



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Propuesta de un sistema de ósmosis inversa para  
tratamiento de la red de abastecimiento como  
insumo a la industria**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Químico**

**P R E S E N T A**

Jorge Isaac Ramírez Vásquez



**Ciudad de México, 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA**

**VOCAL: LUZ MARÍA LAZCANO ARRIOLA**

**SECRETARIO: LUIS ANTONIO GARCÍA VILLANUEVA**

**1er. SUPLENTE: ALBERTO ROSAS ABURTO**

**2° SUPLENTE: VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA**

**ASESOR DEL TEMA:**

**LUIS ANTONIO GARCÍA VILLANUEVA**

**SUSTENTANTE:**

**Jorge Isaac Ramírez Vásquez**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

<b>Resumen .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>9</b>
1.1 Problemática .....	9
1.2 Justificación.....	11
1.3 Objetivo .....	13
1.4 Objetivos específicos .....	13
1.5 Alcances y limitaciones .....	13
<b>2 Marco teórico.....</b>	<b>14</b>
2.1 Naturaleza del agua .....	14
2.2 Parámetros regulados del agua.....	19
2.2.1 Agua para uso y consumo humano.....	19
2.2.2 Agua para la industria.....	25
<b>3 Sistemas de filtración .....</b>	<b>30</b>
3.1 Filtración .....	30
3.2 Filtros de lecho profundo.....	37
3.3 Filtros de carbón activado .....	39
3.4 Intercambio iónico.....	41
3.5 Filtros de cartucho .....	45
3.6 Separación por membrana.....	46
3.7 Microfiltración .....	50
3.8 Ultrafiltración .....	53
3.9 Ósmosis inversa .....	55
3.9.1 Fundamentos de la ósmosis .....	55
3.9.2 Aplicaciones de la ósmosis inversa en la industria .....	59
<b>4 Caso de estudio .....</b>	<b>61</b>

4.1	Estudio de agua cruda de la zona .....	61
4.2	Propuesta de sistema de ósmosis inversa.....	67
<b>5</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>72</b>
5.1	Conclusiones.....	72
5.2	Recomendaciones.....	73
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Calidades de agua esperadas en distintas fuentes. ....	17
Tabla 2.1 Calidades de agua esperadas en distintas fuentes (Continuación). ....	18
Tabla 2.2 Límites permisibles bacteriológicos en agua potable.....	20
Tabla 2.3 Límites permisibles de características físicas y organolépticas. ....	20
Tabla 2.4 Límites permisibles químicos en el agua potable .....	22
Tabla 2.4 Límites permisibles químicos en el agua potable (Continuación): .....	23
Tabla 2.5 Límite máximo permisible de cloro residual para consumo humano.....	23
Tabla 2.6 Límites máximos permisibles de subproductos de desinfectantes en agua potable.....	24
Tabla 2.7 Programa de frecuencia de análisis de agua potable .....	24
Tabla 2.8 Tipos de agua farmacéutica y usos. ....	28
Tabla 4.1 Costos de equipos para tren de tratamiento de agua osmoseada .....	67
Tabla 4.1 Costos de equipos para tren de tratamiento de agua osmoseada (Continuación). ....	68
Tabla 4.1 Costos de equipos para tren de tratamiento de agua osmoseada (Continuación). ....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 3.1 Adaptación Niveles de filtración y niveles de retención (American Water Works Association, 2016). .....	32
Figura 3.2 Filtro manual granular. (Agsararattananont, 2021). .....	33
Figura 3.3 Filtro automático de fibra de vidrio (Inquinat, 2021). .....	34
Figura 3.4 Filtros de cartucho industriales (Acuña, 2006). .....	35
Figura 3.5 Retención de iones y microorganismos según el nivel de filtración empleado (Aquatreatment, 2017). .....	36
Figura 3.6 Composición de filtro multimedia (KPG Water Engineering, 2021). .....	37
Figura 3.7 Componentes de filtro automático granular (KPG Water Engineering, 2021). .....	38
Figura 3.8 Componentes de filtro de carbón activado (KPG Water Engineering, 2021). ..	40
Figura 3.9 Componentes de un filtro de carbón activado (Silo cervecero, 2021) .....	40
Figura 3.10 Mecanismo de adsorción de carbón activado (Lainco, S.A., 2021) .....	41
Figura 3.11 Resina catiónica utilizada para la eliminación de dureza en el agua. (Novo Agua SA de CV, 2021) .....	43
Figura 3.12 Estructura molecular de una resina de intercambio iónico. (Ionic Systems, 2021). .....	44
Figura 3.13 Diagrama de un sistema típico de ósmosis inversa casero, (Osmonics, Inc, 1997). .....	45
Figura 3.14 Experimento de Graham. Transporte de iones de una solución a un disolvente a través de una membrana (Aguilar Peris, 1983). .....	47
Figura 3.15 Clasificación de membranas acorde a su naturaleza (Hernández, Tejerina, Arribas, & Martínez, 1990). .....	48
Figura 3.16 Clasificación de membranas acorde a su estructura (Hernández, Tejerina, Arribas, & Martínez, 1990). .....	49
Figura 3.17 Capacidad de remoción de los sistemas de membrana (Nalco Company, 2009) .....	51
Figura 3.18 Mecanismos de filtración lineal y cruzado. (Sotto Díaz, 2008) .....	52
Figura 3.19 Representación de flujos de permeado y concentrado o retenido (Solís, Vélez, & Ramírez Navas, 2017) .....	53
Figura 3.20 Fenómeno de ósmosis entre dos soluciones (Lubo Matallana, 2002) .....	55
Figura 3.21 Presión osmótica en un sistema de ósmosis (Lubo Matallana, 2002) .....	56
Figura 3.22 Fenómeno de ósmosis inversa (Lubo Matallana, 2002). .....	57
Figura 3.23 Estructura de membrana de ósmosis inversa (Nalco Company, 2009). .....	58
Figura 4.1 Equipo en venta de ósmosis inversa industrial de Carbotecnia (Carbotecnia SA de CV, 2020). .....	69
Figura 4.2 Diagrama de tren de tratamiento de agua propuesto para su venta a la industria .....	71

## RESUMEN

---

En el capítulo 1 se describe el ciclo hidrológico del agua, en el cual durante todo el proceso va adquiriendo distintos contaminantes, como pueden ser gases disueltos en la atmósfera, los minerales de formaciones rocosas, así como el arrastre de microorganismos. Todos estos contaminantes forman una composición final en el agua extraída de alguna fuente de agua. Dependiendo de la calidad de agua es posible determinar el mejor tratamiento a emplear. Asimismo se define el objetivo y alcance del presente proyecto.

