55. Ortega-Larrocea M.P., Siebe C., Bécard G., Méndez I., Webster R. (2001). Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of Mexico. *Applied Soil Ecology* **16** pp. 149–157. Elsevier Ltd.
56. Park N., Kwon B., Kim I.S., Cho J. (2005). Biofouling potential of various NF membranes with respect to bacteria and their soluble microbial products (SMP): Characterizations, flux decline, and transport parameters. *Journal of Membrane Science* **258** pp. 43-54. Elsevier Ltd.
57. Park N., Kwon B., Kim S.-D., Cho J. (2006). Characterizations of the colloidal and microbial organic matters with respect to membrane foulants. *Journal of Membrane Science* **275** pp. 29–36. Elsevier Ltd.
58. Park N., Kwon B., Sun M., Ahn H., Kim C., Kwoak C., Lee D., Chae S., Hyung H., Cho J.(2005). Application of various membranes to remove NOM typically occurring in Korea with respect to DBP, AOC and transport parameters. *Desalination* **178** pp. 161-169. Elsevier Ltd.
59. Qasim Syed R. (1999). *Wastewater treatment plants*. Second edition. Ed. CRC Press, Taylor and Francis group.
60. Reddy K.V. y Ghaffour N. (2007). Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies. *Desalination* **205** pp. 340–353. Elsevier Ltd.

61. Reynolds T. y Richards P. (1996). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. PWS Publishing Company. Boston, USA.
62. Romero A.H. (1994). Estudio de Caso (Valle del Mezquital). Taller Regional para las Américas sobre Aspectos de Salud, Agricultura y Ambiente, Vinculados al Uso de Aguas Residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Jiutepec, México.
63. Sawyer Clair N., McCarty Perry L., Parkin Gene F. (1994). *Chemistry for environmental engineering*. Fourth edition. Ed. MacGraw-Hill, Inc.
64. Schäfer A.I., Fane A.G., Waite T.D. (2005). *Nanofiltration-principles and applications*. First edition. Ed. Elsevier Ltd.
65. Seyrig Grégoire y Shan Wenqian (2007). Chemical precipitation: water softening. College of Engineering, Michigan State University.
<http://www.egr.msu.edu/~hashsham/courses/ene806/docs/Water%20Softening%2002.pdf>
66. Siemens J., Huschek G., Siebe C., Kaupenjohann M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City–Mezquital Valley. *Water Research* **42** pp. 2124 – 2134. Elsevier Ltd.
67. Silva V. (2008). *Evaluación de contaminantes emergentes en fuentes de abastecimiento del valle de Tula*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F. México.
68. Sirivedhin T. y Gray K.A. (2005). Comparison of the disinfection by-product formation potentials between a wastewater effluent and surface waters. *Water Research* **39** pp. 1025–1036. Elsevier Ltd.
69. Snyder S.A., Adham S., Redding A.M., Cannon F.S., DeCarolis J., Oppenheimer J., Wert E.C., Yoon Y. (2007). Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination* **202** pp. 156–181. Elsevier Ltd.
70. 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. México D.F. México.

71. Torres Romero José Luis (2001). *Potabilización del agua subterránea del Valle del Mezquital mediante membranas para el suministro a la ciudad de México*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F. México.
72. Trujillo Machado Judith (2006). *Evaluación del ácido peracético, radiación ultravioleta y cloro para la desinfección de una fuente no convencional de agua (Valle de Tula)*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F. México.
73. Van der Bruggen B., Braeken L., Vandecasteele C. (2002). Evaluation of parameters describing flux decline in nanofiltration of aqueous solutions containing organic compounds. *Desalination* **147** pp. 281-288. Elsevier Ltd.
74. Van der Bruggen B., Schaep J., Wilms D., Vandecasteele C. (1999). Influence of molecular size, polarity and charge on the retention of organic molecules by nanofiltration. *Journal of Membrane Science* **156** pp. 29-41. Elsevier Ltd.
75. Van der Bruggen B., Vandecasteele C., Van Gestel T., Doyen W., Leysen R. (2003). A Review of Pressure-Driven Membrane Processes in Wastewater Treatment and Drinking Water Production. *Environmental progress* Vol. **22**, No. 1.
76. Ventresque C., Bablon G. (1997). The integrated nanofiltration system of the M6ry-sur-Oise surface water treatment plant (37 mgd). *Desalination* **113** pp. 263-266. Elsevier Ltd.
77. WHO (2006). *Guidelines for Drinking-Water Quality – First addendum to third Edition - Volume 1 – Recommendations*. World Health Organization. WHO Library Cataloguing in Publication Data. Geneva.
78. Xu P., Drewes J.E., Kim T.-U., Bellona C., Amy G. (2006). Effect of membrane fouling on transport of organic contaminants in NF/RO membrane applications. *Journal of Membrane Science* **279** pp. 165-175. Elsevier Ltd.
79. Yangali-Quintanilla V., Sadmani A., McConville M., Kennedy M., Amy G. (2009). Rejection of pharmaceutically active compounds and endocrine disrupting compounds by clean and fouled nanofiltration membranes. *Water Research* **43**, pp. 2349-2362. Elsevier Ltd.
80. Yoon Y., Westerhoff P., Snyder S.A., Wert E.C., Yoon J. (2007). Removal of endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals by nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Desalination* **202** pp. 16–23. Elsevier Ltd.
81. Yu Z., Peldszus S., Huck P.M. (2008). Adsorption characteristics of selected pharmaceuticals and an endocrine disrupting compound—Naproxen,

carbamazepine and nonylphenol—on activated carbon. *Water Research* **42** pp. 2873 – 2882. Elsevier Ltd.

82. Zhang Y., Causserand C., Aimar P., Cravedic J.P. (2006). Removal of bisphenol A by a nanofiltration membrane in view of drinking water production. *Water Research* **40** pp. 3793 – 3799. Elsevier Ltd.

ANEXO A

Resultados caracterización agua manantial Cerro Colorado

A.1. Resultados de mediciones de SDT

Muestreo	Repetición	Capsula Después	Capsula Antes	SDT (mg/L)	Promedio Muestreo	Desviación Estándar
18-nov-08	1	53.0797	53.0272	1050	1083	36
	2	45.9702	45.9141	1122		
	3	51.5905	51.5366	1078		
24-nov-08	1	45.9768	45.9235	1066	1063	15
	2	52.5562	52.5039	1046		
	3	53.0894	53.0356	1076		
01-dic-08	1	53.0924	53.037	1108	1087	23
	2	45.981	45.9264	1092		
	3	52.5603	52.5072	1062		
08-dic-08	1	53.11	53.0529	1142	1141	1
	2	52.5812	52.5242	1140		
	3	45.9985	45.9414	1142		
15-dic-08	1	53.1106	53.0566	1080	1081	8
	2	46.0036	45.9499	1074		
	3	52.5861	52.5316	1090		
				Promedio total	1091	30

A.2. Resultados de mediciones de COT

Muestreo	Repetición	COT mg/L	Promedio Muestreo	Desviación Estándar
18-nov-08	1	3.9	2.93	0.95
	2	2		
	3	2.9		
24-nov-08	1	2.8	2.47	0.67
	2	2.9		
	3	1.7		
01-dic-08	1	3.3	2.80	0.70
	2	2		
	3	3.1		
08-dic-08	1	2.8	2.87	0.12
	2	3		
	3	2.8		
15-dic-08	1	2.2	2.40	0.17
	2	2.5		
	3	2.5		
		Promedio total	2.69	0.24

A.3. Resultados de mediciones de Nitrógeno amoniacal, Nitritos y Nitratos

Muestreo	Repetición	Nitrógeno de Nitritos (mg/L)	Nitrógeno de Nitratos (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)	Promedio muestreo Nitrógeno de nitritos (mg/L)	Promedio muestreo Nitrógeno de nitratos (mg/L)	Promedio muestreo Nitrógeno amoniacal (mg/L)
		N-NO2	N-NO3	N-NH3	N-NO2	N-NO3	N-NH3
18-nov-08	1	0.007	0.15	0.11	0.012	0.130	0.097
	2	0.013	0.14	0.09			
	3	0.015	0.1	0.09			
24-nov-08	1	0.23	0.11	0.08	0.146	0.107	0.080
	2	0.099	0.1	0.1			
	3	0.108	0.11	0.06			
01-dic-08	1	0.006	0.1	0.07	0.007	0.113	0.057
	2	0.009	0.12	0.05			
	3	0.007	0.12	0.05			
08-dic-08	1	0.006	0.09	0.06	0.008	0.093	0.070
	2	0.011	0.1	0.07			
	3	0.006	0.09	0.08			
15-dic-08	1	0.006	0.13	0.01	0.005	0.130	0.027
	2	0.004	0.13	0.03			
	3	0.004	0.13	0.04			
				Total	0.035	0.115	0.066

