

01177
22

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

**"POTABILIZACIÓN DEL AGUA
SUBTERRÁNEA DEL VALLE DEL
MEZQUITAL MEDIANTE MEMBRANAS
PARA EL SUMINISTRO A LA CIUDAD
DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

I.C. JOSÉ LUIS TORRES ROMERO

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS

México, 2001

204347





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

A mis padres y hermanos...

a nostalgia y a mi bebe

Contenido

| | |
|---|-------------|
| Lista de Tablas | i |
| Lista de Figuras | iii |
| RESUMEN | vi |
| INTRODUCCIÓN | viii |
| OBJETIVO | xii |
| METAS | xiii |
| I. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1. El valle de México | 1 |
| 1.1.1. Problemática del suministro de agua potable en la Ciudad de México | 2 |
| 1.2. El Valle del Mezquital como alternativa de suministro de agua | 5 |
| 1.2.1. Uso de aguas negras en el Valle del Mezquital | 6 |
| 1.2.2. Modificación de la hidrología del Valle del Mezquital | 9 |
| 1.2.3. Caracterización de la zona de explotación | 11 |
| II. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 2.1. Nanofiltración y ósmosis inversa | 16 |
| 2.2. Aplicaciones | 17 |
| 2.3. Conceptos generales | 18 |
| 2.3.1. Membranas | 18 |
| 2.3.2. Ósmosis inversa | 19 |
| 2.3.3. Concentración de polarización | 20 |
| 2.4. Fabricación de membranas | 21 |
| 2.4.1. Membranas orgánicas | 21 |
| 2.4.1.1. Ésteres de celulosa | 21 |
| 2.4.1.2. Poliamidas | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.1.3. Polisulfonolias y polietersulfonolias | 22 |
| 2.4.2. Membranas inorgánicas | 22 |
| 2.5. Configuración de las membranas | 22 |
| 2.5.1. Enrollado en espiral | 22 |
| 2.5.2. Tubular | 23 |
| 2.5.3. Fibra hueca | 24 |
| 2.6. Diseño | 25 |
| 2.6.1. Pretratamiento | 25 |
| 2.6.1.1. Incrustación | 26 |
| 2.6.1.2. Ensuciamiento | 28 |
| 2.6.1.3. Daños a las membranas | 31 |
| 2.6.2. Instrumentación | 31 |
| 2.6.3. Postratamiento | 32 |
| 2.7. Limpieza de membranas | 33 |
| III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 35 |
| 3.1. Localización | 35 |
| 3.2. Descripción del proceso de tratamiento con membranas | 37 |
| 3.2.1. Alimentación de agua cruda | 39 |
| 3.2.2. Pretratamiento | 40 |
| 3.2.2.1. Filtro multimedia | 40 |
| 3.2.2.2. Filtro de cartucho | 42 |
| 3.2.3. Unidad de membranas | 43 |
| 3.2.3.1. Ósmosis inversa | 44 |
| 3.2.3.2. Panel de control | 47 |
| 3.2.3.3. Estructura de montaje | 48 |
| 3.2.3.4. Tuberías, válvulas y accesorios | 48 |
| 3.2.4. Lavado de membranas | 49 |
| 3.2.5. Vehículo para acoplar la planta piloto | 49 |
| 3.3. Evaluación | 52 |
| 3.3.1. Operación | 53 |
| 3.3.1.1. Presiones | 53 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.1.2. Caudales | 54 |
| 3.3.2. Calidad del agua | 54 |
| IV. RESULTADOS | 55 |
| 4.1. Nanofiltración | 55 |
| 4.1.1. Selección de la presión de operación | 55 |
| 4.1.2. Evaluación de la unidad de NF a una presión de operación de 11.6 kg/cm ² (165 psi) | 60 |
| 4.1.2.1. Operación | 60 |
| 4.1.2.2. Calidad del agua | 65 |
| 4.2. Ósmosis inversa | 73 |
| 4.2.1. Selección de la presión de operación | 73 |
| 4.2.2. Evaluación de la unidad de OI a una presión de operación de 15.8 kg/cm ² (225 psi) | 77 |
| 4.2.2.1. Operación | 77 |
| 4.2.2.2. Calidad del agua | 82 |
| 4.3. Comparación de los arreglos de membranas | 89 |
| 4.3.1. Generación de producto | 89 |
| 4.3.2. Calidad del producto | 90 |
| 4.3.3. Consumo y costo energético por metro cúbico tratado | 90 |
| 4.3.4. Selección del arreglo de membranas adecuado | 91 |
| 4.3.4.1. Pretratamiento | 92 |
| 4.3.4.2. Postratamiento | 93 |
| V. DISPOSICIÓN DEL RECHAZO | 94 |
| 5.1. Volumen generado de rechazo en la unidad de NF | 94 |
| 5.2. Opción del manejo del rechazo mediante OI | 96 |
| 5.2.1. Alternativas de disposición del rechazo | 98 |
| VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 101 |

| | |
|--|------------|
| 6.1. Conclusiones | 101 |
| 6.2. Recomendaciones | 103 |
| BIBLIOGRAFÍA | 106 |
| PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS | 110 |
| ANEXO A. CRETIB DEL RECHAZO DEL ARREGLO NF-OI | 112 |
| ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO DEL ARREGLO NF-OI | 115 |
| ANEXO C. PARÁMETROS DE RUTINA DEL AFLUENTE, PRODUCTO Y RECHAZO DE LA UNIDAD DE NF | 119 |
| ANEXO D. PARÁMETROS DE RUTINA DEL AFLUENTE, PRODUCTO Y RECHAZO DE LA UNIDAD DE OI | 122 |

Lista de Tablas

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | Origen y cantidad de agua aportada a la Ciudad de México | 5 |
| Tabla 2 | Parámetros que exceden la Norma Mexicana y criterios internacionales | 13 |
| Tabla 3 | Calidad del agua para evitar la formación de incrustaciones | 27 |
| Tabla 4 | Calidad del agua para minimizar el ensuciamiento | 29 |
| Tabla 5 | Síntomas del ensuciamiento de membranas | 34 |
| Tabla 6 | Recomendaciones de reactivos para la limpieza | 34 |
| Tabla 7 | Principales características de las membranas | 44 |
| Tabla 8 | Características generales del remolque | 52 |
| Tabla 9 | Parámetros analizados en campo | 54 |
| Tabla 10 | Presiones y flujos en el arranque de la unidad de NF | 56 |
| Tabla 11 | Calidad del producto de la unidad de NF a diferentes presiones de operación | 59 |
| Tabla 12 | Calidad del rechazo de la unidad de NF a diferentes presiones de operación | 59 |
| Tabla 13 | Parámetros de seguimiento de la calidad del agua en la unidad de NF | 70 |
| Tabla 14 | Presiones y flujos en el arranque de la unidad de OI | 73 |
| Tabla 15 | Calidad del producto de la unidad de OI a diferentes presiones de operación | 76 |
| Tabla 16 | Calidad del rechazo de la unidad de OI a diferentes presiones de operación | 76 |
| Tabla 17 | Parámetros de seguimiento de la calidad del agua en la unidad de OI | 86 |
| Tabla 18 | Volumen generado para cada arreglo de membranas | 89 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Ciudad de México o Zona Metropolitana del Valle de México | 2 |
| Figura 2 | Fuentes de abastecimiento de agua a la Ciudad de México | 4 |
| Figura 3 | Valle del Mezquital | 6 |
| Figura 4 | Sistema General de Drenaje de la Ciudad de México | 7 |
| Figura 5 | Distrito de Riego 003 | 8 |
| Figura 6 | Acuíferos localizados en el Distrito de Riego 003 | 10 |
| Figura 7 | Sitios de muestreo en el Valle del Mezquital | 12 |
| Figura 8 | Membrana permselectiva | 18 |
| Figura 9 | Mecanismos de la ósmosis | 19 |
| Figura 10 | Enrollado en espiral | 23 |
| Figura 11 | Tubular | 24 |
| Figura 12 | Fibra hueca | 25 |
| Figura 13 | Problemas que afectan el rendimiento de las membranas | 26 |
| Figura 14 | Ubicación de los sitios posibles y de este estudio | 36 |
| Figura 15 | Manantial Cerro Colorado | 37 |
| Figura 16 | Diagrama de flujo de la planta piloto | 38 |
| Figura 17 | Obra de toma | 39 |
| Figura 18 | Bomba, válvulas y rotámetro | 40 |
| Figura 19 | Filtro multimedia | 41 |
| Figura 20 | Sistema de lavado automático del filtro multimedia | 41 |
| Figura 21 | Filtro de cartucho | 42 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 22 | Medio filtrante del filtro de cartucho | 43 |
| Figura 23 | Bomba con <i>booster</i> | 45 |
| Figura 24 | Unidad de ósmosis inversa constituida por tres torres de membranas | 46 |
| Figura 25 | Panel de control | 47 |
| Figura 26 | Sistema de lavado de membranas | 49 |
| Figura 27 | Vehículo para trasladar la planta piloto | 50 |
| Figura 28 | Laboratorio de campo | 51 |
| Figura 29 | Análisis del agua en el laboratorio de campo | 51 |
| Figura 30 | Volumen generado de producto, rechazo y <i>flushing</i> en la unidad de NF | 56 |
| Figura 31 | Generación de producto en la unidad de NF | 57 |
| Figura 32 | Paso de sales en el producto de la unidad de NF | 58 |
| Figura 33 | Comportamiento de los caudales en la unidad de NF | 61 |
| Figura 34 | Comportamiento de la presión en la entrada y salida del FC de la unidad de NF | 63 |
| Figura 35 | Comportamiento de la presión en la descarga y operación de la unidad de NF | 64 |
| Figura 36 | Comportamiento de los SDT en la unidad de NF | 67 |
| Figura 37 | Comportamiento del pH en la unidad de NF | 68 |
| Figura 38 | Comportamiento de la temperatura en la unidad de NF | 69 |
| Figura 39 | Balance de masa del arreglo NF | 71 |
| Figura 40 | Volumen generado de producto, rechazo y <i>flushing</i> en la unidad de OI | 74 |
| Figura 41 | Generación de producto en la unidad de OI | 75 |
| Figura 42 | Paso de sales en el producto de la unidad de OI | 75 |
| Figura 43 | Comportamiento de los caudales en la unidad de OI | 78 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 44 | Comportamiento de la presión en la entrada y salida del FC de la unidad de OI | 80 |
| Figura 45 | Comportamiento de la presión de descarga y operación en la unidad de OI | 81 |
| Figura 46 | Comportamiento de los SDT en la unidad de OI | 83 |
| Figura 47 | Comportamiento del pH en la unidad de OI | 84 |
| Figura 48 | Comportamiento de la temperatura en la unidad de OI | 85 |
| Figura 49 | Balace de masa del arreglo OI | 87 |
| Figura 50 | Balace de masa del arreglo NF+OI | 87 |
| Figura 51 | Tren de tratamiento propuesto | 91 |

Resumen

En esta investigación se analizó un proceso de tratamiento avanzado empleando membranas de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) con el fin de potabilizar el agua subterránea del Valle del Mezquital.

El agua que se utilizó en la experimentación provenía del manantial Cerro Colorado, ubicado en la zona 1 del Distrito de Riego 003, en el Estado de Hidalgo. El agua se extrajo del manantial y se condujo a un pretratamiento constituido por filtración (filtro multimedia y filtro de cartucho). Posteriormente, el agua filtrada se envió a la unidad de membranas.

La operación de los módulos de membranas fue estudiado en configuraciones en paralelo (NF y OI) y en serie (NF+OI); en el segundo, la unidad de OI se alimentó con la mezcla del rechazo de la NF y el agua filtrada del manantial.

La NF se operó durante 137 horas a una presión de 11.6 kg/cm² (165 psi) generando 68% de producto, mientras que la OI se operó en un total de 80 horas a una presión de 15.8 kg/cm² (225 psi) obteniendo un rendimiento del 69%.

El agua del manantial no cumplió con la calidad requerida para ser tratada por la unidad de membranas, especialmente por la concentración de dureza total (376 mg/L) y COT (35 mg/L).

El producto generado se caracterizó por una baja concentración de sales (44 mg/L) y por un pH ácido (5). A excepción de este último, el producto presentó la calidad requerida por la NOM-127-SSA1-1994 para tener un uso potable.

El rechazo presentó altas concentraciones de SDT (2190 a 2599 mg/L) y COT (157 a 215 mg/L). De hecho, el rechazo fue considerado como un residuo peligroso debido a sus características biológicas infecciosas (NOM-052-ECOL-1993), empero, esta situación es fácilmente controlada mediante una desinfección.

De acuerdo a la calidad del producto y al costo energético por metro cúbico tratado (\$0.48 pesos), el arreglo NF fue la mejor opción para potabilizar el agua del manantial.

Introducción

El agua es considerada como uno de los recursos naturales más importante para el hombre pues es indispensable para que sobreviva; de hecho es un factor básico en el desarrollo económico de varias poblaciones.

En la Tierra se estima un volumen de agua en todas sus formas de 1.36×10^{18} m³, de los cuales el 97.2% se encuentra en los océanos y el resto, 2.8% (3.8×10^{16} m³), es agua dulce. Sin embargo, más del 75% del agua dulce se concentra en bancos de hielo polares, en el suelo, en formaciones rocosas y en la atmósfera; el 22% (8.4×10^{15} m³) restante es agua superficial y subterránea. Del volumen disponible, se tiene acceso únicamente al 0.6% (5×10^{13} m³) para uso potable que representa aproximadamente el 0.004% del volumen original (Henry y Heinke, 1999).

Aunado a esto, el desmesurado incremento de la población y las actividades antropogénicas han afectado la calidad y cantidad del agua para el suministro a la población, industria y agricultura, reduciendo aún más el volumen disponible.

En las zonas áridas del Medio Oriente es necesario desalar aguas marinas y aguas subterráneas salobres para satisfacer las demandas en la población, pues la disponibilidad de agua dulce es muy limitada. La primera tecnología utilizada con este propósito fue la destilación (Buros, 1995).

La destilación es el proceso más antiguo y consiste en calentar el agua salina o salobre hasta evaporarla y después condensarla para obtener agua con un contenido adecuado de sales. Empero, el enorme consumo de energía para el calentamiento provoca que el proceso sea demasiado costoso y limita su aplicación. Estas desventajas propiciaron el desarrollo de nuevas tecnologías de desalación, como es el caso de la electrodiálisis y el uso de membranas.

La electrodiálisis es un proceso que emplea un potencial eléctrico para separar especies iónicas (cationes o aniones) y otros componentes no cargados de una solución acuosa mediante láminas permeables.

En contraste, el proceso de membranas consiste en hacer pasar agua a presión a través de una película semipermeable que impide el paso de la mayoría de las sales disueltas y otras impurezas contenidas. En el mercado se conocen dos tipos de membranas para generar agua potable a partir de agua salada: la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (OI); las cuales remueven partículas con tamaños superiores a 0.001 y 0.0001 μm , respectivamente, que se encuentran en el intervalo molecular o iónico y con pesos moleculares de 200 y 100 Daltons¹ (Buckley *et al.* y Levine *et al.*, 1998). La NF y OI permiten remover sales, dureza, patógenos, turbidez, color, compuestos orgánicos sintéticos y otros contaminantes.

Las principales ventajas de la NF y OI se reflejan en el bajo costo de inversión, bajo requerimiento de espacio para su instalación y fácil operación. Estas características permiten que las membranas sean consideradas como un proceso promisorio con costos inferiores a los de otras tecnologías de desalación (Buros, 1995).

La desalación de agua de mar mediante membranas de NF y OI es ampliamente utilizada en la región del Golfo de Arabia, a tal grado que se han

¹ Medida de la masa o peso molecular. Un Dalton es aproximadamente igual a la masa del átomo de hidrógeno.

construido durante los últimos 10 años más de 20 plantas potabilizadoras en Arabia Saudita, 19 en los Emiratos Unidos Árabes, 4 en Omán y 3 en Bahrain (Al-Shammiri y Al-Dawas, 1997). En esta parte del mundo, los procesos de membrana generan alrededor de 123 m³/s de agua potable, que representa el 56% de la producción mundial (MITIJ, 1995).

En los Estados Unidos, los procesos de membrana producen más del 0.5% de agua potable que se genera en el país (Mickley *et al.*, 1993). Actualmente 19 estados tienen plantas potabilizadoras mediante membranas: 120 en Florida, 17 en California y 11 en Texas, entre los más importantes; en Florida se generan alrededor de 8.8 m³/s de agua potable para abastecer a una población de 1.3 millones de habitantes (Vanhems, 2000).

Con base en esto, en áreas donde el crecimiento de la población ha incrementado las demandas de agua más allá de los volúmenes que pueden proporcionar las fuentes de agua dulce, la potabilización de agua salina o salobre mediante membranas es una opción para satisfacerlas.

Por otro lado, la Ciudad de México enfrenta perspectivas inciertas para asegurar un abastecimiento de agua potable permanente y confiable; esto obliga a hallar nuevas fuentes de suministro que se encuentren fuera de la Cuenca de México. Una alternativa es el acuífero del Valle del Mezquital de donde se pueden extraer, en una primer etapa, 6 m³/s de agua (Jiménez *et al.*, 2000).

Dicho acuífero presenta una recarga aproximada de 25 m³/s de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México, no obstante, después de pasar por un proceso de tratamiento natural se caracteriza por presentar una acumulación de iones (SDT, cloruros y sodio) y material orgánico. Para remover estos contaminantes será necesario utilizar membranas de NF u OI (Jiménez *et al.* 2000).

Por lo tanto, esta investigación consistió en analizar el proceso de membranas (NF y OI) a nivel piloto con el fin de potabilizar el agua subterránea del Valle del Mezquital; para ello, se analizó la cantidad y calidad del producto y rechazo generado, así como la disposición de este último.

De hecho, en algunas zonas áridas del norte de México el abastecimiento de agua potable se realiza a partir de la desalación de aguas salobres y marinas mediante membranas; tal es el caso de la porción norte de la Península de Baja California, Mexicali, Puertecitos, Santa Rosalita, Laguna Manuela, La Chorera, San Felipe, Bahía de los Ángeles y Punta Estrella (SEMARNAP, 2000).

OBJETIVO

Establecer las condiciones de operación de un tratamiento avanzado a nivel piloto, empleando membranas de nanofiltración u ósmosis inversa, para potabilizar el agua subterránea del Valle del Mezquital.

METAS

- ☞ Determinar los parámetros de diseño del sistema de membranas

- ☞ Valorar la generación de producto y rechazo en el sistema de tratamiento

- ☞ Analizar la calidad del agua del afluente, producto y rechazo

- ☞ Definir la disposición del rechazo

- ☞ Establecer la necesidad de pruebas piloto para seleccionar un tratamiento con membranas

CAPÍTULO I

Antecedentes

CAPÍTULO I

Antecedentes

1.1. El valle de México

La Ciudad de México se localiza en la porción sur de la Cuenca del Valle de México sobre la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano a una altura aproximada de 2400 msnm (Figura 1). Anteriormente, la ciudad se ubicaba básicamente en la parte norte centro del Distrito Federal, pero el progresivo crecimiento de la urbanización en las últimas décadas ocasionó que la ciudad incluya el Distrito Federal y gran parte de la jurisdicción de 17 municipios del Estado de México, ocupando una superficie cercana a los 3733 km² y albergando a casi 21 millones de habitantes (National Academy Press, 1995).

A esta población, el Gobierno debe proporcionarle servicios urbanos entre los cuales destaca, por su importancia, el abastecimiento de agua potable.

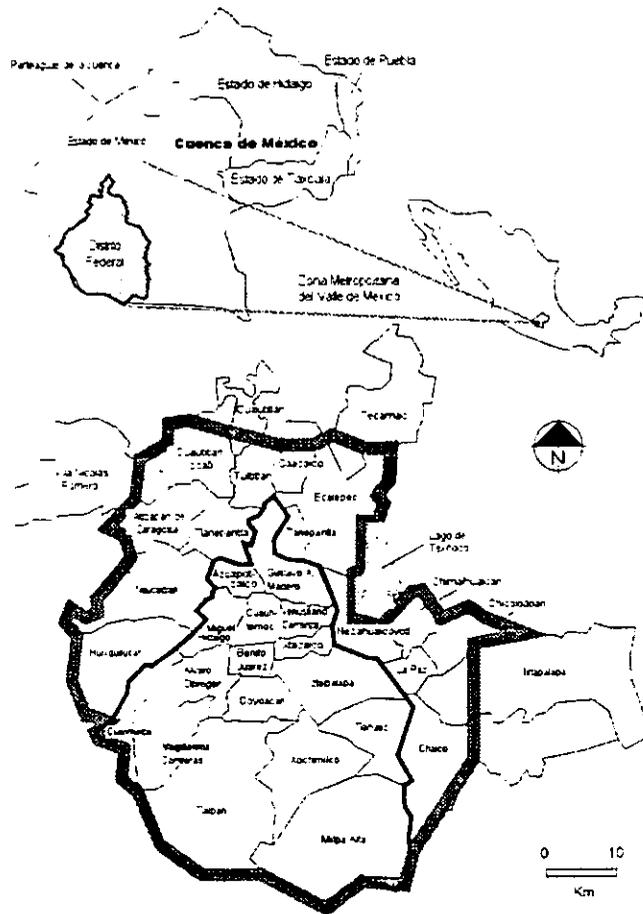


Figura 1. Ciudad de México o Zona Metropolitana del Valle de México
(Adaptada de National Academy Press, 1995)

1.1.1. Problemática del suministro de agua potable en la Ciudad de México

Hasta inicios del siglo XX, la hidrología del Valle de México estaba constituida por un excelente acuífero, por varios manantiales al pie de las montañas y por pozos sujetos a presión artesiana. Estas condiciones motivaron a realizar perforaciones profundas en los años treinta con el fin de extraer agua y cubrir las demandas en la ciudad. Empero, la explotación intensiva del acuífero fue

generó poco a poco un cambio en las condiciones hidrológicas naturales pues inició el desecamiento de los manantiales, que los lagos menguaran y que el agua del subsuelo perdiera presión debido al abatimiento del nivel freático.

Aunado a esto, la reducción de las áreas verdes debido al crecimiento de la mancha urbana y la evacuación de las aguas de la Cuenca de México mediante tres salidas artificiales (Gran Canal de Desagüe-Tajo de Nochistongo, Emisor Poniente y Emisor Central), estas últimas para evitar las inundaciones en la ciudad, impiden que el agua se infiltre en el subsuelo para permitir una recarga completa de las fuentes subterráneas; que de acuerdo a un balance de agua, la cantidad que se extrae por bombeo es superior a la que ingresa por infiltración, lo que indica una sobreexplotación.

Esta fuerte extracción de agua ha ocasionado que las formaciones de arcillas lacustres sobre las que se asienta la ciudad empezaran a consolidarse causando un daño excesivo a la infraestructura de la urbe, principalmente a cimientos de edificios y al sistema de conducción de agua potable y alcantarillado. En el caso de los cimientos, éstos se vuelven más vulnerables a los efectos de los sismos, mientras que el sistema de conducción hidráulica tiende a fracturarse propiciando fugas; en el caso de las aguas negras, si el suelo lo permite, podrán infiltrarse hasta contaminar el acuífero.

Con el propósito de reducir el inconveniente de la sobreexplotación y el severo hundimiento del centro de la ciudad fue indispensable cerrar muchos pozos del área urbana y perforar otros en las zonas aledañas de Chalco, Tiáhuac y Xochimilco, así como transferir agua desde cuencas externas como es el caso del Cutzamala y del Lerma.

En la Figura 2 se muestran las principales fuentes de suministro de agua a la Ciudad de México, siendo las flechas oscuras las aportaciones actuales mientras que las otras señalan las nuevas fuentes potenciales.

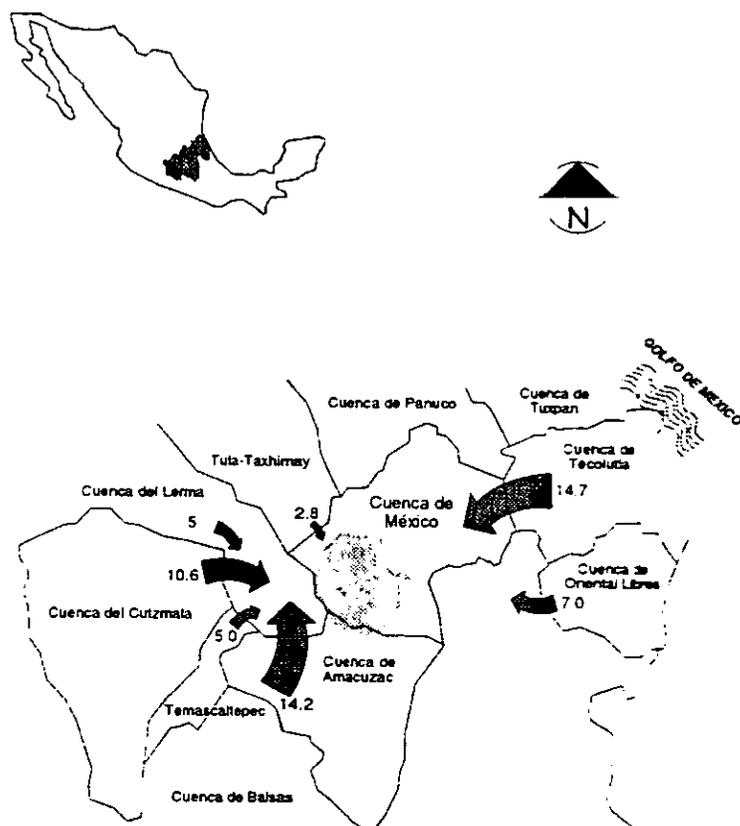


Figura 2. Fuentes de abastecimiento de agua a la Ciudad de México
(Adaptada de National Academy Press, 1995)

De acuerdo con el National Academy Press, 1995, se suministran alrededor de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua potable a la Ciudad de México, de los cuales aproximadamente el 72% se obtiene de 1089 pozos que se explotan de los mantos subterráneos ubicados en la Cuenca de México, el 26% lo contribuyen las cuencas del Cutzamala y del Lerma, mientras que el 2% proviene del Río Magdalena, la Presa Madín y de algunos manantiales y arroyos. En la Tabla 1 se muestran las aportaciones de cada una de las fuentes de abastecimiento.

Tabla 1. Origen y cantidad de agua aportada a la Ciudad de México
(Adapta de National Academy Press, 1995)

| Fuente de agua | Distrito Federal (m ³ /s) | Estado de México (m ³ /s) | Total (m ³ /s) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Cuenca del Valle de México | | | |
| Pozos | 22.7 | 20.3 | 43 |
| Río Magdalena | 0.2 | -- | 0.2 |
| Presa Madín | -- | 0.5 | 0.5 |
| Manantiales y arroyos | 0.5 | 0.2 | 0.7 |
| Fuentes Importadas | | | |
| Río Cutzamala | 7.6 | 3 | 10.6 |
| Pozos del Lerma | 4 | 1 | 5 |
| Abastecimiento Total | 35 | 25 | 60 |

Al igual que otras ciudades del mundo, la Ciudad de México enfrenta perspectivas inciertas para asegurar un abastecimiento de agua permanente y confiable, por lo que es necesario encontrar nuevas fuentes de suministro fuera de la Cuenca de México que puedan ser aprovechables sin afectar el ecosistema de la zona de extracción o la dotación de una determinada población. Esto se logrará a medida en que se puedan efectuar inversiones importantes de recursos para llevar a cabo la construcción de la infraestructura necesaria. Por ejemplo, para el Sistema Cutzamala está prevista una asignación presupuestal de 923 millones de pesos, cuyas obras permitirán suministrar a la Ciudad de México un caudal promedio de 23.5 m³/s (Saldaña, 2000).

1.2. El Valle del Mezquital como alternativa de suministro de agua

El Valle del Mezquital se localiza en la parte suroeste del Estado de Hidalgo a 50 km del norte de la Ciudad de México, entre el Cinturón Volcánico Transmexicano y la Sierra Madre Oriental, a una altura promedio de 2030 msnm (Figura 3). El suelo se compone de tierras calcáreas semiáridas e inicialmente pobres en materia orgánica y nutrientes. El clima que predomina es seco estepario, la precipitación y evaporación media anual es de 534 y 1750 mm respectivamente (Torres, 1999). Se estima que actualmente hay 570 mil

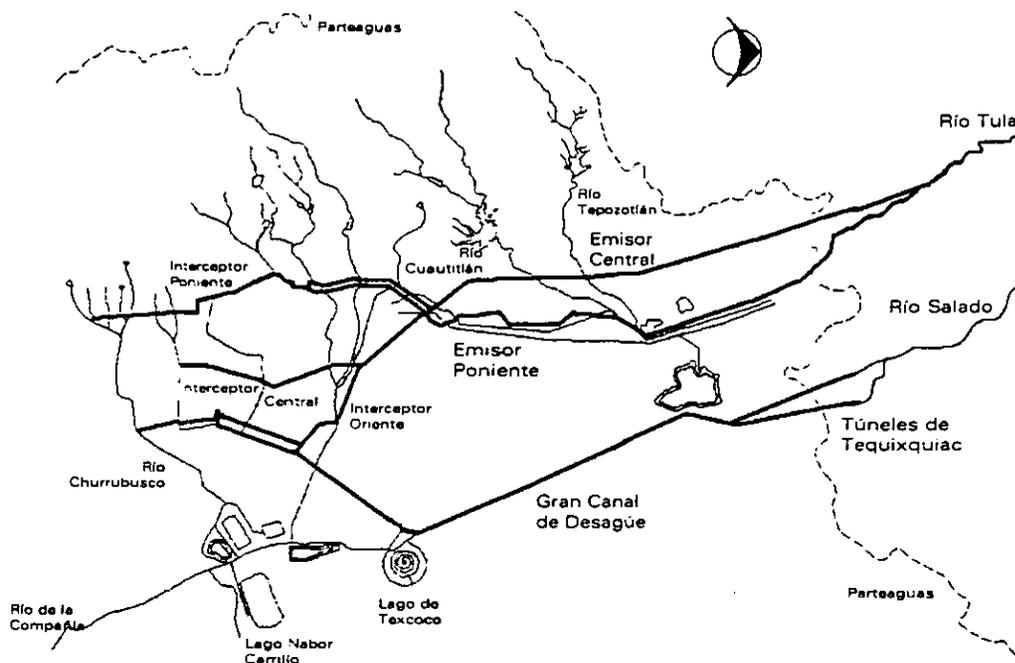


Figura 4. Sistema General de Drenaje de la Ciudad de México
(Adaptada de Torres, 1999)

De acuerdo con las características topográficas del Valle del Mezquital únicamente la quinta parte es utilizada en la agricultura, en donde se emplean las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México para irrigar alrededor de 45,000 ha pertenecientes al Distrito de Riego 003 (Figura 5). Esta actividad se practica desde 1896 e inicia desde la zona centro del valle, cerca de Tlaxcoapan y Tlahuelilpan, difundiéndose hacia el norte en dirección a Mixquiahuala, empleando un complejo sistema de canales no revestidos (BGS, 1998).

Debido a las condiciones climatológicas y a las características del suelo, los campesinos emplean elevadas láminas de riego, del orden de 2 m/año (Jiménez *et al.*, 1999b), teniendo como consecuencia no prevista la transformación de tierras improductivas en vastas extensiones agrícolas con incrementos en la producción anual de cultivos. Esto ha favorecido el desarrollo socioeconómico de una de las regiones más pobres del país.

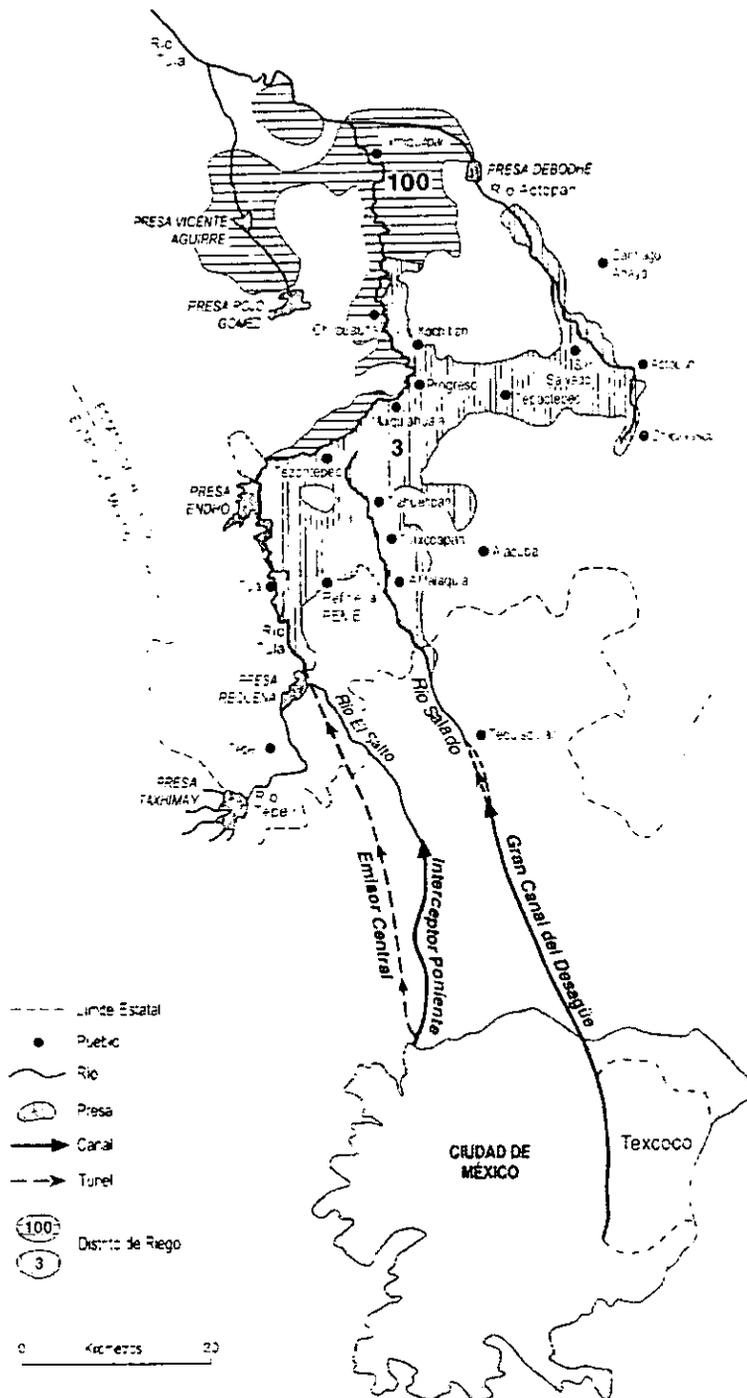


Figura 5. Distrito de Riego 003
(Adaptada de BGS, 1998)

Por el momento las autoridades federales controlan las prácticas de siembra e irrigación para minimizar el riesgo de transmisión de enfermedades gastrointestinales a trabajadores agrícolas y a los consumidores de cultivos, restringiendo la siembra de legumbres y verduras que se comen crudas. Además, se tiene pensado construir en la zona una macroplanta de tratamiento de aguas residuales la cual permitirá atenuar la problemática sanitaria y limitará en lo posible la eliminación de materia orgánica y nutrientes solubles a un bajo costo (Torres, 1999).