La importancia del capítulo 2 radica en el marco teórico a trabajar, los cuales son: principios de filtración, fisicoquímica del agua, fundamentos de ósmosis inversa y el transporte de masa a través de una membrana de ósmosis inversa. Por último se mencionan las necesidades de las industrias para satisfacer sus necesidades en la calidad de agua para sus procesos o servicios.

En el capítulo 3 se encontrará los distintos sistemas de filtración comerciales que son utilizados por las distintas industrias y proveedores, se plantean los arreglos existentes así como los niveles de filtración que existen para tratar distintos micrajes de partículas hasta llegar a la ósmosis inversa.

Para el capítulo 4, establecidas las bases de filtración y conociendo los equipos de tratamiento, el lector encontrará en este capítulo el caso de estudio para un sistema de ósmosis inversa partiendo de un agua potable proveniente de pozo del municipio de Naucalpan, Estado de México y los equipos requeridos para conseguir la calidad buscada, así como una descripción de los caudales de trabajo, presiones de operación, etc.

Por último, en el capítulo 5 se dan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, comparando los resultados obtenidos contra los objetivos propuestos, además de dar sugerencias para obtener mayores volúmenes de producción, así como para mejorar la calidad del permeado.

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Problemática

El agua tiene un ciclo hidrológico muy interesante, en donde sus características fisicoquímicas, organolépticas y microbiológicas se ven modificadas, gracias a la facilidad con la que el agua puede contaminarse con los gases atmosféricos del ambiente, por su facilidad para disolver los minerales de las rocas, así como con la materia orgánica y los microorganismos. Por esta sencilla razón, las variaciones serán determinadas por la región, los tipos de roca presentes al paso del agua y los diversos contaminantes que encuentre a su paso.

Todos los contaminantes adquiridos en el ciclo hidrológico del agua le darán características especiales, que dependiendo el uso pueden o no afectar. Cuando el agua se requiere como agua potable para uso y consumo humano, debe de cumplir con ciertos parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y organolépticos apejándose a la normatividad mexicana vigente.

Por otro lado, si el agua se requiere para un fin industrial, los parámetros de calidad del agua buscados, se pueden volver más específicos, ya que cada industria y según el proceso de su operación a realizar, se establecen ciertos parámetros que no pongan en riesgo a algún equipo de proceso u operación. No es igual alimentar a una caldera con agua suavizada proveniente de pozo, que alimentarla con agua suavizada proveniente del mar, en donde la gran cantidad de sólidos disueltos puede ocasionar problemas de incrustamiento al interior del equipo, para ambos casos es necesario establecer un tren de tratamiento adecuado y acorde a las necesidades y costos de operación de la planta.

Actualmente en el mercado del tratamiento de aguas, es posible encontrar equipos e insumos de diferentes calidades y materiales de fabricación, que brindan la posibilidad a los usuarios de seleccionar aquellos que les sean más funcionales de acuerdo a sus necesidades de operación sin tener que hacer enormes inversiones de capital para adquirir las últimas tecnologías del mercado. Los equipos para el

tratamiento de agua van desde los filtros para sólidos suspendidos, que dependiendo el caudal a tratar pueden ser filtros de cartucho desechables o filtros granulares, los cuales pueden contener un solo tipo de medio granular o combinaciones de varios tipos granulares. Si se requiere eliminar/disminuir olores, color y sabor en el agua, lo más común es emplear filtros de carbón activado.

Para eliminar o disminuir los componentes iónicos (ya sean catiónicos o aniónicos) disueltos en el agua se emplean filtros de intercambio iónico como comúnmente se les conoce a los equipos con resina de intercambio iónico. Estas resinas se encargan de intercambiar iones indeseables por iones “movibles” que tienen al interior de su estructura, esto conlleva a que llegue un punto en el que se tiene que regenerar la resina, o si fuera el caso de una resina mixta, realizar el reemplazo de la resina por una nueva.

Además de la filtración con filtros de cartucho o granulares se pueden alcanzar niveles de filtración más bajos para aplicaciones más específicas, estos niveles de filtración de sólidos suspendidos es posible alcanzarlos mediante microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, esta última tecnología también permite retener sólidos disueltos, proteínas y algunas moléculas.

En México existen Normas Oficiales Mexicanas las cuales establecen los parámetros en la calidad de agua tanto microbiológicos, fisicoquímicos y organolépticos para el caso del agua potable, la cual será la materia prima a utilizar en el presente trabajo.

Es importante considerar que una vez instalados los equipos para el tratamiento del agua, se tienen que programar mantenimientos preventivos y correctivos, lo que conlleva más gastos de operación, en los cuales muchas veces las empresas prefieren ahorrarse todos los gastos operativos que conlleva tener equipos para el tratamiento del agua. En el caso específico de la ósmosis inversa los costos operativos se elevan aún más, ya que además de tener un tren de filtración previo para el tratamiento del agua potable proveniente de la red municipal, el operar este sistema para algunas empresas no lo ven viable, ya sea porque el tiempo de

operación es poco, el gasto diario de agua a producir también pudiera ser mínimo, tal es el caso de laboratorios, empresas jaboneras y cosméticas, algunos sectores de la industria alimenticia por ejemplo, donde la demanda de agua purificada o baja en sales se prefiere obtenerla a través de un proveedor. Aprovechando este nicho de mercado, se plantea establecer un equipo de ósmosis inversa capaz de cubrir las necesidades de los usuarios y que cumpla con la normatividad mexicana para la entrega de agua osmoseada a los distintos sectores industriales.

## 1.2 Justificación

El obtener agua en la industria libre de contaminantes, sales disueltas e inclusive microorganismos empleando unidades de ósmosis inversa, implica que las empresas estén dispuestas a destinar recursos al mantenimiento del equipo, tales como limpieza y cambios de membranas, la capacitación constante del personal para la operación del equipo, así como grandes consumos que se terminan por reflejar en altos costos de operación si su demanda es alta.

Teniendo en cuenta los gastos operativos que implica tener un sistema de ósmosis inversa, algunas empresas optan por comprar agua baja en sales a un proveedor que les garantice la calidad de agua buscada.

Actualmente las tecnologías de ósmosis inversa están más desarrolladas en comparación del siglo pasado. Los sistemas más modernos e innovadores llegan a dar rendimientos de agua-producto de hasta un 97% (Tecnología Reflex-Desalitech), que en comparación con los sistemas convencionales de una sola etapa se alcanzan recuperaciones de hasta un 95%. El problema de estos equipos tan automatizados es su alto costo de inversión, que para ser redituable se necesita que los usuarios tengan consumos de al menos  $10 \text{ m}^3/h$ . La realidad es que son pocas las empresas que alcanzan estos grandes volúmenes de consumo, por lo que esta tecnología queda al alcance de unos cuantos. (*Desalitech, 2020*).