A.4. Resultados de mediciones de Alcalinidad

Muestreo	Repetición	Vol. H ₂ SO ₄ 0.02N (Fenolftaleína)	Vol. H ₂ SO ₄ 0.02N (anaranjado de metilo)	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Promedio Muestreo	Desviación Estándar
18-nov-08	blanco	0	0.15		461	31
	1	1.05	21.9	456		
	2	0.75	24.1	494		
	3	0.9	20.9	433		
24-nov-08	blanco	0.4	0.4		629	23
	1	4.2	29.1	650		
	2	3.2	29.3	634		
	3	2.7	28.3	604		
01-dic-08	blanco	0.4	0.1		475	22
	1	1.5	23.6	492		
	2	1.5	23.1	482		
	3	1.1	21.9	450		
08-dic-08	blanco	0.5	0.2		546	2
	1	2.5	25.6	548		
	2	2.3	25.6	544		
	3	2.5	25.5	546		
15-dic-08	blanco	1.6	0.7		495	6
	1	2	25.2	498		
	2	3.5	23.7	498		
	3	2	24.7	488		
				total	521	69

A.5. Resultados de mediciones de Cloruros

Muestreo	Repetición	mL de AgNO ₃ gastados	Cloruros mg/L	Promedio Muestreo	Desviación Estándar
18-nov-08	Blanco	0		166	3
	1	16.6	165		
	2	16.5	164		
	3	17	169		
24-nov-08	Blanco	0.9		150	33
	1	12.2	112		
	2	17.6	166		
	3	18.3	173		
01-dic-08	Blanco	1.2		164	8
	1	17.1	158		
	2	18.6	173		
	3	17.6	163		
08-dic-08	Blanco	0.9		162	4
	1	17	160		
	2	17.1	161		
	3	17.7	167		
15-dic-08	Blanco	0.9		161	2
	1	17	160		
	2	17.1	161		
	3	17.3	163		
			total	161	6

A.6. Resultados de las mediciones para dureza Total, de Calcio y de Magnesio como mg/L de CaCO₃

Muestreo	Repetición	Dureza Total	Dureza de Calcio	Dureza total	Dureza de Calcio	Dureza de Magnesio	Dureza total mg/L de CaCO ₃		Dureza de Calcio mg/L de CaCO ₃		Dureza de Magnesio mg/L de CaCO ₃	
		EDTA 0.1M gastado (mL)		mg/L de CaCO ₃	mg/L de CaCO ₃	mg/L de CaCO ₃	promedio	Desviación Estándar	promedio	Desviación Estándar	promedio	Desviación Estándar
18-nov-08	1	1.90	1.35	380	270	110	387	6	247	21	140	26
	2	1.95	1.20	390	240	150						
	3	1.95	1.15	390	230	160						
24-nov-08	1	2.20	1.80	440	360	80	443	6	337	21	107	25
	2	2.25	1.60	450	320	130						
	3	2.20	1.65	440	330	110						
01-dic-08	1	2.20	1.10	440	220	220	433	12	230	10	203	21
	2	2.20	1.15	440	230	210						
	3	2.10	1.20	420	240	180						
08-dic-08	1	2.05	1.15	410	230	180	413	6	227	6	187	12
	2	2.10	1.10	420	220	200						
	3	2.05	1.15	410	230	180						
15-dic-08	1	1.95	0.85	390	170	220	400	36	153	21	247	31
	2	1.85	0.65	370	130	240						
	3	2.20	0.80	440	160	280						
						Total	415	23	239	66	177	55

A.7. Resultados de las mediciones para dureza Total, de Calcio y de Magnesio como mg/L

Muestreo	Repetición	Dureza Total	Dureza de Calcio	Concentración de Calcio	Concentración de Magnesio	Concentración de Calcio mg Ca/L		Concentración de Magnesio mg Mg/L	
		EDTA 0.1M gastado (mL)		mg Ca/L	mg Mg/L	promedio	desv est	promedio	desv est
18-nov-08	1	1.90	1.35	108	27	99	8	34	6
	2	1.95	1.20	96	36				
	3	1.95	1.15	92	39				
24-nov-08	1	2.20	1.80	144	19	135	8	26	6
	2	2.25	1.60	128	32				
	3	2.20	1.65	132	27				
01-dic-08	1	2.20	1.10	88	53	92	4	49	5
	2	2.20	1.15	92	51				
	3	2.10	1.20	96	44				
08-dic-08	1	2.05	1.15	92	44	91	2	45	3
	2	2.10	1.10	88	49				
	3	2.05	1.15	92	44				
15-dic-08	1	1.95	0.85	68	53	61	8	60	7
	2	1.85	0.65	52	58				
	3	2.20	0.80	64	68				
					Total	96	26	43	13

A.8. Resultados de mediciones de Sulfatos

Muestreo	Repetición	Capsula Después	Capsula Antes	SDT(mg/L)	Promedio Muestreo	Desviación Estándar
18-nov-08	Blanco	51.5337	51.5321	0.0016	94	79
	1	47.5065	47.5036	5.3508		
	2	50.7088	50.6771	123.8916		
	3	43.3302	43.2912	153.9384		
24-nov-08	Blanco	51.5451	51.5441	0.001	137	17
	1	47.5366	47.5036	131.712		
	2	50.7079	50.6771	122.6568		
	3	43.3302	43.2912	156.408		
01-dic-08	Blanco	47.4897	47.4872	0.0025	196	14
	1	50.7207	50.6667	211.974		
	2	51.5854	51.5363	191.8056		
	3	43.3321	43.2846	185.22		
08-dic-08	Blanco	47.4886	47.4857	0.0029	171	50
	1	50.7055	50.6661	150.234		
	2	51.5913	51.533	228.0264		
	3	43.3166	43.2808	135.4164		
15-dic-08	Blanco	47.4869	47.4844	0.0025	144	2
	1	51.5727	51.5348	145.7064		
	2	50.7057	50.6686	142.4136		
	3	43.3253	43.2879	143.6484		
				total	149	38

A.9. Resultados de mediciones de absorbancia UV 254nm y porcentaje de Transmitancia

Muestreo	Repetición	Absorbancia UV 254nm	Transmitancia %T	Absorbancia UV 254nm		Transmitancia	
				Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
18-nov-08	1	0.044	90.6	0.04	0.0025	91	0.31
	2	0.041	91				
	3	0.039	91.2				
24-nov-08	1	0.068	85.3	0.07	0.0012	85	0.12
	2	0.068	85.5				
	3	0.066	85.5				
01-dic-08	1	0.124	75.2	0.13	0.0017	75	0.26
	2	0.124	74.8				
	3	0.127	74.7				
08-dic-08	1	0.058	87.6	0.06	0.0012	87	0.36
	2	0.06	86.9				
	3	0.06	87.1				
15-dic-08	1	0.062	86.7	0.06	0.0012	87	0.06
	2	0.062	86.7				
	3	0.06	86.8				
			Promedio Total	0.07	0.03	85	6

A.10. Cálculo de los índices LSI Y RI

Parámetro	UNIDAD	18/11/2008	24/11/2008	01/12/2008	08/12/2008	15/12/2008	PROMEDIO
<i>Sólidos Disueltos Totales (SDT)</i>	mg/L	1083.33	1062.67	1087.33	1141.33	1081.33	1091.20
<i>Alcalinidad</i>	mg CaCO ₃ /L	461.00	629.33	474.67	546.00	494.67	521.13
<i>pH</i>	pH unit	7.04	7.01	6.98	7.10	6.99	7.02
<i>Calcio</i>	mg/L	98.90	134.90	92.20	90.80	61.50	95.66
<i>Carbonatos</i>	mg CaCO ₃ /L	36.00	118.67	38.67	77.33	36.00	61.33
<i>Bicarbonatos</i>	mg CaCO ₃ /L	425.00	510.67	436.00	468.67	458.67	459.80