1.2.2. Modificación de la hidrología del Valle del Mezquital

Sin embargo, el empleo de aguas de desecho en el Distrito de Riego 003 también ha traído como consecuencia una fuerte modificación de la hidrología natural del valle, debido principalmente a la infiltración de aguas provenientes de las fugas del sistema de distribución por canales no revestidos y por el exceso de irrigación de agua en los cultivos, estimándose una recarga artificial del orden de 25 m³/s (BGS, 1998). Las lluvias que caen dentro del valle también contribuyen a la recarga pero de forma limitada. Aunado a esto, la estructura geológica de la zona ha permitido una retención del agua en el subsuelo, incrementando el nivel freático hasta alcanzar, en algunos casos, la superficie del terreno y propiciar el afloramiento de manantiales así como áreas de inundación. En décadas pasadas para obtener el vital líquido se tenían que perforar pozos con profundidades cercanas a los 60 m.

La acumulación de agua en el subsuelo del Valle del Mezquital es muy valiosa y puede utilizarse para satisfacer la demanda en la Ciudad de México. De los siete acuíferos que constituyen al Distrito de Riego 003 (Figura 6), los más adecuados para explotar son la zona 1 y 2 (Jiménez *et al.*, 1999b), puesto que presentan las siguientes características:

- Se originan del filtrado de las aguas residuales
- Presentan problemas de drenaje debido a que los niveles piezométricos son muy someros e inclusive se encuentran anegados

El segundo acuífero se localiza al sur de Tlahuelilpan y se clasifica como parcial o totalmente confinado pues está limitado por la parte superior e inferior por capas no permeables de arcilla, lo que ocasiona que el agua penetre de forma lateral. El nivel freático se encuentra cercano a la superficie del terreno, pero hacia el sur se profundiza por la elevación de la topografía y por haber mayor infiltración debido a la presencia de material más permeable. Abarca también la zona de Mangas, siendo el nivel del agua somero e influenciado por canales no revestidos y por los Ríos Tula y Salado. Continúa hacia el norte de Mixquiahuala en donde hay presencia de rocas calizas de la formación Doctor. Posteriormente, el flujo se desvía al oriente pasando por la región de Tepatepec hasta alcanzar la región de Actopan (Jiménez *et al.*, 1999b).

Con base en estudios geohidrológicos realizados es posible extraer de la zona 1 y 2 alrededor de 6 a 10 m³/s de agua para ser distribuida en la Ciudad de México, no obstante, la explotación debe realizarse con prudencia para conocer las respuestas del acuitardo, por lo que es factible extraer en una primera etapa 6 m³/s (Jiménez *et al.*, 2000).

1.2.3. Caracterización de la zona de explotación

Actualmente, la población del Valle del Mezquital se abastece de agua proveniente de pozos y manantiales ubicados en el Distrito de Riego 003, cuyo único acondicionamiento es la cloración. Empero, para que esta agua tenga un uso potable y pueda ser utilizada en la Ciudad de México se debe conocer más a detalle su calidad, por lo que el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó un estudio minucioso de la calidad del acuífero en el que se analizaron 276 parámetros (22 físicos; 34 metales, no metales y compuestos inorgánicos; 7 microbiológicos; 213 compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, carbonatos, pesticidas clorados, BPC's, pesticidas fosforados, trihalometanos, HTP's, toxicidad y radiactividad) pertenecientes a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994), a los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de EUA (1996), Comunidad Económica Europea (1990) y a la Organización Mundial de la Salud (1993) (Jiménez *et al.*, 1999b).

Los sitios que se establecieron para el muestreo fueron el Pozo 9 de Teocalco y la noria de Tezontepec, pertenecientes a la zona 1 y 2, respectivamente (Figura 7). En la Tabla 2 se presenta el valor promedio, mínimo, máximo y desviación estándar de los parámetros que excedieron los valores de la norma mexicana y los criterios internacionales en los dos puntos de muestreo.

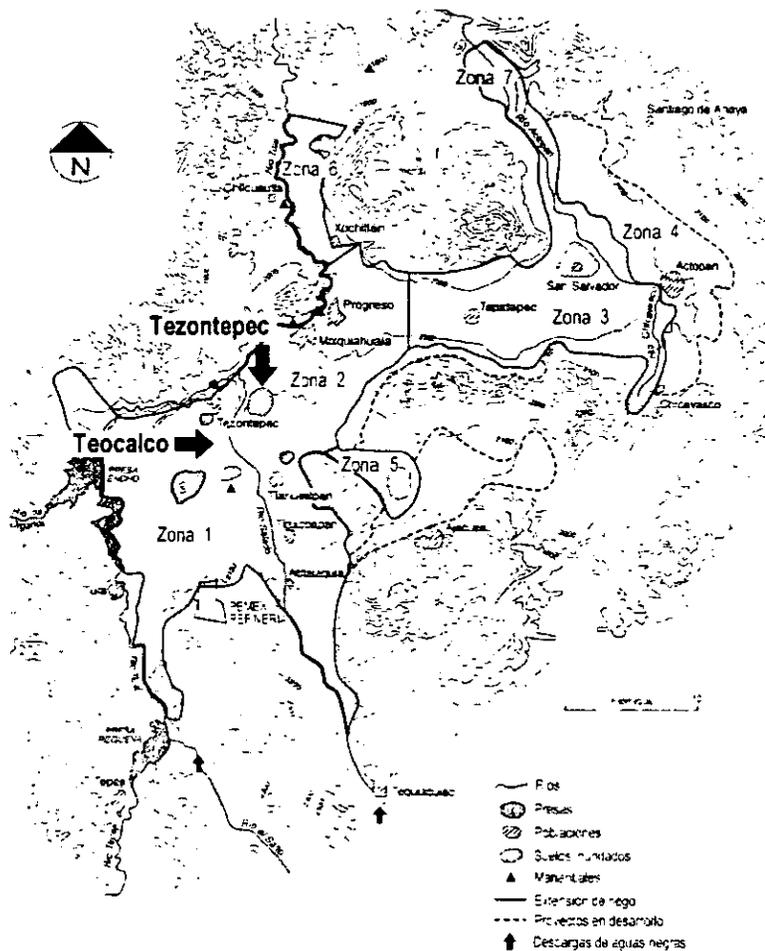


Figura 7. Sitios de muestreo en el Valle del Mezquital
(Adaptada de Jiménez *et al.*, 1999b)

Tabla 2. Parámetros que exceden la Norma Mexicana y criterios internacionales
(Adaptada de Jiménez *et al.*, 2000)

| Parámetro | Valor Máximo de Norma | | | | Pozo 9 de Teocalco | | | Noria de Tezontepec | | | Efectos que genera |
|---|-----------------------|-----------------|-------|-------|--------------------|-----|-------|---------------------|--------|-------|---|
| | NOM 127 | EPA | OMS | CEE | P ± DE | Mín | Máx | P ± DE | Mín | Máx | |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml) | 2 | 5% ¹ | 0 | 0 | 16 ± 21 | ND | 43 | 27 ± 27 | 0 | 200 | Gastrointestinales |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.3 ± 1.3 | ND | 4 | 4.2 ± 9.0 | 0 | 29 | Gastrointestinales |
| Hierro (mg/L) | 0.3 | - | 0.3 | 0.2 | NEN | NEN | NEN | 0.16 ± 0.3 | <0.003 | 0.94 | Problemas en el sistema nervioso central |
| Manganeso (mg/L) | 0.15 | - | 0.5 | 0.05 | NEN | NEN | NEN | 0.01 ± 0.02 | ND | 0.08 | |
| Mercurio (mg/L) | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 ± 0.0009 | ND | 0.002 | 0.001 ± 0.002 | ND | 0.005 | |
| Plomo (mg/L) | 0.025 | 0.015 | 0.01 | 0.05 | 0.02 ± 0.02 | ND | 0.044 | 0.02 ± 0.03 | ND | 0.08 | Efectos neurológicos y anemia principalmente en infantes |
| Sodio (mg/L) | 200 | - | 150 | 160 | 176 ± 98 | 81 | 317 | 168 ± 73 | 75 | 264 | Estético, hipertensión, problemas renales y cardiovasculares |
| Cloruros (Cl mg/L) | 250 | - | 250 | 200 | NEN | NEN | NEN | 179 ± 17 | 160 | 216 | Estético, da al agua un sabor salado o amargo, su consumo genera anorexia, pérdida de peso y deshidratación |
| Dureza Total (mg de CaCO ₃ /L) | 500 | - | - | 60 | 324 ± 37 | 285 | 376 | 452 ± 15 | 438 | 485 | Estético e incrustaciones |
| NTK (mg/L) | - | - | - | 1.0 | 1.5 ± 1.57 | ND | 6.4 | 1.6 ± 1.6 | <0.1 | 7.4 | Enfermedad del niño azul |

Tabla 2. Parámetros que exceden la norma y criterios internacionales
(Continuación)

| Parámetro | Valor Máximo de Norma | | | | Pozo 9 de Teocalco | | | Noria de Tezontepec | | | Efectos que genera |
|--|-----------------------|-----|------|-----------------|--------------------|------|------|---------------------|------|------|---|
| | NOM 127 | EPA | OMS | CEE | P ± DE | Mín | Máx | P ± DE | Mín | Máx | |
| Nitratos (mg de N-NO ₃ /L) | 10 | 10 | 11 | 11 ² | 24 ± 24 | 1.4 | 77 | 17 ± 17 | 1.4 | 56 | Enfermedad del niño azul (metahemoglobinemia) |
| Nitrógeno Amoniacal (mg de N-NH ₄ /L) | 0.5 | - | - | 0.5 | 0.7 ± 0.7 | ND | 4.4 | NEN | NEN | NEN | |
| SAAM (mg/L) | 0.5 | - | - | - | 0.2 ± 0.2 | ND | 0.6 | 0.14 ± 0.3 | ND | 0.9 | |
| Magnesio (mg/L) | - | - | - | 50 | NEN | NEN | NEN | 54 ± 17 | 28 | 83 | Deshidratación |
| Alcalinidad Total (mg de CaCO ₃ /L) | - | - | - | 49 ³ | 520 ± 191 | 385 | 942 | 511 ± 150 | 333 | 906 | |
| Boro (mg/L) | - | - | 0.3 | - | 0.55 ± 0.14 | 0.44 | 0.76 | 0.63 ± 0.1 | 0.48 | 0.72 | Toxicidad aguda y crónica, problemas renales |
| Potasio (mg/L) | - | - | - | 12 | 32 ± 4.6 | 25 | 37 | 31 ± 7 | 19 | 39 | Vómito, náuseas y problemas renales |
| Sólidos Disueltos Totales (mg/L) | 1000 | - | 1000 | 1500 | 945 ± 100 | 789 | 1054 | 1038 ± 188 | 551 | 1159 | |

NOM 127: NOM-127-SSA1-1984

EPA: Agencia de Protección Ambiental de EUA

OMS: Organización Mundial de la Salud

CEE: Comunidad Económica Europea

P±DE: Promedio + Desviación Estándar

¹ Máximo 5% de las muestras positivas de Coliformes Totales en un mes (Para los sistemas de agua que recolectan al menos 40 muestras rutinariamente por mes, máximo 1 muestra resulta positiva de Coliformes Totales) Cada muestra que contenga Coliformes Totales debe ser analizada para Coliformes Fecales, la cual debe ser exenta

² 11 mg/l de N-NO₂ = 50 mg/l de NO₃

³ 10 mg/l de Fe (II), 40 mg/l de Fe (III)

ND: No Detectado

NEN: No Excede la Norma

En el caso del Pozo 9 de Teocalco, zona 1, los parámetros que excedieron la norma mexicana fueron los coliformes totales y fecales, los nitratos y el nitrógeno amoniacal, pero en más de dos ocasiones se encontró que el valor máximo, mas no el promedio, sobrepasó la norma en los siguientes casos: mercurio, plomo, sodio, SAAM y SDT, por lo que es importante considerarlos para determinar el sistema de potabilización. Sin embargo, los estándares internacionales son más estrictos que la norma nacional, por ello, se encontró que la dureza total, el NTK, la alcalinidad, el boro y el potasio los rebasan.

En la noria de Tezontepec, zona 2. los coliformes fecales y totales, los nitratos y los sólidos disueltos totales rebasan la norma nacional. Los parámetros que superan al menos una vez la norma fueron el hierro, el manganeso, el mercurio, el plomo y el sodio. En relación con los estándares internacionales, el manganeso, los cloruros, la dureza y alcalinidad total, NTK, el magnesio, el boro y el potasio los exceden.

Por consiguiente, los resultados indican que el agua no es apta para consumo humano pues no cumple con la calidad establecida por la normatividad mexicana. Además, es importante hacer hincapié que el agua del acuífero del Distrito de Riego 003 proviene de infiltraciones de aguas residuales sin previo tratamiento, caracterizándose por presentar una acumulación de iones (sólidos disueltos totales, cloruros y sodio). Para remover estos contaminantes será necesario utilizar un proceso de tratamiento avanzado que consiste en un sistema de membranas (Jiménez *et al.*, 2000), pues permiten remover con seguridad iones y moléculas con pesos superiores a algunas decenas de gramos por mol ($<10^7$ mm).

CAPÍTULO II

Marco Teórico

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Nanofiltración y ósmosis inversa

Las membranas de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) son los procesos de membranas más utilizados para potabilizar agua salobre y salina, debido a su bajo costo y a la calidad de agua que proporcionan (Buros, 1995). Por lo general, rechazan contaminantes con tamaños superiores a 0.001 y 0.0001 μm , que se encuentran en el intervalo molecular o iónico, con pesos de 200 y 100 Daltons, respectivamente (Bucley *et al.*, y Levine *et al.*, 1998).

La NF y OI se pueden describir como un proceso de difusión que remueve sales, patógenos, precursores de subproductos de la desinfección, compuestos orgánicos sintéticos, turbidez, color, dureza, así como la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos hoy en día. La mayoría de los gases disueltos, como el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el dióxido de carbono (CO₂), pasan a través de estas membranas.

Aunque las membranas de NF y OI funcionan de la misma forma, se diferencian de acuerdo a la presión de operación, por el volumen y calidad del permeado. En la OI se utiliza una mayor presión de trabajo para generar un mayor volumen de permeado, sin embargo, su rechazo contiene una mayor concentración de sales.

2.2. Aplicaciones

En el tratamiento del agua (potabilización y depuración), las membranas fueron aplicadas sólo en situaciones muy específicas y de pequeña escala, tales como la desalación de agua de mar. Actualmente, esta tecnología ha crecido a un grado tal que existe un importante mercado que crece a un ritmo de casi el 15 % anual (AWWARF, 1998). Esto se debe, por una parte, al incremento de contaminantes complejos solubles y, por otra, a que los costos han disminuido considerablemente.

Los principales usos de las membranas de NF y OI son los siguientes:

- Tratar efluentes de procesos de lodos activados (Gagliardo, 1998)
- Tratar aguas residuales municipales e industriales para recarga de acuíferos (Ernst y Jekel, 1998)
- Reúso de efluentes en procesos industriales (Yalcin *et al.*, 1998)
- Desalar aguas salobres y de mar
- Elaborar agua para enjuague de microcircuitos
- Generar agua para productos farmacéuticos y cosméticos
- Generar agua para consumo humano
- Producir agua para bebidas gaseosas y ultrapuras
- Producir agua para fabricar hielo cristalino

2.3. Conceptos generales

2.3.1. Membrana

Las membranas semipermeables son barreras delgadas o películas de material que permiten el paso de ciertos compuestos. Son procesos continuos que presentan tres corrientes diferentes de agua: una a la entrada llamada alimentación y dos a la salida conocidas como producto y rechazo (Figura 8). El flujo de alimentación o afluente está constituido por sales disueltas, microorganismos, materia orgánica, coloides y otras impurezas. Cuando se aplica presión a este flujo el agua se disuelve en la membrana y pasa por difusión a través de ésta, pues no está dotada de poros. El agua que logra atravesar la membrana se le denomina permeado o producto, mientras que el flujo que contiene todas las impurezas que no lograron pasar se le denomina concentrado o rechazo.

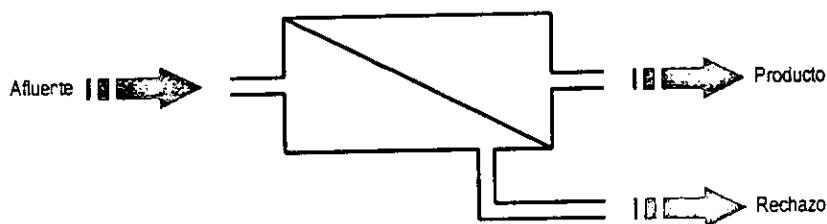


Figura 8. Membrana permselectiva

Sin embargo, hasta el momento no se ha fabricado una membrana que sea perfectamente selectiva, cuya estructura molecular deje pasar solamente agua y rechace el 100% de todas las sales disueltas, pues algunas son muy pequeñas y se disuelven y difunden a través de las membranas. Por ende, la NF y OI no generan un producto libre de sales. Un buen diseño de un módulo de OI es capaz de remover del 90 a 99% de compuestos disueltos; la NF, entre 87 y 95% (Hydraunatics, 2000).

2.3.2. Ósmosis inversa

El fenómeno de la ósmosis natural consiste en desplazar la solución menos concentrada, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas a través de una membrana semipermeable sin necesidad de aplicar ninguna fuerza externa (Figura 9a). Si a la solución más concentrada se le aplica una presión externa mayor a la osmótica, el solvente, es decir el agua, fluye en sentido inverso al proceso natural (Figura 9b). Consecuentemente, la ósmosis inversa es un proceso en el que se separa el agua de las sales disueltas mediante la filtración a través de una membrana semipermeable a una presión superior a la osmótica.

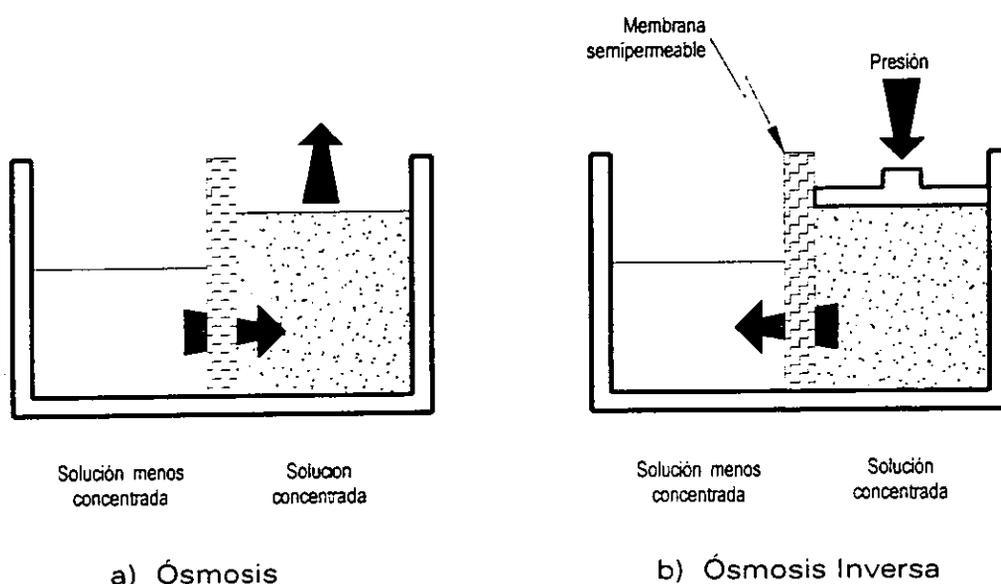


Figura 9. Mecanismos de la ósmosis

La presión osmótica² es la presión hidráulica generada por el paso de agua a través de una membrana semipermeable que separa dos soluciones de concentraciones diferentes de soluto. La transferencia ocurre de la zona de mayor concentración a la de menor, debido a la diferencia de concentración.

² La presión osmótica para un agua con concentración de 1000 mg. l. de SDT es de 0.8 kg/cm² (11.3 psi) (Reynolds y Richards, 1995).

2.3.3. Concentración de polarización

Cuando el flujo del afluente ingresa a una torre³ arrastra todo tipo de partículas en suspensión y solución (iones, sólidos e impurezas) hasta la superficie de la membrana, que al toparla, el agua empieza a permear dejando atrás a la mayoría de dichas partículas.

Si por alguna razón se incrementa la presión de operación, las partículas en solución arrastradas por el agua permeada empiezan a ser atropelladas por las que vienen atrás, a tal grado de incrementar la concentración de sales e impurezas sobre la superficie de la membrana; que puede ser superior a la concentración promedio del afluente. En caso de presentarse un flujo laminar, la concentración local sobre la superficie de la membrana, conocida como capa límite, tiende a precipitar sales y formar cristales sobre la superficie de ésta, ocasionando un taponamiento por incrustación. A este fenómeno se conoce como concentración de polarización o factor *beta* (β).

El aumento de la concentración de polarización también trae por consecuencia el incremento de los costos energéticos, pues se requieren mayores presiones de trabajo para contrarrestar el mayor gradiente osmótico en el interior de la capa límite.

De acuerdo con criterios de diseño de Fluid Systems, la concentración de polarización no debe exceder de 1.13, es decir, que la concentración de sales en la capa límite nunca sea superior al 13% de la concentración del rechazo.

La concentración de polarización se incrementa cuando se ha cerrado la válvula del rechazo más de lo debido con el fin de obtener una mayor generación de producto; por consiguiente, se corre el riesgo de incrustar las membranas irreversiblemente.

³ Una torre es un tubo o depósito que permite alojar la membrana. Ver Figura 24 (Pág. 46).

2.4. Fabricación de membranas

Las membranas de NF y OI se fabrican mediante materiales orgánicos o inorgánicos (AWWARF, 1998).

2.4.1. Membranas orgánicas

Este tipo de membranas está constituida por polímeros de celulosa y sus derivados, pero por necesidades del proceso y vida de las membranas sólo se utilizan algunas, tal es el caso de ésteres de la celulosa, poliamidas, polisulfonolas y polietersulfonolas

2.4.1.1. Ésteres de celulosa

Las membranas de ésteres de la celulosa, principalmente el di y el triacetato, tienen la ventaja de ser relativamente resistentes al cloro y, a pesar de su sensibilidad a los ácidos, a la hidrólisis alcalina, a la temperatura y a la degradación biológica. Se utilizan ampliamente para desalación, ablandamiento, desinfección y clarificación.

2.4.1.2. Poliamidas

Las poliamidas aromáticas, después del diacetato de celulosa, es el polímero usado en la desalación de agua a causa de su propiedad de selectividad al permeado y por una mejor estabilidad térmica, química e hidrofílica⁴. El grupo amida (-CO-NH-) tiene una gran sensibilidad a la degradación oxidativa y no puede tolerar exposición de cloro, aún en trazas.

⁴ Significa que el agua es capaz de asociarse con ellos.

2.4.1.3. Polisulfonolas y polietersulfonolas

Las membranas polisulfonolas y las polietersulfonolas no son hidrofílicas y tienen una tendencia relativamente alta a la adsorción, muy buena estabilidad química, mecánica y térmica. La mayor parte de este tipo de membranas se modifican mezclándolas con polímeros hidrofílicos para dotarlas de mejores propiedades de antiensuciamiento.

2.4.2. Membranas inorgánicas

Este tipo de membranas presenta la característica de poseer una mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. No obstante, tienen la desventaja de ser muy frágiles y más caras que las membranas orgánicas, por lo que su campo de aplicación está limitado a la industria química, en el tratamiento de fluidos agresivos o de alta temperatura, y en las industrias farmacéuticas y lácteas donde se precisa esterilización térmica.

Las membranas fabricadas con cerámica son las típicas inorgánicas. Son óxidos, nitruros o carburos de metales como el aluminio, zirconio o titanio.

2.5. Configuración de las membranas

En el mercado se encuentran diferentes tipos de membranas que se utilizan en la práctica industrial, sin embargo, en la producción de agua potable la configuración enrollada en espiral, tubular y fibra hueca son las más comunes para las membranas de NF y OI (AWWARF, 1998).

2.5.1. Enrollado en espiral

El módulo enrollado en espiral es una envolvente de dos membranas planas encerrando una hoja de material flexible poroso (colector de permeado) sellado por tres de sus bordes. El borde abierto está conectado y enrollado sobre un

tubo perforado que transporta el permeado (Figura 10). Varias envolventes son ensambladas y separadas una de otra por un espaciador del lado de la alimentación, el cual no sólo mantiene abierto un canal de flujo para la alimentación, sino que también cumple la muy importante función de inducir turbulencias y reducir así la concentración de polarización. El espaciador puede ser una malla o bien un separador corrugado. La alimentación fluye en el sentido del eje del tubo de permeado.

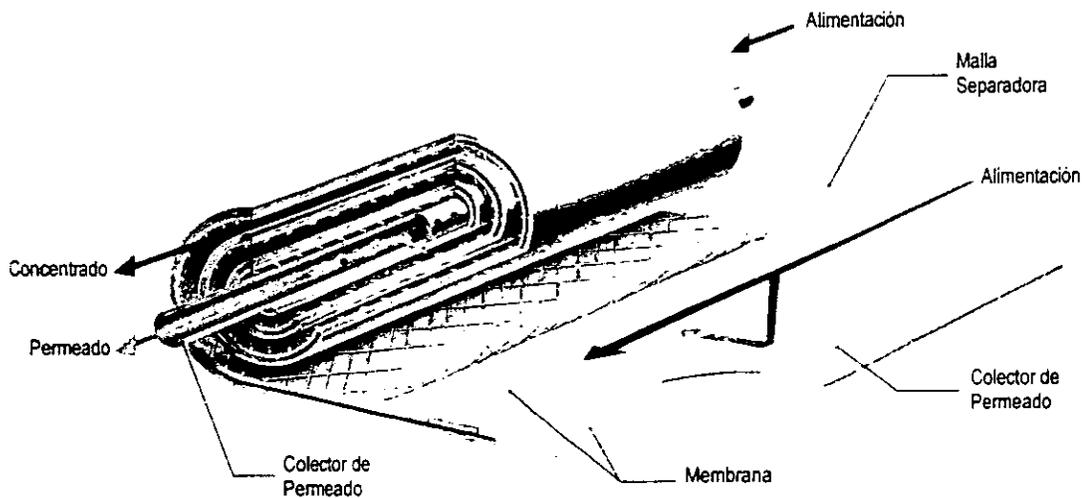


Figura 10. Enrollado en espiral (Adaptada de Nitto Denko, 2000)

El diámetro de un elemento en espiral es menor de 30 cm y puede medir hasta 1.5 m. En una sola torre pueden insertarse de dos a seis elementos. Éste tipo de módulo es muy sensible a la obstrucción debido al espaciador y no pueden utilizarse directamente con agua turbia sin pretratamiento.

2.5.2. Tubular

El módulo tubular es la configuración más simple pues la membrana se moldea sobre la pared interior de un tubo soporte poroso. Estos tubos tienen diámetros interiores que están entre los 6 a 40 mm. Los tubos individuales pueden colocarse en el interior de mangas de acero inoxidable o de PVC, o ser

agrupadas juntamente en haces de 3 a 151 tubos en un alojamiento cilíndrico con placas adecuadas.

Las membranas inorgánicas pueden disponerse sobre soportes cerámicos multicanales conteniendo hasta 19 canales de flujo paralelo (Figura 11). Cada elemento de membrana multicanal está alojado individualmente o en haces paralelos menores de 99 elementos, formando así módulos de membranas con un área superficial total de 0.2 a 7.4 m².

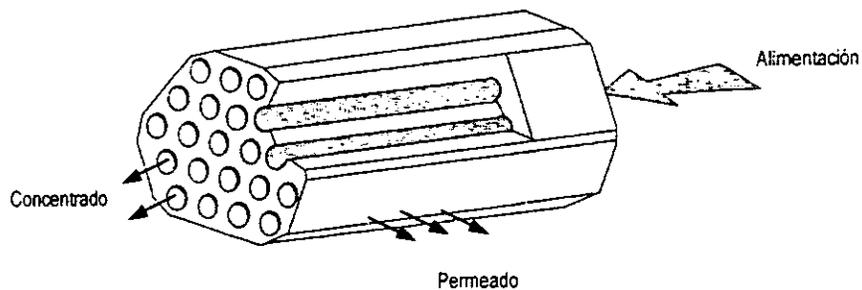


Figura 11. Tubular (Adaptada de AWWARF, 1998)

La hidrodinámica del flujo está perfectamente definida y se pueden conseguir velocidades de circulación hasta de 6 m/s en caso de necesitar un flujo de alta turbulencia. Estos módulos no necesitan una prefiltración fina de alimentación y son fácil de limpiar. Están particularmente bien adaptados para el tratamiento de fluidos muy viscosos. La desventaja principal es que tienen una baja densidad de compactado y requieren sitios considerablemente espaciosos; lo que incrementa el costo de inversión.

2.5.3. Fibra hueca

La configuración de fibra hueca está constituida por un conjunto de fibras reunidas en varios miles o millones de haces (Figura 12). El flujo de alimentación tiene lugar por dentro de las fibras (configuración interior-exterior), o bien, por fuera de las fibras (configuración exterior-interior). En el primer caso, la hermeticidad de agua entre flujos de alimentación y permeado

viene asegurada por una resina de alfarería que forma un plato plano en cada final del haz o mazo. Después del endurecimiento de la resina, el mazo se corta de tal manera que los extremos de las fibras aparecen abiertas. En la configuración exterior-interior, el haz tubular o mazo se dispone a menudo en forma de U; las fibras se sellan y hermetizan por un lado o final. Las velocidades de trabajo son normalmente bajas.

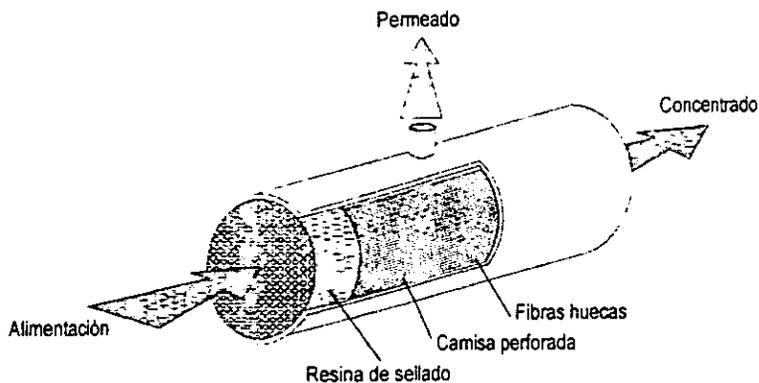


Figura 12. Fibra hueca (Adaptada de AWWARF, 1998)

2.6. Diseño

El diseño de los módulos o unidades de NF y OI están constituidos por pretratamiento, instrumentación y postratamiento.

2.6.1. Pretratamiento

El pretratamiento es específico para cada agua, del proceso empleado y difiere de un lugar a otro. En el caso de las membranas de NF y OI se requiere por dos razones totalmente diferentes e importantes: prevenir taponamientos y daños a las membranas (Figura 13). En caso de generarse un taponamiento, el equipo de membranas empieza a presentar anomalías en su funcionamiento, provocando una reducción de la generación de producto, incremento del volumen del rechazo o un aumento en la presión diferencial (ΔP) durante la

operación. Cuando se presentan daños se genera un mayor volumen de producto con una alta concentración de sales.

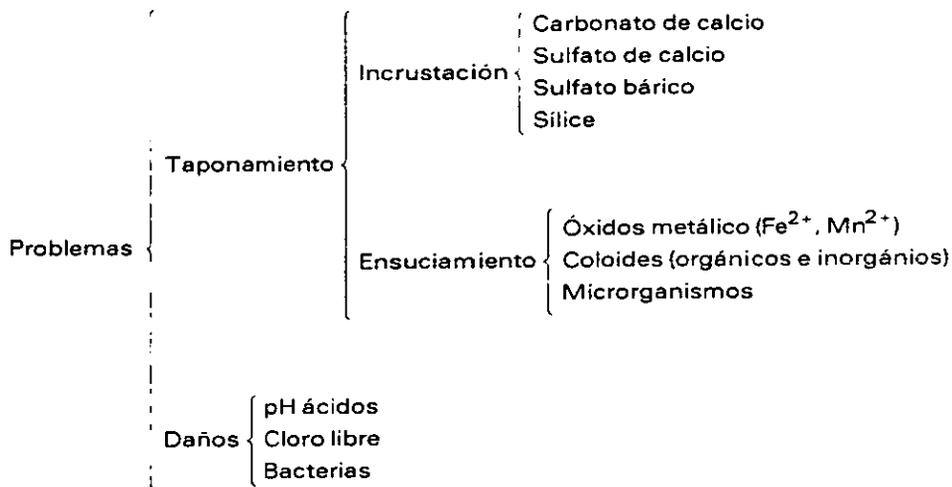


Figura 13. Problemas que afectan el rendimiento de las membranas
(Adaptada de Jiménez, 1999a)

2.6.1.1. Incrustación

Las incrustaciones se presentan cuando se forman especies que exceden la concentración de polarización al cambiar los flujos a un comportamiento laminar, formándose una capa impermeable ultradelgada sobre las membranas.

El primer síntoma de la incrustación es una reducción del rendimiento⁵ de la unidad de membranas o un aumento en la presión de operación. Esto ocurre porque las capas de incrustación, aunque son delgadas, son muy impermeables y ofrecen gran resistencia al paso del permeado. Si no se detecta y corrige oportunamente cualquiera de estos problemas, el depósito de sales incrustantes en las últimas membranas del tren de tratamiento, las cuales están expuestas al rechazo más concentrado, puede crecer lo suficiente y progresar lentamente hacia las primeras membranas. Esto ocasionará que la

⁵ El rendimiento de la unidad de membranas está asociado con la generación de producto.

presión diferencial se incremente, a tal grado de dañar los elementos por deformación o fisuramiento.

Las incrustaciones son ocasionadas principalmente por el carbonato de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario y sílice, debido a la baja solubilidad que tienen. En la Tabla 3 se presenta la calidad que debe tener el agua de alimentación para prevenir la formación de incrustaciones en las membranas de NF y OI.