A pesar de que las alternativas de sistemas de ósmosis inversa en el mercado son variadas, algunas empresas en México prefieren ahorrarse los costos de operación

mediante la compra de agua baja en sales a empresas dedicadas a la producción y distribución de la misma. Algunos de los giros industriales que hacen uso de agua de buena calidad son las farmacéuticas, alimenticias y de bebidas, productoras de jabón e higiénicos, cosméticas, etc.

Identificados los diversos giros industriales y sus necesidades por adquirir agua de una buena calidad, es posible aprovechar este nicho de mercado y ofrecer los servicios de venta y distribución de agua baja en sales a la industria.

### **1.3 Objetivo**

Proponer un sistema de ósmosis inversa para la eliminación de sales en el agua de la red de abastecimiento como insumo para la industria.

### **1.4 Objetivos específicos**

Proponer un tren de filtración y membranas de ósmosis para una producción diaria de 5000 galones por día (18.92 metros cúbicos) con una conductividad menor a 5  $\mu\text{S}$ .

Estimar costos de inversión del sistema de ósmosis inverso propuesto.

### **1.5 Alcances y limitaciones**

Se buscara que el sistema propuesto haga uso del agua de la red de agua potable de la Ciudad de México.

Se obtendrán los costos de los equipos e insumos empleados para la obtención de agua-producto.

Se ha demostrado que todos los contaminantes del agua provienen de las precipitaciones, la naturaleza de la cuenca hidrográfica o acuífero subterráneo y las actividades humanas. Los principales contaminantes se pueden clasificar en componentes disueltos e insolubles. Dentro de los contaminantes disueltos hay algunos que se pueden considerar como transitorios, debido a que al ser componentes que pueden tener reacciones continuas, la actividad biológica cambia sus concentraciones, como lo pueden ser el oxígeno y el dióxido de carbono.

## 2 MARCO TEÓRICO

---

- Principio de filtración
- Fisicoquímica del agua
- Fundamentos de ósmosis inversa
- Transporte de masa

### 2.1 Naturaleza del agua

Las características fisicoquímicas, organolépticas y microbiológicas del agua están dadas por el ciclo natural hidrológico del agua, por lo que es susceptible a contaminarse con gases atmosféricos, minerales de las rocas, materia orgánica y microorganismos. Debido a esta sencilla razón, las características naturales del agua pueden tener grandes variaciones, no serán los mismos componentes de un agua que escurre a través de las montañas mediante ríos a aquella que se filtra por distintas capas de tierra y rocas hasta alojarse en pozos, por mencionar un ejemplo.

El agua líquida se evapora y se absorbe en el aire, cuando esta se condensa en el aire más frío cae como pequeñas partículas, ya sea como lluvia, nieve, o alguna otra precipitación regresa a la superficie de la tierra, disolviendo a su paso algunos gases como dióxido de carbono, oxígeno, emisiones naturales e industriales como óxidos nítricos y sulfúricos, por lo que un agua típica de lluvia tiene un pH de 5-6. El resultado del contacto con niveles más altos de estos gases provoca una condición ligeramente más ácida, dando lugar a la llamada “lluvia ácida” que puede llegar a tener un pH de 4 (Osmonics, 1997).

Conforme las precipitaciones de agua caen al suelo van adquiriendo otros tipos de contaminación, como lo pueden ser partículas de polvo, bacterias, esporas, etc. Al tocar el suelo comienzan a filtrarse a través de la corteza superior porosa y a través de las demás capas del suelo, por lo que a su paso se va dando un proceso de filtración hasta llegar a algún manto acuífero. Durante todo este proceso las partículas sólidas son retenidas y la mayor parte de materia orgánica es degradada por la actividad bacteriana en el suelo, relativamente limpia y ligeramente ácida.

Debido a esta condición ácida del agua le permite disolver muchos minerales, principalmente piedra caliza, que contribuye con calcio. Otras formaciones geológicas aportan minerales como magnesio, hierro, sulfatos y cloruros. Lo que da como resultado un aumento del pH de 7 - 8.5 (Osmonics) 1997.

### **Minerales y conductividad**

Se dice que el agua es completamente pura, pero esto no es del todo cierto, ya que contiene un nivel de impurezas, las cuales se miden por lo general en partes por millón (mg/L). Las principales impurezas iónicas disueltas en el agua, son por ejemplo sodio, magnesio, calcio, potasio, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, óxidos de silicio y bromuros. Se clasifican en términos generales como sales inorgánicas disueltas, aquellas provenientes de la disolución de minerales geológicos, en donde las cargas positivas y negativas de los iones coexisten en una estructura reticular unidos por enlaces electrostáticos. El agua dada sus características bipolares, es capaz de rodear los iones de carga positiva con la parte negativa de su molécula, aislándolo de los iones que lo rodean y neutralizando las fuerzas de atracción que lo mantienen unido a la red cristalina, este mismo fenómeno ocurre con los iones de carga negativa al ser rodeados por la parte positiva de la molécula de agua. Estos iones hidratados que abandonan la estructura cristalina de una sal inorgánica y se desplazan hacia la solución reciben el nombre de iones disueltos (Jenkins, 1999)

Los minerales al disolverse en el agua se disocian, al estar disociados los iones favorecen la conductividad eléctrica en el agua, de esta manera se puede conocer la concentración iónica total. Los iones que tienen mayor conductividad en el agua en el caso de cationes son el magnesio, calcio, sodio y potasio. Los aniones con mayor conductividad son cloruros, sulfatos y bicarbonatos.

### **Moléculas orgánicas**

La contaminación a causa de componentes orgánicos, puede ser causada por la descomposición de la materia proveniente de organismos vivos, así como compuestos sintéticos. Algunos contaminantes de origen natural muy comunes en el agua pueden ser el ácido húmico y ácidos fúlvicos, los cuales pueden otorgarle

color al agua, que lejos de causar algún daño a la salud, le dan un aspecto poco estético. En cuanto a los contaminantes orgánicos sintéticos estos provienen generalmente de químicos de uso industrial y agrícola como lo son los pesticidas. No son fácilmente biodegradables y suelen ser transportados y depositados en fuentes de agua. Algunos plaguicidas se demostraron que son carcinogénicos. (Nalco Company, 2009)

Muchos de los efluentes industriales no pueden ser tan fácilmente removidos del agua, sin importar que sean de origen orgánico o inorgánico, ya que generalmente se encuentran en altas concentraciones, o requiere de algún tratamiento poco convencional.