[Ca] en mol/L

0.0024725	0.0033725	0.0023050	0.0022700	0.0015375	0.0023915	
[HCO ₃] pero se va a tomar [Alkt] en mol/L	0.0092200	0.0125866	0.0094934	0.0109200	0.0098934	0.0104227

1. Determinación de la fuerza iónica usando $I=2.5 \times 10^{-5} \times TDS$

<i>I</i>	0.0270832	0.0265667	0.0271832	0.0285332	0.0270332	0.02727995
----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------

2. Determinar los coeficientes de actividad para calcio y bicarbonato

a) para Calcio

$$\log \gamma_{Ca^{2+}} = - (0.5(Zi)^2 \sqrt{I}) / (1 + \sqrt{I})$$

$\gamma_{Ca^{2+}}$	0.5216416	0.5244458	0.5211043	0.5140249	0.5219109	0.520586594
--------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------------

a) para Bicarbonato

$$\log \gamma_{HCO_3^-} = - (0.5(Zi)^2 \sqrt{I}) / (1 + \sqrt{I})$$

$\gamma_{HCO_3^-}$	0.8498515	0.8509913	0.8496326	0.8467321	0.8499611	0.849421492
--------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------------

3. determinar pHs

$$pHs = -\log[(K_{a2} \cdot \gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-]) / K_{sp}]$$

<i>pHs</i>	3.2050551	2.8224757	3.1137133	3.0669832	3.2708057	3.057695917
------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------------

4. determinar $LSI = pH - pH_s$

5. determinar $RI = 2pH_s - pH$

	18/11/2008	24/11/2008	01/12/2008	08/12/2008	15/12/2008	PROMEDIO
<i>LSI</i>	3.83	4.19	3.87	4.03	3.72	3.97
<i>RI</i>	-0.63	-1.37	-0.75	-0.97	-0.45	-0.91

ANEXO B

Descripción de los cálculos del ablandamiento

B.1. Estimación de la concentración de ácido carbónico

Determinación de la concentración de bicarbonato en moles por litro (se asume que la alcalinidad se encuentra en forma de bicarbonato debido a que el pH es 7,126).

$$[HCO_3^-] = 520 \left[\frac{61}{50} \right] \left[\frac{1}{1000} \right] \left[\frac{1}{61} \right] = 1,040 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

Cálculo de las constantes de disociación a 19,3 °C.

$$K_1 = 10^{14,8435 - \left(\frac{3404,71}{292,45} \right) - (0,032786 * 292,45)} = 4,10403 \times 10^{-7}$$

$$K_2 = 10^{6,498 - \left(\frac{2909,39}{292,45} \right) - (0,02379 * 292,45)} = 3,91094 \times 10^{-11}$$

Cálculo de α_1

$$\alpha_1 = \frac{1}{(1 \times 10^{-7,3} / 4,10 \times 10^{-7}) + 1 + (3,91 \times 10^{-11} / 1 \times 10^{-7,3})} = 0,89$$

Determinación de la concentración total de especies carbónicas.

$$C_T = \frac{1,040 \times 10^{-2}}{0,89} = 1,168 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

Cálculo de la concentración de ácido carbónico.

$$[H_2CO_3^*] = C_T - [HCO_3^-] = 1,168 \times 10^{-2} - 1,040 \times 10^{-2} = 1,278 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

O

$$[H_2CO_3^*] = 127,8 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$$

El diagrama de barras del agua sin ablandamiento se muestra en la Figura B.1.1.

128	0	258	392
H ₂ CO ₃	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Otros cationes
	HCO ₃ ⁻		
128	0		520

Figura B.1.1. Diagrama de distribución de dureza del agua sin ablandamiento

B.2. Estimación de la dosis de cal requerida el proceso de exceso de cal

Cantidad de cal requerida = concentración de ácido carbónico + alcalinidad total +
dureza debida al Magnesio + 60 mg/L de exceso de
cal

Cantidad de cal requerida = 128 + 520 + 134 + 60 = 842 mg CaCO₃/L

O bien

Cantidad de cal requerida = 996 (37/50) = 623 mg/L de Ca(OH)₂

ANEXO C

Resultados del proceso de ablandamiento

C.1. Dureza Total

En la Tabla C.1.1 se presentan los resultados obtenidos de la medición de la dureza total para las diferentes dosis de cal en la prueba del proceso de ablandamiento, mismos que se grafican en la Figura C.1.1.

Tabla C.1.1. Resultados obtenidos para el parámetro dureza total

Dosis de Cal		Dureza total						Promedio mg CaCO ₃ /L
		repetición			repetición			
		Vol. EDTA mL			mg CaCO ₃ /L			
%	mg Ca(OH) ₂ /L	1	2	3	1	2	3	
0%	0	19,6			392			392
30%	186.9	16,7	15,1	15,1	334	302	302	313 ±18
60%	373.8	12,4	9,2	10,1	248	184	202	211 ±33
90%	560.7	9,1	8,8	8,9	182	176	178	179 ±3
100%	623	9,3	8,1	9,5	186	162	190	179 ±15
120%	747.6	8,5	5,5	8,3	170	110	166	149 ±34
150%	934.5	4,2	2,8	5,4	84	56	108	83 ±26
180%	1121.4	8,9	3	12,1	178	60	242	160 ±92

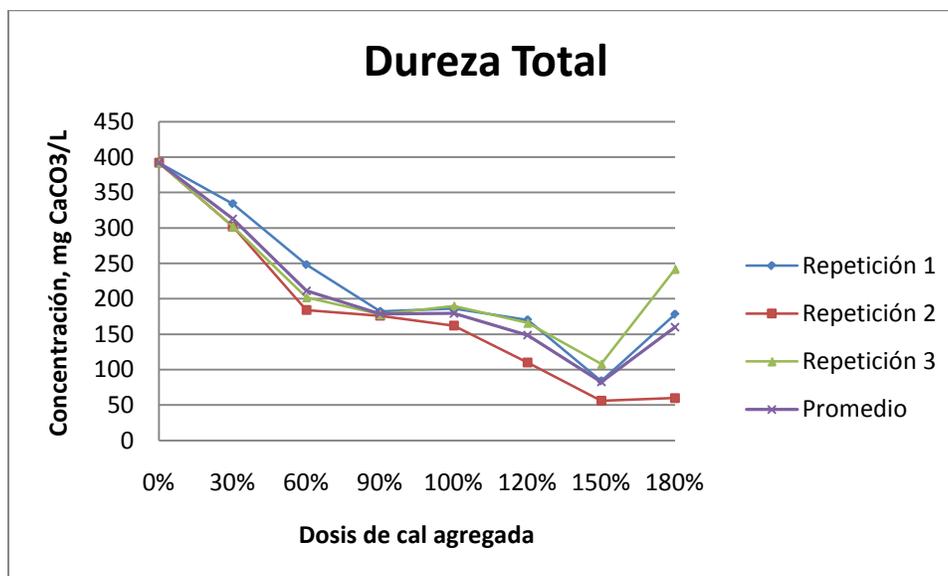


Figura C.1.1. Resultados obtenidos para el parámetro dureza total

A continuación se presenta en la Tabla C.1.2 el Análisis de varianza realizado para el experimento, en donde se hacen las consideraciones siguientes:

Factor: Dosis de cal.

Niveles: 30%, 60%, 90%, 100%, 120%, 150% y 180%

Variable de respuesta: Dureza total (mg CaCO₃ /L)

$\alpha=0,01$

Hipótesis:

$$H_o: \tau_{30} = \tau_{60} = \tau_{90} = \tau_{100} = \tau_{120} = \tau_{150} = \tau_{180}$$

$$H_a: \tau_i \neq \tau_j \text{ para algún } i \neq j$$

Tabla C.1.2. Análisis de Varianza

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Prob > F
Dosis de cal	6	88243,81	14707,3	8,5821	0,0005
Error	14	23992,00	1713,7		
Total	20	112235,81			

Del análisis de varianza se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula, lo que quiere decir que, al menos hay un par de tratamientos cuyos efectos son diferentes.
2. La dosis de cal aplicada influye en la dureza total presente en el agua.
3. Es necesario realizar comparaciones entre los tratamientos para determinar las diferencias entre ellos.