Tabla 3. Calidad del agua para evitar la formación de incrustaciones
(Jiménez *et al.*, 1999a)

| Parámetro | Valor |
|---|--|
| Índice de Saturación de Langelier ISL (SDT <5000 mg/L) | <1 con antincrustante <0 sin antincrustante |
| Índice de Saturación de Davis ISD (SDT >5000 mg/L) | <0.5 con antincrustante <0 sin antincrustante |
| Bario | <0.1 mg/L |
| Sílice | <60 mg/L |

Para controlar las incrustaciones se pueden emplear tres métodos: adición de ácido, ablandadores y adición de antincrustante.

a) Adición de ácidos

Para eliminar las incrustaciones se agrega ácido sulfúrico al agua de alimentación con el fin de transformar los iones carbonatos a bicarbonatos y ácido carbónico. Pero, se debe tener cuidado con las membranas de poliamida pues no soportan un pH inferior a 3.

b) Ablandadores

Las incrustaciones de carbonato de calcio también se previenen mediante precipitación o ablandamiento con cal, soda cálcica (Na_2CO_3), cristalización en gránulos con soda cáustica y resinas de intercambio de cationes (Romero, 1999).

c) Adición de antincrustantes

Los antincrustantes comercialmente disponibles se usan para controlar los iones metálicos de la alimentación por complejación. Se recomienda utilizar hexametáfosfato de sodio. Es importante mencionar que los antincrustantes no detienen el proceso de cristalización, sino que lo hace más lento.

2.6.1.2. Ensuciamiento

El ensuciamiento es resultado de la depositación de sólidos suspendidos, microorganismos, materia orgánica o material coloidal sobre la superficie de las membranas, generando una obstrucción física. Si el problema del ensuciamiento no se corrige oportunamente se presentarán presiones diferenciales excesivas hasta dañar la membrana mediante deformación o por fisuramiento.

Al contrario de la incrustación, el ensuciamiento normalmente comienza por el extremo de la alimentación y progresa hacia la parte posterior del sistema; a excepción del ensuciamiento por sedimentación de materia coloidal, lo cual suele ocurrir en las últimas membranas y se distingue fácilmente de la incrustación, pues en vez de cristales blancos o amarillos se observa un polvo coloidal.

En el caso del crecimiento microbiológico, si no se controla se puede extender y ensuciar todo el sistema, pues una biopelícula atrae sólidos y acelera el problema de ensuciamiento.

En la Tabla 4 se presentan los lineamientos generales para minimizar el ensuciamiento de las membranas de NF y OI.

Tabla 4. Calidad del agua para minimizar el ensuciamiento
(Hydranautics, 2000, y Jiménez *et al.*, 1999a)

| Parámetro | Valor |
|----------------------|-----------------|
| IDS ₁₅ | <5 |
| Turbiedad | <1 UTN |
| Hierro | <0.05 mg/L |
| Manganeso | <0.5 mg/L |
| Sulfuro de hidrógeno | <0.1 mg/L |
| Orgánicos | <10 mg/L de COT |

El Índice de Densidad de Sal (IDS) es el índice de ensuciamiento y está generalmente relacionado con la turbiedad del agua, pues al ser alta el ISD es más elevado. El ISD no debe exceder de 5 ya que las membranas se tapan rápidamente (Hydranautics, 2000).

El hierro y el manganeso se incluyen como sólidos suspendidos pues aunque entran en forma soluble, se oxidan y depositan en la superficie de las membranas en forma de sólidos. La oxidación del metal cataliza también la oxidación de la membrana provocando daños irreversibles. Asimismo, el sulfuro de hidrógeno (H₂S) con facilidad se oxida a azufre coloidal y se adhiere a la superficie de la membrana. El oxígeno disuelto del agua precipita el azufre casi tan rápido como la exposición a cloro.

El contenido de orgánicos, medido como Carbón Orgánico Total (COT), debe mantenerse al mínimo para prevenir el ensuciamiento con moléculas orgánicas y para minimizar el crecimiento de microorganismos.

Para controlar el ensuciamiento de las membranas de NF y OI se pueden emplear los siguientes procesos:

- Coagulación y floculación
- Clarificación
- Filtración
- Carbón activado
- Oxidación en arena verde de manganeso
- Cloración
- Biocidas

Los agentes de coagulación y floculación se agregan al agua para crear flóculos de grandes dimensiones y masa, que después son removidos por sedimentación seguida de filtración con arena.

Los filtros de carbón activado son usados para reducir los compuestos orgánicos y remover el cloro con eficiencias del 95 y 100%, respectivamente (AWWARF, 1998).

Mediante la oxidación y filtración con arena verde de manganeso, el hierro y el manganeso son removidos primero por oxidación del metal y después por eliminación física del precipitado en un lecho filtrante. Si las concentraciones de hierro son superiores a 1 mg/L, del filtrado con arena verde de manganeso pueden seguir filtros multimedia para darle un mayor pulimiento al agua. El riesgo de usar arena verde de manganeso como pretratamiento en NF y OI son los oxidantes residuales que pueden degradar las membranas de película fina composite si no son previamente removidos.

La cloración es un método utilizado para minimizar el ensuciamiento de las membranas por microorganismos. Su desventaja es que dañan las membranas de composite, por lo que debe declorarse el agua antes de ser alimentada.

Los biocidas son recomendados para membranas de composite. Se usan junto con la cloración para prevenir el crecimiento de microorganismos.

2.6.1.3. Daños a las membranas

El daño a las membranas se debe al ataque químico o bacteriano, cuyos síntomas son totalmente opuestos a los que se presentan en el ensuciamiento o incrustación. Estos daños afectan irreversiblemente a la capa de la membrana formando pequeños orificios por donde se fugan las sales y el agua.

El daño inicia en las primeras membranas del sistema y empeora gradualmente hacia las membranas ubicadas en la descarga, ocasionando un decremento en la presión de operación y un incremento progresivo tanto de los sólidos disueltos totales (SDT) como del volumen de producto generado; en el caso de los SDT, la concentración en el producto puede ser igual o superior a la del afluente.

Para prevenir el daño de las membranas por un afluente con pH ácido puede emplearse alguna solución alcalina para elevarlo al requerido por la membrana. En caso de presentarse cloro libre puede utilizarse un filtro de carbón activado. Si el problema son las bacterias será necesario emplear algún biocida.

2.6.2. Instrumentación

Las plantas de NF y OI son procesos altamente automatizados debido a sus características físicas. El número de bombas y válvulas así como su operación son muy importantes, por lo que necesitan numerosos sensores para operar automáticamente. Entre los instrumentos para el proceso se tienen:

- Medidores de caudal
- Medidores de presión
- Válvulas de alivio de presión
- *Switch* de paro/arranque
- Sensores de calidad del agua (turbiedad, conductividad, pH, temperatura u otros parámetros)
- Sensores de enjuague (*timers*)

2.6.3. Postratamiento

El postratamiento está constituido por varias operaciones diferentes, su elección y secuencia está en función de la calidad del permeado y del criterio del diseñador. Las más comunes son: remoción de sulfuro, recuperación de alcalinidad y desinfección.

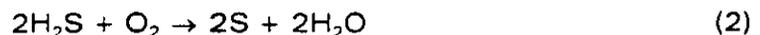
a) Remoción de sulfuro de hidrógeno

Es común que el agua subterránea que es empleada para alimentar membranas de NF y OI contengan sulfuro de hidrógeno (H_2S). Sin embargo, ni el proceso convencional de tratamiento, ni el de membranas lo eliminan. La adición de productos químicos y la aireación son los dos métodos para hacerlo.

La adición de productos químicos consiste en dosificar cloro al agua para que reaccione con el sulfuro de hidrógeno y lo oxide a azufre coloidal. La reacción que se lleva a cabo se muestra a continuación:



La aireación es un proceso que permite el contacto del aire con el agua, con el fin de transferir moléculas de oxígeno (O_2) al líquido para oxidar el sulfuro de hidrógeno a azufre coloidal, tal y como se muestra en la reacción siguiente:



b) Recuperación de alcalinidad

Una vez que el dióxido de carbono (CO_2) atraviesa las membranas, ya que la NF y OI no logran removerlo, empieza a reaccionar con los H^+ del agua permeada para formar ácido carbónico (H_2CO_3). Es decir:



Esta reacción origina que el producto presente un pH cercano a 4, cuya acidez puede ocasionar corrosión en el sistema de conducción o distribución de agua, además de no cumplir con la normatividad mexicana para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

Consecuentemente, es necesario elevar el pH mediante la recuperación de alcalinidad, la cual consiste en dosificar la cantidad de base necesaria para transformar el ácido carbónico en bicarbonatos (HCO_3).

c) Desinfección

Las membranas de NF y OI remueven la mayoría de microorganismos. Sin embargo, como no es fácil mantener condiciones estériles en la zona de descarga del permeado, los microorganismos pueden desarrollarse. Para evitar la proliferación es necesario adicionar cloro para que haya un remanente en la distribución del permeado.

2.7. Limpieza de membranas

Durante la operación, el equipo de membranas está expuesto al taponamiento, el cual se manifiesta mediante la reducción progresiva del rendimiento del equipo de membranas. Ejemplos comunes de tales problemas son las incrustaciones por carbonato de calcio, sulfato de calcio, óxidos metálicos, revestimientos sílicos y depósitos orgánicos o biológicos. Si el taponamiento es progresivo y no es controlado al inicio, el rendimiento del equipo disminuirá en un tiempo relativamente corto.

La remoción del taponamiento se realiza mediante un lavado. En la Tabla 5 se provee un resumen de los efectos esperados por el taponamiento, mientras que la Tabla 6 muestra las soluciones de estos problemas.

Tabla 5. Síntomas del ensuciamiento de membranas (Hydranautics, 2000)

| Taponamiento | Síntomas generales |
|--|--|
| Precipitados de calcio (carbonatos y fosfatos) | Disminución de la concentración de SDT en el rechazo y el moderado incremento del ΔP entre la alimentación y el rechazo Decremento en la generación de producto ^a |
| Óxido hidratado (hierro, manganeso, níquel, cobre, etc.) | Una rápida disminución de la concentración de SDT en el rechazo y rápido incremento del ΔP entre la alimentación y el rechazo Rápido decremento de la generación de producto ^a |
| Coloides mezclados (generalmente encontrado en el rechazo) | Reducción del volumen del rechazo ^b y un leve a moderado incremento del ΔP entre la alimentación y el rechazo Decremento en la generación de producto ^a |
| Sulfato de calcio | Reducción significativa del rechazo y un moderado aumento del ΔP entre la alimentación y el rechazo Ligera disminución en la generación de producto |
| Depósitos orgánicos | Posible disminución del rechazo y un aumento gradual en el ΔP entre la alimentación y el rechazo. Disminución gradual en la generación de producto |
| Ensuciamiento bacterias | Posible disminución del rechazo y un marcado aumento en el ΔP entre el producto y el rechazo Marcada disminución en la generación de producto |

^a Para una torre el ΔP máximo es de 0.7 kg/cm² (10 psi). En caso de ser mayor, se debe parar la unidad y realizar un lavado a las membranas

^b Cuando la reducción del producto o rechazo sea superior de 10 al 15%, se debe detener la unidad y realizar un lavado a las membranas

Tabla 6. Recomendaciones de reactivos para la limpieza (Hydranautics, 2000)

| Taponamiento | Ingredientes | Cantidad | pH |
|--|--|--|--------|
| Precipitados de calcio y óxidos hidratados | Ácido cítrico Agua del producto | 7.7 kg (17 lb) 379 L (100 gal) | 3 a 10 |
| Coloides mezclados, sulfato de calcio, depósitos orgánicos y ensuciamiento bacterias | Tripolifosfato de sodio Tetrasodio EDTA Agua del producto | 7.7 kg (17 lb) 3.16 kg (7 lb) 379 L (100 gal) | 3 a 10 |
| Ensuciamiento bacterias fuerte | Tripolifosfato de sodio Dodecilbeneno sulfonato de sodio Agua del producto | 7.7 kg (17 lb) 0.97 kg (2.13 lb) 379 L (100 gal) | 3 a 10 |

CAPÍTULO III

Metodología Experimental

CAPÍTULO III

Metodología Experimental

3.1. Localización

De acuerdo al capítulo I, la zona 1 y 2 del Distrito de Riego 003 son los acuíferos recomendados para extraer agua y distribuirla a la Ciudad de México. En estos acuíferos se encuentran ocho sitios en donde se pueden realizar pruebas a nivel piloto (seis pozos de extracción y dos manantiales). En la zona 1 se encuentran los pozos de Zayula, Tepetitlán, Mangas, Teocalco (Pozo PEMEX 7 y 9) y el manantial de Cerro Colorado; en la zona 2, el pozo de Tlaxcoapan y el manantial de Tezontepec. En la Figura 14 se muestra la ubicación de los pozos y de los manantiales.

Cabe señalar que esta tesis trató únicamente lo concerniente a las pruebas piloto del manantial Cerro Colorado (Figura 15).



Figura 15. Manantial Cerro Colorado

3.2. Descripción del proceso de tratamiento con membranas

Con objeto de realizar los estudios, se diseñó una planta de tratamiento piloto móvil de operación semicontinua y con flexibilidad suficiente para operar con diversos arreglos. La planta piloto presentó el diagrama de flujo de la Figura 16 y estaba constituida por cinco módulos principales: alimentación de agua cruda, pretratamiento (filtro multimedia y filtro de cartucho), unidad de membranas (nanofiltración, ósmosis inversa y nanofiltración-ósmosis inversa) y sistema de lavado de membranas.

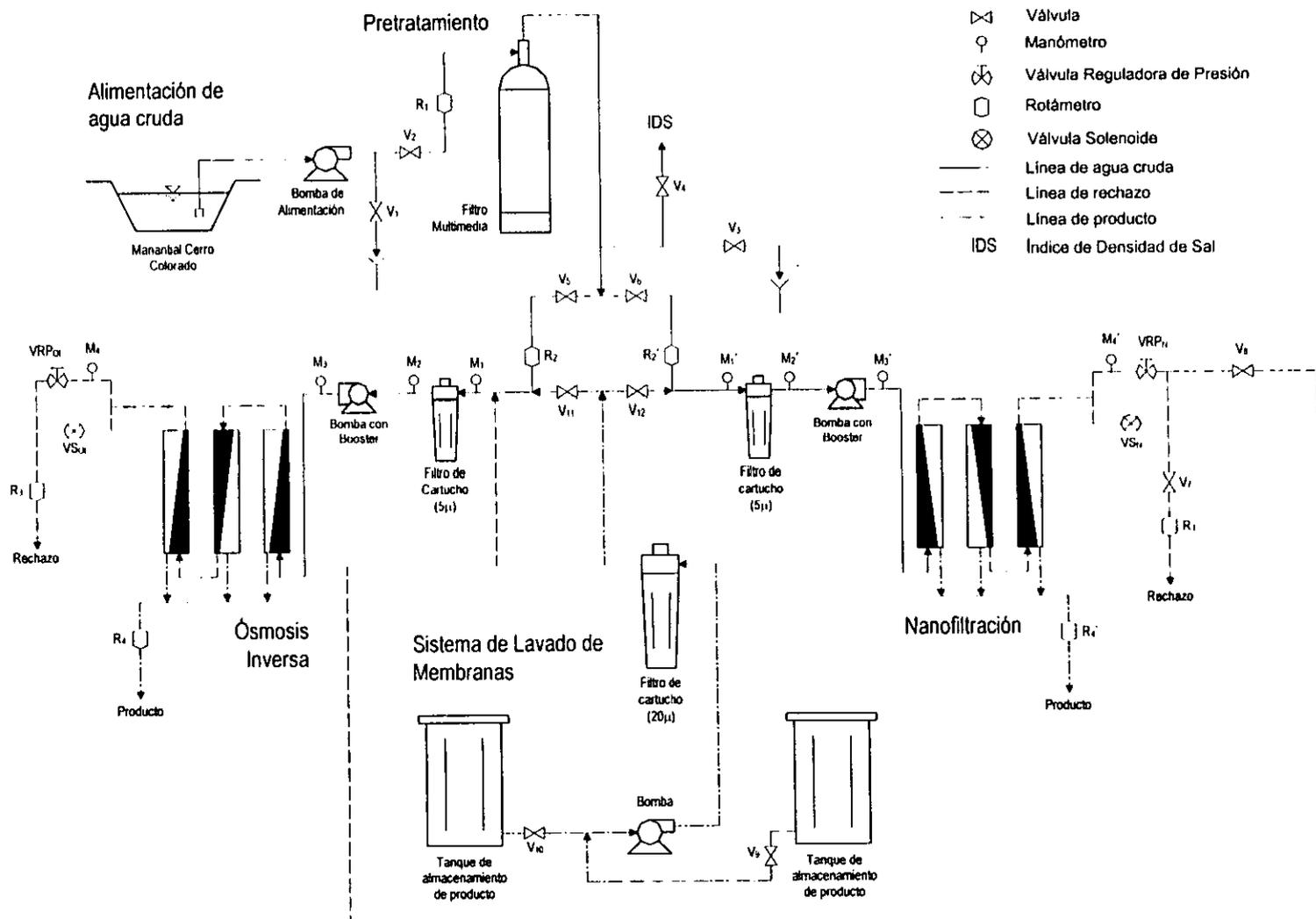


Figura 16. Diagrama de flujo de la planta piloto

3.2.1. Alimentación de agua cruda

La alimentación de agua cruda estaba constituida por una manguera 5 cm (2 plg) de diámetro con pichancha en el punto de succión, una bomba centrífuga Franklin Electric de 2 HP con succión axial, dos válvulas y un rotámetro con capacidad de 75 LPM.

El agua se extrajo del manantial Cerro Colorado mediante la bomba y fue conducida hacia el pretratamiento. La bomba tenía la capacidad de alimentar un caudal de 120 LPM, sin embargo, este flujo resultó muy elevado para operar el pretratamiento pues aceptaba menos de 70 LPM. Ello obligó a colocar en la salida de la bomba dos válvulas (V_1 y V_2) y un rotámetro (R_1). La V_1 desalojó el excedente a una distancia de 10 m aguas abajo del punto de extracción mientras que la V_2 y el R_1 permitieron controlar el caudal de entrada al pretratamiento.

La obra de toma se ubicó a 3 m de la orilla del manantial y a 1.5 m de profundidad con el fin de no permitir la extracción de material sedimentado o sólidos suspendidos que puedan afectar el proceso de tratamiento de agua. La Figura 17 y 18 muestra la obra de toma, la bomba de alimentación de agua cruda, las válvulas reguladoras de flujo y el rotámetro.

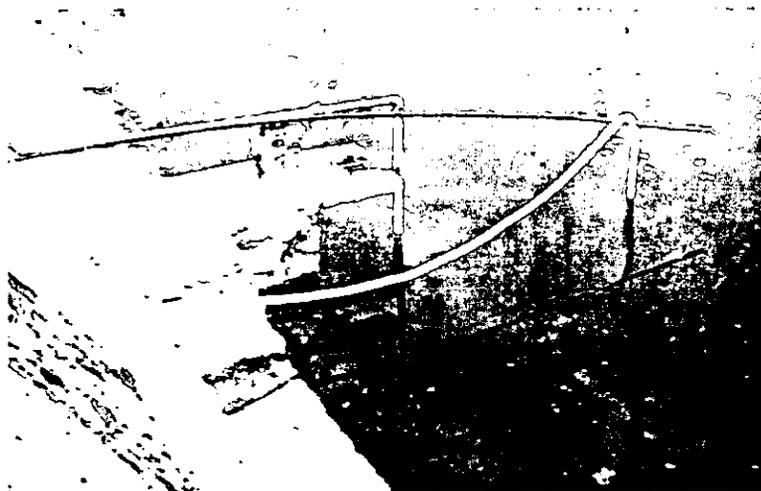


Figura 17. Obra de toma



Figura 18. Bomba, válvulas y rotámetro

3.2.2. Pretratamiento

Para proteger y prolongar la vida de las membranas, se instaló una unidad de pretratamiento que consistió en un filtro multimedia y un filtro de cartucho.

3.2.2.1. Filtro multimedia

El filtro (Figura 19), que utilizó como fuerza impulsora la presión ejercida por el sistema de alimentación de agua cruda generando una filtración rápida con dirección de flujo descendente, fue un cilindro de fibra de vidrio herméticamente cerrado con diámetro y altura de 20 y 89 cm respectivamente, en cuyo interior alojó granate, arena y antracita como medio filtrante.

El agua cruda ingresó por un conducto horizontal ubicado en la parte superior del filtro y se distribuyó uniformemente sobre el medio filtrante en donde las partículas con diámetro superior a $10\ \mu\text{m}$ fueron retenidas mientras que el líquido, al atravesar el medio poroso, cayó en un falso fondo localizado en la parte inferior del filtro. En el interior del falso fondo se encontraba una tubería que permitió desalojar el agua de forma ascendente. El sistema de filtración tenía conexiones de 5 cm (2 plg) de diámetro y para obtener una buena operación debió ingresar un caudal máximo de 60 LPM.

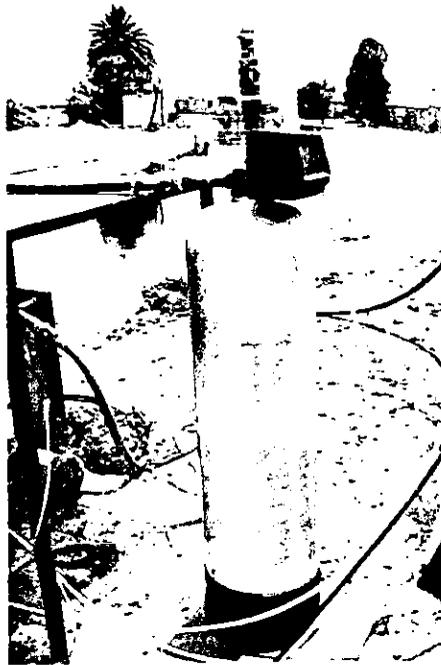


Figura 19. Filtro multimedia

El filtro estaba constituido por un sistema de lavado automático en donde se estableció el periodo de filtración y el tiempo del lavado. Como punto de partida se establecieron lavados al medio filtrante cada 2 días de operación durante 15 minutos empleando un caudal de 34 LPM. En la Figura 20 se presenta el sistema de autolavado.

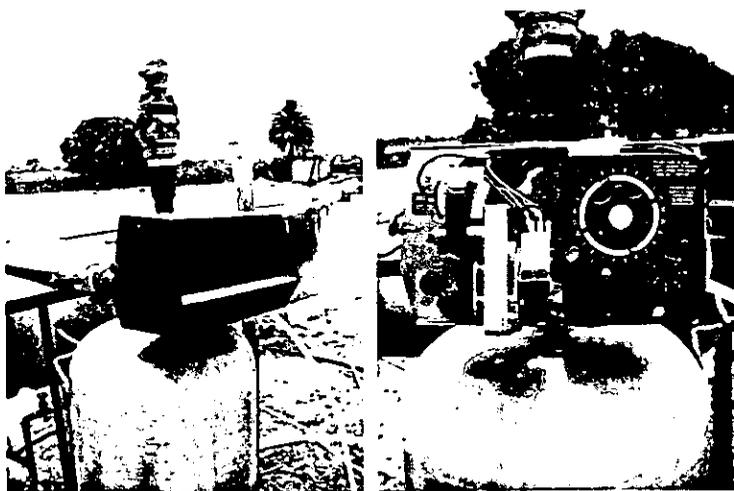


Figura 20. Sistema de lavado automático del filtro multimedia

Después del pretratamiento se encontraban cuatro válvulas (V_3 , V_4 , V_5 y V_6) y dos rotámetros (R_2 y R_2'). La V_3 se empleó para desalojar el excedente de agua que salió del pretratamiento, la V_4 para determinar el Índice de Densidad de Sal (IDS), la V_5 y V_6 para regular la entrada del agua hacia la unidad de ósmosis inversa o nanofiltración, y los rotámetros para cuantificar el caudal que ingresaba a estas dos unidades.

3.2.2.2. Filtro de cartucho

Una vez filtrada el agua se dirigió a un filtro de cartucho desechable, cuya función fue remover partículas con tamaño superior a $5\ \mu\text{m}$ (Figura 21).

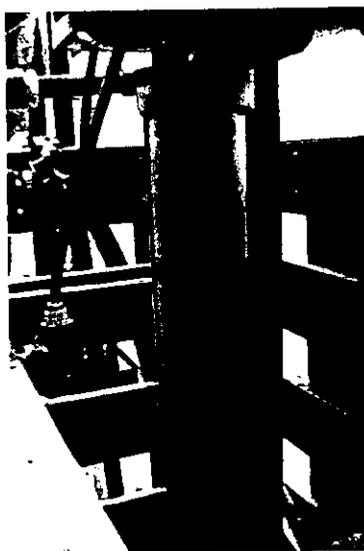


Figura 21. Filtro de cartucho

El filtro de cartucho fue de polietileno y presentó una sección cilíndrica con diámetro y altura de 5 y 51 cm, respectivamente. En su interior se encontraba un medio filtrante sintético (cartucho) cuyo material fue polipropileno con intersticios de $5\ \mu\text{m}$ (Figura 22).



Figura 22. Medio filtrante del filtro de cartucho

El filtro de cartucho incluyó dos manómetros, uno a la entrada y otro a la salida (M_1 y M_2 , ver Figura 16), los cuales tuvieron la función de registrar la caída de presión (ΔP) por taponamiento del filtro. Cuando el ΔP sea superior a 0.4 kg/cm^2 (6 psi) deberá cambiarse el cartucho o enjuagarse con producto. La entrada y salida del prefiltro presentaron un diámetro de 2.5 cm (1 plg).

3.2.3. Unidad de membranas

La unidad de membranas consistió en ósmosis inversa (OI), nanofiltración (NF), y nanofiltración-ósmosis inversa (Figura 16). Las dos primeras presentaron un arreglo en paralelo; en el tercer caso, arreglo en serie (NF+OI), la unidad de OI se alimentó con la mezcla del rechazo de la NF y el agua filtrada del manantial.

Como los módulos de ósmosis inversa y nanofiltración funcionaron de la misma forma, aunque difirieron del tipo de membrana y del tipo de *booster* acoplado a la bomba, se describirá solamente el funcionamiento de la unidad de OI.

En la Tabla 7 se muestran las principales características de las membranas utilizadas en la unidad de OI y NF.

Tabla 7. Principales características de las membranas
(Hydranautics, 2000)

| Características | Nanofiltración | Ósmosis Inversa |
|--|---|---|
| Tipo de membrana | ESPA3-4040 | ESPA1-4040 |
| Eliminación de la sal | 98 % | 99 % |
| Conversión Máxima (Producto:Rechazo) | 5:1 | 5:1 |
| Tipo de configuración | Espiral | Espiral |
| Tipo de Polímero | Composite poliamida | Composite poliamida |
| Área nominal | 7.9 m ² (85 ft ²) | 7.9 m ² (85 ft ²) |
| Longitud | 101.6 cm (40 plg) | 101.6 cm (40 plg) |
| Presión Máxima de operación | 12 kg/cm ² (170 psi) | 16.5 kg/cm ² (230 psi) |
| Caída de Presión máxima por cada torre | 0.7 kg/cm ² (10 psi) | 0.7 kg/cm ² (10 psi) |
| Afluente máximo | 60.6 LPM (16 GPM) | 60.6 LPM (16 GPM) |
| Concentración máxima de cloro en el afluente | 0.1 ppm | 0.1 ppm |
| Temperatura máxima en el afluente | 45 °C (113 °F) | 45 °C (113 °F) |
| pH en el afluente | 3 a 10 | 3 a 10 |
| Turbiedad en el afluente | < 1 NTU | < 1 NTU |
| IDS | < 5 | < 5 |

3.2.3.1. Ósmosis Inversa

El módulo de OI estaba constituido por una bomba Goulds Pumps con protección térmica de 2 HP (Magnetek de 1 HP para la NF) con *booster* de 0.7 kg/cm² (10 psi) en la descarga (0.35 kg/cm² en la NF), tres torres cilíndricas de

10 cm de diámetro y 1 m de altura, dos manómetros, dos rotámetros, un panel de control de flujo y de energía, una estructura de montaje, tuberías y accesorios.

Una vez que el agua salió del filtro de cartucho se dirigió a una bomba que tenía adaptado un *booster*, el cual tuvo la función de aumentar la presión en el afluente de las membranas (Figura 23).



Figura 23. Bomba con *booster*

En la salida del *booster* estaba conectado un manómetro (M_3) para medir la presión de descarga en la bomba; para que funcionara este sistema debió presentarse una presión mínima de 1.4 kg/cm^2 (20 psi). Una vez alcanzada la presión necesaria se activaba la bomba, dirigiendo el caudal hacia la primera torre cilíndrica. Las torres fueron de acero al carbón y en su interior se alojaron las membranas. En la Figura 24 se muestra la unidad de ósmosis inversa constituida por tres torres, la primera, de acuerdo al sentido del flujo del agua, se encontraba a la derecha, la segunda en el centro y la tercera a la izquierda.

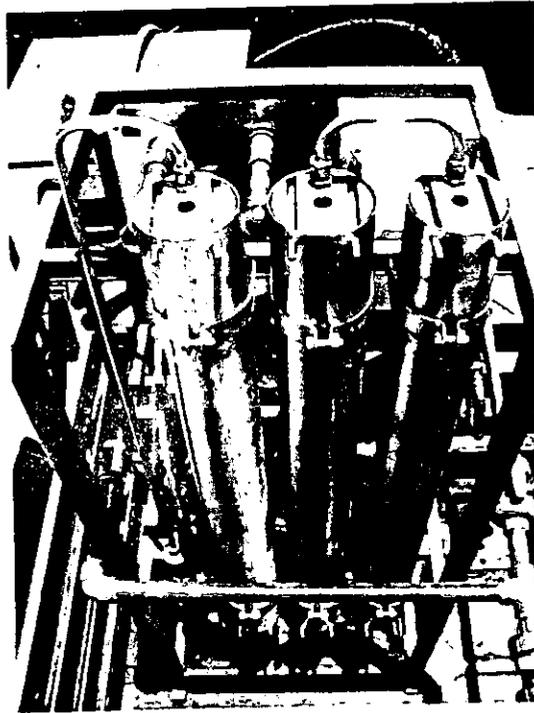


Figura 24. Unidad de ósmosis inversa constituida por tres torres de membranas

El líquido ingresó por la parte inferior de la primera torre y fue forzado a penetrar la membrana para generar producto. Sobre el eje de la membrana había un conducto que permitió desalojar el permeado por la parte inferior central de la torre, que posteriormente fue dirigido a una tubería recolectora de producto; mientras que la mezcla acuosa que contenía los iones que no lograron atravesar la membrana (rechazo) se desalojó por la parte superior.

El rechazo de la primera membrana se dirigió a la segunda torre e ingresó por la parte superior de esta última, generando nuevamente permeado así como rechazo. El permeado se dirigió a la tubería recolectora de agua producto localizada en la parte baja de la torre, mientras que el rechazo fue conducido a la tercera torre por la parte inferior.

En la última torre, al igual que las membranas anteriores, se volvió a generar permeado y rechazo. El permeado salió por el extremo inferior y el rechazo por el extremo superior.

En la salida del rechazo del módulo de membranas se localizaba un manómetro (M_4) que permitió medir la presión de operación de las membranas, además se encontraba un rotámetro (R_3) que medía el caudal del rechazo generado. La presión de operación fue controlada por medio de una válvula reguladora de presión (VRP_{01}), localizada en la salida del rechazo de la tercera torre.

Finalmente, para medir el producto generado la unidad contaba con un rotámetro (R_4) en el efluente del módulo de membranas.

3.2.3.2. Panel de control

El panel de control fue tipo *Nema* de 60x60 cm y estaba formado por dos rotámetros Blue & White con capacidad de 38 LPM, cuatro carátulas de manómetros, una válvula reguladora de presión (VRP_{01}), dos carátulas digitales para medir pH y conductividad, un arrancador, un *switch* de presión y un *timer* (Figura 25).

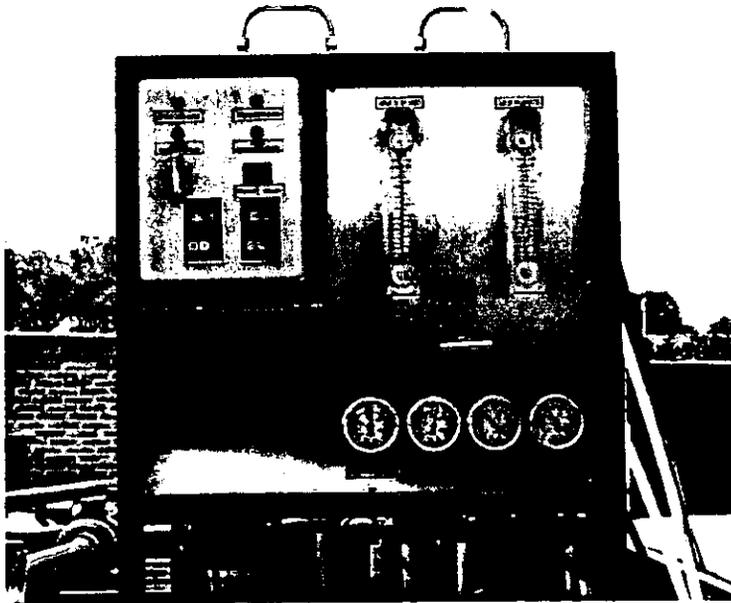


Figura 25. Panel de control

Los rotámetros (R_3 y R_4) fueron de PVC con flotador de acero inoxidable y se empleaban para medir tanto el flujo del producto como del rechazo, así como el flujo del enjuague y lavado de las membranas. Los manómetros se utilizaron para medir la presión diferencial del prefiltro (M_1 y M_2), la presión en la descarga de la bomba (M_3) y la presión a la salida de las membranas (M_4). La válvula reguladora de presión (VRP) se utilizó para controlar la presión de operación y el flujo del rechazo.

Tanto los arrancadores como los *switch* se instalaron para proteger las bombas cuando se presentara una baja presión ($<1.4 \text{ kg/cm}^2$), deteniéndose el sistema automáticamente. El *timer* se empleaba para ajustar el periodo y la duración del *flushing*.

El equipo de membranas contaba con un sistema automático llamado *flushing* que tenía la función de realizar un enjuague a la superficie de la membrana mediante un alto flujo a baja presión. Cuando se activaba se abría inmediatamente la válvula solenoide (VS) permitiendo el paso del torrente del afluente filtrado. Este flujo fue impulsado por la bomba de la unidad de membranas con el fin de desprender el ensuciamiento o incrustación de las membranas. El agua generada durante el *flushing* se consideró como parte del rechazo debido a las concentraciones de contaminantes que presentaba. Además, durante esta operación también se generó un pequeño caudal de producto que en ocasiones fue despreciable.

3.2.3.3. Estructura de montaje

La estructura para el montaje de los equipos fue de acero estructural soldado, cuyo diseño fue adecuado para instalar el equipo de membranas y accesorios, así como para montarlo en un vehículo.