### **Microorganismos**

En el agua puede haber dos tipos de contaminación microbiológica, una a partir de microorganismos capaces de reproducirse y proliferar y otra de organismos incapaces de reproducirse. Los primeros organismos se pueden detectar a partir del cultivo de una población bacteriana y se cuantifica el crecimiento de las colonias que se han desarrollado mediante “Unidades Formadoras de Colonias” (CFU). Otro tipo de técnicas incluyen el *Número más Probable*, que está basado en la probabilidad estadística.

Existen algunos microorganismos llamados fotosintéticos, debido a que utilizan la energía solar para acelerar una reacción de óxido reducción, a partir de la reducción del dióxido de carbono a materia orgánica en medio acuoso y con producción de oxígeno, por ende bajo estas condiciones de organismos fotosintéticos, es de esperar que las condiciones tóxicas en el agua aumenten. Otro tipo de reacciones por microorganismos que pueden dar lugar, son la reducción de nitritos a amoníaco y gas nitrógeno, la reducción de sulfatos a sulfuros y la reducción de dióxido de carbono a metano, de esta manera se ve afectada la calidad del agua bajo distintas circunstancias. (Jenkins, 1999)

En la tabla 2.1 se dan las posibles calidades esperadas en fuentes comunes de agua.

Tabla 2.1 Calidades de agua esperadas en distintas fuentes.

Fuente de agua	Contenido químico	Potenciales positivos del agua	Potenciales negativos del agua
Agua potable municipal	Va desde agua con poca dureza y baja conductividad hasta alto contenido de dureza con alta conductividad.	Tiende a ser agua de buena calidad con baja cuenta de bacterias y libre de sólidos suspendidos	A menudo es la fuente más costosa. Si proviene de una fuente superficial sus componentes variarán conforme a la temporada. Si su origen es de pozo tendrá una alta dureza. Los arrastres de Hierro o Aluminio son comunes dependiendo del método de clarificación que se haya empleado para potabilizar el agua.
Ríos	Por lo regular tiene un contenido más bajo de dureza que el agua de pozos, dependiendo el área geográfica donde se localice.	El agua que pueden brindar es consistente en calidad, usando solo clarificación o filtración como pretratamiento	La química del agua, la contaminación biológica y los sólidos suspendidos varían con la temporalidad del año. Cuando hay zonas agrícolas aledañas es posible encontrar fosfatos y nitratos en el agua. La lluvia a menudo incrementa los sólidos suspendidos y los depósitos microbiológicos. Los cloruros varían en los estuarios en función de las fluctuaciones estacionales y las mareas.
Lagos	Generalmente baja en dureza y más constante que el agua de pozos	La variabilidad es baja, particularmente en los grandes lagos. Química del agua es buena y llega a ser baja en sólidos suspendidos.	Los contaminantes varían entre las estaciones del año. El aumento de las concentraciones puede ocurrir con el tiempo en los lagos más pequeños. Durante el verano puede explotar el crecimiento de algas en los lagos.

Tabla 2.2 Calidades de agua esperadas en distintas fuentes (continuación).

Fuente de agua	Contenido químico	Potenciales positivos del agua	Potenciales negativos del agua
Pozos	Agua con poca dureza y baja conductividad hasta alto contenido de dureza con alta conductividad	Generalmente es consistente en su química del agua, con poco contenido biológico o materia suspendida.	A menudo son la fuente de agua con la mayor cantidad de dureza, altos niveles de dureza de calcio y alcalinidad. Otros problemas pueden ser su alto contenido iónico tan alto como 5000 ppm, alto contenido de sílice, bacterias anaeróbicas, hierro y manganeso disuelto, así como sulfuro de hidrógeno.
Agua de proceso y aguas grises	Puede contener algunos contaminantes o en el caso de algunas aguas de proceso hay un aumento de la concentración de iones.	Una fuente potencial de bajo costo. Ambientalmente proactivo, particularmente en zonas áridas	Los contaminantes presentes pueden incrementar la corrosión. En comparación con una fuente de agua primaria puede tener una mayor cantidad de sólidos suspendidos, el pH puede ser muy variable, así como compuestos orgánicos más altos. Si las aguas grises desean reusarse para proceso, lo más común es que requieran un pretratamiento.
Efluente de alcantarillado municipal	Contiene una gran cantidad de contaminantes, desde compuestos orgánicos hasta inorgánicos, lo que ocasiona un incremento en la concentración de diversos iones.	Es una fuente potencial de bajo costo. Se pueden promover incentivos para promover su uso pensando en el aspecto ambiental, sobre todo en lugares con escasez de agua de fuentes primarias.	A menudo contienen fosfatos, compuestos nitrogenados, orgánicos, organismos biológicos, altos cloruros y sulfatos que el agua fresca del área. Requieren distintos tipos de pretratamiento para su reúso en proceso como ablandamiento con cal para reducir el contenido de dureza, alcalinidad y fosfatos. También aplican tratamientos biológicos para remover orgánicos, amoníaco y fosfatos.

(Nalco Company, 2009)

## 2.2 Parámetros regulados del agua

### 2.2.1 Agua para uso y consumo humano

En México el abastecimiento de agua para uso y consumo humano debe cumplir con una calidad adecuada en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas y químicas. Para garantizar las características mencionadas, el agua se debe someter a tratamientos de potabilización, de esta manera se evitarán distintas enfermedades. Los sistemas de abastecimiento públicos y privados, o cualquier persona física o moral que distribuya agua en el territorio nacional, deben de estar apegados a la Norma Oficial Mexicana **NOM-127-SSA1-1994**, la cual establece los límites permisibles en el agua potable; siendo aquella que es apta para consumo humano, ya que cumple con parámetros establecidos de calidad. La institución que regula el cumplimiento de la calidad del agua es la Secretaría de Salud (SSA), como herramienta utiliza las normas NOM-127-SSA1-1994, la NOM-201-SSA1-2015, entre otras (Carbotecnia SA de CV, 2020).

Se define como agua para consumo humano a aquella que no cause efectos nocivos a la salud, es decir, libre de agentes patógenos y sustancias tóxicas.

Para el caso de las características bacteriológicas, los límites permisibles se pueden reportar como NMP/100 mL en caso de que se utilice la técnica de número más probable. Si se hace uso de la técnica de filtración por membrana los valores se reportarán como UFC/ 100 mL, es decir unidades formadores de colonias por 100 mL (Secretaría de Salud, 2015).

En la tabla 2.2 se muestra los límites permisibles bacteriológicos en agua potable.

Tabla 2.3 Límites permisibles bacteriológicos en agua potable.

<b>Característica</b>	<b>Límite permisible</b>
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 mL 2 UFC/ 100 mL
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/ 100 mL

(Secretaría de Salud, 1994).