Las comparaciones se llevaron a cabo por el método Método de Tukey-Kramer HSD. Los resultados obtenidos de este método se presentan en la Figura C.1.2, así como en la Tabla C.1.3.

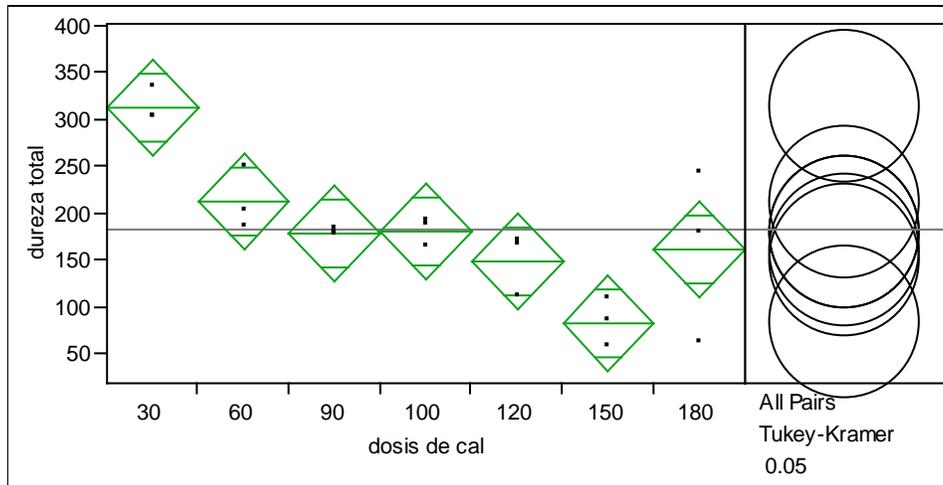


Figura C.1.2. Análisis de dureza total por dosis de cal

Tabla C.1.3. Análisis de Tukey-Kramer HSD para comparaciones

Dosis	Media
30 A	312,66
60 A B	211,33
100 B C	179,33
90 B C	178,66
180 B C	160,00
120 B C	148,66
150 C	82,66

Del análisis de Tukey-Kramer, se concluye que la mejor dosis de cal para reducir la dureza total es la de 150%.

C.2. Dureza debida al Calcio

En la Tabla C.2.1 se presentan los resultados obtenidos de la medición para dureza debida al Calcio para las diferentes dosis de cal, mismos que se grafican en la Figura C.2.1. Del análisis de estos datos se concluye que la dosis óptima para la reducción de la dureza debida al Calcio es del 90%.

Tabla C.2.1. Resultados obtenidos para la dureza debida al Calcio

Dosis de Cal		Dureza de Calcio						Promedio mg CaCO ₃ /L
		repetición			repetición			
		Vol. EDTA mL			mg CaCO ₃ /L			
%	mg Ca(OH) ₂ /L	1	2	3	1	2	3	
0%	0	12.9			258			258
30%	186.9	5.9	6.5	2.3	118	130	46	98 ±45
60%	373.8	4.5	3.2	2.8	90	64	56	70 ±18
90%	560.7	2.9	2.9	2.4	58	58	48	55 ±6
100%	623	3.1	2.5	2.7	62	50	54	55 ±6
120%	747.6	2.6	2.2	2.5	52	44	50	49 ±4
150%	934.5	2.9	2.2	3.3	58	44	66	56 ±11
180%	1121.4	2.5	2.5	8.6	50	50	172	91 ±70

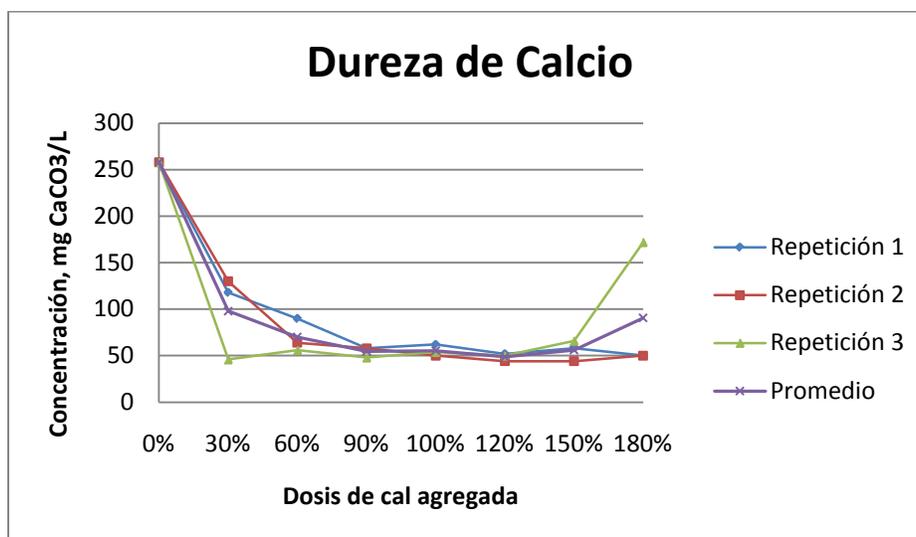


Figura C.2.1. Resultados obtenidos para la dureza debida al Calcio

C.3. Dureza debida al Magnesio

En la Tabla C.3.1 se presentan los resultados obtenidos de la medición para dureza debida al Magnesio para las diferentes dosis de cal, mismos que se grafican en la Figura C.3.1. De estos datos se concluye que la dosis óptima para la reducción de la dureza debida al Magnesio es una dosis de 150%.

Tabla C.3.1. Resultados obtenidos para la dureza debida al Magnesio

Dosis de Cal		Dureza de Magnesio			
		repetición			Promedio
		mg CaCO ₃ /L			mg CaCO ₃ /L
%	mg Ca(OH) ₂ /L	1	2	3	
0%	0	134	134	134	134
30%	186.9	216	172	256	215
60%	373.8	158	120	146	141
90%	560.7	124	118	130	124
100%	623	124	112	136	124
120%	747.6	118	66	116	100
150%	934.5	26	12	42	27
180%	1121.4	128	10	70	69

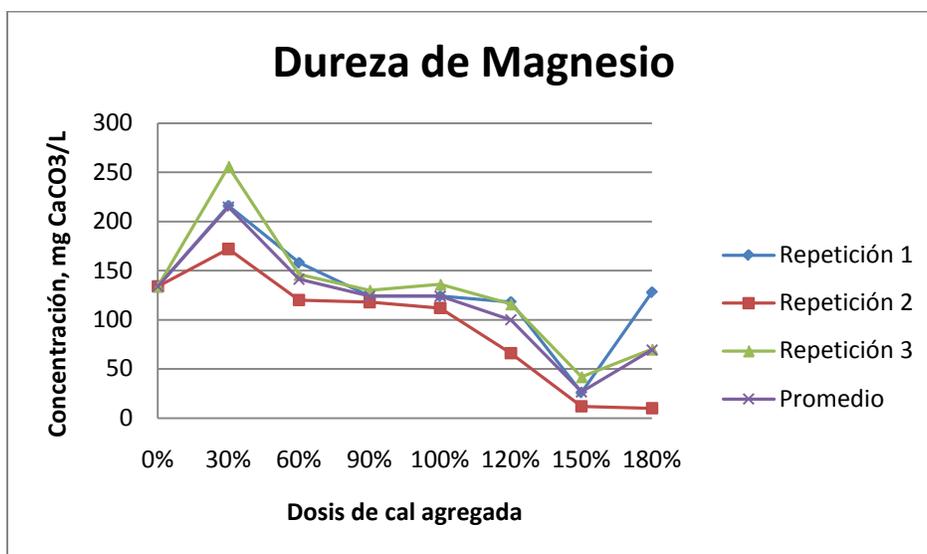


Figura C.3.1. Resultados obtenidos para la dureza debida al Magnesio

C.4. Alcalinidad

En la Tabla C.4.1 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas para determinar la alcalinidad en las diferentes dosis de cal, estos resultados también se grafican en la Figura C.4.1.