3.2.3.4. Tuberías, válvulas y accesorios

La tubería, válvulas y accesorios empleados fueron de PVC tipo industrial para cementar o roscar, a excepción de la tubería que conecta el rechazo de la NF a

la OI, que fue de cobre. La tubería principal de alimentación y la de rechazo tenía 5 cm (2 plg) de diámetro, mientras que la línea de permeado y de alimentación a las membranas fueron de 2.5 cm (1 plg) y 1.2 cm (½ plg), respectivamente.

3.2.4. Lavado de membranas

Para realizar el lavado a las membranas se contaba con dos tanques de polietileno de 200 L de capacidad para almacenar agua del permeado, una bomba centrífuga de acero inoxidable Siemens de 1.5 HP y un filtro de cartucho de polietileno de 5 cm de diámetro y 21 cm de largo con medio filtrante de polipropileno con intersticios de 20 µm. En la Figura 26 se muestra el sistema de lavado de membranas.



Figura 26. Sistema de lavado de membranas

3.2.5. Vehículo para acoplar la planta piloto

Se instaló la planta piloto en la plataforma de una camioneta NISSAN modelo 99, con capacidad de 1 ton, para tener la posibilidad de trasladarla a diferentes

sitios. En la Figura 27 se presenta una imagen del vehículo con la planta piloto montada.

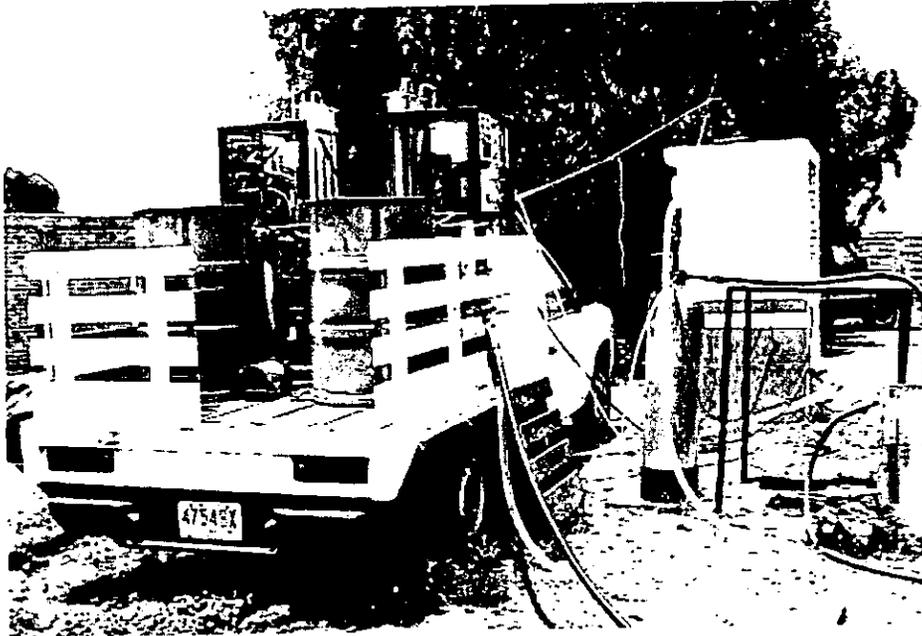


Figura 27. Vehículo para trasladar la planta piloto

3.2.6. Laboratorio de campo

Para llevar a cabo pruebas de laboratorio *in situ* fue necesario adaptar un remolque, el cual puede trasladarse fácilmente ya que presenta un sistema de arrastre en la parte delantera (Figura 28 y 29). En la Tabla 8 se presentan las principales características del remolque.

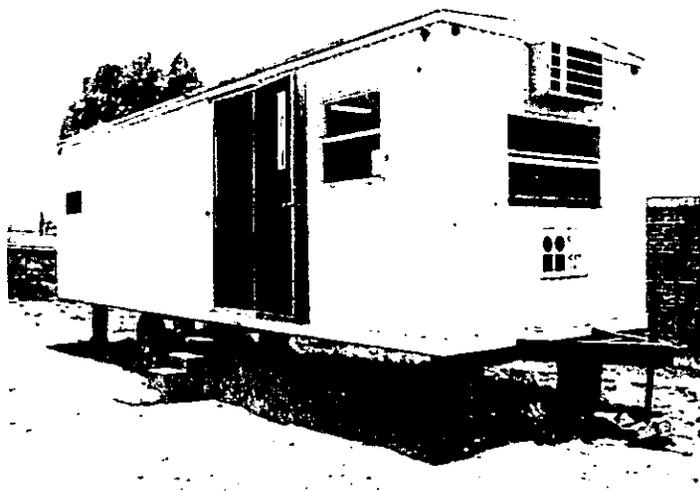


Figura 28. Laboratorio de campo



Figura 29. Análisis del agua en el laboratorio de campo

Tabla 8. Características generales del remolque

| | |
|---------------|---|
| Piso | Metálico con desagüe |
| Dimensiones | |
| Altura | 1.9 m |
| Ancho | 2.44 m |
| Largo | 8.54 m |
| Piso | Loseta vinílica de 1/16 plg |
| Acabados | |
| Interiores | Panel de madera de 5/32 plg |
| Exteriores | Aluminio de 0.19 mm |
| Estructura | Monten, plafonera, zetas, bordas y esquineros calibre 10, 12 y 14 |
| Puertas | Una puerta exterior, dos interiores abatibles |
| Accesorios | Aislantes térmicos R-11 y R-19, dos mesas de trabajo, cinco ventanas, cuatro lámparas fluorescente, conexiones de energía eléctrica, instalaciones hidráulicas y sanitarias, dos acondicionadores de aire, medio baño estándar, dos entrepaños superiores y dos escritorios dobles con archivos |
| Piso exterior | Dos ejes traseros, bola de 2 5/16 plg y un patín para estacionamiento |
| Llantas | Dos en uso y dos de refacción de rodada 15 |

3.3. Evaluación

Para evaluar el funcionamiento de cada configuración primero se estableció la presión de operación que consistió en probar diferentes presiones para maximizar el producto y minimizar el rechazo. Después se operaron las configuraciones de tratamiento a la presión de operación recomendada y se llevó a cabo el seguimiento de la calidad del agua. Adicionalmente, se llevó un registro acumulado de las variables de operación con el objetivo de evaluar la vida útil de las membranas. Este procedimiento definió los parámetros de diseño del sistema de membranas.

Para llevar a cabo el procedimiento de evaluación se estableció como parámetros de control la operación y la calidad del agua durante una jornada de trabajo de 8 horas por día.

3.3.1. Operación

La evaluación de la operación de cada arreglo de membranas dependió de las presiones y caudales.

3.3.1.1. Presiones

Las presiones son parámetros que influyeron en el buen funcionamiento de la planta piloto, por ello, se midieron cuatro presiones tanto en la unidad de nanofiltración (NF) como en la ósmosis inversa (OI): la primera a la entrada del filtro de cartucho (M_1 y M_1'), la segunda a la salida de este mismo (M_2 y M_2'), la tercera llamada presión de descarga de la bomba a la entrada de las membranas (M_3 y M_3') y la cuarta descrita como presión de operación a la salida del último elemento del sistema (M_4 y M_4'); la ubicación de los manómetros se muestra en la Figura 16.

Si la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro de cartucho (ΔP) es superior a 0.4 kg/cm^2 (6 psi) indica que el medio filtrante se ha tapado y es necesario cambiarlo o realizarle una limpieza. Además, la presión de salida de este filtro es muy importante porque influye sobre el arranque de la planta piloto, ya que debe presentarse una presión mínima de 1.4 kg/cm^2 (20 psi) para que funcione, si no es el caso, la planta se detiene.

En la unidad de membranas se presentaron dos tipos de presiones: descarga de la bomba y de operación; la primera debe ser superior a la segunda y el ΔP que se genere no debe exceder de 2.1 kg/cm^2 (30 psi) pues se generarán daños irreversibles por taponamiento de las membranas.

Uno de los objetivos de la evaluación de la planta piloto fue alcanzar la presión de operación que permitiera obtener el volumen más bajo de rechazo y el volumen más alto de producto, pero sin dañar las membranas.

3.3.1.2. Caudales

Para cada sistema definido, se midieron los caudales del afluente de la unidad de membranas, así como los caudales de producto, rechazo y *flushing*. Estas medidas se realizaron con rotámetros colocados en las tuberías de cada unidad.

3.3.2. Calidad del agua

Se caracterizaron diferentes parámetros fisicoquímicos para cada sistema, tanto en el afluente como en el producto y rechazo. En la Tabla 9 se muestran los parámetros que de forma rutinaria se analizaron en campo. Adicionalmente se midió turbiedad, COT e ISD.

Tabla 9. Parámetros analizados en campo

| Cada hora | Una vez por jornada |
|---------------------------|---------------------|
| pH | Cloro residual |
| Conductividad | Nitratos |
| Sólidos disueltos totales | Sulfatos |
| Temperatura | Dureza total |
| | Dureza de calcio |
| | Dureza de magnesio |
| | Alcalinidad total |

CAPÍTULO IV

Resultados

CAPÍTULO IV

Resultados

4.1. Nanofiltración

4.1.1. Selección de la presión de operación

Por recomendaciones del fabricante del equipo, en un inicio, al arrancar la planta piloto se estableció como presión de operación 7 kg/cm^2 (100 psi). En la Tabla 10 se muestran las presiones y caudales obtenidos para esta presión.

Tabla 10. Presiones y flujos en el arranque de la unidad de NF

| Manómetros | Presiones (kg/cm ² - psi) | Rotámetros | Flujos (LPM) |
|--|---|---|-----------------|
| Entrada del filtro de cartucho (M ₁) | 2.2 - 32 | Bomba de alimentación (R ₁) | 44 |
| Salida del filtro de cartucho (M ₂) | 2.1 - 30 | Sistema de filtración (R ₂) | 27 |
| Presión de descarga (M ₃) | 8.4 - 120 | Rechazo (R ₃) | 15 |
| Presión de operación (M ₄) | 7 - 100 | Producto (R ₄) | 12 |

En cuanto a presiones, el ΔP en el filtro de cartucho y unidad de membranas fue de 0.1 kg/cm² (2 psi) y 1.4 kg/cm² (20 psi), respectivamente, por lo que se encuentran dentro de los criterios de diseño. Sin embargo, la unidad de NF no presentó un buen rendimiento ya que el volumen generado de rechazo fue 25% más que el producto. Para evitar este inconveniente, se empezaron a realizar una serie de pruebas a diferentes presiones, a partir de 7 kg/cm² (100 psi) y hasta alcanzar una presión máxima de 12 kg/cm² (170 psi); esta última correspondió al límite de presión de operación para un sistema de NF. El objetivo de esta prueba fue obtener la presión de operación adecuada para generar el máximo volumen de producto y el menor de rechazo. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 30 y corresponden a una jornada de 8 horas.

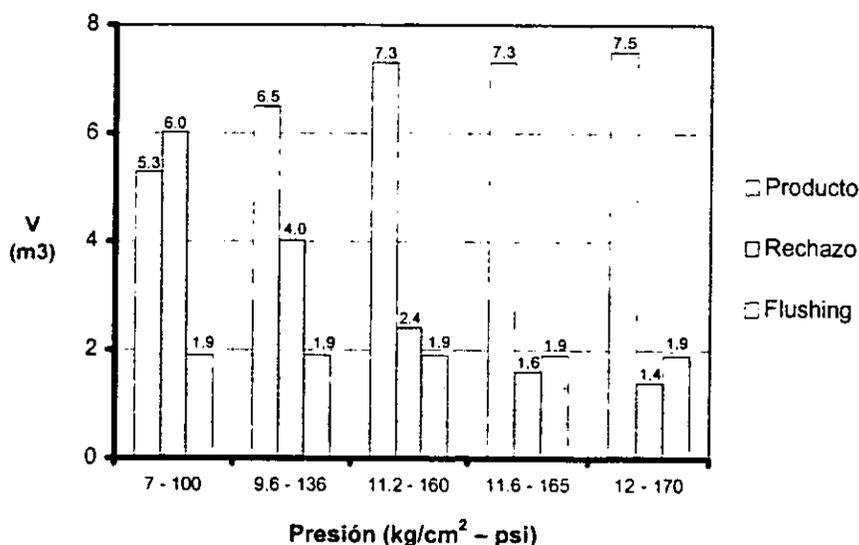


Figura 30. Volumen generado de producto, rechazo y *flushing* en la unidad de NF

El volumen del afluente empezó a disminuir cuando la presión de operación aumentaba. Esto se debe al límite de volumen en el interior de los módulos de las membranas ya que no permitió que entrara más agua de la que se puede filtrar. En el caso del producto, el volumen generado estaba en función del aumento de la presión de operación. Cuando se aplicó la presión de 11.2 kg/cm² (160 psi) la producción empezó a llegar a un máximo hasta alcanzar un valor de 7.5 m³ en la presión de 12 kg/cm² (170 psi). En el rechazo el comportamiento fue diferente, su volumen disminuyó siempre y cuando la presión de operación aumentara. En lo que corresponde al *flushing*, se mantuvo constante independientemente de la presión de operación aplicada pues solamente fue un alto flujo a baja presión.

Consecuentemente, cuando la presión de operación aumentaba se generaba un mayor volumen de producto, tal y como se observa en la Figura 31. La máxima recuperación, que fue del 69%, correspondió a la presión de 12 kg/cm² (170 psi). Esta presión fue la máxima con la que se puede operar la unidad de NF. La generación o conversión es el porcentaje del agua de alimentación que se extrae como producto.

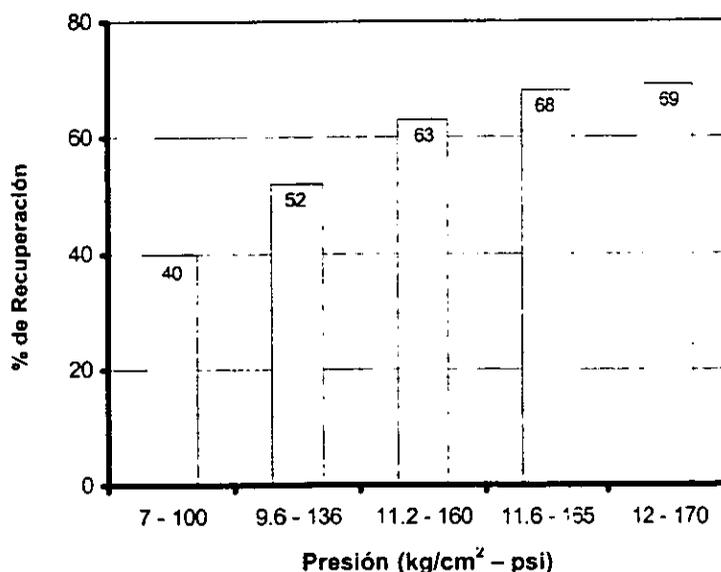


Figura 31. Generación de producto en la unidad de NF

En cuanto a la calidad del agua, la Figura 32 muestra el paso de sales en el producto en relación con las diferentes presiones de operación. El paso de sales es el porcentaje de sales que lograron atravesar la membrana y se incrementó cuando la presión de operación aumentaba. Sin embargo, la diferencia fue muy pequeña y no fue significativa. Por consiguiente, se puede decir que el aumento de la presión de operación no afectó el paso de sales, es decir, la calidad del producto en el intervalo de presiones analizadas.

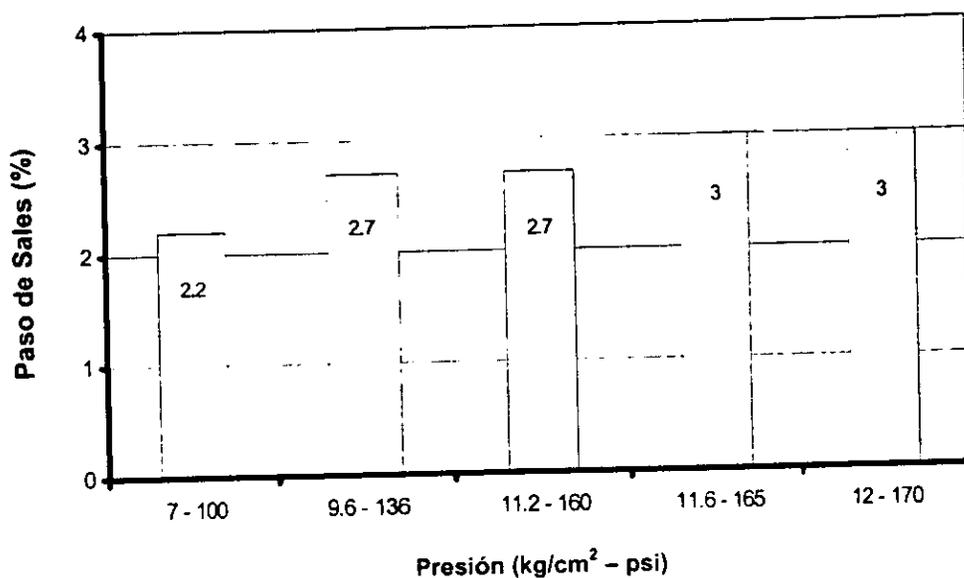


Figura 32. Paso de sales en el producto de la unidad de NF

Las Tablas 11 y 12 muestran la calidad del producto y rechazo de acuerdo con las diferentes presiones de operación aplicadas. Los datos corresponden al promedio de una jornada para cada presión de operación.

Tabla 11. Calidad del producto de la unidad de NF a diferentes presiones de operación

| Parámetros | Presión de operación (psi) | | | | |
|-----------------------|----------------------------|-----------|------------|------------|----------|
| | 7 - 100 | 9.6 - 136 | 11.2 - 160 | 11.6 - 165 | 12 - 170 |
| pH | 5.2 | 5.6 | 5.2 | 5.6 | 5.4 |
| Temperatura (°C) | 19.5 | 21 | 21.2 | 20.4 | 21.4 |
| Conductividad (mS/cm) | 0.08 | 0.087 | 0.086 | 0.092 | 0.088 |
| Turbiedad (UTN) | 0.12 | 0.12 | 0.17 | 0.18 | 0.19 |
| SDT (mg/l) | 38 | 43 | 40 | 45 | 40 |

Tabla 12. Calidad del rechazo de la unidad de NF a diferentes presiones de operación

| Parámetros | Presión de operación (psi) | | | | |
|-----------------------|----------------------------|-----------|------------|------------|----------|
| | 7 - 100 | 9.6 - 136 | 11.2 - 160 | 11.6 - 165 | 12 - 170 |
| pH | 7.4 | 7.6 | 7.3 | 7.3 | 7.3 |
| Temperatura (°C) | 19.6 | 21 | 21.2 | 20.5 | 21.4 |
| Conductividad (mS/cm) | 3.6 | 4.3 | 5.2 | 4.5 | 5.7 |
| Turbiedad (UTN) | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 |
| SDT (mg/l) | 1797 | 2150 | 2504 | 2425 | 2760 |

El comportamiento de los parámetros de rutina (pH, temperatura, conductividad, turbiedad y SDT) fue prácticamente constante en el producto. En el rechazo se observó un ligero incremento de sales cuando aumentaba la presión pues se redujo el volumen del rechazo.

De este análisis se puede concluir que la calidad del agua generada no fue un criterio para seleccionar la presión de operación, sino fue función únicamente de los volúmenes de producto y rechazo generados. Por lo tanto, la presión de operación recomendada para un producto máximo (68%) y un rechazo mínimo fue de 11.6 kg/cm² (165 psi). No se utilizó la presión de 12 kg/cm² (170 psi) pues fue el límite de operación recomendado por el fabricante, además, se corre el riesgo de disminuir la vida útil de las membranas rápidamente. Cabe destacar que estos resultados se obtuvieron antes de que las membranas empezaran a obstruirse.

4.1.2. Evaluación de la unidad de NF a una presión de operación de 11.6 kg/cm² (165 psi)

Una vez seleccionada la presión de operación, la NF operó de forma semicontinua durante 137 horas. Durante este tiempo se presentó un decaimiento en el rendimiento de la unidad sin alterar la calidad del producto y rechazo.

4.1.2.1. Operación

a) Caudales

Durante las primeras 50 horas de funcionamiento, la unidad de NF generó un caudal de producto y rechazo de 17 y 6 LPM, respectivamente (Figura 33). Posteriormente, el caudal del producto disminuyó alrededor a 15 LPM (12%) mientras que el rechazo no presentó variaciones. Esto fue consecuencia de la reducción del volumen del afluente al iniciar la operación del arreglo en paralelo (NF y OI).

Después de las 116 horas de operación, la NF presentó un ligero decaimiento en su rendimiento, pues al finalizar 137 horas de operación el caudal del producto disminuyó a 14 LPM (7%) y el rechazo se incrementó a 7 LPM (17%). El decremento del producto se debió al taponamiento de las membranas, el cual no fue significativo.

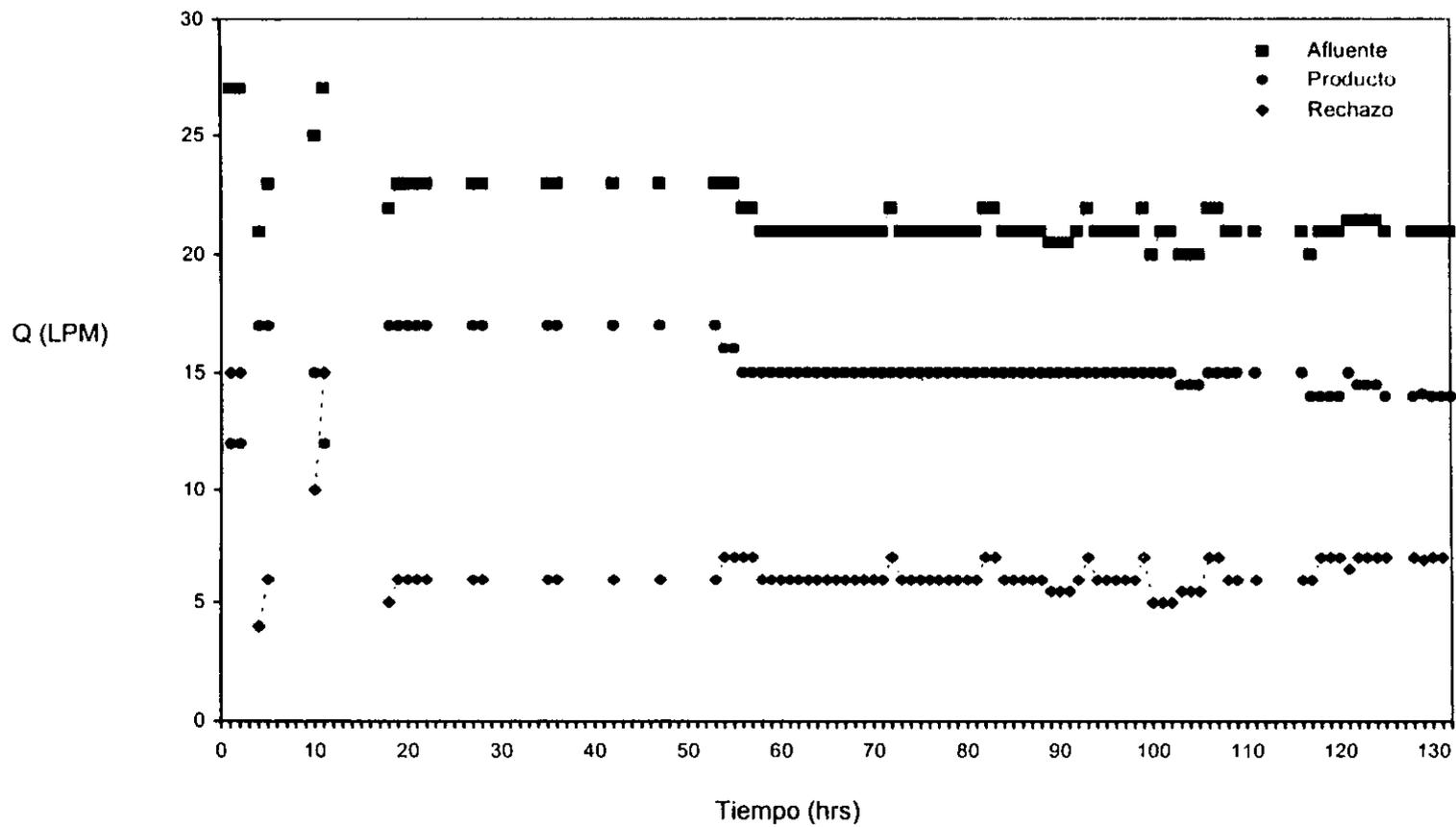


Figura 33. Comportamiento de los caudales en la unidad de NF

b) Presiones

La Figura 34 muestra el comportamiento de las presiones en la entrada y salida del filtro de cartucho (FC). Durante las primeras 50 horas de operación, cuando la NF operaba sola, la alimentación presentó un caudal alto que provocó una presión alta en la entrada y salida del FC. Al iniciar el arreglo en paralelo la alimentación tuvo que dividirse entre las dos unidades ocasionando que la presión del agua en la entrada y salida del FC bajaran. Sin embargo, a pesar de las variaciones de presión durante el funcionamiento de unidad de NF, la diferencia de presión (ΔP) no excedió 0.4 kg/cm^2 (6 psi), lo que indica que el FC de cartucho no se tapó.

Por otro lado, el ΔP entre la presión de operación y descarga de la bomba fue aproximadamente de 0.7 kg/cm^2 (10 psi) durante la mayor parte del funcionamiento de la unidad de NF (Figura 35).

Si la presión de descarga se incrementa, significa que las membranas ofrecen resistencia al paso del agua debido al taponamiento. Como el módulo de NF presentó tres torres de membranas, el ΔP máximo fue de 2.1 kg/cm^2 (30 psi); si se rebasa este valor se corre el riesgo de dañar las membranas por deformación o falla (agrietamiento o ruptura).

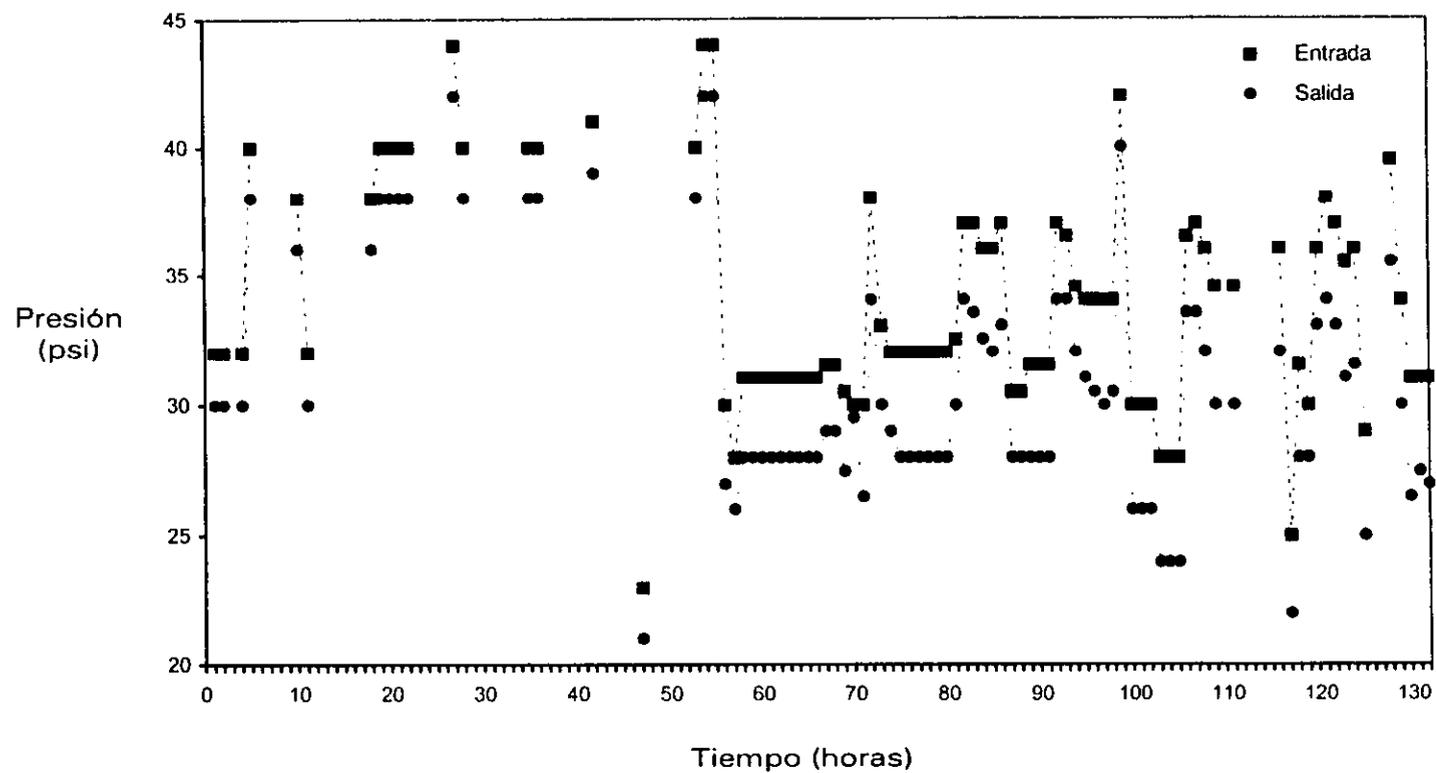


Figura 34. Comportamiento de la presión en la entrada y salida del FC de la unidad de NF

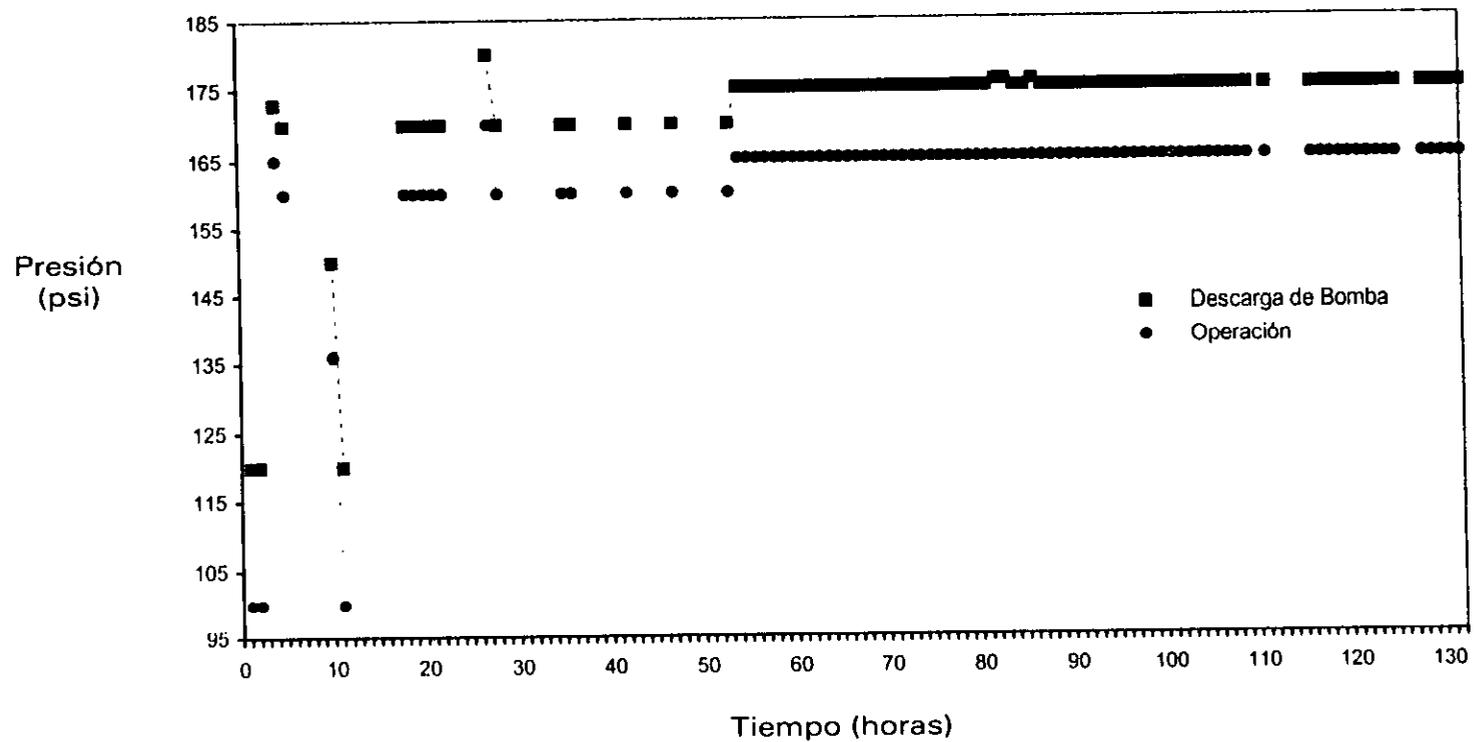


Figura 35. Comportamiento de la presión en la descarga y operación de la unidad de NF

4.1.2.2. Calidad del agua

a) Sólidos disueltos totales

La unidad de NF presentó una remoción de sólidos disueltos totales (SDT) del 95%, pues el afluente y producto tuvieron una concentración promedio de 869 y 47 mg/L, respectivamente (Figura 36). En el caso del producto, la concentración fue muy inferior a 500 mg/L, que es el valor permitido por la norma mexicana para que el agua tenga un uso potable (NOM-127-SSA1-1994).

Con relación al rechazo, la concentración inicial fue de 2400 mg/L y se redujo al final de la investigación aproximadamente en un 13%, 2090 mg/L, debido a que las sales se precipitaron formando una delgada capa impermeable (incrustación) sobre la superficie de la membrana. Esto explica la reducción del caudal generado de producto y el incremento del rechazo.

b) pH

El pH del afluente fue cercano a 7 (Figura 37) y al salir como permeado, disminuyó a 4.8 en promedio. En el caso del rechazo, el pH se incrementó a un valor cercano de 7.5.

La acidez en el producto se debió principalmente al CO_2 , pues se encontraba disuelto en el agua de alimentación y lograba atravesar las membranas de NF, que al reaccionar con los H^+ del agua se formó un ácido débil e inestable, conocido como ácido carbónico (H_2CO_3).

La desventaja de un pH ácido en el producto es la generación de corrosión en el sistema de conducción y distribución de agua potable, o generar enfermedades gastrointestinales si su consumo es prolongado.

Para elevar el pH del producto debe realizarse un postratamiento mediante la recuperación de alcalinidad, a partir de la adición de una solución alcalina para transformar el ácido carbónico en bicarbonatos (HCO_3).

En el caso del rechazo, los bicarbonatos que se encuentran en el afluente son separados por las membranas y concentrados en el rechazo, originando un aumento del pH a un valor cercano a 7.5.

c) Temperatura

La temperatura del agua en el manantial varió conforme transcurría el día, siendo aproximadamente de 18 °C por las mañanas y de 21 °C por las tardes (Figura 38).

El producto y rechazo presentaron temperaturas semejantes pero ligeramente superiores a las del afluente; por las mañanas fue de 19 °C y por las tardes se incrementó alrededor de tres grados.