Algunas características del agua son perceptibles por los sentidos del ser humano (olfato, vista y gusto). El ser humano tiende a ser susceptible cuando las características físicas del agua son distintas a los estándares de incolora, inodora e insabora por lo que cualquier cambio detectable será un rechazo por parte del consumidor.

Algunos de estos parámetros son cuantificables como el color y la turbidez, mientras que el olor y el sabor son valores que dependerán principalmente de la experiencia y aceptación por la mayoría de los consumidores, indirectamente la ausencia de contaminantes se relaciona con la falta de olor y color en el agua. (Padillo, 2016)

Las partículas que se llegan a encontrar en suspensión en el agua, son causantes de la disminución de la transparencia del agua, para la cuantificación de la turbidez se lleva a cabo mediante un turbidímetro o nefelómetro. Los límites permisibles para este tipo de características físicas de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 se listan en la tabla 2.3 :

Tabla 2.4 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

<b>Característica</b>	<b>Límite permisible</b>
Color	20 unidades de color verdadero en unidades platino Cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptará toda aquella que sea aceptada por la mayoría de consumidores)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas o su equivalente en otro método.

(Secretaría de Salud, 1994).

Como se mencionó en el capítulo 2.1 de este trabajo, el ciclo hidrológico del agua es el causante de que adquiera sus componentes orgánicos, inorgánicos, así como los microorganismos presentes según el origen de la fuente de agua. Su paso por las capas de la corteza terrestre permiten que las sales se disuelvan alcanzando concentraciones que en algunos casos ya no son adecuadas para el ser humano a menos de que se sometan a algún tratamiento. Los límites permisibles químicos en el agua son los establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, los cuales se indican en la tabla 2.4.

Tabla 2.5 Límites permisibles químicos en el agua potable

<b>Característica</b>	<b>Límite permisible (mg/L)</b>
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025

Tabla 2.6 Límites permisibles químicos en el agua potable (continuación):

<b>Característica</b>	<b>Límite permisible (mg/L)</b>
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

(Secretaría de Salud, 1994).

Además de cumplir con la NOM-127-SSA1-1994, al momento de buscar comercializar el agua preenvasada o a granel se debe cumplir con lo dictado por la NOM-201-SSA1-2015, siendo aplicable a personas físicas o morales en territorio mexicano dedicadas al proceso o importación de agua. A groso modo esta norma indica las disposiciones sanitarias en cuanto a la fuente de abastecimiento del agua, tuberías y dispositivos que estén en contacto con el líquido, condiciones del área de lavado y llenado, así como el transporte. Además se indican los límites máximos permisibles del agua para consumo humano, los cuales son prácticamente los mismos que la NOM-127-SSA1-1994, añadiendo el siguiente límite máximo permisible cuando se mantiene cloro residual como desinfectante de acuerdo a la tabla 2.5:

Tabla 2.7 Límite máximo permisible de cloro residual para consumo humano

<b>Especificación</b>	<b>Límite máximo permisible (mg/L)</b>
Cloro residual libre	0.1

(Secretaría de Salud, 1994).

Cuando se usa algún agente desinfectante como cloro u ozono, se pueden generar algunos subproductos de la desinfección.

Los límites máximos permisibles de los subproductos de los desinfectantes utilizados están definidos por la tabla 2.6:

*Tabla 2.8 Límites máximos permisibles de subproductos de desinfectantes en agua potable*

<b>Desinfectante Utilizado</b>	<b>Especificación</b>	<b>Límite máximo permisible (mg/L)</b>
Cloro	Formaldehído	0.9
	Bromodiclorometano	0.06
	Bromoformo	0.1
	Dibromoclorometano	0.1
	Cloroformo	0.2
Ozono	Formaldehído	0.9
	Bromato	0.01

(NOM-201-SSA1-2002)

Finalmente para verificar estos parámetros es necesario contar con un programa de muestreo, en el que la frecuencia de los análisis realizados al agua dependerá de la fuente de origen, de manera general en la tabla 2.7 se describe lo anterior:

*Tabla 2.9 Programa de frecuencia de análisis de agua potable*

Especificación	Frecuencia
Organolépticos y físicos	Mensual
Coliformes totales	Semanal
Metales, metaloides y compuestos inorgánicos	Anual
Compuestos orgánicos sintéticos	Anual
Desinfectantes	Cada cuatro horas
Subproductos de desinfección	Anual
Radioactivos	Cada cinco años

(NOM-201-SSA1-2002)

### **2.2.2 Agua para la industria**

La industria en México debe utilizar para servicios el agua potable, que además debe cumplir con la NOM-127-SSA1-1994. Para el caso del agua de proceso de las distintas ramas industriales como la alimenticia y de bebidas, farmacéutica, cosmética, pinturas y recubrimientos, aparatos electrónicos, etc. requieren cierta calidad de agua según el tipo de proceso a realizar y/o producto a obtener. Existen diversos métodos para el tratamiento del agua, la elección del más indicado dependerá de la calidad del agua a tratar y el grado de pureza deseado (Nalco Company, 2009).

#### **Industria Alimenticia y de bebidas**

Los usos del agua en este sector son muy variados, desde su uso como servicio para la limpieza de materia prima, líneas y equipos de proceso, se emplea para la producción de vapor en calderas y como agua de enfriamiento en intercambiadores de calor. En la industria alimentaria y de bebidas se parte de agua proveniente de la red municipal que ya tuvo un tratamiento previo o si fuera el caso de algún pozo (Muñoz Lucas, 2018).

El uso del agua en proceso puede ser usado desde ingrediente en la formulación, hasta ser empleada como diluyente o para el acondicionamiento de materia prima (lavados, escaldados, cocción, tratamientos térmicos, preparación de salmueras, etc.).

Es un hecho que cualquier industria de alimentos o bebidas debe controlar de primera instancia la ausencia de materia extraña y que esté libre de microorganismos patógenos, por lo que deben asegurarlo de manera mínima con el tren de filtración más básico que está conformado por una desinfección con cloro en el tanque de almacenamiento de agua cruda, para después pasar por una serie de filtros, comenzando con uno de grava y arenas, de carbón activado para eliminar el cloro residual y quitar carga de color, hasta este punto está considerado como el tratamiento más básico, dependiendo del uso que se le vaya a dar al agua en las

distintas etapas del proceso, se determinara si requiere de equipos adicionales como puede ser un suavizador para eliminar la dureza del agua, una ósmosis inversa si se requiere que sea baja en sales y por ende en conductividad, la adición de lámparas UV, filtros pulidores, desinfección con ozono, etc.