Tabla C.4.1. Resultados obtenidos de las determinaciones de alcalinidad

Dosis de Cal		Alcalinidad									
		repetición									Promedio
		Vol. Fenofaleína mL			Vol. Anaranjado de metilo mL			mg CaCO ₃ /L			mg CaCO ₃ /L
%	mg Ca(OH) ₂ /L	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0%	0							520	520	520	520
30%	186.9	3,3	1,6	1,4	19,2	16,2	17,9	450	356	386	397 ±48
60%	373.8	1,9	19,2	2,9	13,5	10	10,9	308	584	276	389 ±169
90%	560.7	5,1	5,4	6,2	8,4	7,4	6,6	270	256	256	261 ±8
100%	623	4,6	7	6,4	8,6	5,7	6,1	264	254	250	256 ±7
120%	747.6	6,2	6,4	7,3	6,8	4,3	4,8	260	214	242	239 ±23
150%	934.5	6	5,8	6,9	2,3	2,2	2	166	160	178	168 ±9
180%	1121.4	5,7	5,7	13,4	7,3	1,7	2,2	260	148	312	240 ±84

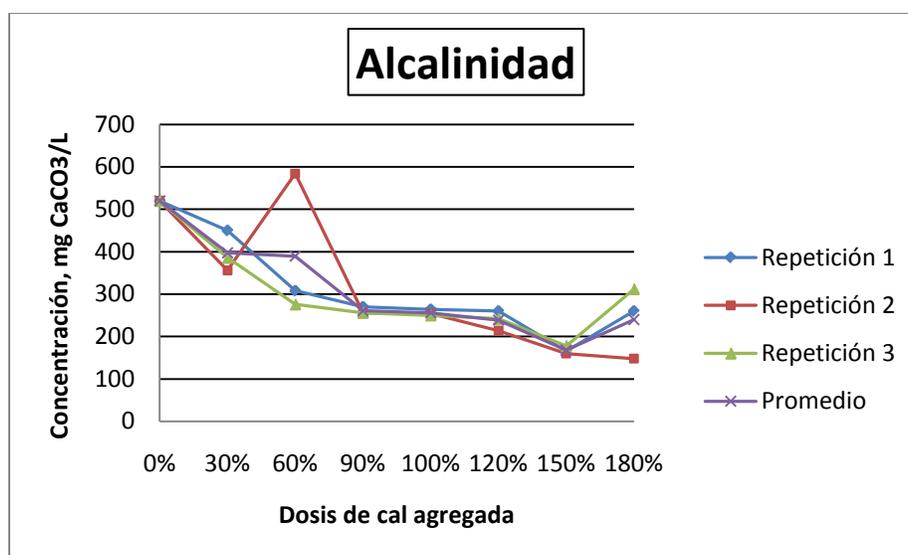


Figura C.4.1. Resultados obtenidos de las determinaciones de alcalinidad

C.5. pH

En la Tabla C.5.1 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas para determinar el pH del agua para las diferentes dosis de cal, estos resultados también se grafican en la Figura C.5.1.

Tabla C.5.1. Resultados obtenidos de las mediciones de pH

Dosis de Cal		pH			
		repetición			Promedio
%	mg Ca(OH) ₂ /L	1	2	3	
0%	0	7,126	7,126	7,126	7,126
30%	186.9	8,348	8,223	8,306	8,292
60%	373.8	8,821	9,111	9,051	8,994
90%	560.7	9,541	9,713	9,84	9,698
100%	623	9,536	10,014	10,039	9,863
120%	747.6	9,837	10,338	10,513	10,229
150%	934.5	10,582	10,633	11,002	10,739
180%	1121.4	9,645	10,708	11,409	10,587