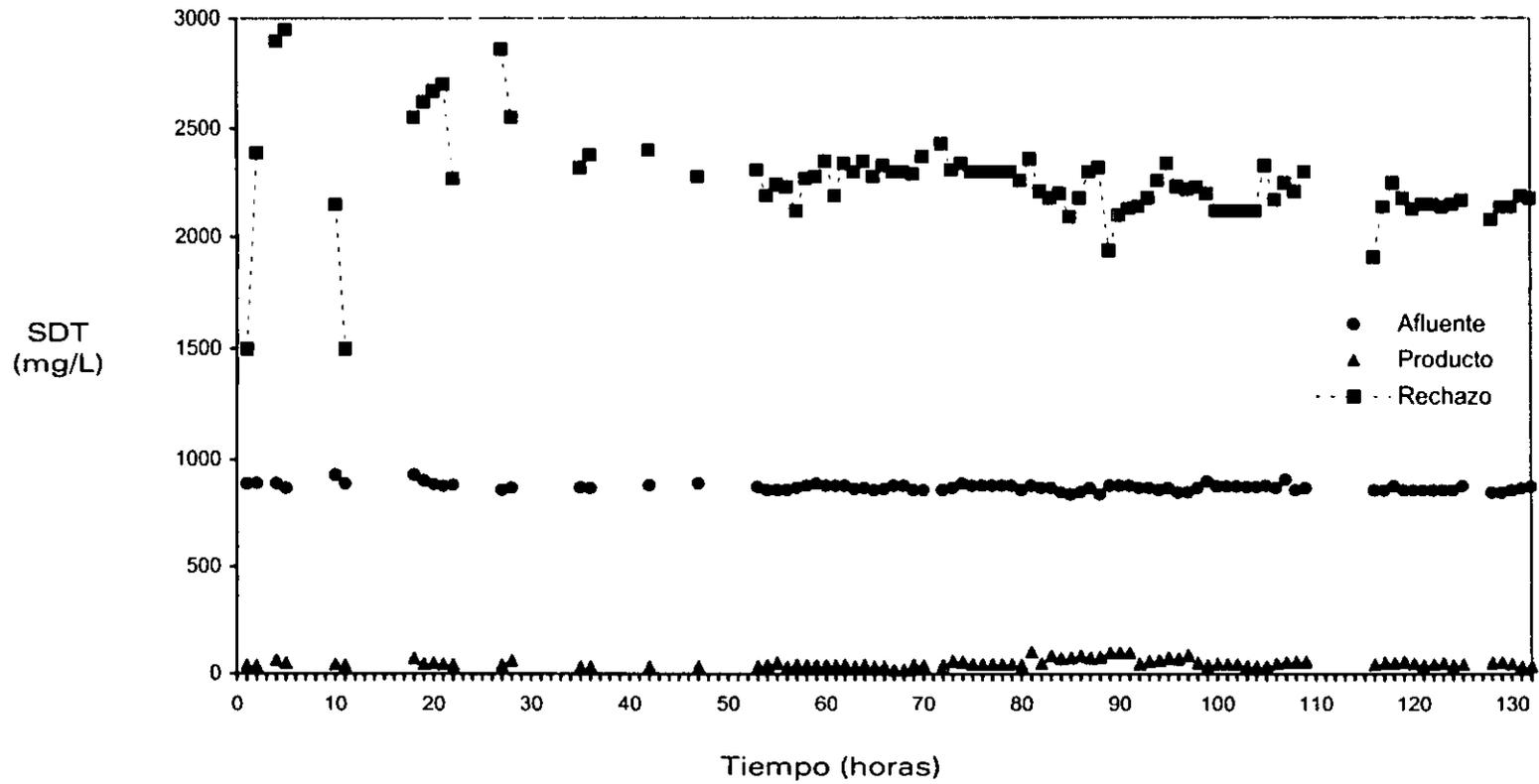


Figura 36. Comportamiento de los SDT en la unidad de NF

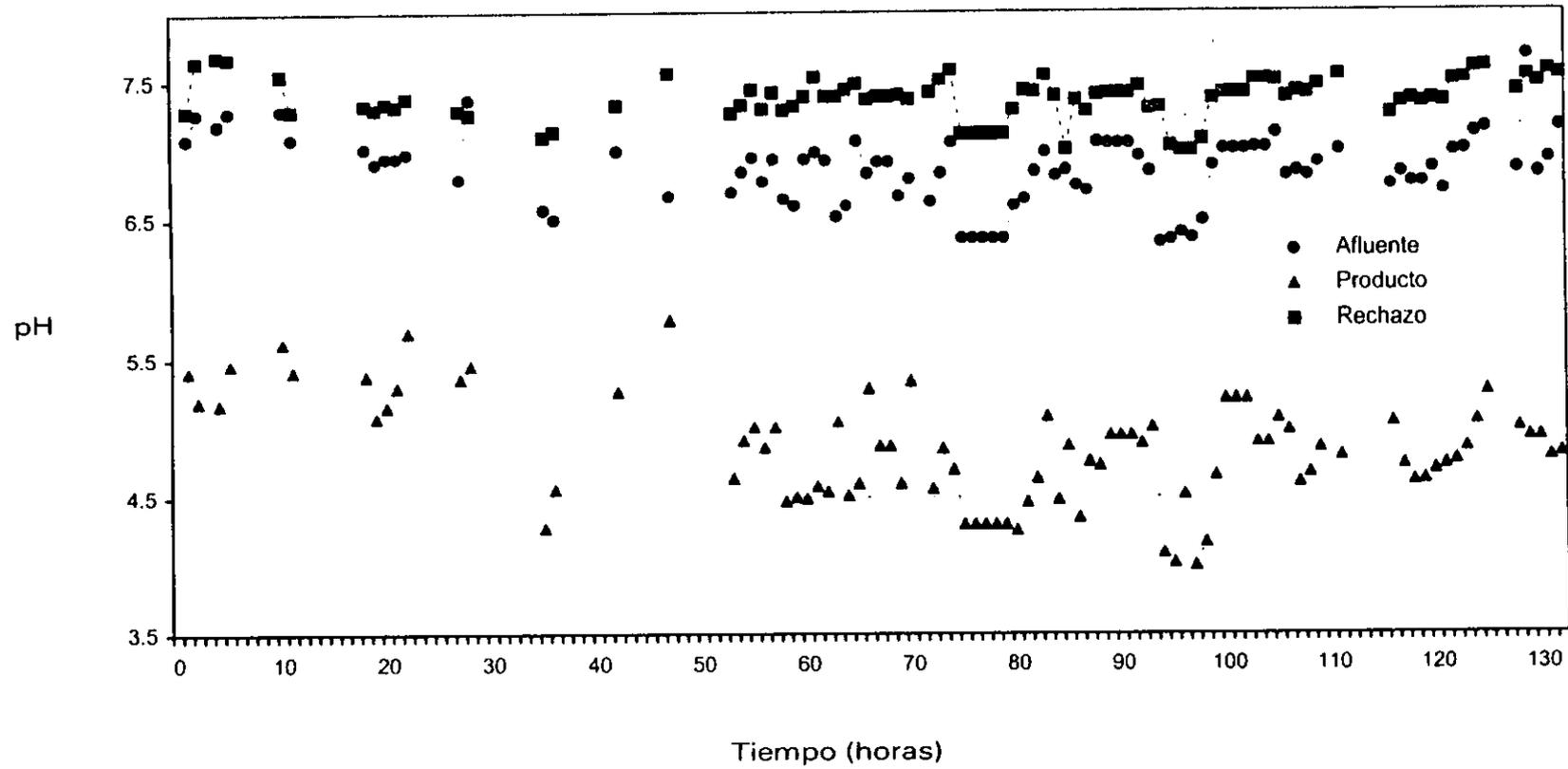


Figura 37. Comportamiento del pH en la unidad de NF

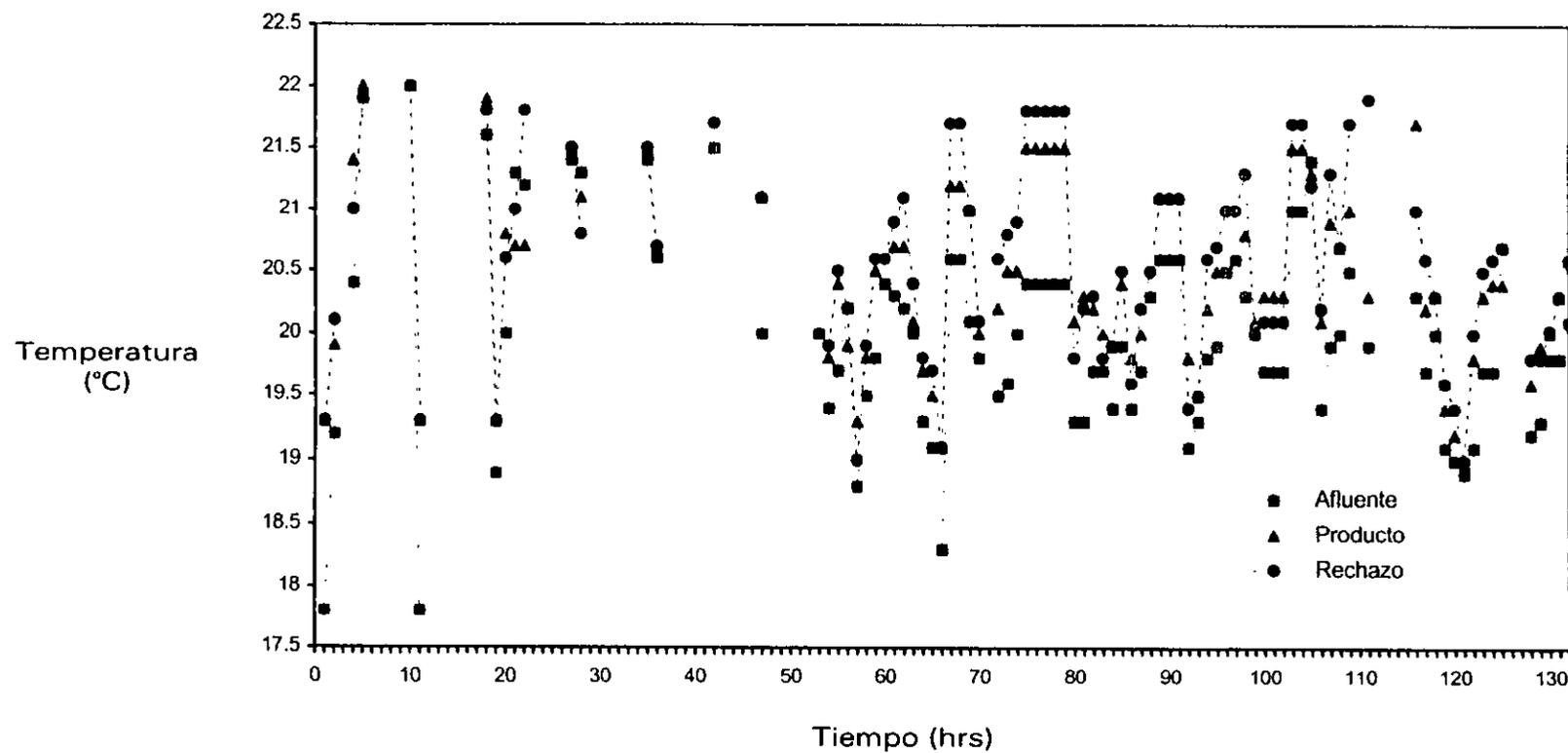


Figura 38. Comportamiento de la temperatura en la unidad de NF

d) Seguimiento de los parámetros de control en el afluente y producto

Con el fin de evaluar el desempeño del sistema con base en la calidad del permeado que genera, se analizaron los parámetros que se muestran en la Tabla 13 y en la Figura 39; en el caso de la tabla, como punto de comparación, se tomaron las concentraciones recomendadas por el fabricante para el agua de alimentación y la NOM-127-SSA1-1994 que establece la calidad del agua potable en México.

Tabla 13. Parámetros de seguimiento de la calidad del agua en la unidad de NF

| Parámetro | Afluente | RF | Producto | NOM | Rechazo |
|---|---------------------|--------|------------|-----------|---------------------|
| pH | 6.8±0.2 | 3 - 10 | 4.9±0.4 | 6.5 - 8.5 | 7.4±0.2 |
| IDS | 2.7±0.06 | <5 | NR | -- | NR |
| Conductividad (mS/cm) | 1.74±0.03 | -- | 0.084±0.03 | -- | 4.5±0.5 |
| SDT (mg/L) | 869±37 | <3000 | 47±17 | 1000 | 2190±318 |
| Temperatura (°C) | 20.2±0.8 | 4 - 45 | 20.5±0.7 | -- | 20.6±0.9 |
| COT (mg/L) | 35±16 | <10 | 2±0.2 | -- | 157±15 |
| Alcalinidad (mg de CaCO ₃ /L) | 430±6 | -- | 29±6 | -- | 1200±11 |
| Dureza total (mg de CaCO ₃ /L) | 376±22 | <17 | 12±0.01 | 500 | 1088±146 |
| Dureza en Ca (mg de CaCO ₃ /L) | 174±41 | -- | 2±0.01 | -- | 628±92 |
| Dureza en Mg (mg de CaCO ₃ /L) | 202±31 | -- | 10±0.01 | -- | 460±107 |
| Fe (mg/L) | <0.02 | <0.1 | nd | 0.3 | NR |
| Cloro residual libre (mg/L) | nd | <0.1 | nd | 0.2 - 1.5 | NR |
| Mn (mg/L) | <0.003 | <0.5 | nd | 0.15 | NR |
| Ba (mg/L) | 0.099 | <0.1 | NR | 0.7 | NR |
| Si (mg/L) | 29±2.9 | <60 | NR | -- | NR |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 260±24 | -- | 3±2 | -- | 680±84 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 250±23 | -- | 3.2±0.02 | 250 | 400±20 |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 8.7±0.1 | -- | 2.7±0.03 | 10 | 11.3±0.3 |
| Coliformes Fecales (UFC/100 ml) | 9.3×10 ² | -- | 3 | 0 | 2.7×10 ³ |

RF. Recomendaciones del fabricante

NOM: NOM-127-SSA1-1994

NR: No realizado

nd: No detectado

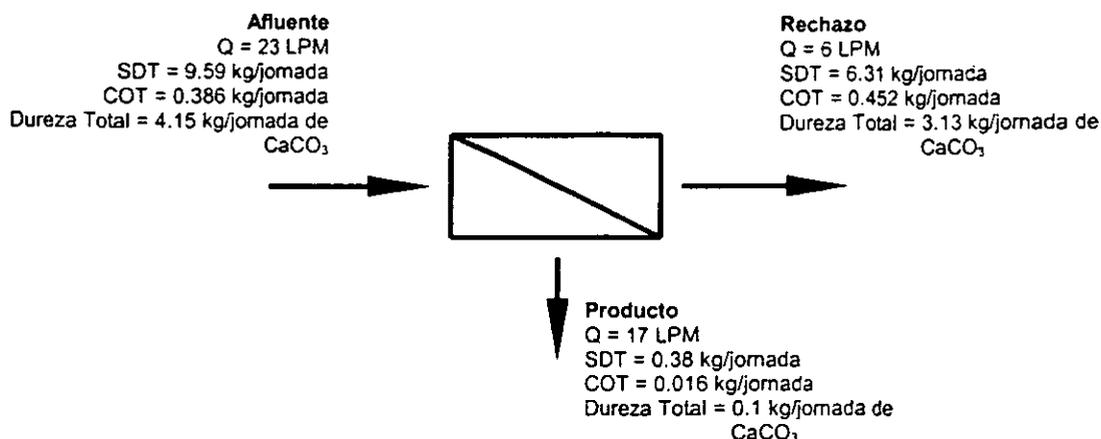


Figura 39. Balance de masa del arreglo NF

Afluente

El afluente ó agua del manantial cumple con la calidad requerida para ser tratada por la unidad de membranas, en términos de pH, IDS, SDT, temperatura, Fe, cloro residual libre, Mn, Ba y Si, pues se encontraron en concentraciones no dañinas.

El material orgánico, medido como COT, presentó un valor superior a lo recomendado por el fabricante (35 mg/L), por consiguiente, es necesario mantener concentraciones mínimas para prevenir el ensuciamiento de las membranas con moléculas orgánicas y para minimizar el crecimiento de microorganismos que puedan dañarlas. Para ello, puede emplearse un filtro de carbón activado como medio filtrante puesto que presentan eficiencias de remoción superiores al 95% (Weitnaure y Cumb, 1996).

El agua del manantial se clasifica como dura puesto que la concentración de dureza fue superior a 150 mg/L de CaCO₃ (Romero, 1999). Estas concentraciones causan una reducción del rendimiento de la unidad de membranas debido a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio sobre la superficie de la membrana. Para evitar este inconveniente es necesario aplicar un ablandamiento con el fin de reducir la concentración de dureza en el agua.

Producto

El producto presentó concentraciones bajas de pH y de SDT con respecto a la Norma Oficial Mexicana. Si se quiere incrementar la calidad del permeado puede realizarse un postratamiento para elevar el pH mediante recuperación de alcalinidad, o realizar una mezcla con otro tipo de agua potable. De acuerdo al balance de masa, la unidad de NF presentó una remoción de SDT del 96%.

El producto fue considerado como un agua blanda ya que presentó una concentración de dureza de 12 mg/L de CaCO_3 (Romero, 1999), inferior al requerido por la norma mexicana. La remoción obtenida fue del 98%.

El producto también presentó una alta remoción de sulfatos (99%), cloruros (99%) y nitratos (77%), con concentraciones de 3, 3.2 y 2.7 mg/L, respectivamente; los cuales cumplen con la normatividad mexicana.

La presencia de coliformes fecales en el permeado se debe al daño de las membranas o a una contaminación del permeado. Cuando se presentan daños por químicos o microorganismos, la superficie de la membrana es afectada irreversiblemente pues se forman pequeños orificios por donde se fugan las sales, microorganismos y el agua, por lo que se genera un mayor volumen de producto pero con una alta concentración de sales y microorganismos. No obstante, el comportamiento del módulo de NF fue diferente, pues el volumen del permeado tendió a disminuir al final de la investigación mientras la concentración de sales se mantuvo aproximadamente constante; este análisis descarta el daño de las membranas, pero es posible que la concentración de coliformes fecales se deba a la contaminación en la descarga del producto.

Las membranas de NF eliminan esencialmente la mayoría de los microorganismos, pero, al no mantener condiciones estériles a lo largo de la zona de descarga los microorganismos pueden proliferar en el producto. Con el propósito de evitar este inconveniente será necesario que el postratamiento incluya una desinfección.

Rechazo

Como fue de esperarse, el rechazo generado presentó una concentración de parámetros superior al afluente, sin embargo, la concentración que entró a la unidad no fue la misma que salió por el producto o rechazo (Figura 39), pues el 30 y 22% de SDT y dureza total, respectivamente, se depositó sobre la superficie de las membranas ocasionando un taponamiento por incrustación.

En el caso del COT, la concentración que entró fue inferior a la que salió en el producto y rechazo debido a la presencia de algas sobre la pared del tubo de descarga del rechazo.

4.2. Ósmosis inversa

4.2.1. Selección de la presión de operación

De acuerdo a las recomendaciones del fabricante del equipo, la unidad de ósmosis inversa (OI) se operó a la presión de 8.4 kg/cm² (120 psi) y generó las presiones y flujos que se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Presiones y flujos en el arranque de la unidad de OI

| Manómetros | Presiones (kg/cm ² - psi) | Rotámetros | Flujos (LPM) |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Entrada del filtro de cartucho (M ₁) | 2 - 28 | Bomba alimentación (R ₁) | 44 |
| Salida del filtro de cartucho (M ₂) | 1.8 - 26 | Sistema filtración (R ₂) | 44 |
| Presión descarga (M ₃) | 13.4 - 190 | Rechazo (R ₃) | 28 |
| Presión operación (M ₄) | 8.4 - 120 | Producto (R ₄) | 16 |

Los resultados obtenidos no presentaron un buen rendimiento de la unidad de OI, pues el volumen del rechazo generado fue superior al del producto. Para evitar estas condiciones se operó la unidad de membranas desde la presión

recomendada por el proveedor hasta la presión de 15.8 kg/cm² (225 psi). En la Figura 40 se presentan los resultados obtenidos en una jornada de 8 horas.

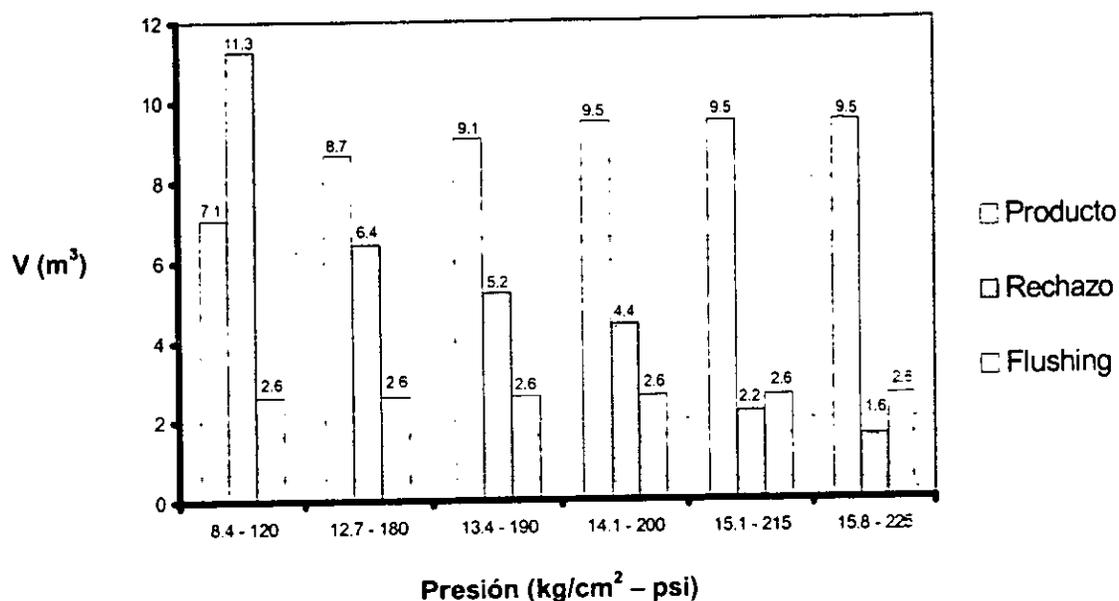


Figura 40. Volumen generado de producto, rechazo y *flushing* en la unidad de OI

Al incrementar la presión de operación, el volumen de producto generado se incrementó hasta llegar a un máximo de 9.5 m³ por jornada, mientras que el rechazo presentó un comportamiento opuesto pues decreció a 1.6 m³. En el caso del *flushing*, se mantuvo constante independientemente de la presión de operación aplicada debido a que se trata de un alto flujo a baja presión. En el afluente, el volumen que entró a la unidad de membranas disminuyó al aumentar la presión de operación porque el volumen del sistema no permitió el ingreso de más agua de la necesaria para filtrar.

De acuerdo a la Figura 41, la unidad de OI empezó a ser rentable al operar con una presión de 13.4 kg/cm² (190 psi), ya que el volumen del producto superó al rechazo. La máxima generación, que fue del 69%, atañó a la presión de operación de 15.8 kg/cm² (225 psi).

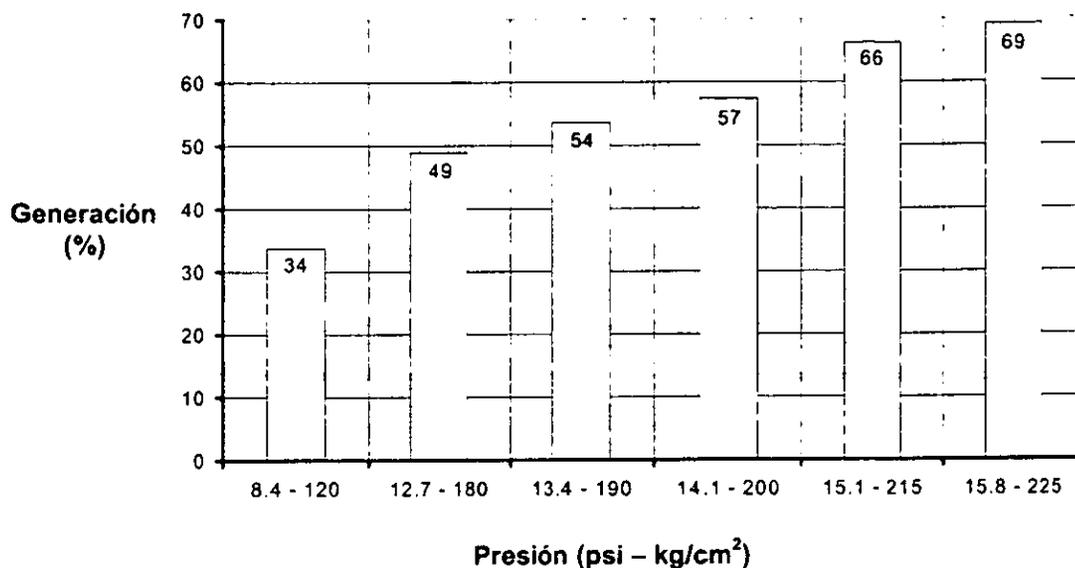


Figura 41. Generación de producto en la unidad de OI

En lo que corresponde a la calidad del agua generada, la Figura 42 muestra el paso de sales en el producto en relación con las diferentes presiones de operación.

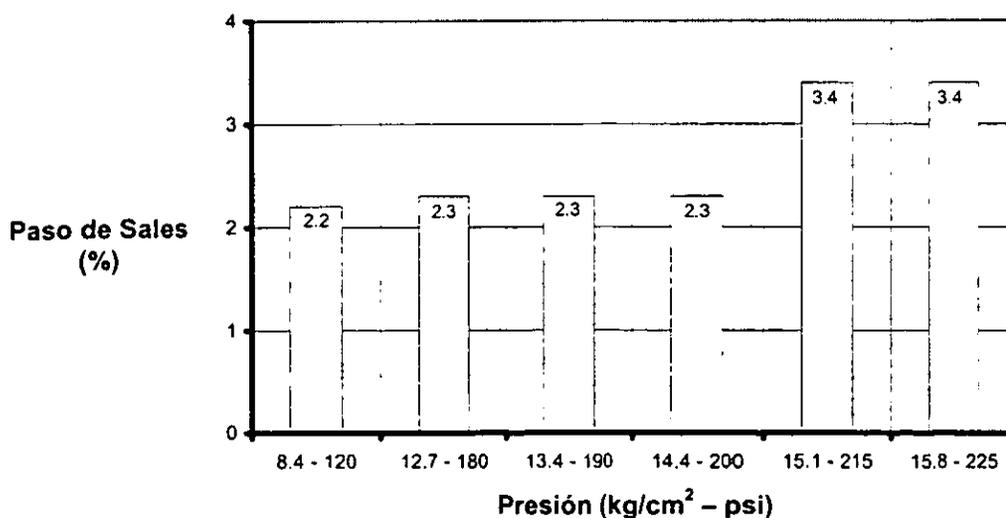


Figura 42. Paso de sales en el producto de la unidad de OI

El paso de sales presentó tres niveles crecientes: uno para presiones inferiores a 12.7 kg/cm² (180 psi), otro entre las presiones de 12.7 a 14.4 kg/cm² (200 psi) y el último de 14.4 a 15.8 kg/cm² (225 psi). Estos niveles representan el comportamiento de las membranas cuando se incrementó la presión de operación. De hecho, la diferencia de paso de sales no fue importante entre los dos primeros niveles, pero la diferencia entre el segundo y el último fue del 48% en promedio.

Las Tablas 15 y 16 muestran la calidad del producto y rechazo de acuerdo a la presión de operación aplicada en la unidad de OI.

Tabla 15. Calidad del producto de la unidad de OI a diferentes presiones de operación

| Parámetro | Presión de operación (kg/cm ² - psi) | | | | | |
|-----------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 8.4 - 120 | 12.7 - 180 | 13.4 - 190 | 14.1 - 200 | 15.1 - 215 | 15.8 - 225 |
| pH | 4.6 | 4.43 | 4.32 | 4.28 | 4.73 | 4.6 |
| Temperatura (°C) | 21.4 | 21.4 | 21.5 | 21.2 | 21.4 | 21.4 |
| Conductividad (mS/cm) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.04 |
| Turbiedad (UTN) | 0.09 | 0.11 | 0.12 | 0.16 | 0.19 | 0.19 |
| SDT (mg/L) | 20 | 20 | 20 | 20 | 30 | 41 |

Tabla 16. Calidad del rechazo de la unidad de OI a diferentes presiones de operación

| Parámetro | Presión de operación (kg/cm ² - psi) | | | | | |
|-----------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 8.4 - 120 | 12.7 - 180 | 13.4 - 190 | 14.1 - 200 | 15.1 - 215 | 15.8 - 225 |
| pH | 7.16 | 7.31 | 7.25 | 7.41 | 7.61 | 7.16 |
| Temperatura (°C) | 21.4 | 21.4 | 21.5 | 21.2 | 21.4 | 21.4 |
| Conductividad (mS/cm) | 2.53 | 3.48 | 3.68 | 4.14 | 5.1 | 6.53 |
| Turbiedad (UTN) | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.9 |
| SDT (mg/L) | 1270 | 1750 | 1840 | 2070 | 3170 | 3273 |

En el producto, los parámetros no presentaron diferencias importantes; mientras que en el rechazo las concentraciones aumentaron ligeramente al incrementar la presión de operación debido a la reducción del volumen del rechazo.

Al igual que en la unidad de NF, la calidad del agua en la OI no fue un factor para seleccionar la presión de operación, sino que fue función del volumen generado de producto y rechazo. Por lo tanto, se decidió operar la unidad de OI a una presión de 15.1 kg/cm² (225 psi) pues genera 69% de producto.

4.2.2. Evaluación de la unidad de OI a una presión de operación de 15.8 kg/cm² (225 psi)

4.2.2.1. Operación

La unidad de OI se operó durante 80 horas; en las primeras 30, el equipo trabajó en paralelo y después en serie. A continuación se describe el rendimiento de la unidad.

a) Caudales

Una vez seleccionada la presión de 15.8 kg/cm² (225 psi) como la adecuada para operar la unidad de OI, se generaron caudales constantes del orden de 22 y 4 LPM para el producto y rechazo, respectivamente (Figura 43). No obstante, al iniciar el funcionamiento del equipo en serie (NF+OI), después de las 30 horas de operación, la unidad comenzó a presentar cambios en su rendimiento a tal grado que al concluir 80 horas de operación el caudal del producto disminuyó en un 45% (12 LPM); caso contrario sucedió con el rechazo, se incrementó en un 275% (15 LPM) pues recibió el agua que no logró permear a través de las membranas.

Como el decremento del producto fue superior al 15%, se establece que las membranas de OI se encuentran tapadas y requieren un lavado para regenerarlas.

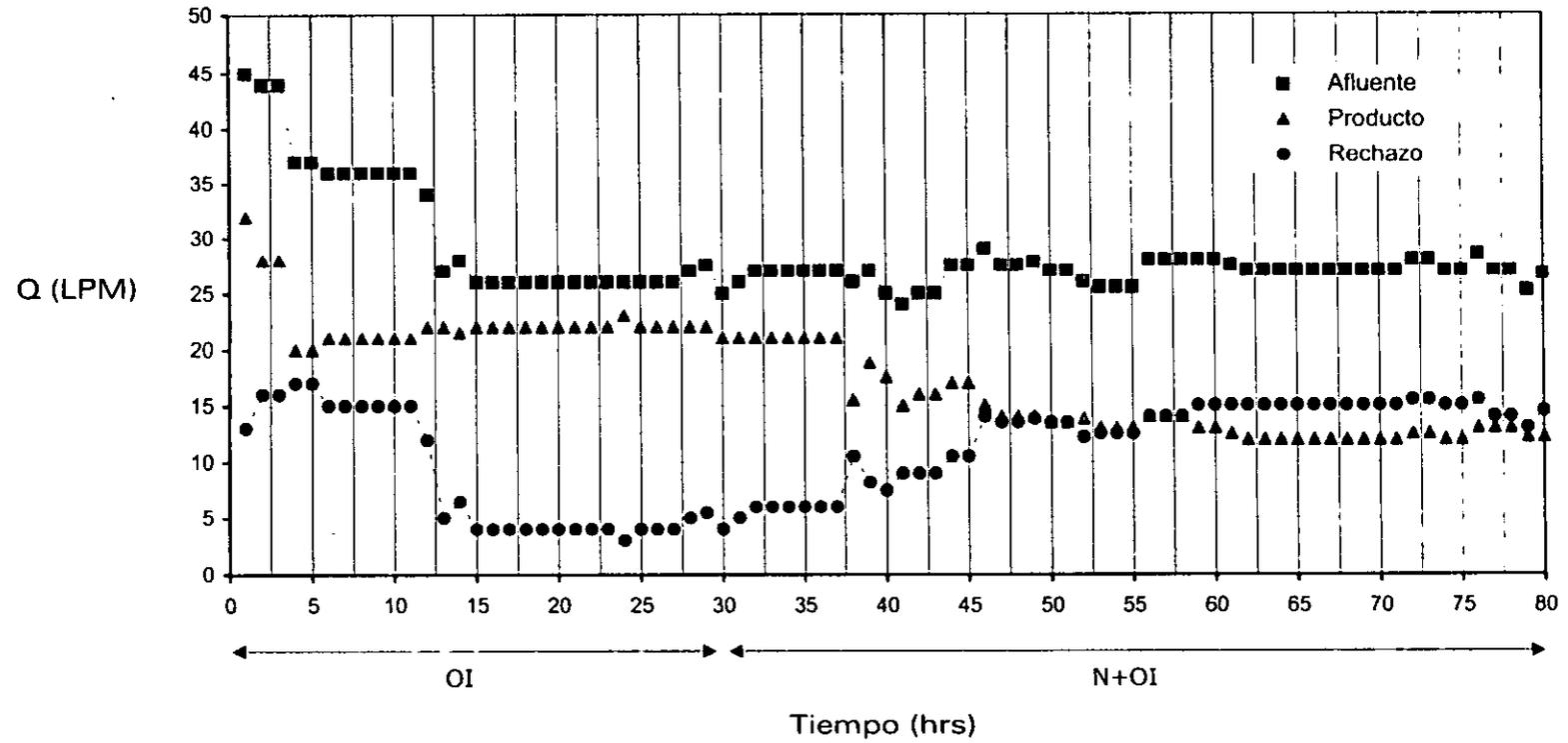


Figura 43. Comportamiento de los caudales en la unidad de OI

b) Presiones

Independientemente del arreglo que se haya empleado en la unidad de OI (paralelo o serie), la diferencia de presión (ΔP) en el filtro de cartucho (FC) no excedió de 0.4 kg/cm^2 (6 psi), lo que indica que el medio filtrante no se saturó (Figura 44).