En las industrias donde se hace uso de frutas o vegetales, el proceso comienza con el lavado de materia prima, como pueden ser la industria de zumos y preparados y de conservas, en donde el lavado se lleva a cabo con agua ligeramente dura y que mantenga un residual de cloro. El agua que se utiliza para lavados de materia prima, tiene la calidad necesaria para ser empleada en los enjuagues de los tanques, bombas, intercambiadores de calor, válvulas y líneas de proceso después de haber realizado la debida limpieza CIP (limpieza en sitio, por sus siglas en inglés “Cleaning in Place”). Hay ocasiones que la demanda de agua para lavados y enjuagues es tan grande para una empresa que se busca sacar todo el provecho posible aplicando un debido tratamiento para poder reusarla en otros puntos del proceso o servicios, por ejemplo para la alimentación de calderas o en torres de enfriamiento, de esta manera se tienen grandes ahorros de agua (Cancino, 2009).

En aquellas empresas que fabrican bebidas preparadas se busca obtener una baja alcalinidad, libre de impurezas y que cuente con ausencia de Hierro disuelto y Manganeso ya que estos iones pueden afectar el sabor de la bebida. En el caso de los néctares se busca una alcalinidad baja, de esta manera se asegura que no se neutralice el ácido utilizado como conservador (Muñoz Lucas, 2018).

En la industria de bebidas en donde el agua es el ingrediente principal, es decir el de mayor proporción, se requiere que el contenido de sólidos disueltos sea muy bajo, hasta 10 ppm como máximo, de esta manera se garantiza que el contenido disuelto de impurezas no afecten el sabor de la bebida, esto ocurre principalmente en las industrias refresqueras y de bebidas alcohólicas. Para alcanzar este objetivo es necesario agregar un sistema de ósmosis inversa, el cual se encargara de retirar hasta un 99% de contenido de sales disueltas, estos porcentajes pueden variar dependiendo el tipo de membrana utilizada (Carbotecnia SA de CV, 2020).

El agua que se obtiene en un sistema de ósmosis inversa es tan pura que puede ser usada para la alimentación de una caldera, siempre y cuando el sistema de ósmosis inversa que se tenga instalado otorgue la cantidad de agua requerida, el problema de alimentar calderas con agua osmoseada radica en que al eliminar las sales disueltas adquiere un carácter ácido y se vuelve más corrosiva, este pequeño problema se puede resolver fácilmente aplicando un tratamiento anticorrosivo.

### ***Industria Farmacéutica***

Los usos del agua en la industria farmacéutica son:

- Como disolvente o ingrediente en alguna forma farmacéutica.
- Limpieza y enjuagues de tuberías, tanques, áreas de trabajo, etc.
- Producción de vapor

Se debe garantizar que el agua utilizada en los procesos de la industria farmacéutica esté libre contaminantes, tanto de microorganismos como fisicoquímicos. Para alcanzar la calidad adecuada se hace uso de agua purificada, la cual se obtiene a partir de la purificación del agua potable, sometiéndola a procesos como ablandamiento, desionización, ósmosis inversa, filtración fina, ozonificación, luz ultravioleta. En México existe la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos, siendo una agencia reguladora que define los grados específicos del agua purificada para distintas formas farmacéuticas y sus requisitos para el lavado, síntesis o formulación. La calidad del vapor requerida en esta industria es similar a la del vapor que está en contacto con alimentos, libre de aditivos volátiles, sus principales usos son la desinfección térmica o procesos de esterilización (Sánchez Crispín, 2013).

La Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos declara los 3 tipos de agua que se utilizan en esta industria, así como el tipo de proceso empleado, las cuales son citadas en la tabla 2.8:

Tabla 2.10 *Tipos de agua farmacéutica y usos.*

<i>Farmacopea</i>	<i>Tipo de agua farmacéutica</i>			
<i>FEUM (Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos)</i>	<i>Agua potable</i>	<i>Agua purificada</i>	<i>Agua altamente purificada</i>	<i>Agua para inyectables</i>
<i>Obtención</i>	N/A	A partir de agua potable, sometiéndola a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtración.</li> <li>• Decoloración.</li> <li>• Ablandamiento.</li> <li>• Desionización.</li> </ul>	Se parte del agua purificada, añadiendo las etapas de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ósmosis inversa</li> <li>• Ultrafiltración</li> </ul>	Se parte del agua purificada, añadiendo las etapas de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Destilación</li> <li>• Microfiltración</li> <li>• Ultrafiltración</li> </ul>
<i>Usos</i>	Se emplea como materia prima para la producción de agua farmacéutica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricación de principios activos.</li> <li>• Fabricación de óvulos y supositorios</li> <li>• Fabricación de productos orales y tópicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricación de formas tópicas que requieren alta pureza microbiológica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricación de formas inyectables.</li> </ul>

*(Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos, 2010).*

El agua purificada y altamente purificada contienen la calidad requerida para ser empleada en la industria cosmética, en la que se fabrican productos para el cuidado personal, como lo pueden ser jabones de tocador, dentífricos, perfumes, maquillajes y cremas, el agua empleada suele tener una conductividad próxima a cero, con un intervalo de 0 a 5 microsiemens. Cuando se emplea esta calidad de agua, se asegura que el agua lleve impurezas que puedan provocar lesiones en la piel o que pudieran ser absorbidas (Laboratorios Valquer, 2014).

Hasta ahora se ha visto todas las funciones que puede desempeñar el agua en la industria, los principales consumos son como ingrediente en fórmula y como agente de limpieza, hasta en la fabricación de detergentes, productos de limpieza y del cuidado personal se requiere llevar a cabo una limpieza de los equipos después de la siguiente fabricación. Para el caso de la fabricación de artículos de aseo personal (jabones, detergentes, pastas dentales, cremas, etc.) y de cosméticos, se requiere un agua baja en dureza o hasta en 20 ppm como máximo, de lo contrario el agua dura evitará la formación de espuma y que los tensoactivos actúen de manera correcta (Pochteca, 2021).

Un sistema de tratamiento con ósmosis inversa para la producción de agua altamente purificada permitiría incursionar en diversos giros industriales para su venta, tales como la industria alimenticia y de bebidas, farmacéutica (ciertos sectores), jabones y detergentes, cosméticos, y hasta en sectores de la industria electrónica, en donde en ocasiones se requiere hacer lavados de piezas con agua libre de sales, para evitar la formación de sales en su superficie.

## 3 SISTEMAS DE FILTRACIÓN

---

### 3.1 Filtración

Algunos de los contaminantes del agua se pueden encontrar como partículas en suspensión o sedimentadas, las cuales pueden ser desde algunos centímetros y muy densas, hasta coloides muy estables con tamaños de partículas de hasta algunos pocos nanómetros, por lo general estos coloides son de naturaleza orgánica (Osmonics Inc, 1997).