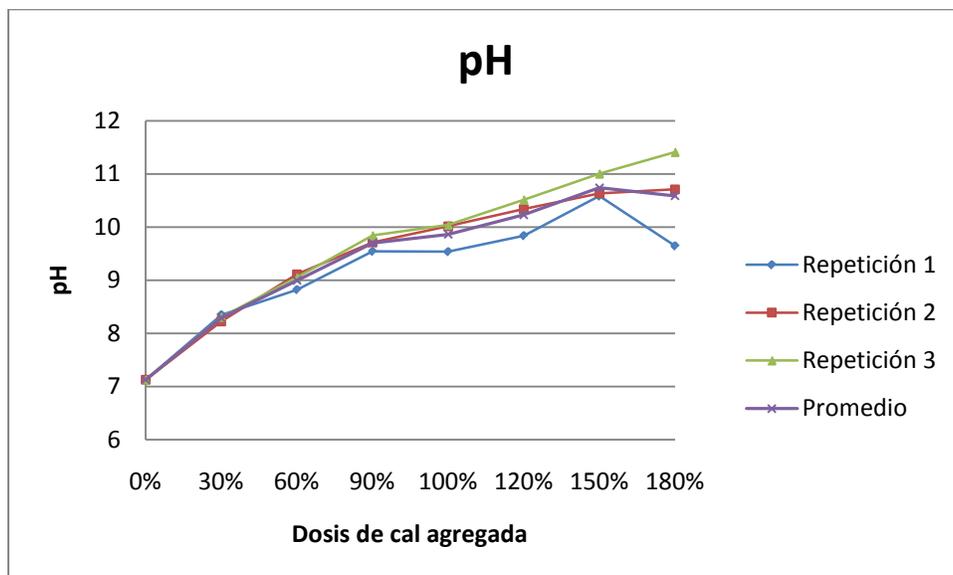


Figura C.5.1. Resultados obtenidos de las mediciones de pH

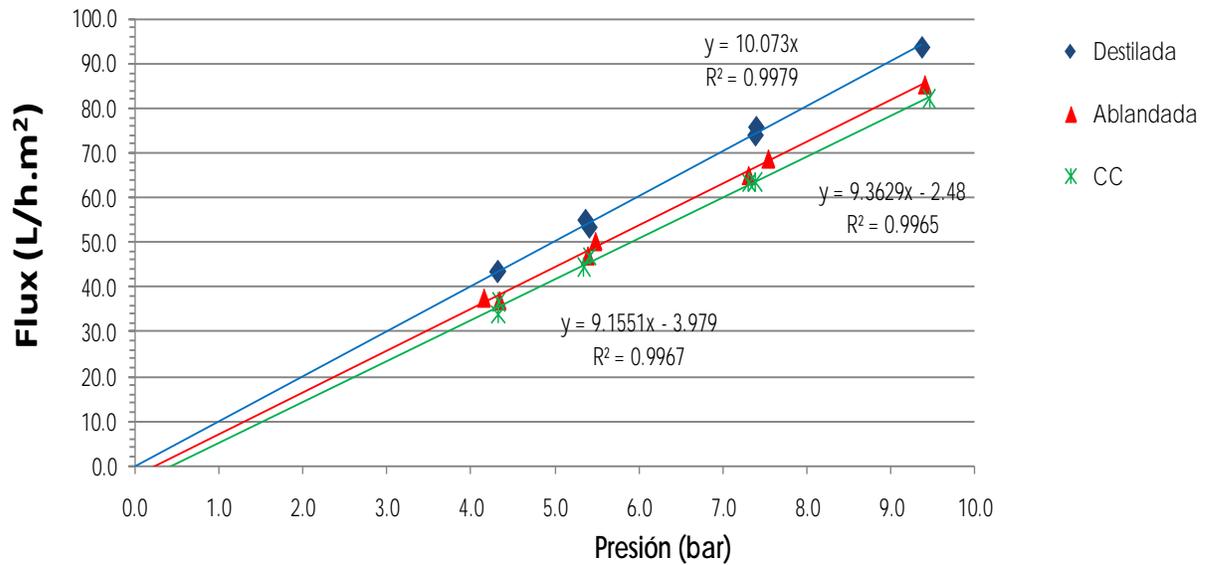
ANEXO D

Permeabilidad hidráulica de las membranas

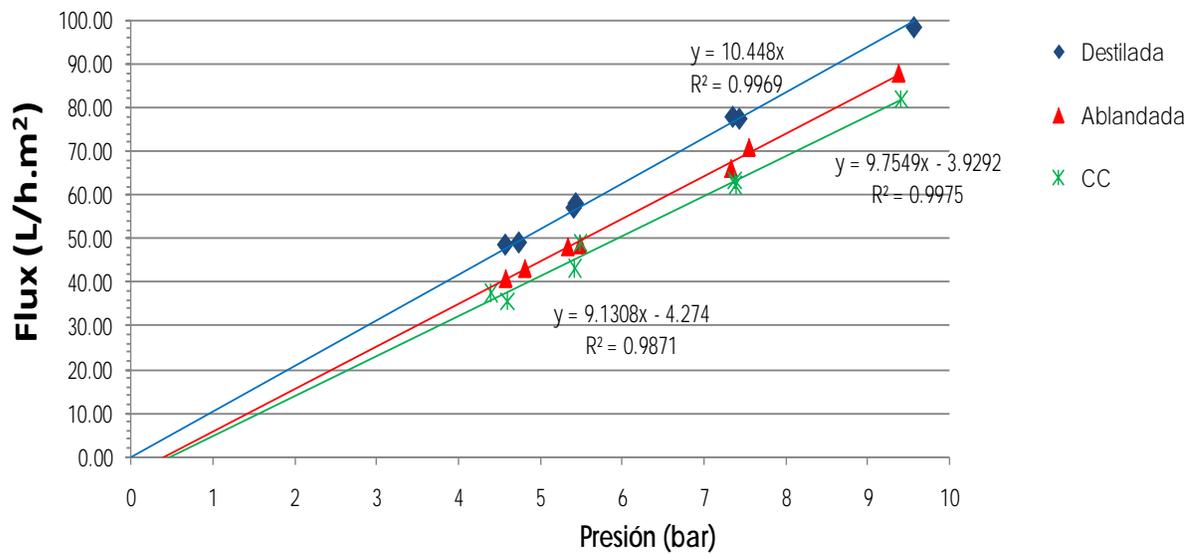
D.1. Membrana DOWFILMTEC NF90



FLUX vs PRESIÓN ENSAYO 1 - MEMBRANA NF90

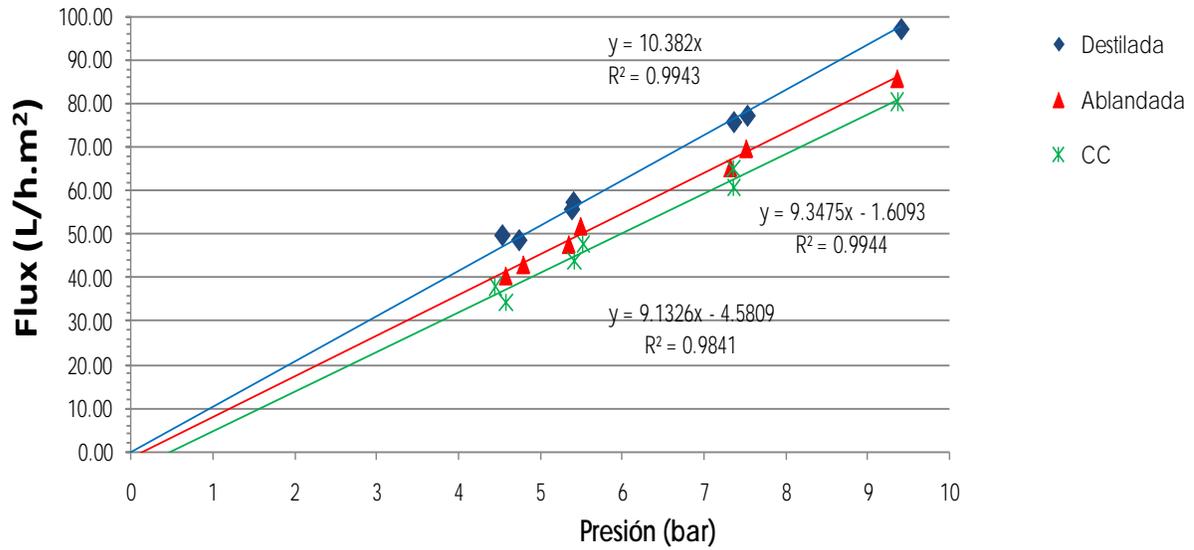


FLUX vs PRESIÓN ENSAYO 2 - MEMBRANA NF90





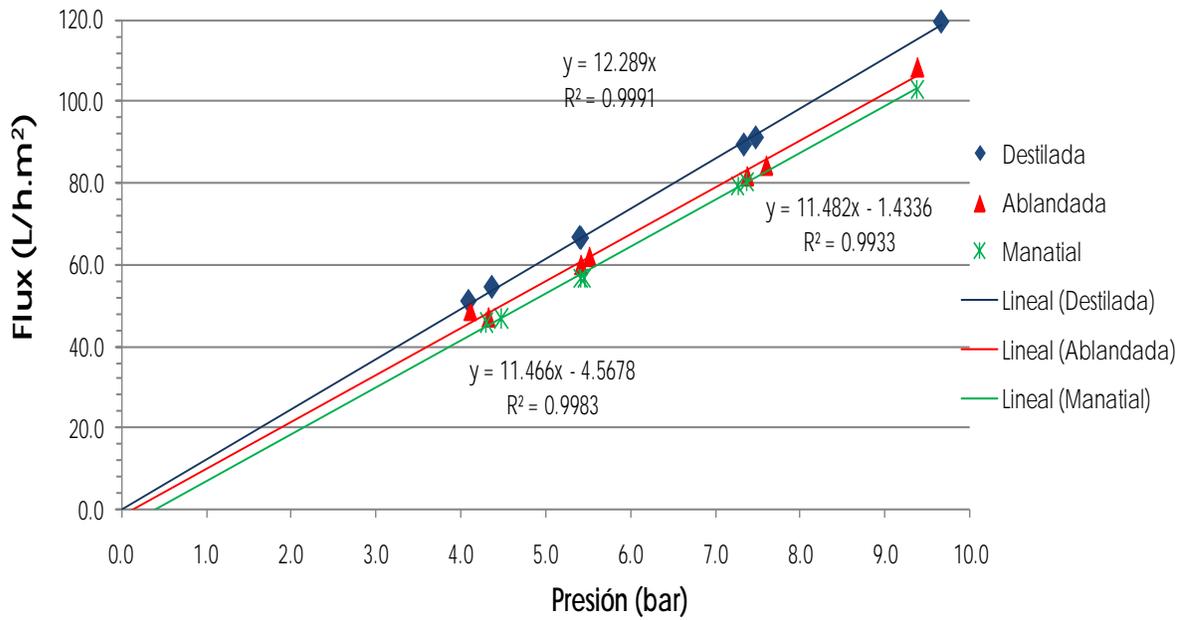
FLUX vs PRESIÓN ENSAYO 3 - MEMBRANA NF90