Durante la investigación, la presión de operación se mantuvo constante con un valor de 15.8 kg/cm^2 (225 psi) (Figura 45). La presión de descarga presentó un comportamiento diferente, pues inició con un valor de 16.9 kg/cm^2 (240 psi) y finalizó con 17.6 kg/cm^2 (250 psi). Esto ocasionó que el ΔP inicial de 1.1 kg/cm^2 (15 psi) se incrementara en un 67%, es decir, a 1.8 kg/cm^2 (25 psi).

Como el ΔP es cercano al máximo permitido para operar la unidad, 2.1 kg/cm^2 (30 psi), se establece que las membranas se encuentran tapadas y es necesario realizarle un lavado para regenerarlas; de esta forma se evitará que las membranas se dañen por deformación o ruptura.

El taponamiento de la unidad de OI fue prematuro e inició al operar con el arreglo en serie (NF+OI).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

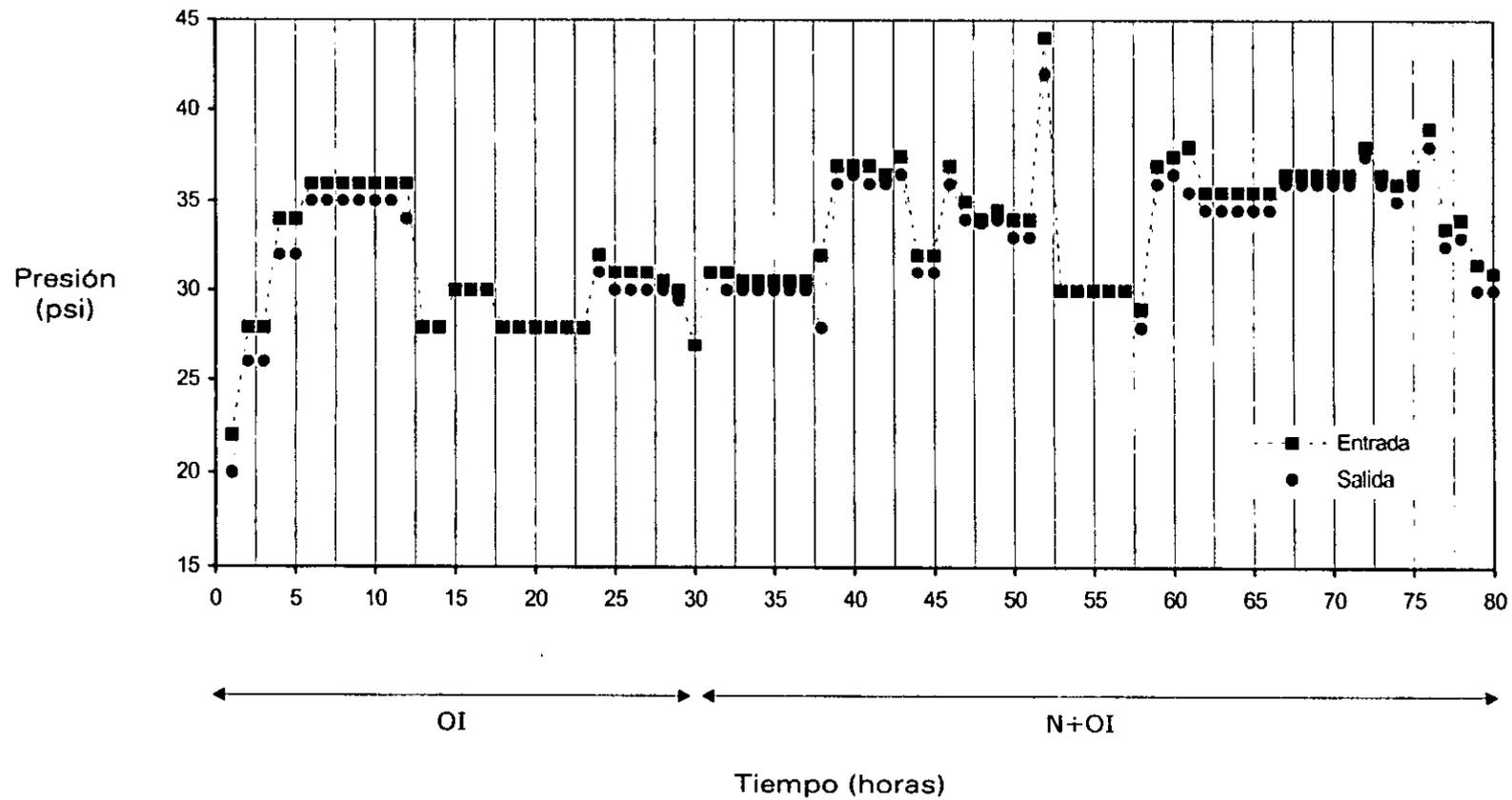


Figura 44. Comportamiento de la presión en la entrada y salida del FC de la unidad de OI

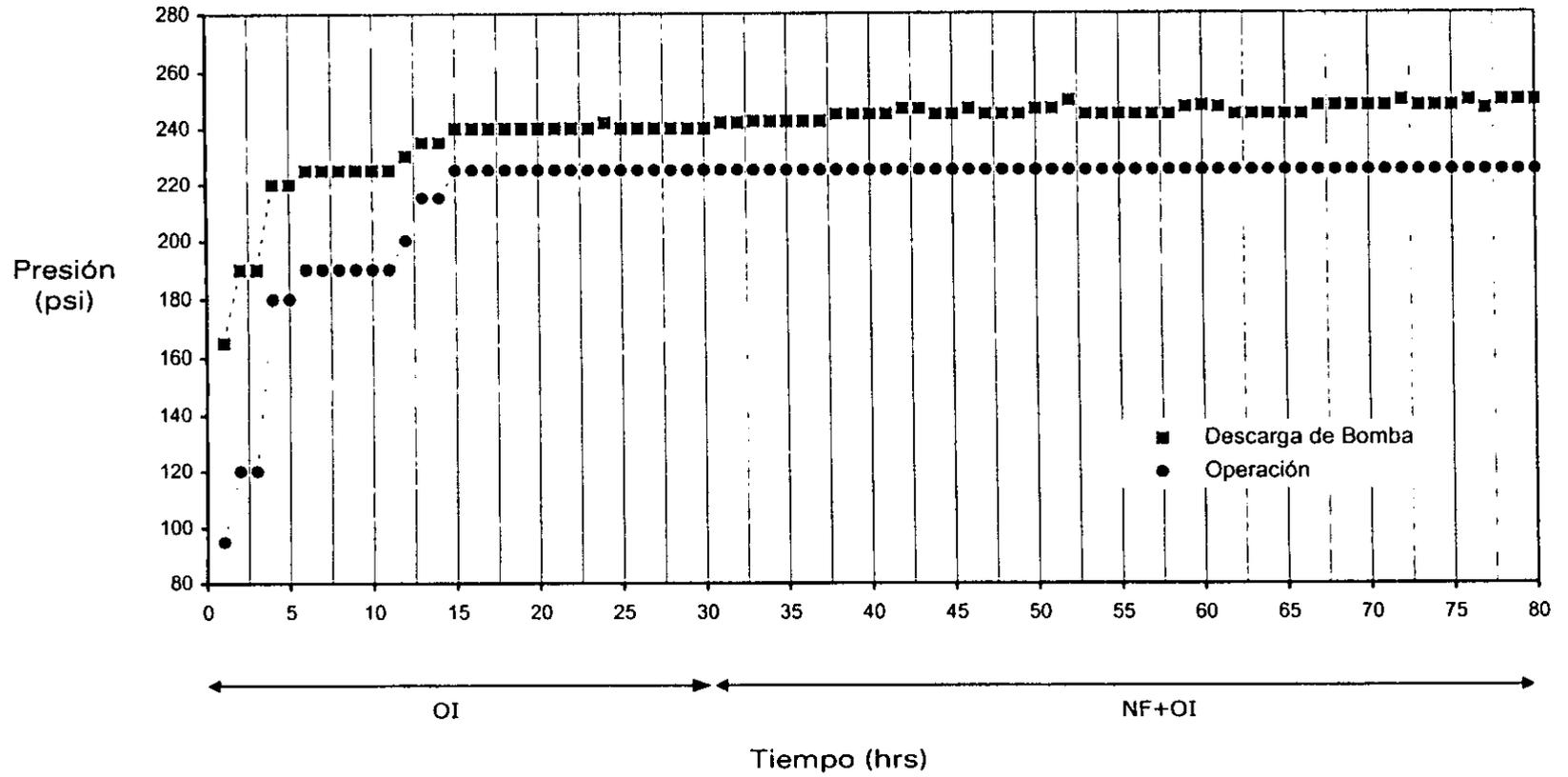


Figura 45. Comportamiento de la presión de descarga y operación en la unidad de OI

4.2.2.2. Calidad del agua

a) Sólidos disueltos totales

Los sólidos disueltos totales (SDT) en el afluente y producto presentaron un comportamiento constante (Figura 46), con concentraciones de 869 y 49 mg/L en promedio, respectivamente.

La concentración del rechazo durante las primeras 30 horas de funcionamiento, operación en paralelo, varió de 3000 a 3600 mg/L. Posteriormente, al iniciar la operación en serie (NF+OI), la concentración de SDT comenzó a descender hasta un valor de 1500 mg/L al finalizar las pruebas piloto. La alta concentración de SDT ocasionó que las sales se precipitaran formando una delgada capa impermeable (incrustación) sobre la superficie de las membranas, que obstaculizó el paso del agua a través de ella; de esta forma se explica la reducción del caudal del permeado, el incremento del ΔP y la reducción de los SDT en el rechazo.

b) pH

En la Figura 47 se muestra las variaciones del pH durante la investigación. El afluente presentó una concentración que varió de 6.5 a 7, el rechazo de 7 a 7.5 y el producto de 4 a 5. Al igual que la NF, se presentó un pH ácido en el producto debido a la formación de ácido carbónico (H_2CO_3) a partir de la reacción del CO_2 disuelto con los H^+ del agua.

c) Temperatura

La temperatura del agua del manantial Cerro Colorado varió durante el día, siendo aproximadamente de 18 °C por las mañanas e incrementándose cuatro grados por las tardes debido al clima que se presentó en el lugar (Figura 48). El rechazo y producto presentaron temperaturas semejantes, ligeramente superiores al afluente, pues por las mañanas fue de 19 °C y por las tardes aumentó a 21 °C.

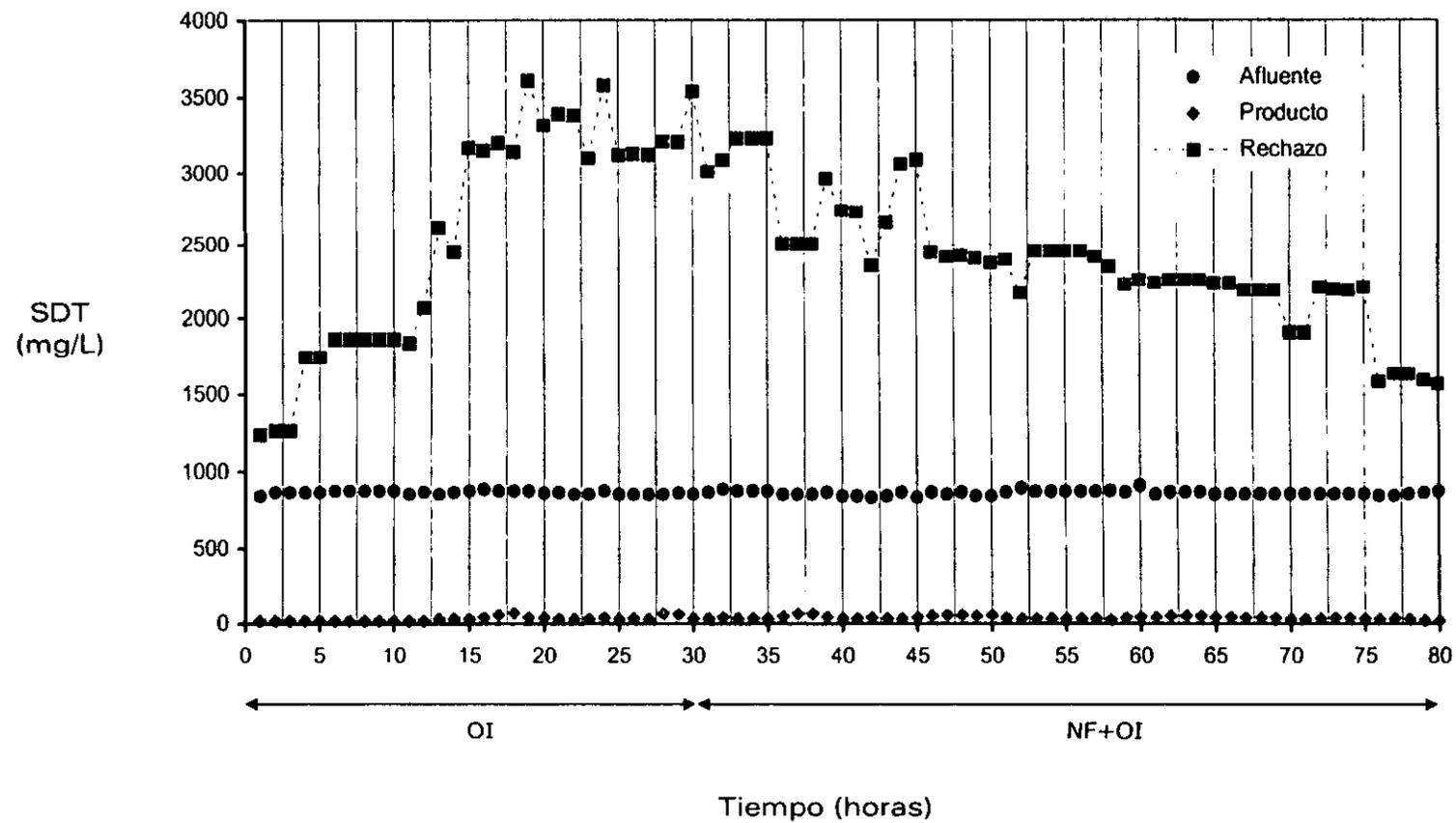


Figura 46. Comportamiento de los SDT en la unidad de OI

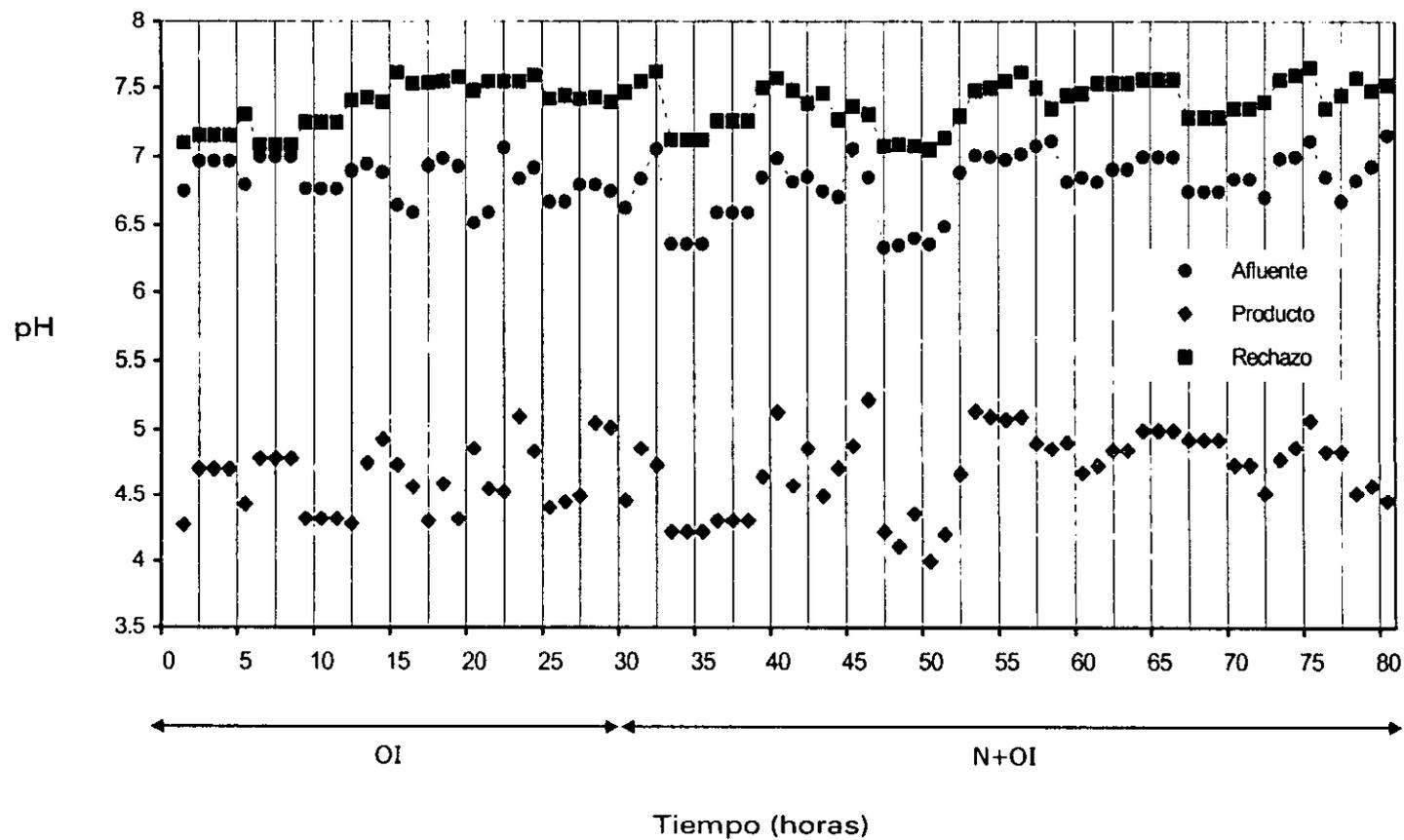


Figura 47. Comportamiento del pH en la unidad de OI

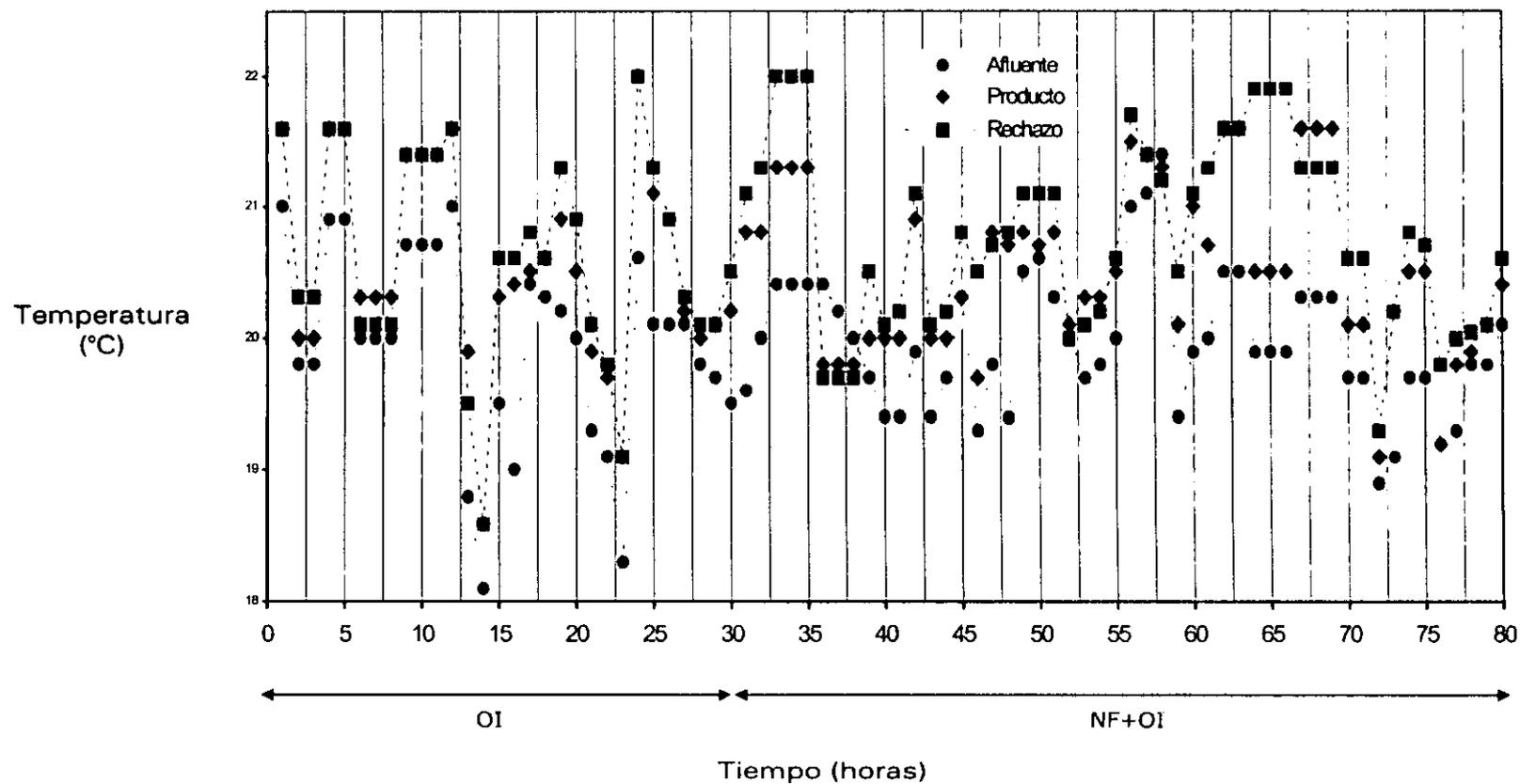


Figura 48. Comportamiento de la temperatura en la unidad de OI

d) Control de la calidad del agua

La Tabla 17 presenta las características del afluente, producto y rechazo de la unidad de OI cuando operó en paralelo y en serie, los límites recomendados por el fabricante de membranas y las concentraciones permisibles de la calidad del agua potable en México. Además, en la Figura 49 y 50 se muestra el balance de masa del arreglo OI y NF+OI.

Tabla 17. Parámetros de seguimiento de la calidad del agua en la unidad de OI

| Parámetro | A | RF | Producto | | NOM | Rechazo | |
|---|---------------------|--------|-----------|----------|-----------|---------------------|----------|
| | | | OI | NF+OI | | OI | NF+OI |
| pH | 6.8±0.2 | 3 - 10 | 4.7±1.3 | 4.8±0.3 | 6.5 - 8.5 | 7.4±0.2 | 7.4±0.2 |
| SDI | 2.7±0.06 | <5 | NR | NR | -- | NR | NR |
| Conductividad (mS/cm) | 1.74±0.03 | -- | 0.08±0.03 | 0.1±0.02 | -- | 4.9±1.6 | 5.2±1 |
| SDT (mg/L) | 869±37 | <3000 | 40±14 | 57±11 | 1000 | 2448±792 | 2599±512 |
| Temperatura (°C) | 20.2±0.8 | 4 - 45 | 20.5±0.9 | 20.3±0.6 | -- | 20.4±0.9 | 20.8±0.6 |
| COT (mg/L) | 35±16 | <10 | 2.4±0.2 | 2.1±0.1 | -- | 204±14 | 215±9 |
| Alcalinidad (mg de CaCO ₃ /L) | 430±6 | -- | 9±0.01 | 6±0.01 | -- | 1450±8 | 1500±69 |
| Dureza total (mg de CaCO ₃ /L) | 376±22 | <17 | 4±0.01 | 2±0.01 | 500 | 1400±282 | 1484±111 |
| Dureza de Ca (mg de CaCO ₃ /L) | 174±41 | -- | 0.5±0.01 | 0±0.01 | -- | 700±86 | 710±70 |
| Dureza de Mg (mg de CaCO ₃ /L) | 202±31 | -- | 3.5±0.01 | 2±0.01 | -- | 690±198 | 784±92 |
| Fe (mg/L) | <0.02 | <0.1 | nd | nd | 0.3 | NR | NR |
| Cloro residual libre (mg/L) | nd | <0.1 | nd | nd | 0.2 - 1.5 | NR | NR |
| Mn (mg/L) | <0.003 | <0.5 | nd | nd | 0.15 | NR | NR |
| Ba (mg/L) | 0.099 | <0.1 | NR | NR | 0.7 | NR | NR |
| Si (mg/L) | 29±2.9 | <60 | NR | NR | -- | NR | NR |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 260±24 | -- | 2±0.4 | 1±0.01 | -- | 700±14 | 1300±755 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 250±23 | -- | 2.6±0.2 | 6.8±0.01 | 250 | 400±50 | 500±30 |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 8.7±0.1 | -- | 1.9±0.7 | 2.4±0.62 | 10 | 10.9±12.5 | 12.5±3.5 |
| Coliformes Fecales (UFC/100 ml) | 9.3x10 ² | -- | 0 | 0 | 0 | 4.2x10 ³ | NR |

A: Afluente

RF: Recomendaciones del fabricante

NOM: NOM-127-SSA1-1994

nd: No detectado

NR: No realizado

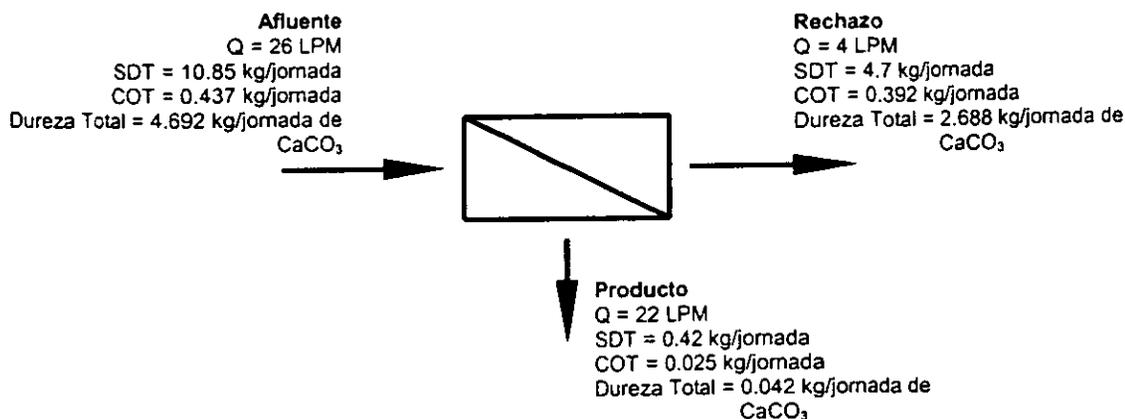


Figura 49. Balance de masa del arreglo OI

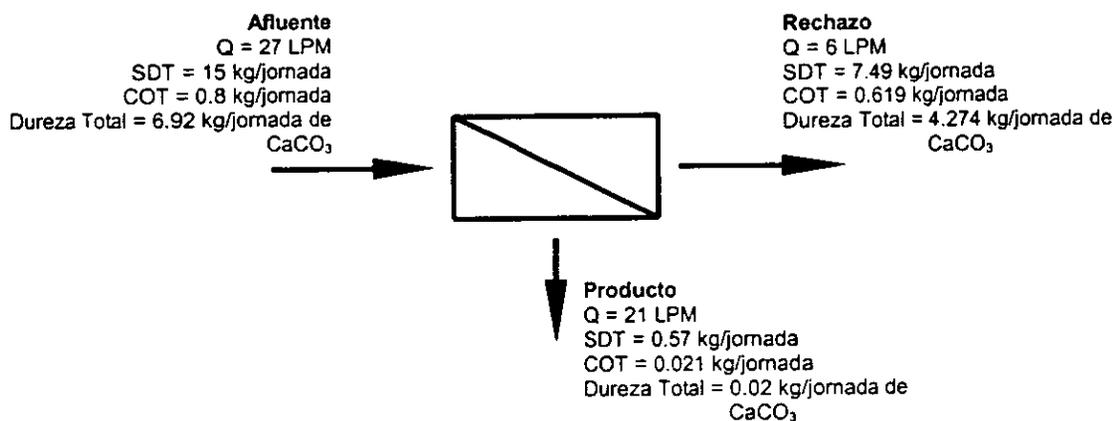


Figura 50. Balance de masa del arreglo NF+OI

Afluente

La concentración de pH, IDS, SDT, temperatura, Fe, cloro residual libre, Mn, Ba y Si en el agua del manantial presentaron concentraciones inferiores a las recomendadas por el fabricante de membranas, de modo que no fue ningún inconveniente para ser tratada por la unidad de OI.

Caso contrario sucedió con la concentración de COT y dureza total; para ello, es necesario incorporar al pretratamiento, al igual que en la unidad de NF, un filtro de carbón activado y un ablandamiento para mantener en concentraciones mínimas estos parámetros y reducir el ensuciamiento o incrustación de las membranas.

Producto

El producto de las configuraciones OI y NF+OI presentaron concentraciones muy similares a las obtenidas en la NF e inferiores a las requeridas por la Norma Oficial Mexicana. Aunado a esto, en ambas configuraciones no se presentaron unidades formadoras de colonias de coliformes fecales.

Independientemente de cumplir con la normatividad mexicana, se recomienda que al proceso de membranas se incorpore un postratamiento constituido por recuperación de alcalinidad y cloración; el primer caso se empleará para elevar el pH del agua producto y el segundo para evitar la proliferación de microorganismos en el sistema de conducción y distribución de agua potable.

Los arreglos presentaron remociones de SDT del orden del 96%; 94 y 97% de COT, 99 y 98% de dureza total para la OI y NF+OI, respectivamente. Teóricamente, la remoción en una unidad de membranas es superior al 95% (Weitnaure y Cumb, 1996).

Rechazo

La calidad del rechazo generado por el arreglo de OI fue ligeramente inferior al de NF+OI, pero en ambos casos se presentaron concentraciones altas de SDT y COT, los cuales pueden limitar su disposición. Estas concentraciones fueron las esperadas pues son los contaminantes que no lograron atravesar las membranas.

De acuerdo al balance de masa de las Figuras 49 y 50 se presentó un acumulamiento sobre la superficie de las membranas del 53 y 46% de SDT, 42 y 38% de dureza total y 5 y 2% de COT para el arreglo de OI y NF+OI, respectivamente. Los resultados establecen que el taponamiento de las membranas se debió a incrustaciones y no por ensuciamiento, pues la acumulación del material orgánico es mínimo.

4.3. Comparación de los arreglos de membranas

Para comparar los arreglos estudiados se tomaron en cuenta los factores de generación de producto, su calidad y el costo energético por metro cúbico del agua tratada.

4.3.1. Generación de producto

De los tres arreglos analizados (Tabla 18), el arreglo NF+OI generó un mayor volumen de producto, del orden de 16.7 m³ que representó el 78% del volumen tratado. Los arreglos de OI y NF generaron 9.5 y 7.3 m³, es decir, el 69 y 68%, respectivamente. La diferencia en producción de la NF+OI con respecto a la OI y NF fueron del 15 y 13% respectivamente, que en términos de volumen puede llegar a ser importante.

Tabla 18. Volumen generado para cada arreglo de membranas

| Arreglo | Presión de Operación (kg/cm ² - psi) | m ³ /jornada | | | Recuperación de Producto (%) |
|---------|---|-------------------------|----------|---------|------------------------------|
| | | Afluente | Producto | Rechazo | |
| NF | 11.6 - 165 | 10.8 | 7.3 | 3.5 | 68 |
| OI | 15.8 - 225 | 13.7 | 9.5 | 4.2 | 69 |
| NF+OI | 11.6+15.8 | 21.3 | 16.7 | 4.6 | 78 |

Cabe destacar que este análisis fue realizado con los datos obtenidos bajo las condiciones óptimas de operación de los equipos, por lo que no se consideraron los efectos de taponamiento de las membranas.

4.3.2. Calidad del producto

De acuerdo a los parámetros analizados en campo (Tabla 13 y 17), la calidad del producto generado en los tres arreglos de membranas son semejantes y muy inferiores a la calidad de la NOM-127-SSA1-1994 para que el agua tenga un uso potable.

4.3.3. Consumo y costo energético por metro cúbico tratado

En la Tabla 20 se muestra el consumo y el costo energético para producir un metro cúbico de agua. Los cálculos se realizaron con base en la presión de descarga de la bomba y considerando eficiencias del motor y bomba del 85%. El costo del kW-h fue de \$0.70 que corresponde a la tarifa para servicios de agua potable.

Tabla 19. Consumo y costo energético por metro cúbico para cada arreglo

| Arreglo | Presión de Operación (psi) | Presión de Alimentación (psi) | Consumo (Kwh/m ³) | Gasto (m ³ /j) | Consumo (Kw-h/j) | Costo por Jornada (\$/j) | Producto (m ³ /j) | Costo unitario (\$/m ³) |
|---------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| NF | 165 | 175 | 0.47 | 10.8 | 5.02 | 3.52 | 7.3 | 0.48 |
| OI | 225 | 250 | 0.66 | 13.7 | 9.04 | 6.32 | 9.5 | 0.67 |
| NF-OI | 165 + 225 | 175 + 250 | 1.13 | 21.3 | 14.06 | 9.84 | 16.7 | 0.59 |

El sistema con el menor costo energético por metro cúbico fue la NF, con \$0.48, seguido del arreglo NF+OI y la OI con costos de \$0.59 y \$0.67, respectivamente. Cabe mencionar que estos costos fueron calculados antes de que el equipo de membranas empezara a taparse.

4.3.4. Selección del arreglo de membranas adecuado

Al no haber grandes diferencias en la calidad del producto generado y desde el punto de vista de costos energéticos por metro cúbico de agua tratada, se establece que la NF, cuando opera a una presión de 11.6 kg/cm² (165 psi), es la mejor opción de tratamiento de esta investigación.

No obstante, para que el proceso de NF sea confiable deberá incorporarse al tren de tratamiento un pretratamiento más completo, así como un postratamiento. En el primer caso, estará constituido por ablandamiento, remoción de material orgánico, filtro multimedia (granate, arena y antracita) y filtro de cartucho (Figura 51); en el segundo caso, por ajuste de pH y desinfección.