La filtración se trata de un proceso físico que mediante el uso de un medio filtrante o superficie porosa, se encarga de retener las partículas sólidas de un fluido. En la filtración de agua potable los dos sistemas más comunes, son los filtros granulares (también llamados de lecho profundo) y los de membrana. Por lo general se emplean ambos métodos cuando se desea mejorar la calidad de agua a filtrar y la materia típica a filtrar es tierra, arena, limo, entre otras, ya sea para uso doméstico o actividades industriales. En ciertos procesos se requiere la eliminación de las partículas para evitar su arrastre a otros equipos en los cuales pudieran causar afectaciones, como son ensuciamientos u obstrucciones (Medina Rosero, 2007).

Hay casos como en el tratamiento de aguas residuales, en las que primero se eliminan sólidos de gran tamaño mediante procesos como desbaste y tamizado, pero habrá ciertas partículas que no puedan ser retiradas tan fácilmente mediante procesos físicos, por lo que será necesario emplear previamente a un proceso de filtración, la adición de reactivos químicos para favorecer la separación en el fluido dando lugar a un tratamiento fisicoquímico, como es el caso de la floculación-coagulación.

Un ejemplo claro de partículas suspendidas, son las aguas que presentan turbidez, ya que se trata de sólidos que no se sedimentan ni flotan sobre la superficie, otorgando cierta opalescencia en el medio.

Otro tipo de partícula suspendida bastante común son los coloides, que se trata de sólidos en dispersión en el medio acuoso, logrando estabilizarse mediante su carga negativa en la superficie, ocasionando que se repelan entre sí con las partículas vecinas. Estos compuestos son los objetivos de la adición de productos químicos, ya que no pueden ser eliminadas mediante algún tipo de filtración. Entonces para lograr retirarlas, primero se tiene que lograr la desestabilización de las cargas del coloide mediante la adición de químicos llamados coagulantes, que al neutralizar la carga, las partículas se dejan de repeler entre sí, permitiendo las colisiones entre ellas, este proceso recibe el nombre de coagulación. Ya desestabilizado el coloide se requiere que las partículas se aglomeren entre sí para formar flóculos (proceso de floculación) y después se procede a un proceso de eliminación de los mismos flóculos, el cual se denomina clarificación (Lenntech, 2021).

Como se ha mencionado, el hecho de que las partículas estén suspendidas no quiere decir que sea necesario u obligatorio utilizar floculación-coagulación para su retiro, hay situaciones en las que con un filtro adecuado se puede lograr el objetivo, hay una regla muy general que indica que sólidos son sedimentables y cuales se mantendrán en suspensión, la cual se basa en el tamaño de las partículas, aquellas que sean aproximadamente mayores a 10  $\mu\text{m}$ , mientras que los sólidos que se mantendrán en suspensión serán aquellos que midan de 1 – 10  $\mu\text{m}$ .

La eliminación de sólidos y selección del tratamiento físico o fisicoquímico más adecuado dependerá de la concentración, la forma y el tamaño de las partículas. Una vez realizado el tratamiento al agua cruda, esta tendrá las características adecuadas para su uso en aplicaciones industriales o caseras, en la figura 3.1 se muestra el rango típico de filtración para algunas sustancias comunes de encontrar en el agua.

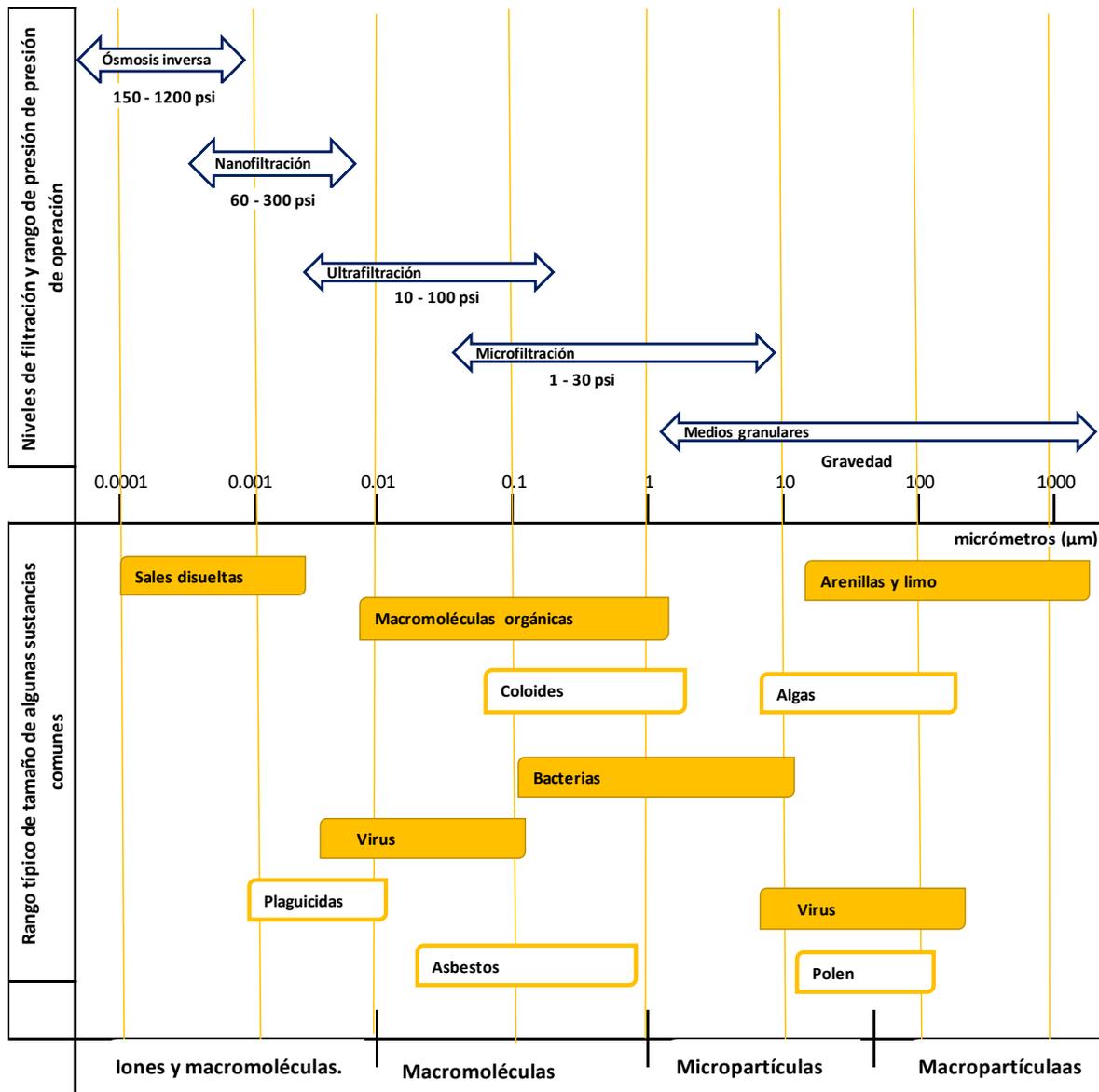


Figura 3.1 Adaptación Niveles de filtración y niveles de retención (American Water Works Association, 2016).