D.2. Membrana DOWFILMTEC NF270

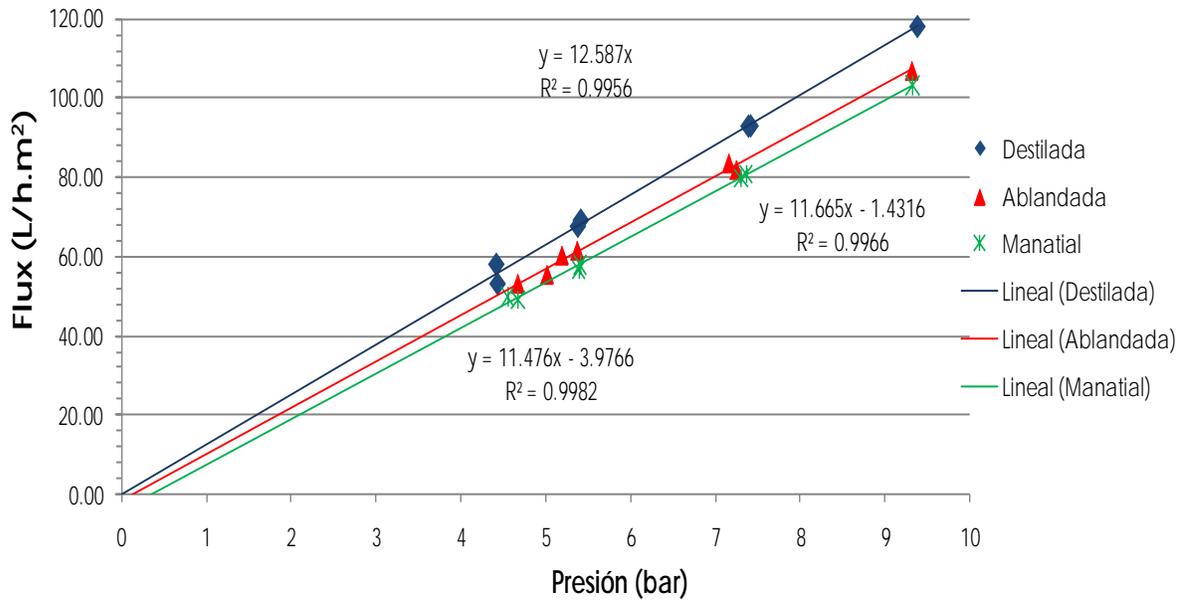


FLUX vs PRESIÓN ENSAYO 1 - MEMBRANA NF270

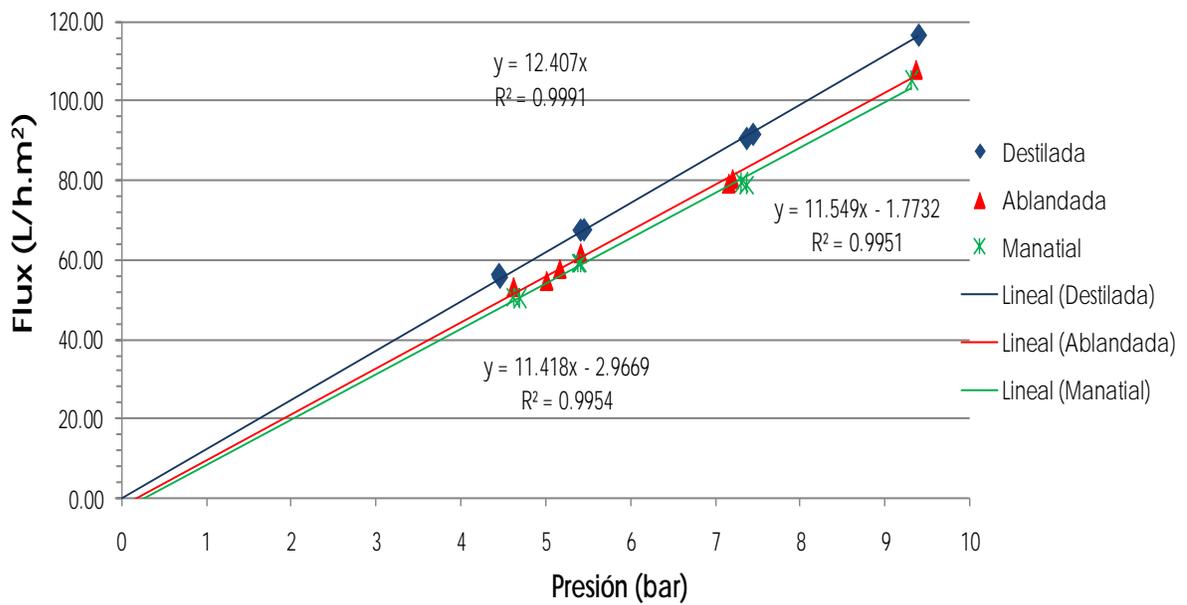




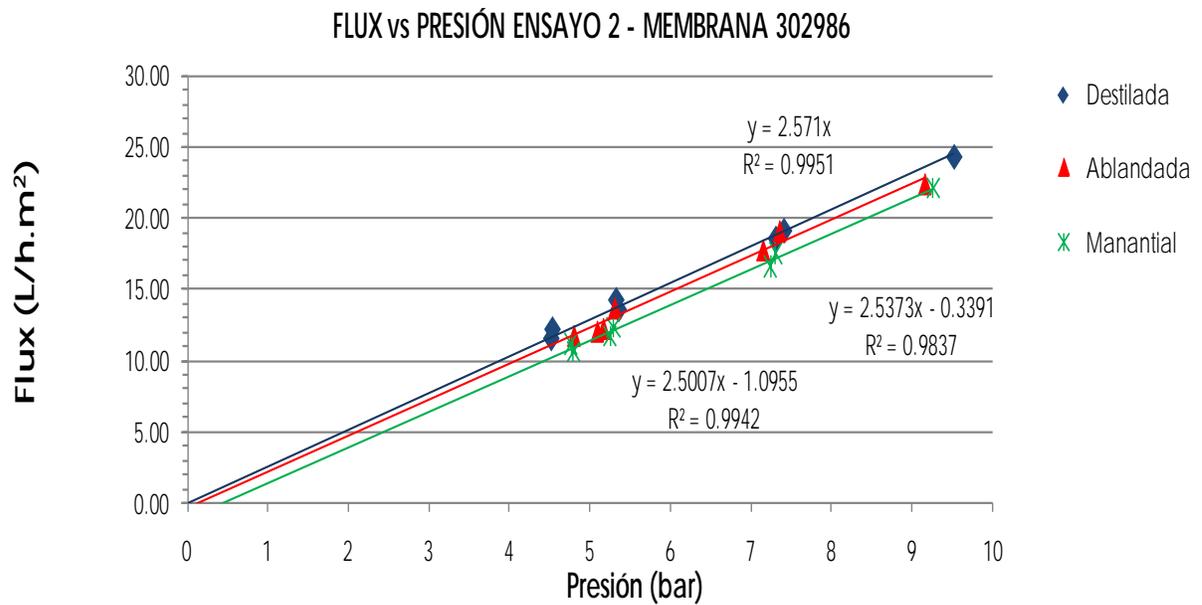
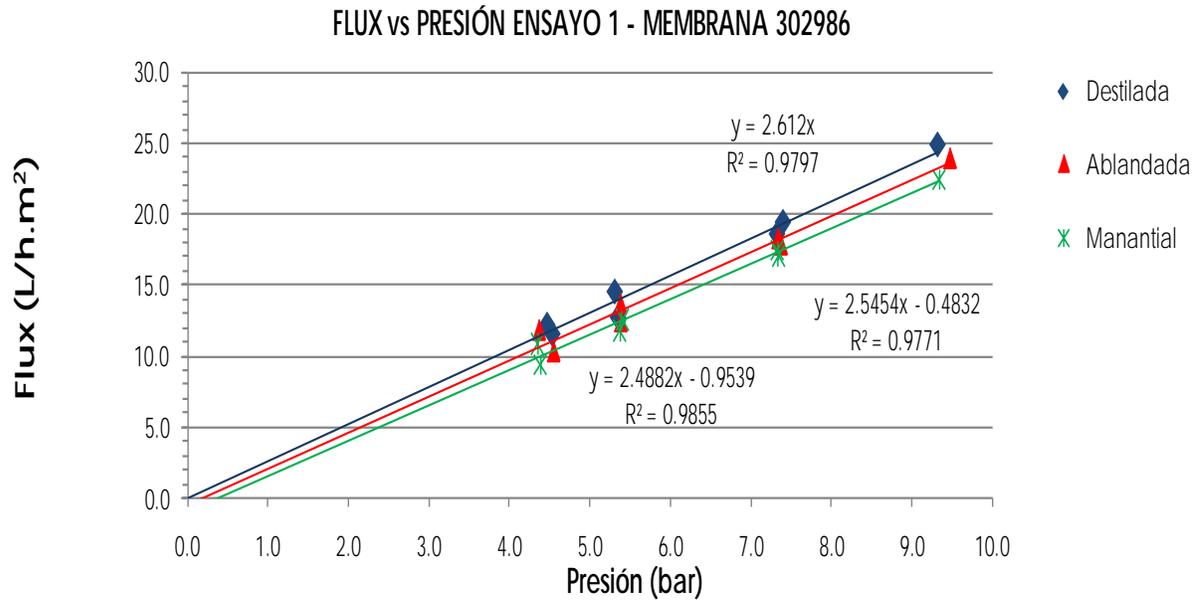
FLUX vs PRESIÓN ENSAYO 2 - MEMBRANA NF270