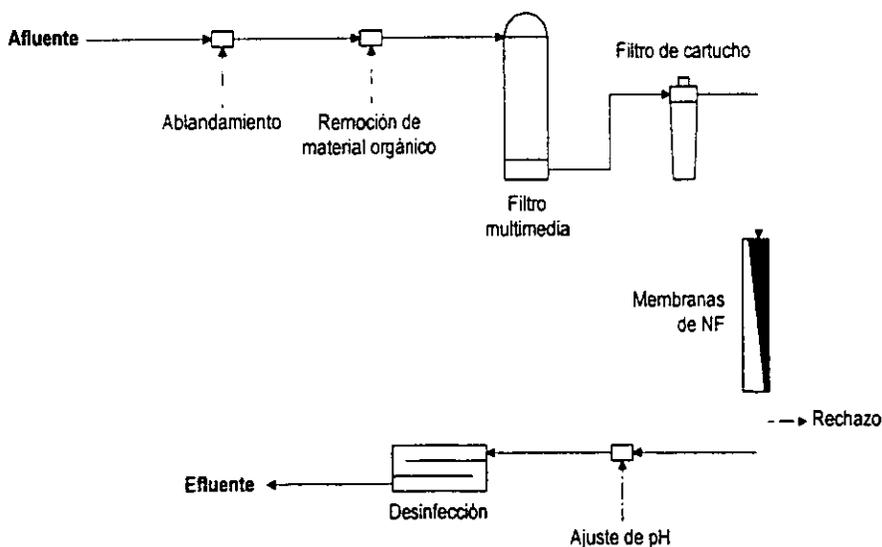


Figura 51. Tren de tratamiento propuesto

4.3.4.1. Pretratamiento

Ablandamiento

El empleo de ablandamiento se realizará con el fin de disminuir la dureza del agua a concentraciones inferiores de 17 mg/L de CaCO_3 ; para ello, se puede dosificar cal o carbonato de sodio (Na_2CO_3), o simplemente instalar una unidad de resinas de intercambio catiónico. También puede dosificarse un antincrustante como el hexametáfosfato de sodio, el cual hace más lento el proceso de cristalización.

Remoción de material orgánico

El agua del manantial presentó una concentración de material orgánico superior a 10 mg/L, de modo que es necesario mantener concentraciones mínimas para prevenir el ensuciamiento de las membranas con moléculas orgánicas. Para reducir la concentración puede emplearse un filtro con carbón activado como medio filtrante, ozonación o cloración; este último tiene la desventaja de dañar las membranas de composite, por lo que debe declorarse el agua antes de ser alimentada a la unidad.

Filtro multimedia y filtro de cartucho

A pesar de que el agua del manantial presenta un IDS inferior a 5, es recomendable emplear un proceso de filtración constituido por filtro multimedia (granate, arena y antracita como medio filtrante) y filtro de cartucho; el primero removerá partículas de 10 μm mientras que el segundo 5 μm . De esta forma se evitará la obstrucción de las membranas.

4.3.4.2. Postratamiento

Ajuste de pH

Como la unidad de NF genera un producto con pH cercano a 4, será necesario incrementarlo para evitar el daño por corrosión al sistema de conducción o distribución de agua, o evitar enfermedades gastrointestinales por un consumo prolongado. Para ajustar el pH a un valor de 6.5 a 8 (NOM-127-SSA1-1994) se adicionará al agua una solución alcalina, de tal forma de transformar el ácido carbónico en bicarbonatos.

Desinfección

Finalmente, como no se logran mantener condiciones estériles a lo largo de la zona de descarga o conducción del producto, es necesario una desinfección. La cloración podrá mantener un remanente en la línea de distribución y evitará la proliferación de microorganismos.

CAPÍTULO V

Disposición del Rechazo

CAPÍTULO V

Disposición del Rechazo

5.1. Volumen generado de rechazo en la unidad de NF

La unidad de NF generó 3.5 m³ de rechazo total que representó el 32% del volumen tratado (Tabla 20), el cual estaba constituido por el volumen del rechazo y del *flushing*.

Es importante hacer notar que la generación total de rechazo estaba influenciada por el *flushing*, que representó el 17% del volumen generado; por ello, el volumen del enjuague es una opción que se debe analizar para disminuir el volumen del rechazo total.

Tabla 20. Volumen y generación de rechazo en la unidad de NF

| | Afluente | Producto | Rechazo | Flushing | Rechazo Total |
|-----------------------------------|----------|----------|---------|----------|---------------|
| Volumen (m ³ /jornada) | 10.8 | 7.3 | 1.6 | 1.9 | 3.5 |
| Generación (%) | 100 | 68 | 15 | 17 | 32 |

De acuerdo a las recomendaciones del fabricante, el *flushing* se presentó cada 30 min con una duración de 6 min, que representó 1:18 horas por jornada. Si se reduce este periodo el volumen generado de *flushing* disminuirá, y al mismo tiempo, disminuirá la generación de rechazo total y se incrementará la generación del producto.

Por ejemplo, si se reduce el tiempo de operación del *flushing* a 20 min por jornada su generación disminuirá a 5% (Tabla 21), el rechazo total bajará a 23% y se incrementará el producto a 77%.

Tabla 21. Volumen y generación de rechazo en la unidad de NF para un *flushing* con duración de 20 min/jornada

| | Afluente | Producto | Rechazo | Flushing | Rechazo Total |
|-----------------------------------|----------|----------|---------|----------|---------------|
| Volumen (m ³ /jornada) | 9 | 6.9 | 1.6 | 0.5 | 2.1 |
| Generación (%) | 100 | 77 | 18 | 5 | 23 |

Con base en esto, deben realizarse suficientes pruebas piloto para establecer si hay un decremento en la producción de la unidad de NF al reducir el tiempo de funcionamiento del *flushing*.

5.2. Opción del manejo del rechazo mediante OI

Una alternativa para reducir el volumen del rechazo de la planta piloto fue mediante el arreglo NF-OI, el cual consistió en alimentar la unidad de OI únicamente con el rechazo de la NF. El volumen del rechazo que se generó de este arreglo resultó ser el mínimo en comparación con la NF, pues fue de 2.9 m³/jornada (27%). Sin embargo, presentó una mayor concentración de sales y material orgánico, tal como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Generación y calidad del rechazo del arreglo NF-OI

| Parámetro | NF-OI |
|-----------------------|-------|
| Generación (%) | 27 |
| pH | 7.5 |
| Conductividad (mS/cm) | 8.5 |
| SDT (mg/L) | 4283 |
| Temperatura (°C) | 21.8 |
| COT (mg/L) | 401 |

Tomando en cuenta que este rechazo fue el que presentó una mayor concentración de contaminantes, es decir, el escenario más desfavorable de disposición, se realizó un análisis CRETIB para determinar si este líquido debe considerarse como peligroso (NOM-052-ECOL/93). En la Tabla 23 se presenta un resumen de los resultados del CRETIB; los análisis realizados para determinar cada una de las características (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso) se muestran en el Anexo A.

Tabla 23. Resultados del CRETIB del rechazo del arreglo NF-OI

| Características | Resultado |
|----------------------|----------------------|
| Corrosividad | No corrosivo |
| Reactividad | No reactivo |
| Explosividad | No explosivo |
| Toxicidad | No tóxico |
| Inflamabilidad | Inflamable |
| Biológico Infeccioso | Biológico Infeccioso |

Con base en la normatividad mexicana, se establece que el rechazo del arreglo NF-OI debe considerarse como un residuo peligroso debido a las características biológicas infecciosas y por ser inflamable. Este resultado condiciona el manejo del rechazo mediante el arreglo NF-OI.

El rechazo se clasifica como biológico infeccioso ya que presentó una cuenta en placa de 800 UFC. Asimismo, es de esperarse que presente concentraciones de coliformes fecales por arriba de 1000 NMP/100 mL, lo cual limita las posibilidades de disposición sin tratamiento. Sin embargo, esta situación es fácilmente controlable mediante una desinfección.

Al disminuir y concentrar el volumen del rechazo mediante el arreglo NF-OI se incrementó la concentración de material orgánico (401 mg/L), el cual está influenciado por aguas residuales que presentan concentraciones apreciables de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles (Anexo A). Esta característica explica la inflamabilidad en el líquido.

Por lo anterior, se decidió realizar la prueba de inflamabilidad al rechazo del arreglo NF, el cual es la mejor opción de tratamiento de esta investigación. El resultado obtenido indicó que el rechazo no es inflamable, pues estaba menos concentrado que el obtenido en el arreglo NF-OI (157 mg/L). Por consiguiente, de acuerdo a las características que constituyen un CRETIB, el rechazo de la NF no debe considerarse como un residuo peligroso, siempre y cuando presente un tratamiento mediante una desinfección.

Por otra parte, como la NF-OI es el arreglo más desfavorable, al producto generado se le realizó un análisis de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, cuyos resultados muestran que el pH (4.79) no cumple con la concentración establecida por la Norma Mexicana (Anexo B); el resto de los parámetros si cumplen con dicha normatividad e incluso son inferiores a los criterios internacionales establecidos en la Tabla 2 del capítulo I (página 13 y 14). Por lo tanto, es necesario incrementar la concentración del pH a valores de 6.5 a 8.5 (apartado 4.3.4.2.), para que el producto pueda tener un uso potable. Si el producto del arreglo NF-OI cumple con este requisito, es de esperarse que el producto generado del arreglo NF podrá tener también un uso potable.

5.2.1 Alternativas de disposición del rechazo

La disposición del rechazo o concentrado de las plantas de NF y OI es un problema significativo para todas las plantas de tratamiento de agua potable que emplean membranas, debido principalmente a que el flujo del rechazo contiene una alta concentración de sales.

Este rechazo debe ser dispuesto de tal forma que no ocasione disturbios al ecosistema de la zona de descarga ni contamine las fuentes de agua potable. Los métodos más comunes de disposición del rechazo son los siguientes:

- Descarga a corrientes superficiales
- Descarga a desagüe
- Descarga a lagunas
- Reciclado a la fuente o recurso hidráulico
- Procesos avanzados
- Disposición en el mar
- Estanque de evaporación
- Inyección en pozo profundo

Las cuatro primeras disposiciones son empleadas cuando se presentan plantas de tratamiento de pequeña escala, pues el volumen de rechazo generado es mínimo y sus concentraciones de sales normalmente no ocasionan alteraciones importantes al medio ambiente. En el caso del Valle del

Mezquital, la disposición a corrientes superficiales podría ser una opción pues el río Tula se clasifica como altamente salino (1.6 mS/cm^2) (Jiménez *et al.*, 1997).

Los *proceso avanzados* son métodos que permiten manejar el rechazo en evaporadores, de tal forma que se genera un producto esencialmente seco. Este es el medio recomendado de disposición del rechazo derivado de la desalación de agua y efluentes industriales. El concentrado de los evaporadores puede absorberse en cenizas para dar como resultado una descarga nula del efluente.

La *disposición en el mar* es el método más económico, sin embargo, se debe tener cuidado de asegurar que la descarga del concentrado cumpla con las normas necesarias y que el medio ambiente no se vea afectado de modo adverso. Esta disposición no resulta ser factible cuando la planta potabilizadora se encuentre lejos de zonas costeras ya que los costos de disposición se incrementan enormemente; principalmente por bombeo o conducción.

En zonas donde existe una elevada tasa de evaporación, como es el caso de las zonas áridas, la disposición del concentrado en lagunas o *estanques de evaporación* es un método efectivo. No obstante, hay que tener cuidado de evitar la filtración del concentrado a mantos freáticos o la derivación de un exceso de flujo a corrientes superficiales. Las lagunas adecuadamente limitadas y de suficiente capacidad deben evitar este tipo de problemas.

El método de *inyección a pozo profundo* consiste en inyectar el rechazo en pozos mucho más profundos que cualquier fuente de suministro de agua potable en la zona, para evitar cualquier posibilidad de contaminación. Los mantos acuíferos confinados pueden utilizarse para este propósito pues no se va a presentar ninguna contaminación de aguas subterráneas donde el agua esté siendo bombeada para consumo humano.

Por lo tanto, se sugiere que el rechazo de la futura macroplanta de membranas presente una disposición en lagunas de evaporación, inyección a pozo profundo o descarga a corrientes superficiales. Estos métodos deberán ser

estudiados y analizados para evitar alteraciones al ecosistema o contaminación de cuerpos de agua; si es necesario, deberá realizarse un tratamiento al rechazo antes de su disposición.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

CAPÍTULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Como una alternativa de suministro de agua potable a la Ciudad de México, en esta investigación se realizaron pruebas a nivel piloto al agua del manantial Cerro Colorado, zona 1 del Valle del Mezquital, empleando membranas de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) mediante tres arreglos diferentes: NF, OI y NF+OI.

La unidad de NF y OI se operaron a una presión de 11.6 kg/cm² (165 psi) y 15.1 kg/cm² (225 psi), respectivamente, ya que generaron 68 y 69% de producto.

La operación de la NF y OI fue semicontinua y se desarrolló durante 137 y 80 horas para cada unidad. Durante éste tiempo, ambas unidades presentaron un decaimiento en su rendimiento debido al taponamiento de las membranas; en la OI la obstrucción fue más rápida.

La concentración de COT (35 mg/L) y dureza total (376 mg/L de CaCO_3) en el agua del manantial fue superior a la calidad requerida para ser tratada por la unidad de membranas, lo que propició el taponamiento principalmente por incrustación.

De acuerdo a la calidad del producto, las unidades de membranas presentaron concentraciones similares y equivalentes al agua destilada, pues los SDT fueron de 44 mg/L en promedio y el pH cercano a 5. Además, se generó un agua blanda (<12 mg/L de CaCO_3) con muy baja concentración de sulfatos (1 a 3 mg/L), cloruros (2.6 a 6.8 mg/L) y nitratos (1.9 a 2.7 mg/L), los cuales fueron inferiores a la NOM-127-SSA1-1994.

En cuanto al rechazo, como fue de esperarse, la NF y OI presentaron una concentración de parámetros superior al afluente pues las impurezas que no lograron atravesar las membranas fueron concentradas y desalojadas en el rechazo; de hecho, las concentraciones de SDT (2190 a 2599 mg/L) y COT (157 a 215 mg/L) pueden limitar su disposición.

Una alternativa para reducir el volumen del rechazo generado fue alimentar el rechazo de la NF a la OI (NF-OI). Este arreglo generó poco volumen rechazo (27%) pero con una mayor concentración de sales (4283 mg/L) y material orgánico (401 mg/L). Al ser el concentrado más desfavorable, se le realizó un análisis de CRETIB (NOM-052-ECOL-1993) cuyo resultado estableció que es un residuo peligroso debido a sus características biológicas infecciosas (800 UFC) y por ser inflamable; por consiguiente, estas características condicionan concentrar el rechazo mediante este arreglo.

En cuanto a biológico infeccioso, es de esperarse que el líquido presente una concentración de coliformes fecales superior a 1000 NMP/100 mL. Este inconveniente es fácilmente controlado mediante una desinfección.

La inflamabilidad se debió a la reducción y concentración del volumen del rechazo (27%), así como a la influencia de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. Por ello, se decidió realizar la prueba al rechazo de la NF, cuyo resultado estableció que **no es inflamable** pues estaba menos concentrado (32%) que el obtenido en el arreglo NF-OI. La prueba se realizó dos veces en la

NF-OI y una vez en la NF, por consiguiente, deben realizarse suficientes pruebas para analizar con más detalle la caracterización del rechazo y determinar el motivo de la inflamabilidad.

Además, al producto del arreglo NF-OI se le realizó un análisis de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, cuyos resultados establecieron que el producto no tiene un uso potable, pues únicamente el pH (4.79) no cumplió con dicha norma.

Por otro lado, el costo energético por metro cúbico tratado fue inferior en el arreglo NF, teniendo un costo de 0.48 \$/m³, mientras que la NF+OI y OI presentaron costos de 0.59 y 0.67 \$/m³, respectivamente.

De acuerdo a la calidad del producto que se generó, aunque las diferencias no fueron importantes en los tres arreglos de membranas, y de acuerdo al costo energético por metro cúbico tratado, se establece que el arreglo de NF fue la mejor opción para potabilizar el agua del manantial Cerro Colorado.

6.2. Recomendaciones

Para regenerar las membranas, principalmente las de OI, será necesario realizar un lavado, sin embargo, la generación de producto no será igual que la inicial.

Es importante mencionar que los lavados no resuelven la problemática de las incrustaciones por lo que será necesario un ablandamiento en el pretratamiento para evitar la obstrucción prematura de las membranas, la reducción de su vida útil y el incremento de costos de mantenimiento de la unidad. El ablandamiento puede estar constituido mediante la instalación de una unidad de resinas de intercambio catiónico, dosificación de cal o carbonato de sodio; estos procesos deberán reducir la concentración de dureza a valores inferiores de 17 mg/L de CaCO₃.

Para reducir el ensuciamiento de las membranas con moléculas orgánicas será necesario remover el contenido orgánico a concentraciones inferiores de 10

mg/L. Para ello, puede emplearse un filtro de carbón activado como medio filtrante, ozonación o cloración; este último tiene la desventaja de dañar las membranas de poliamida, por lo que será necesario declorar el agua antes de entrar a la unidad de membranas.

Aunado al pretratamiento, se recomienda que al finalizar la jornada de trabajo o antes de realizar un paro por más de 3 días se realice un lavado a la unidad de membranas únicamente con producto para remover la incrustación generada.

Para evitar tanto el daño por corrosión al sistema de distribución como la generación de enfermedades gastrointestinales por el consumo de agua con pH cercano a 4, y sobre todo para que el producto cumpla con la calidad recomendada por la normatividad mexicana, es necesario adicionar al tren de tratamiento un postratamiento que incluya el ajuste del pH a concentraciones de 6.5 a 8 (NOM-127-SSA1-1994) mediante la dosificación de una solución alcalina.

Las membranas remueven esencialmente la mayoría de los microorganismos, empero, al no poder mantener condiciones estériles a lo largo de la zona de descarga del producto los microorganismos pueden proliferar. Esto obliga a realizar una desinfección como postratamiento y para ello puede considerarse la dosificación de cloro, ya que mediante este proceso se puede mantener una concentración de cloro libre residual para evitar dicha proliferación.

Como la generación de rechazo total está fuertemente influenciado por la generación del *flushing*, es recomendable disminuir el periodo de funcionamiento del enjuague para reducir su volumen; por ejemplo, si se reduce el enjuague a 20 min por jornada la generación de rechazo total, que fue de 32%, bajará a 23% mientras que el producto se incrementará a 77%.

En lo que corresponde al rechazo, se sugiere que su disposición sea mediante inyección a pozo profundo, mediante estanques de evaporación o descarga a corrientes superficiales (río Tula). Sin embargo, estas alternativas de disposición deben ser estudiadas y analizadas para evitar alteraciones al ecosistema o contaminación de cuerpos de agua.

Finalmente, se aconseja realizar suficientes pruebas piloto con el fin de mejorar el proceso de tratamiento, eliminar incertidumbres de operación y evitar costos innecesarios por mantenimiento u operación de la futura macroplanta. Posiblemente sea necesario realizar pruebas con otro tipo de membranas para evitar generar un agua con muy baja concentración de sales.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- 📖 Al-Shammiri, M. y Al-Dawas, M. (1997). "Maximum Recovery From Seawater Reverse Osmosis Plants in Kuwait". *Desalination*. No 110. Elsevier Science. March. Pp 37-48.

- 📖 Andrews, L. y Witt, G. (1993). "An Overview of RO Concentrate Disposal Methods in Zahid Amjad". *Reverse Osmosis-Membrane technology. Water Chemistry and Industrial Applications*. Van Nostrand-Reinhold, New York. Pp 30.

- 📖 AWWARF (1998). "Tratamiento del agua por procesos de membranas: principios, procesos y aplicaciones". American Water Work Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux and Water Research Commission of South Africa. Editorial Mc Graw Hill. España. P 837.

- 📖 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

- 📖 Buckley, C.; Stephenson, T; Brouckaert, C. y Brindle, K. (1998). "The Potential Application on Membrane Processes for Wastewater Recycling and reuse". *Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Conference Proceeding*. Volume 1. Fiera Milano. September 14-16. Pp 415-418.

- 📖 Buross, O. (1995). "Cost Effective Implementation of Water Resource Technologies in Arid Areas". *International Conference on Water Resources Management in Arid Countries*. Muscat. March 12-16. Volume 2. Pp 611-616.

- 📖 Capella, S. y Pegueros, A. (1998). "Generación de compuestos organoclorados en la cloración del agua residual". *Resumen Preliminar*. Departamento de Química Analítica. Facultad de Química UNAM.

- ☐ Ernst, M. y Jekel, M. (1998). "Advanced Treatment Combination for Groundwater Recharge of Municipal Wastewater by Nanofiltration and Ozonation". Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Conference Proceeding. Volume 1. Fiera Milano. September 14-16. Pp 431-438.

- ☐ Gagliardo, Paul (1998). "Comparing the Performance of Various RO Membranes for Water Purification". Water Reuse Conference Proceeding. American Water Works Association y Water Environment Federation. Feb 1-4. Lake Buena Vista, Florida. Pp 559-563.

- ☐ Henty, Glynn y Heinke, Gary (1999). "Ingeniería ambiental". Segunda Edición. Editorial Prentice Hall. México. Pp 778.

- ☐ IMPRESA (2000). "Sistemas de filtración por membrana". Imagen Productiva Ecológica. Manual de operación. Feb. Pp 26.

- ☐ Jiménez, Blanca; López, Nonantzin y Sotomayor, Claudia (1997). "Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Valle del Mezquital". Informe elaborado para la Comisión Nacional del Agua. Proyecto 5322. Instituto de Ingeniería, UNAM: P 263.

- ☐ Jiménez, Blanca; Becerril, Elías y Torres, Luis (1999a). "Tecnología para la desalación de agua". Informe elaborado para la Comisión Nacional del Agua. Proyecto 8426. Diciembre. Pp 127.

- ☐ Jiménez, Blanca; Cruickshank, Carlos; Chávez, Alma; Jiménez, Rocío y Pérez, Rosalino (1999b). "Estudio de la factibilidad del empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México". Informe final elaborado por el Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua. Proyecto 8393. Instituto de Ingeniería, UNAM. Septiembre. Pp 189.

- ☐ Jiménez, Blanca; Chávez, Alma; Torres, José Luis; Laugier, Jérôme; Pérez, Rosalino y Barrios, Eugenio (1999c). "Proyecto de evaluación de la aplicabilidad de membranas para potabilizar el agua del acuífero del

Mezquital". Informe final elaborado por el Instituto de Ingeniería elaborado para la Comisión Nacional del Agua. Proyecto 9340. Instituto de Ingeniería, UNAM. December.

- 📖 Jiménez, Blanca; Chávez, Alma; Jiménez, Rocío y Pérez, Rosalino (2000). "¿El agua del Valle del Mezquital, fuentes de abastecimiento para el Valle de México?". XII Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Año 1, N° 1, Marzo. México. Pp 53-61.
- 📖 Kirpatrick, Joanne (1991). "Applied Math for Water Plant Operators". Mathematics for Water and Wastewater Treatment Plant Operator Series. Technomic Publishing. USA.
- 📖 Leal, Mariana; Chávez, Valentina y Larralde, Laura (1996). "Temas ambientales: Zona Metropolitana de la Ciudad de México". *Gobierno del Estado de México, Secretaría de Ecología, Comisión Ambiental Metropolitana, Programa Universitario del Medio Ambiente y SEMARNAP*. México. P 16.
- 📖 Levine, Bruno.; Madireddi, Kapal; Lazarova, Valentina; Stenstrom, Michael y Suffet, Mel (1998). "Treatment of trace Organic Compounds by Membrane Processes: At the Lake Arrowhead Water Reuse Pilot Plant". Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Conference Proceeding. Volume 1. Fiera Milano. September 14-16. Pp 447-454.
- 📖 MITIJ (1995). "Future Water Resources". Ministry of International trade and Industry of Japan. Environmental protection and Industrial Location Bureal. Japan. Pp 1-6.
- 📖 NALCO (1989). "Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones". Tomo II. Editorial Mc Graw Hill. México. Pp 14-1 a 16-9.
- 📖 National Academy Press (1995). "El suministro de agua de la Ciudad de México: Mejorando la sustentabilidad". National Research Council, Academia de la Investigación Científica y Academia Nacional de Ingeniería.

USA. P 114.

- 📖 Nitto Denko (2000). "Spiral Wound Membrane Elements". Nitto Denko Corporation. Japan. Pp 5.
- 📖 Reynolds, Tom. y Richards, Paul (1995). "Unit Operations and Processes in Environmental Engineering". Publishing Company. USA. Pp 401-408.
- 📖 Romero, Jairo A. (1999). "Calidad del agua". Editorial Alfaomega. México. Pp 273.
- 📖 Saldaña, Ivette (2000). "Mantener abierta la llave para el abasto de agua, prioridad para la CNA". *El Financiero*. Lunes 28 de Febrero. México. P 77.
- 📖 Schutte, C. (1983). "Desalination: A South African Perspective". Water Research Comisión. Pretoria, South Africa. Pp 25.
- 📖 Torres Romero, José Luis (1999). "Selección y diseño de un sistema de filtración a partir de la comparación de dos medios de filtración para remover huevos de helminto de un efluente primario avanzado". *Tesis profesional que para obtener el título de Ingeniero Civil*. Facultad de Ingeniería, UNAM. Pp viii-ix, 17.
- 📖 Yalcin, F.; Koyuncu, I.; Oztürk, I. y Topacik, D. (1998). "Pilot Scale UF and RO Studies on Water Reuse in Corrugated Board Industry". *Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Conference Proceeding*. Volume 1. Fiera Milano. September 14-16. Pp 455-462.
- 📖 Wiesner, Mark y Chellam, Shankaraman (1999). "The Promise of Membrane Technology". *Environmental Science & Technology*. September 1. Volume 33. Pp 360-366.

**PÁGINAS DE
INTERNET
CONSULTADAS**

PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS

- @ Critical Review of Desalination Concentrate Disposal to Surface Water.
<http://www.geocities.com/cvanhems/intro.html>.

- @ "GAT is Reverse Osmosis?".
<http://www.osmonics.com/products/Page833.htm>.

- @ Hydraunatics (2000). <http://www.hydraunatics.com>.

- @ Kronmiller, David y Dunham, Stephen (1996). "The Inherent Risks of Using Genric Chemicals in RO Applications".
<http://www.pwtinc.com/articles.htm>.

- @ "Membrane Technology".
<http://www.ceic.unsw.edu.au/staff/Vicki/memtech.htm>.

- @ Mickley, Mike; Hamilton, Robert; Gallegos, Lana y Truesdall, Jeffrey (1993). "Membrane Concentrate Disposal". AWWA Research Foundation Order. N° 90637. November. <http://www.awwarf.com/exsums/90637.htm>.

- @ Murakami, Masahiro y Musiake, Katsumi. "Desalinación por ósmosis inversa aprovechando la hidro-energía para co-generación".
http://unesco.org.uy/phi/libros/uso_eficiente/murakami.html.

- @ Murrieta, Rosa Lidia. "Agua y contaminación". Revista de Derecho Ecológico. <http://www.uson.mx/informa/derechoecologico/admin.htm>.

- @ Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, "Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente". Instituto Nacional de Ecología. http://www.ine.gob.mx/dgra/normas/res_pel/no_052.htm.

- ① 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.
<http://www.ssa.gob.mx/nom/127ssa14.html>.

- ① "Reverse Osmosis Water Treatment".
<http://www.mseu.msu.edu/msue/imp/mod02/01500611.html>.

- ① SEMARNAP (2000). "El camino a la desalación". Estado de Sonora.
<http://www.semarnap.gob.mx/sonora/Desalación.htm>.

- ① Vanhens, Christophe (2000). "Critical Review of Desalination Concentrate Disposal to Surface Water".
<http://www.geocities.com/evanhems/intro.html>

- ① Weitnauer, Angela y Comb, Lee (1996). "Reverse Osmosis for WFI and PW". Marzo. Ultrapure Water. Osmonics.
<http://www.osmonics.com/products/Page697.htm>

- ① Walling, David. "Water Treatment by Filtration, Conditioners, Distillation, Deionization, and Reverse Osmosis. <http://www.reconn.com/artcle1.htm>.

- ① Weitnauer, Angela y Comb, Lee (1996). "Reverse Osmosis for WFI and PW". Ultrapure Water. 01 Mar.
<http://www.osmonics.com/products/Page697.htm>.

ANEXO A

CRETIB del rechazo
del arreglo NF-01

CRETIB del rechazo del arreglo NF-OI

Característica: Corrosividad

| Parámetro | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inciso de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|---------------------------------|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| pH | -- | NA | 7.89 | -- | 5.5.1.1. | El residuo en solución acuosa no presenta un pH menor a 2 ni mayor a 12.5, por lo que se considera no corrosivo |
| Velocidad de corrosión al acero | mm/año | 6.35 | <6.35 | -- | 5.5.1.2. | El residuo en solución acuosa y a una temperatura de 55°C, no es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020) a una velocidad de 6.35 mm o más por año, por lo que se considera como no corrosivo |

Característica: Reactividad

| Parámetro | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inciso de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|-----------|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| | | | | | 5.5.2.2. | El residuo, bajo condiciones normales (25°C y 1 atm), cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3 y 5:5, no reacciona violentamente formando gases, vapores, ni humos, por lo que se considera no reactivo |
| | | | | | 5.5.2.3. | El residuo, bajo condiciones normales, cuando se pone en contacto con soluciones de pH ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1 N) en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3 y 5:5 no reacciona violentamente formando gases, vapores y humos, por lo que se considera no reactivo |
| Cianuro | mg/kg | 0.1 | <0.1 | -- | 5.5.2.4. | Cuando el residuo se expone a condiciones de pH entre 2 y 12.5 no genera gases, vapores ni humos tóxicos mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 mg de H ₂ S/kg de residuo, por lo que se considera no reactivo |
| Sulfuro | mg/kg | 36.2 | <36.2 | -- | 5.5.2.5. | |

Característica: Explosividad

| Parámetro | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inciso de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|--------------|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| Explosividad | | NA | | -- | 5.5.3.2. | El residuo no es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm ² de presión, por lo que se considera no explosivo |

Característica: Toxicidad

| Parámetro | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inicio de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|--|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| Metales | | | | | | |
| Arsénico | mg/L | 0.1 | 0.37 | 5 | | |
| Bario | mg/L | 0.1 | 0.34 | 100 | | |
| Cadmio | mg/L | 0.1 | 0.014 | 1 | | |
| Cromo hexavalente | mg/L | 0.1 | <0.1 | 5 | | |
| Níquel | mg/L | 0.03 | 0.08 | 5 | | |
| Mercurio | mg/L | 0.0001 | 0.003 | 0.2 | | |
| Plata | mg/L | 0.02 | <0.02 | 5 | | |
| Plomo | mg/L | 0.1 | 0.135 | 5 | | |
| Selenio | mg/L | 0.001 | <0.001 | 1 | | |
| Compuesto Orgánicos Volátiles | | | | | | |
| Acilonitrilo | mg/L | 0.03 | <0.03 | 5 | | |
| Benceno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.5 | | |
| Cclorobenceno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 100 | | |
| Cloroformo | mg/L | 0.005 | <0.005 | 6 | | |
| Cloruro de metilo | mg/L | 0.005 | <0.005 | 8.6 | | |
| Cloruro de vinilo | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.2 | | |
| 1,2-Diclorobenceno | mg/L | 0.01 | <0.01 | 4.3 | | |
| 1,4-Diclorobenceno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 7.5 | | |
| 1,2-Dicloroetano | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.5 | | |
| 1,1-Dicloroetileno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.7 | | |
| Disulfuro de carbono | mg/L | 0.005 | <0.005 | 14.4 | | |
| Isobutanol | mg/L | 0.35 | <0.35 | 36 | | |
| Metilacetona | mg/L | 0.02 | <0.02 | 200 | | |
| 1,1,1,2-Tetracloroetano | mg/L | 0.005 | <0.005 | 10 | | |
| 1,1,2,2-Tetracloroetano | mg/L | 0.01 | <0.01 | 1.3 | | |
| Tetracloruro de carbono | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.5 | | |
| Tetracloroetileno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.7 | | |
| Tolueno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 14.4 | | |
| 1,1,1-Tricloroetano | mg/L | 0.005 | <0.005 | 30 | | |
| 1,1,2-Tricloroetano | mg/L | 0.005 | <0.005 | 1.2 | | |
| Tricloroetileno | mg/L | 0.005 | <0.005 | 0.5 | | |
| Compuesto Orgánicos Semivolátiles | | | | | | |
| o-Cresol | mg/L | 0.01 | <0.01 | 200 | | |
| m,p-Cresol | mg/L | 0.01 | <0.01 | 200 | | |
| 2,4,-Dinitrotolueno | mg/L | 0.01 | <0.01 | 0.13 | | |
| Hexacloroetano | mg/L | 0.01 | <0.01 | 3 | | |
| Nitrobenceno | mg/L | 0.01 | <0.01 | 2 | | |
| Pentaclorofenol | mg/L | 0.02 | <0.02 | 100 | | |
| 2,3,4,6-Tetraclorofenol | mg/L | 0.01 | <0.01 | 1.5 | | |
| 2,4,5-Triclorofenol | mg/L | 0.01 | <0.01 | 400 | | |
| 2,4,6-Triclorofenol | mg/L | 0.01 | <0.01 | 2 | | |

Característica: Toxicidad (continuación)

| Compuesto | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inciso de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|---|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Compuestos Orgánicos Semivolátiles | | | | | | |
| Bis-(2-cloroetil) éter | mg/L | 0.01 | <0.01 | 0.05 | | |
| Fenol | mg/L | 0.01 | <0.01 | 14.4 | | |
| Hexaclorobenceno | mg/L | 0.02 | <0.02 | 0.13 | | |
| Hexacloro-1,3-butadieno | mg/L | 0.01 | <0.01 | 0.5 | | |
| Piridina | mg/L | 0.01 | <0.01 | 5 | | |
| Pesticidas | | | | | | |
| Clordano | mg/L | 0.0004 | <0.0004 | 0.03 | | |
| Endrin | mg/L | 0.0004 | <0.0004 | 0.02 | | |
| Heptacloro | mg/L | 0.0004 | <0.0004 | 0.008 | | |
| Heptacloro epóxico | mg/L | 0.0004 | <0.0004 | 0.008 | | |
| Lindano | mg/L | 0.0004 | <0.0004 | 0.4 | | |
| Metoxicloro | mg/L | 0.0005 | <0.0005 | 10 | | |
| Toxafeno | mg/L | 0.0004 | <0.0004 | 0.5 | | |
| Herbicidas | | | | | 5.5.4.1. | El residuo fue sometido a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECO-1993, y el lixiviado de la muestra representativa no contiene alguno de los constituyentes listados en concentraciones mayores a los límites señalados, por lo que se considera no tóxico |
| Ácido 2,4-Diclorofenoxiacético | mg/L | 0.03 | <0.03 | 10 | | |
| Ácido 2,4,5-Triclorofenoxipropiónico | mg/L | 0.03 | <0.03 | 1 | | |

Característica: Inflamabilidad

| Parámetro | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inciso de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|-----------|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| | | | | | 5.5.5.1. | En solución acuosa no contiene más de 24% de alcohol en volumen, por lo que se considera inflamable |
| | | | | | 5.5.5.2. | Tiene un punto de inflamación inferior a 60°C por lo que se considera inflamable |
| | | | | | 5.5.5.3. | El residuo es líquido, por lo tanto este criterio no aplica |
| | | | | | 5.5.5.4. | El residuo no es gas, por lo que este criterio no aplica |