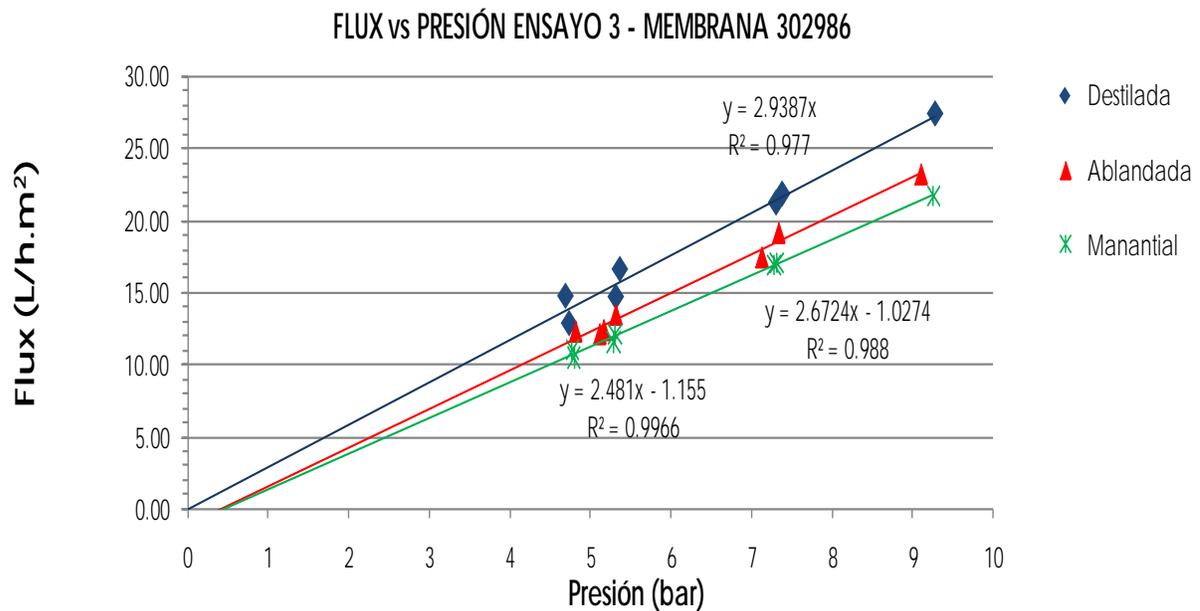


FLUX vs PRESIÓN ENSAYO 3 - MEMBRANA NF270



D.3. Membrana THOMAPOR 302986





D.4. Análisis estadístico de las pruebas de nanofiltración

En la Tabla D.4.1 se presenta el Análisis de varianza realizado para las pruebas de nanofiltración, en donde se hacen las consideraciones siguientes:

- Diseño factorial axb.
- 2 factores:
 - Membrana.
 - Presión.
- Variable de respuesta:
 - Flux de permeado
- Niveles de factores:
 - Nivel a del Factor A.
 - Tipo de membrana (NF270, NF90, 302986).
 - Nivel b del Factor B.
 - Presión (P1, P2, P3, P4).

$\alpha=0,01$

Hipótesis:

$$H_{01}: \gamma_{ij} = 0$$

$$H_{02}: \tau_i + \gamma_i = 0$$

$$H_{03}: \beta_j + \gamma_j = 0$$

Tabla D.4.1. Análisis de Varianza

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Prob > F
Membrana	2	1006.6704	503.3352	8001.8	<0.0001
Presión	3	0.1125	0.0375	0.5964	0.6203
Interacción	6	0.0871	0.0145	0.2308	0.9647
Error	51	3.2080	0.063		
Total	62	1106.0590			

Del análisis de varianza se obtienen las siguientes conclusiones:

1. No se rechaza H_{01} , es decir que no existe interacción entre los factores membrana y presión.
2. No se rechaza la hipótesis nula para el factor presión, es decir, la presión no tiene influencia sobre el flux de permeado.
3. Se rechaza la hipótesis nula para el factor membrana, es decir, el tipo de membrana usado sí tiene efecto sobre en el flux de permeado.

Se llevaron comparaciones múltiples mediante el método de Tukey-Kramer HSD. Los resultados obtenidos de este método se presentan en la Tabla D.4.2.

Tabla D.4.2. Análisis de Tukey-Kramer HSD para comparaciones

Tratamiento		Media
NF270, P1	A	12.53
NF270, P2	A	12.47
NF270, P3	A	12.45
NF270, P4	A	12.34
NF90, P1	B	10.38
NF90, P2	B	10.38
NF90, P3	B	10.30
NF90, P4	B	10.21
302986, P1	C	2.73
302986, P2	C	2.72
302986, P3	C	2.69
302986, P4	C	2.69

Del análisis de Tukey-Kramer, se concluye que el tipo de membrana usado tiene influencia en la cantidad de flux de permeado producido. Siendo la membrana NF270 la que produce la mayor cantidad de flux de permeado y la 302986 la presenta la menor producción.

ANEXO E

Resultados de remoción de compuestos orgánicos

E.1. Remoción de COT

Fecha de muestreo	Fuente	Concentración COT (mg/L)			promedio	Desviación estándar
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3		
02/11/2009	manantial Cerro Colorado	2.9	2.5	2.7	2.7	0.2
	Permeado NF90	0.4	0.6	0.8	0.6	0.2
	Permeado NF270	0.6	0.5	0.6	0.6	0.1
	Permeado 302986	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2
06/01/2010	manantial Cerro Colorado	2.2	2.5	2.2	2.3	0.2
	Permeado NF90	0.4	0.5	0.4	0.4	0.1
	Permeado NF270	0.5	0.7	0.6	0.6	0.1
	Permeado 302986	0.3	0.6	0.5	0.5	0.2
04/02/2010	manantial Cerro Colorado	1.9	1.9	2.1	2.0	0.1
	Permeado NF90	0.7	0.5	0.6	0.6	0.1
	Permeado NF270	0.6	0.6	0.4	0.5	0.1
	Permeado 302986	0.2	0.4	0.2	0.3	0.1

E.2. Remoción de contaminantes emergentes seleccionados

E.2.1. Concentración fortificada de entrada en ng/L del agua de manantial

4-Nonilfenoles	Triclosán	Bisfenol-A	Butilbenzilftalato	Carbamazepina
1519	58.1	65	170	320
1441	59.7	73.2	174	221
1546	59.9	80.7	169	320
Promedios				
1502 ± 54.7	59.2 ± 0.98	73 ± 7.9	171 ± 2.9	287 ± 57.2

E.2.2. Concentración de los contaminantes emergentes seleccionados en el permeado de la membrana NF270 de DOWFILMTEC

Concentración (ng/L)					
Compuesto	4-Nonilfenoles	Triclosán	Bisfenol-A	Butilbenzilftalato	Carbamazepina
1er corrida	80.2	6.2	6.5	3.5	6.6
2da corrida	61	3	5	1.8	9.3
3er corrida	41.6	1.8	-	-	-
Promedio	61 ± 19	3.7 ± 2.3	5.8 ± 1.2	2.65 ± 1.2	8 ± 1.9

E.2.3. Eficiencias de remoción obtenidas por la membrana NF270 de DOWFILMTEC

Remoción (%)					
Compuesto	4-Nonilfenoles	Triclosán	Bisfenol-A	Butilbenzilftalato	Carbamazepina
1er corrida	94.7 ± 0.61	90 ± 4	91.1 ± 1.19	97.9 ± 0.21	97.9 ± 0.92
2da corrida	95.9 ± 0.05	95 ± 3.4	93.1 ± 0.04	98.9 ± 2	96.8 ± 0.3
3er corrida	97.2 ± 0.07	96.9 ± 3.4	-	-	-
Promedio	95.9 ± 1.3	93.7 ± 1	91.8 ± 0.6	98.4 ± 0.4	97.2 ± 0.3