Característica: Biológico Infeccioso

| Parámetro | Unidades | Límite de detección | Resultado | Concentración Máx Permitida | Inciso de NOM-052-ECOL-1993 | Comentario |
|-----------------|----------|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Cuenta en placa | UFC | 100 | 800 | | 5.5.6.1. | Presencia de microorganismos, el residuo se considera peligroso |

ANEXO B

Caracterización del
producto del arreglo NF-01

Caracterización del producto del arreglo NF-OI

| Parámetro | Unidades | Método | Resultado | NOM-127-SSA-1994 |
|-----------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------|
| Radiactividad Alfa Global | | | | 0.1 |
| Sólidos solubles | Bq/L | AB-117 | 0.07 ± 0.01 | |
| Sólidos insolubles | Bq/L | AB-117 | 0.03 ± 0.01 | |
| Radiactividad Beta Global | | | | 1 |
| Sólidos solubles | Bq/L | AB-117 | < 0.06 | |
| Sólidos insolubles | Bq/L | AB-117 | < 0.04 | |
| Coliformes Fecales | UFC/100mL | NMX AA-102-1987 | 0 | 0 |
| Cloruros | mg/L | NMX AA-73-1981 | 7.94 | 0.07 |
| Cloruros Totales | mg/L | NMX AA-58-1982 | 0.015 | |
| Bióxido de Carbono | mg/L | SM18 4500CO2/B | 14 | |
| Color Real | Pt/Co | NMX AA-45-1981 | 2.5 | 20 |
| COT | mg/L | EPA 415.1 | 0.69 | |
| Coliformes Totales | UFC/100mL | NMX-AA-102-1987 | 0 | 2 |
| DBO soluble | mg/L | NMX AA-28-1981 | NO DETECT | |
| DQO soluble | mg/L | NMX AA-30-1981 | 1.74 | |
| Dureza de Calcio | mg/L CaCO3 | EPA 215.2 | NO DETECT | |
| Dureza de Magnesio | mg/L CaCO3 | NMX AA-72-1981 | 2.97 | |
| Dureza Total | mg/L CaCO3 | NMX AA-72-1981 | 4 | 500 |
| Fluoruros | mg/L | NMX AA-77-1982 | NO DETECT | 1.5 |
| Fenoles Totales | mg/L | NMX AA-50-1981 | NO DETECT | 0.001 |
| Filtración por Muestra | | SM 18o 3030/B | REALIZADA | |
| Huevos de Helminto | org/L | NOM-001-ECOL-96 | 0 | |
| Nitrógeno Amoniacal | mg/L | NMX AA-26-1980 | 0.12 | 0.5 |
| Nitritos (nitrógeno de) | mg/L | NMX AA-81-1986 | 0.01 | 0.05 |
| Nitratos (nitrógeno de) | mg/L | NMX AA-81-1986 | 1.74 | 10 |
| Nitrógeno Total Kjeldhal | mg/L | NMX AA-26-1980 | 3.38 | |
| Oxígeno Disuelto | mg/L | NMX AA-12-1980 | 175 | |
| pH de campo | U pH | NMX AA-08-1980 | 4.79 | 6.5 a 8.5 |
| Fósforo Total | mg/L | NMX AA-29-1981 | NO DETECT | |
| Sulfuros | mg/L | NMX AA-84-1982 | NO DETECT | |
| SAAM | mg/L | NMX AA-39-1980 | 0.33 | 0.5 |
| Sabor y olor | No. UMBRAL | SM18 2160B | NO DETECT | Agradable |
| SDT | mg/L | NMX AA-74-1980 | 60 | 1000 |
| Sulfatos | mg/L | NMX AA-74-1981 | 4.93 | 400 |
| Bioensayo de Ecotoxicidad Aguda | UT | NOM-074-ECOL-19 | NO PRESENTA | |
| Turbiedad | NTU | EPA 180.1 | NO DETECT | 5 |
| Dig. Ática chomo M.O. (p muestra) | | EPA 3015 | REALIZADO | |
| Digestión (p muestra Hg) | | EPA7471A | REALIZADO | |
| Plata | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | |
| Aluminio | mg/L | EPA 6010 | 0.11 | 0.2 |
| Arsénico | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | 0.05 |
| Boro | mg/L | EPA 6010 | 0.517 | |
| Bario | mg/L | EPA 6010 | 0.003 | 0.7 |
| Calcio | mg/L | EPA 6010 | 1.095 | |
| Cadmio | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | 0.005 |
| Cobalto | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | |
| Cromo | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | 0.05 |
| Cobre | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | 2 |
| Hierro | mg/L | EPA 6010 | 0.214 | 0.3 |
| Mercurio | mg/L | EPA 7471A | NO DETECT | 0.001 |
| Potasio | mg/L | EPA 6010 | 1.711 | |
| Manganeso | mg/L | EPA 6011 | NO DETECT | 0.15 |
| Magnesio | mg/L | EPA 6010 | 0.168 | |
| Sodio | mg/L | EPA 6010 | 8.309 | 200 |
| Níquel | mg/L | EPA 6010 | 0.005 | |

| Parámetro | Unidades | Método | Resultado | NOM-127-SSA-1994 |
|---------------------------------------|------------|-------------|-----------|------------------|
| Plomo | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | 0.025 |
| Selenio | mg/L | EPA 6010 | NO DETECT | |
| Zinc | mg/L | EPA 6010 | 0.012 | 5 |
| Alcalinidad | | | | |
| Alcalinidad a la Fenoftaleína | mg/L CaCO3 | NMX AA-36 | NO DETECT | |
| Alcalinidad Total | mg/L CaCO3 | NMX AA-36 | 8.55 | |
| Bicarbonatos | mg/L CaCO3 | NMX AA-36 | 8.55 | |
| Carbonatos | mg/L CaCO3 | NMX AA-36 | NO DETECT | |
| Hidroxitos | mg/L CaCO3 | NMX AA-36 | NO DETECT | |
| Compuestos Orgánicos | | | | |
| Hexaclorobenceno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 2,4,6 triclorofenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Heptacloro y su Epóxido | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Lindano | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Metoxicloro | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Toxafeno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| BIS-(2-Cloroetil) Eter | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| BIS-(2-Etilhexil) Ftalato | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Clordano | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | 0.3 |
| Fenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Hexacloro-1,3-Butadieno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Hexacloroetano | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Endrin | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Pentaclorofenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Piridina | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Nitrobenceno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| m-Cresol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| o-Cresol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 2,3,4,6 Tetraclorofenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| p-Cresol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 1,2 Diclorobenceno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 1,4 Diclorobenceno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 2,4 Diclorofenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | 50 |
| 2,4 Dimetilfenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 2,4 Dinitrofenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 2,4 Dinitrotolueno | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| 2,4,5 Triclorofenol | ug/L | EPA 8270C M | NO DETECT | |
| Extracción de Semivolátiles | ug/L | EPA 8270C M | REALIZADA | |
| Compuestos Orgánicos Volátiles | | | | |
| 1,2 Dicloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,2 Dicloropropano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,3 Diclorobenceno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,2-Dicloropropano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,1 Dicloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Acronitrilo | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Acroleína | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Benceno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Bromoforno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Clorobenceno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,1,1-Tricloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Cloroformo | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Clorometano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Cloruro de Metilo | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Cloruro de Vinilo | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,1,2 Tricloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| Etilbenceno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| p-Xileno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |
| 1,1,2,2 Tetracloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT | |

| Parámetro | Unidades | Método | Resultado | NOM-127-SSA-1994 |
|-------------------------------------|----------|-------------|------------|------------------|
| m-Xileno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| Tetracloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| Tetracloruro de carbono | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| Tolueno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| Tricloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| o-Xileno | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| 1,2 Dicloroetano | ug/L | EPA 8260B M | NO DETECT. | |
| Hidrocarburos poliaromáticos | | | | |
| Acenafteno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Dibenzo (a,h) Antraceno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Fenantreno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Fluoranteno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Fluoreno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Indeno (1,2,3-cd) Pireno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Naftaleno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Pireno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Acenafileno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Antraceno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Benzo (k) Fluoranteno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Benzo (a) Antraceno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Benzo (a) Pireno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Benzo (b) Fluoranteno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Benzo (g,h,i) Penileno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Criseno | ug/L | EPA 8310 M | NO DETECT. | |
| Plaguicidas Clorados y BPCs | | | | |
| Aroclor 1016 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1221 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1232 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1242 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1248 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1254 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1260 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1262 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aroclor 1268 | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| 4,4'-DDD | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Clordano | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Dieldrin | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 0.03 |
| Endosulfan I | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Endosulfan II | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Endosulfan Sulfato | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Endrin | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Endrin Aldheido | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| g-BHC (Lindano) | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Heptacloro y Heptacloro Epóxido | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 0.03 |
| Heptacloro Epóxido | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| 4,4'-DDE | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Lindano | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Metoxicloro | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 20 |
| Toxafeno | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Hexaclorobenceno | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 0.01 |
| 4,4'-DDT | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 1 |
| a-BHC | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| Aldrin | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 0.03 |
| BHC a | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| BHC b | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| BHC d | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | |
| BHC g (Lindano) | ug/L | EPA 8081B M | NO DETECT. | 2 |

| Parámetro | Unidades | Método | Resultado | NOM-127-SSA-1994 |
|-----------------------|-------------|-------------|-----------|------------------|
| Trihalometanos | | | | |
| Bromodichlorometano | ug/L | EPA 501.2 M | NO DETECT | |
| Dibromoclorometano | ug/L | EPA 501.2 M | NO DETECT | |
| Bromoformo | ug/L | EPA 501.2 M | NO DETECT | |
| Cloroformo | ug/L | EPA 501.2 M | NO DETECT | |
| Estreptococos | UFC/100 ml. | SM20TH 923C | 0 | |

ANEXO C

Parámetros de rutina
del afluente, producto y
rechazo de la unidad de NF

| N° | Fecha | Hora | Hora Total | Presión (psí - kg/cm2) | | | Caudal (LPM) | | | pH | | | Conductividad (mS/CM) | | | SDT (mg/L) | | | Temperatura (°C) | | | |
|----|-----------|-------|------------|------------------------|----------|------------------|--------------|----------|----------|---------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------------|----------|----------|---------|
| | | | | Huella | Positivo | Reserva de Bomba | Líquido | Afluente | Producto | Reserva | Afluente | Producto | Reserva | Afluente | Producto | Reserva | Afluente | Producto | Reserva | Afluente | Producto | Reserva |
| | | 16:00 | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17:00 | 51 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 18:00 | 52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 11 may 00 | 11:00 | 53 | 40 | 38 | 170 | 180 | 23 | 17 | 8 | 6.7 | 4.04 | 7.27 | 1.78 | 0.085 | 4.82 | 875 | 33 | 2310 | 20 | 20 | 20 |
| 11 | 7 jun 00 | 13:00 | 54 | 44 | 42 | 178 | 185 | 23 | 18 | 7 | 6.85 | 4.81 | 7.33 | 1.71 | 0.08 | 4.38 | 800 | 48 | 2180 | 19.4 | 18.8 | 19.9 |
| | | 14:00 | 55 | 44 | 42 | 178 | 185 | 23 | 18 | 7 | 6.95 | 5.01 | 7.44 | 1.71 | 0.09 | 4.47 | 860 | 50 | 2240 | 19.7 | 20.4 | 20.5 |
| | | 15:00 | 56 | 30 | 27 | 175 | 165 | 22 | 15 | 7 | 6.78 | 4.88 | 7.3 | 1.71 | 0.07 | 4.42 | 860 | 38 | 2230 | 20.2 | 19.9 | 20.2 |
| | | 16:00 | 57 | 28 | 26 | 175 | 165 | 22 | 15 | 7 | 6.94 | 5.01 | 7.42 | 1.75 | 0.06 | 4.25 | 870 | 40 | 2120 | 18.8 | 18.3 | 19 |
| 12 | 8 jun 00 | 11:00 | 58 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.85 | 4.47 | 7.29 | 1.78 | 0.08 | 4.54 | 880 | 40 | 2270 | 19.8 | 19.8 | 19.9 |
| | | 12:00 | 59 | 31 | 28 | 178 | 185 | 20 | 14 | 6 | 6.8 | 4.8 | 7.32 | 1.77 | 0.08 | 4.98 | 890 | 40 | 2280 | 19.8 | 20.6 | 20.8 |
| | | 13:00 | 60 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.84 | 4.49 | 7.39 | 1.78 | 0.08 | 4.88 | 880 | 40 | 2250 | 20.4 | 20.4 | 20.8 |
| | | 14:00 | 61 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14.5 | 6.5 | 6.99 | 4.58 | 7.53 | 1.74 | 0.07 | 4.38 | 880 | 40 | 2190 | 20.3 | 20.7 | 20.9 |
| | | 15:00 | 62 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.83 | 4.54 | 7.39 | 1.74 | 0.07 | 4.68 | 890 | 40 | 2340 | 20.2 | 20.7 | 21.1 |
| | | 16:00 | 63 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.52 | 5.05 | 7.39 | 1.72 | 0.06 | 4.5 | 865 | 30 | 2300 | 20 | 20.1 | 20.4 |
| | | 17:00 | 64 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.6 | 4.51 | 7.44 | 1.75 | 0.08 | 4.89 | 870 | 40 | 2350 | 19.3 | 18.7 | 19.8 |
| | | 18:00 | 65 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 7.07 | 4.6 | 7.48 | 1.71 | 0.06 | 4.56 | 860 | 30 | 2280 | 19.1 | 18.5 | 19.7 |
| | | 19:00 | 66 | 31 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.84 | 5.29 | 7.37 | 1.71 | 0.07 | 4.85 | 864 | 32 | 2330 | 18.3 | 19.1 | 19.1 |
| 13 | 13 jun 00 | 15:30 | 67 | 31.5 | 29 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.82 | 4.87 | 7.36 | 1.78 | 0.073 | 4.59 | 880 | 17 | 2300 | 20.8 | 21.2 | 21.7 |
| | | 16:30 | 68 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17:30 | 69 | 30.5 | 27.5 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.87 | 4.6 | 7.4 | 1.7 | 0.07 | 4.57 | 880 | 48 | 2290 | 20.1 | 21 | 21 |
| | | 18:30 | 70 | 30 | 29.5 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.8 | 5.34 | 7.37 | 1.73 | 0.073 | 4.72 | 880 | 37 | 2370 | 18.8 | 20 | 20.1 |
| | | 20:30 | 71 | 30 | 26.5 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 14 jun 00 | 11:00 | 72 | 38 | 34 | 175 | 165 | 22 | 15 | 7 | 6.83 | 4.58 | 7.42 | 1.72 | 0.078 | 4.85 | 860 | 38 | 2430 | 18.5 | 20.2 | 20.6 |
| | | 12:00 | 73 | 33 | 30 | 178 | 185 | 21 | 15 | 8 | 6.84 | 4.85 | 7.51 | 1.73 | 0.078 | 4.62 | 870 | 57 | 2310 | 18.6 | 20.5 | 20.8 |
| | | 13:00 | 74 | 32 | 29 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 7.06 | 4.7 | 7.56 | 1.77 | 0.108 | 4.66 | 890 | 53 | 2340 | 20 | 20.5 | 20.8 |
| | | 14:00 | 75 | 32 | 28 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.38 | 4.3 | 7.12 | 1.78 | 0.084 | 4.5 | 880 | 42 | 2300 | 20.4 | 21.5 | 21.8 |
| | | 15:00 | 76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 16:00 | 77 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17:00 | 78 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 18:00 | 79 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 19:00 | 80 | 32 | 26 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.6 | 4.26 | 7.29 | 1.72 | 0.077 | 4.51 | 880 | 39 | 2280 | 19.3 | 20.1 | 19.8 |
| 15 | 16 jun 00 | 11:30 | 81 | 37.5 | 30 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.85 | 4.48 | 7.43 | 1.77 | 0.118 | 4.77 | 880 | 47 | 2380 | 19.3 | 20.3 | 20.7 |
| | | 12:30 | 82 | 37 | 34 | 178 | 185 | 22 | 15 | 7 | 6.83 | 4.84 | 7.42 | 1.73 | 0.093 | 4.41 | 870 | 47 | 2310 | 19.7 | 20.2 | 20.3 |
| | | 13:30 | 83 | 37 | 33.5 | 178 | 185 | 22 | 15 | 7 | 6.99 | 5.09 | 7.54 | 1.73 | 0.181 | 4.35 | 870 | 81 | 2180 | 19.7 | 20 | 19.8 |
| | | 14:30 | 84 | 38 | 32.5 | 178 | 185 | 21 | 15 | 6 | 6.82 | 4.48 | 7.38 | 1.7 | 0.138 | 4.39 | 850 | 86 | 2270 | 19.4 | 19.9 | 19.9 |
| | | 15:30 | 85 | 36 | 32 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.86 | 4.67 | 7.01 | 1.87 | 0.145 | 4.38 | 840 | 73 | 2090 | 18.8 | 20.4 | 20.5 |
| | | 16:30 | 86 | 37 | 33 | 178 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.75 | 4.35 | 7.36 | 1.7 | 0.168 | 4.35 | 850 | 82 | 2180 | 19.4 | 19.8 | 18.8 |
| 16 | 22 jun 00 | 12:15 | 87 | 30.5 | 28 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.71 | 4.78 | 7.28 | 1.74 | 0.141 | 4.6 | 870 | 71 | 2380 | 19.7 | 20 | 20.2 |
| | | 13:15 | 88 | 30.5 | 28 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 7.08 | 4.73 | 7.4 | 1.88 | 0.149 | 4.64 | 840 | 75 | 2120 | 20.3 | 20.3 | 20.5 |
| | | 14:15 | 89 | 31.5 | 28 | 175 | 165 | 20.5 | 15 | 5.5 | 7.05 | 4.95 | 7.41 | 1.75 | 0.189 | 3.88 | 880 | 85 | 1940 | 20.6 | 21.1 | 21.1 |
| | | 15:15 | 90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 16:15 | 91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17:15 | 92 | 37 | 34 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.88 | 4.89 | 7.46 | 1.62 | 0.09 | 4.28 | 810 | 45 | 2140 | 18.1 | 19.8 | 19.4 |
| 17 | 29 jun 00 | 10:30 | 93 | 36.5 | 34 | 175 | 165 | 22 | 15 | 7 | 6.65 | 5.01 | 7.3 | 1.73 | 0.113 | 4.34 | 870 | 57 | 2180 | 19.3 | 18.5 | 19.5 |
| | | 11:30 | 94 | 34.5 | 32 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.3 | 4.09 | 7.3 | 1.72 | 0.117 | 4.52 | 880 | 59 | 2280 | 19.8 | 20.2 | 20.6 |
| | | 12:30 | 95 | 34 | 31 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.35 | 4.02 | 7.03 | 1.73 | 0.145 | 4.67 | 870 | 73 | 2340 | 19.9 | 20.5 | 20.7 |
| | | 13:30 | 96 | 34 | 30.5 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.4 | 4.52 | 7 | 1.7 | 0.135 | 4.45 | 850 | 68 | 2230 | 20.5 | 20.5 | 21 |
| | | 14:30 | 97 | 34 | 30 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.38 | 4 | 7 | 1.69 | 0.169 | 4.43 | 850 | 85 | 2220 | 20.6 | 20.6 | 21 |
| | | 15:30 | 98 | 34 | 30.5 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.49 | 4.17 | 7.08 | 1.72 | 0.1 | 4.58 | 870 | 50 | 2278 | 20.3 | 20.6 | 21.3 |
| 18 | 30 jun 00 | 11:10 | 99 | 42 | 40 | 175 | 165 | 23 | 15 | 8 | 6.89 | 4.88 | 7.37 | 1.78 | 0.078 | 3.78 | 830 | 40 | 1750 | 20 | 20.1 | 20 |
| | | 12:10 | 100 | 30 | 28 | 175 | 165 | 20 | 15 | 9 | 7.01 | 5.22 | 7.41 | 1.754 | 0.084 | 4.21 | 878 | 43 | 2120 | 19.7 | 20.3 | 20.1 |
| | | 13:10 | 101 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 14:10 | 102 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 15:10 | 103 | 28 | 24 | 178 | 165 | 20 | 14.8 | 6.8 | 7.02 | 4.8 | 7.51 | 1.244 | 0.067 | 4.23 | 874 | 34 | 2120 | 21 | 21.8 | 21.7 |
| | | 16:10 | 104 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17:10 | 105 | 28 | 24 | 178 | 165 | 20 | 14.8 | 6.8 | 7.12 | 5.08 | 7.6 | 1.78 | 0.068 | 4.48 | 880 | 34 | 2180 | 21.4 | 21.3 | 21.7 |

| N° | Jornada | Horas | Horas Total | Presión (psi - kg/cm2) | | | | Caudal (LPM) | | | pH | | | Conductividad (mS/CM) | | | SDT (mg/L) | | | Temperatura (°C) | | | | |
|-------|-----------|-------|-------------|------------------------|------------|-------------------|-----------|--------------|----------|---------|----------|----------|---------|-----------------------|----------|---------|------------|----------|---------|------------------|----------|---------|------|------|
| | | | | Prefiltro | Postfiltro | Descarga de Bomba | Operación | Afluente | Producto | Rechazo | Afluente | Producto | Rechazo | Afluente | Producto | Rechazo | Afluente | Producto | Rechazo | Afluente | Producto | Rechazo | | |
| 19 | 8 jul 00 | 11:30 | 106 | 36.5 | 33.5 | 175 | 165 | 22 | 15 | 7 | 6.82 | 4.98 | 7.38 | 1.73 | 0.081 | 4.34 | 870 | 48 | 2170 | 18.4 | 20.1 | 20.2 | | |
| | | 12:30 | 107 | 37 | 33.5 | 175 | 165 | 22 | 15 | 7 | 6.85 | 4.81 | 7.42 | 1.82 | 0.103 | 4.49 | 910 | 67 | 2250 | 18.8 | 20.9 | 21.3 | | |
| | | 13:30 | 108 | 36 | 32 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.82 | 4.68 | 7.41 | 1.72 | 0.109 | 4.42 | 860 | 55 | 2210 | 20 | 20.7 | 20.7 | | |
| | | 14:30 | 109 | 34.5 | 30 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.81 | 4.85 | 7.47 | 1.74 | 0.11 | 4.58 | 870 | 56 | 2300 | 20.5 | 21 | 21.7 | | |
| | | 15:30 | 110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 16:30 | 111 | 34.5 | 30 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 7 | 4.6 | 7.54 | | | | | | | | 18.8 | 20.3 | 21.6 | |
| | | 17:30 | 112 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 10 jul 00 | 14:00 | 115 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 15:00 | 116 | 36 | 32 | 175 | 165 | 21 | 15 | 6 | 6.75 | 5.05 | 7.28 | 1.71 | 0.086 | 4.81 | 860 | 43 | 1910 | 20.3 | 21.7 | 21 | | |
| | | 16:00 | 117 | 25 | 22 | 175 | 165 | 20 | 14 | 6 | 6.84 | 4.74 | 7.34 | 1.72 | 0.087 | 4.28 | 860 | 48 | 2148 | 18.7 | 20.2 | 20.6 | | |
| | | 17:00 | 118 | 11.5 | 26 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.77 | 4.62 | 7.38 | 1.76 | 0.085 | 4.5 | 860 | 48 | 2250 | 20 | 20.3 | 20.3 | | |
| | | 18:00 | 119 | 30 | 28 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.77 | 4.83 | 7.34 | 1.72 | 0.112 | 4.35 | 860 | 58 | 2180 | 19.1 | 19.4 | 19.6 | | |
| | | 19:00 | 120 | 36 | 33 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.87 | 4.7 | 7.36 | 1.71 | 0.094 | 4.25 | 860 | 47 | 2130 | 18 | 18.2 | 19.4 | | |
| | | 20:00 | 121 | 36 | 34 | 175 | 165 | 21.5 | 14.5 | 6.5 | 6.71 | 4.74 | 7.35 | 1.71 | 0.078 | 4.3 | 860 | 40 | 2150 | 18.8 | 19 | 19 | | |
| 21 | 11 jul 00 | 11:00 | 122 | 37 | 33 | 175 | 165 | 21.5 | 14.5 | 7 | 6.98 | 4.77 | 7.5 | 1.72 | 0.083 | 4.28 | 860 | 42 | 2150 | 18.1 | 19.8 | 20 | | |
| | | 12:00 | 123 | 35.5 | 31 | 175 | 165 | 21.5 | 14.5 | 7 | 7 | 4.86 | 7.51 | 1.72 | 0.095 | 4.27 | 860 | 48 | 2140 | 18.7 | 20.3 | 20.5 | | |
| | | 13:00 | 124 | 36 | 31.5 | 175 | 165 | 21.5 | 14.5 | 7 | 7.12 | 5.08 | 7.58 | 1.71 | 0.08 | 4.3 | 860 | 48 | 2150 | 19.7 | 20.4 | 20.8 | | |
| | | 14:00 | 125 | 28 | 25 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 7.15 | 5.27 | 7.8 | 1.75 | 0.087 | 4.35 | 860 | 44 | 2170 | 20.7 | 20.4 | 20.7 | | |
| | | 15:00 | 126 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 16:00 | 127 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 22 | 21 jul 00 | 11:00 | 128 | 39.5 | 35.6 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.86 | 5.014 | 7.42 | 1.68 | 0.101 | 4.16 | 850 | 51 | 2080 | 19.2 | 18.8 | 19.8 |
| 12:00 | 129 | 34 | | 30 | 175 | 165 | 21 | 14.1 | 6.9 | 6.68 | 4.94 | 7.53 | 1.7 | 0.104 | 4.28 | 850 | 63 | 2140 | 19.3 | 19.9 | 19.8 | | | |
| 13:00 | 130 | 31 | | 26.5 | 175 | 165 | 21 | 14 | 7 | 6.83 | 4.94 | 7.48 | 1.72 | 0.08 | 4.27 | 860 | 45 | 2140 | 18.8 | 20.01 | 20.03 | | | |
| 14:00 | 131 | 31 | | 27.5 | 175 | 165 | 20.5 | 14 | 6.5 | 6.93 | 4.79 | 7.57 | 1.73 | 0.07 | 4.37 | 868 | 34 | 2190 | 19.6 | 20.3 | 20.5 | | | |
| 15:00 | 132 | 31 | | 27 | 175 | 165 | 20 | 14 | 6 | 7.16 | 4.82 | 7.54 | 1.75 | 0.072 | 4.36 | 878 | 35 | 2180 | 20.1 | 20.6 | 20.6 | | | |
| 23 | 25 ago 00 | 13:30 | 133 | 42 | 40.5 | 175 | 165 | 20 | 15 | 5 | | | | 1.58 | 0.048 | 4.3 | 860 | 24 | 2150 | 20.2 | 20.5 | 20.3 | | |
| | | 14:30 | 134 | 42 | 40.5 | 175 | 165 | 21 | 16 | 5 | | | | 1.55 | 0.061 | 4.27 | 780 | 31 | 2140 | 19.8 | 20.2 | 20.2 | | |
| | | 15:30 | 135 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 16:30 | 136 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17:30 | 137 | 42 | 38 | 175 | 165 | 21 | 18 | 5 | | | | 1.58 | 0.066 | 4.34 | 790 | 34 | 2170 | 20.2 | 20.8 | 20.3 | | |
| 18:30 | 138 | 46 | 42 | 175 | 165 | 22 | 15.5 | 6.5 | | | | 1.57 | 0.066 | 4.17 | 790 | 28 | 2090 | 19 | 19.1 | 18.4 | | | | |

ANEXO D

Parámetros de rutina
del afluente, producto y
rechazo de la unidad de OI

| N° | Jornada | Areglo | Horas | Horas Total | Presión (psi - kg/cm2) | | | | Caudal (LPM) | | | pH | | | Conductividad (mS/CM) | | | SDT (mg/L) | | | Temperatura (°C) | | | |
|----|-----------|--------|-------|-------------|------------------------|----------|-------------------|-----------|--------------|----------|---------|----------|----------|---------|-----------------------|----------|---------|------------|----------|---------|------------------|----------|---------|--|
| | | | | | Profundo | Positivo | Descarga de Bomba | Operación | Alfuerza | Producto | Rechazo | Alfuerza | Producto | Rechazo | Alfuerza | Producto | Rechazo | Alfuerza | Producto | Rechazo | Alfuerza | Producto | Rechazo | |
| | | | 14:30 | 50 | 34 | 33 | 247 | 225 | 27 | 13.5 | 13.5 | 6.4 | 4.0 | 7.1 | 1.69 | 0.115 | 4.78 | 850 | 58 | 2380 | 20.8 | 20.7 | 21.1 | |
| | | | 15:30 | 51 | 34 | 33 | 247 | 225 | 27 | 13.5 | 13.8 | 6.48 | 4.2 | 7.14 | 1.72 | 0.084 | 4.8 | 870 | 42 | 2400 | 20.3 | 20.8 | 21.1 | |
| 11 | 30 jul 00 | MEZCLA | 11:00 | 52 | 44 | 42 | 250 | 225 | 26 | 13.6 | 12.2 | 6.68 | 4.67 | 7.3 | 1.78 | 0.075 | 4.33 | 900 | 38 | 2170 | 20 | 20.1 | 20 | |
| | | | 12:10 | 53 | 30 | 30 | 245 | 225 | 25.5 | 13 | 12.5 | 7.01 | 5.14 | 7.46 | 1.754 | 0.072 | 4.93 | 878 | 37 | 2480 | 19.7 | 20.3 | 20.1 | |
| | | | 13:10 | 54 | 30 | 30 | 245 | 225 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 14:10 | 55 | 30 | 30 | 245 | 225 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 15:10 | 56 | 30 | 30 | 245 | 225 | 26 | 14 | 14 | 7.02 | 5.1 | 7.61 | 1.744 | 0.086 | 4.91 | 874 | 35 | 2480 | 21 | 21.5 | 21.7 | |
| | | | 16:10 | 57 | 30 | 30 | 245 | 225 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 17:10 | 58 | 26 | 26 | 248 | 225 | 28 | 14 | 14 | 7.12 | 4.86 | 7.35 | 1.75 | 0.055 | 4.88 | 880 | 28 | 2350 | 21.4 | 21.3 | 21.2 | |
| 12 | 8 jul 00 | MEZCLA | 11:30 | 59 | 37 | 35 | 247.5 | 225 | 26 | 13 | 13 | 6.67 | 4.91 | 7.44 | 1.73 | 0.083 | 4.46 | 870 | 42 | 2230 | 19.4 | 20.1 | 20.5 | |
| | | | 12:30 | 60 | 37.5 | 36.5 | 248 | 225 | 26 | 13 | 15 | 6.85 | 4.68 | 7.48 | 1.82 | 0.084 | 4.52 | 810 | 47 | 2280 | 19.9 | 21 | 21.1 | |
| | | | 13:30 | 61 | 38 | 35.5 | 247.5 | 225 | 27.5 | 12.5 | 15 | 6.82 | 4.73 | 7.53 | 1.72 | 0.088 | 4.49 | 880 | 43 | 2240 | 20 | 20.7 | 21.3 | |
| | | | 14:00 | 62 | 34.5 | 34.5 | 248 | 225 | 27 | 12 | 14 | 6.91 | 4.65 | 7.51 | 1.74 | 0.103 | 4.52 | 870 | 42 | 2290 | 20.5 | 21.6 | 21.6 | |
| | | | 15:30 | 63 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 16:30 | 64 | 35.5 | 34.5 | 247.5 | 225 | 27 | 12 | 15 | 7 | 5 | 7.56 | | | | | | | 19.9 | 20.5 | 21.6 | |
| | | | 17:30 | 65 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 18:30 | 66 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 10 jul 00 | MEZCLA | 13:00 | 67 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 14:00 | 68 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 15:00 | 69 | 36.5 | 35 | 248 | 225 | 27 | 12 | 15 | 6.75 | 4.93 | 7.26 | 1.71 | 0.081 | 4.35 | 880 | 41 | 2180 | 20.3 | 21.6 | 21.3 | |
| | | | 16:00 | 70 | 36.5 | 35 | 248 | 225 | 27 | 12 | 18 | 6.84 | 4.74 | 7.35 | 1.72 | 0.084 | 3.81 | 880 | 32 | 1910 | 19.7 | 20.1 | 20.6 | |
| | | | 17:00 | 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 11 jul 00 | MEZCLA | 10:00 | 72 | 38 | 37.5 | 250 | 225 | 28 | 12.5 | 15.5 | 6.71 | 4.62 | 7.4 | 1.71 | 0.074 | 4.42 | 880 | 37 | 2210 | 18.9 | 19.1 | 19.3 | |
| | | | 11:00 | 73 | 36.5 | 35 | 248 | 225 | 28 | 12.5 | 15.5 | 6.90 | 4.78 | 7.55 | 1.72 | 0.079 | 4.4 | 880 | 40 | 2200 | 19.1 | 20.2 | 20.2 | |
| | | | 12:00 | 74 | 36 | 35 | 248 | 225 | 27 | 12 | 15 | 7 | 4.67 | 7.56 | 1.72 | 0.082 | 4.38 | 880 | 41 | 2180 | 19.7 | 20.5 | 20.8 | |
| | | | 13:00 | 75 | 36.5 | 36 | 248 | 225 | 27 | 12 | 15 | 7.12 | 5.07 | 7.65 | 1.71 | 0.071 | 4.42 | 880 | 36 | 2210 | 18.7 | 20.5 | 20.7 | |
| 15 | 21 jul 00 | MEZCLA | 11:00 | 76 | 36 | 36 | 250 | 225 | 26.5 | 13 | 15.5 | 6.80 | 4.84 | 7.35 | 1.69 | 0.084 | 3.17 | 850 | 33 | 1590 | 19.2 | 19.2 | 19.8 | |
| | | | 12:00 | 77 | 33.5 | 32.5 | 247 | 225 | 27 | 13 | 14 | 6.80 | 4.84 | 7.45 | 1.7 | 0.072 | 3.28 | 850 | 37 | 1640 | 19.3 | 19.6 | 20 | |
| | | | 13:00 | 78 | 34 | 33 | 247 | 225 | 27 | 13 | 14 | 6.83 | 4.52 | 7.67 | 1.72 | 0.085 | 3.28 | 880 | 33 | 1640 | 19.8 | 19.9 | 20.04 | |
| | | | 14:00 | 79 | 31.5 | 30 | 247 | 225 | 26.2 | 12.2 | 13 | 6.9 | 4.8 | 7.5 | 1.73 | 0.042 | 3.21 | 868 | 22 | 1600 | 19.6 | 20.1 | 20.1 | |
| | | | 15:00 | 80 | 31 | 30 | 250 | 225 | 26.7 | 12.2 | 14.5 | 7.18 | 4.46 | 7.52 | 1.75 | 0.036 | 3.18 | 878 | 20 | 1573 | 20.1 | 20.4 | 20.6 | |