Una vez conocidos los niveles de filtración, es posible determinar la mejor opción para las distintas etapas del proceso de potabilización y purificación del agua. Dado que hay filtros que operan a presión atmosférica y otros tantos, a presión, cada proceso puede ser muy similar pero los consumos, flujos y cantidades a producir determinarán los equipos más pertinentes a emplear.

Para la filtración convencional, lo más común es emplear filtros granulares que retienen las partículas más grandes presentes en el agua. En el tratamiento de aguas municipales y pretratamientos industriales se suelen emplear filtros que operan a presión, los cuales están compuestos por los medios granulares, un tanque cilíndrico contenedor del medio, una válvula que acciona el mecanismo de retrolavados y su puesta en servicio, así como un tubo difusor con canastilla por donde fluirá el agua al interior y exterior del filtro.

Los tanques de los filtros construidos anteriormente eran construidos de acero y con válvulas manuales, en donde un operador era el encargado de abrir y cerrar válvulas para poner en servicio el filtro, e invirtiendo flujos para accionar los retrolavados *figura 3.2*, en algunas industrias, por ejemplo en la acerera, los filtros continúan siendo de acero e inyectados con aire para favorecer la expansión del lecho al interior del tanque.



*Figura 3.2 Filtro manual granular. (Agsararattananont, 2021)*

Actualmente estos filtros han ido en desuso, siendo remplazados por los filtros automáticos fabricados en fibra de vidrio figura 3.3.



*Figura 3.3 Filtro automático de fibra de vidrio (Inquinat, 2021)*

Estos filtros granulares suelen complementarse con filtros de cartucho en la línea al final de los granulares, haciendo la función de “pulidores”, al retener las partículas finas de medio granular que se hayan pasado al tubo difusor y por subsecuente a la línea de agua. Puede haber filtros de cartucho de distintos materiales y arreglos *figura 3.4*



*Figura 3.4 Filtros de cartucho industriales, de izquierda a derecha: malla inoxidable, espuma sintética, hilo arrollado, papel plegado, carbón activado y en la parte inferior el centro de un filtro de hilo ya utilizado (Acuña, 2006).*

Algunas industrias con necesidades más especializadas requieren alcanzar un nivel de filtración que sea capaz de retener bacterias y virus, proteínas, azúcares o minerales, con esto se abren niveles de filtración, tales como la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

Estos tipos de filtración para llevarse a cabo, emplean filtros denominados membranas, al igual que los filtros de cartucho hay de distintos materiales y diferentes estructuras, en donde el tamaño de poro de la membrana determinará el tipo de sustancias que puede retener, *figura 3.5*

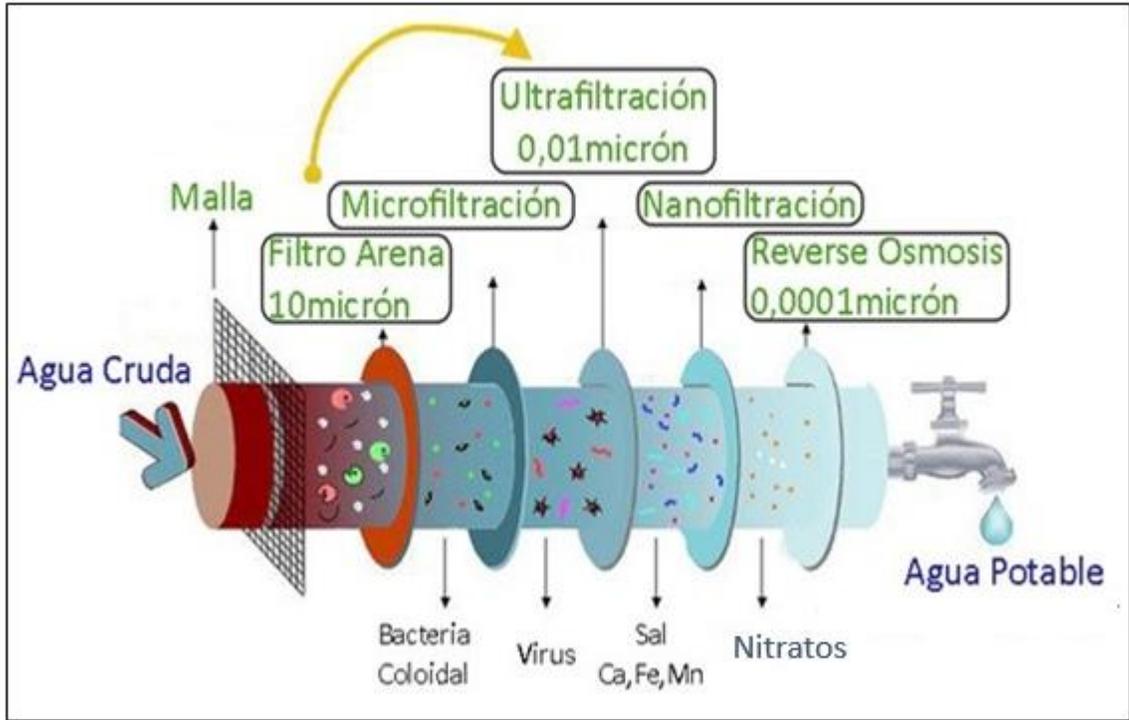


Figura 3.5 Retención de iones y microorganismos según el nivel de filtración empleado (Aquatreatment, 2017).

### 3.2 Filtros de lecho profundo

En el tratamiento de agua potable generalmente la primera etapa del proceso es la desinfección del agua, en la cual se utiliza comúnmente hipoclorito de sodio, después viene una etapa de filtración a través de un medio filtrante que puede ser una cama de arena o alguna combinación de diversos medios granulares, llamados filtros multimedia (*figuras 3.6 y 3.7*), los cuales consisten en camas de diversos gránulos y densidades de arenas, gravas y antracita, en donde el medio filtrante de mayor tamaño queda acomodado en la parte superior y en la inferior se encuentran las capas más finas de medio que terminan de realizar el proceso de filtración. Adicional a los medios filtrantes, se agrega una capa de grava como soporte a los medios filtrantes

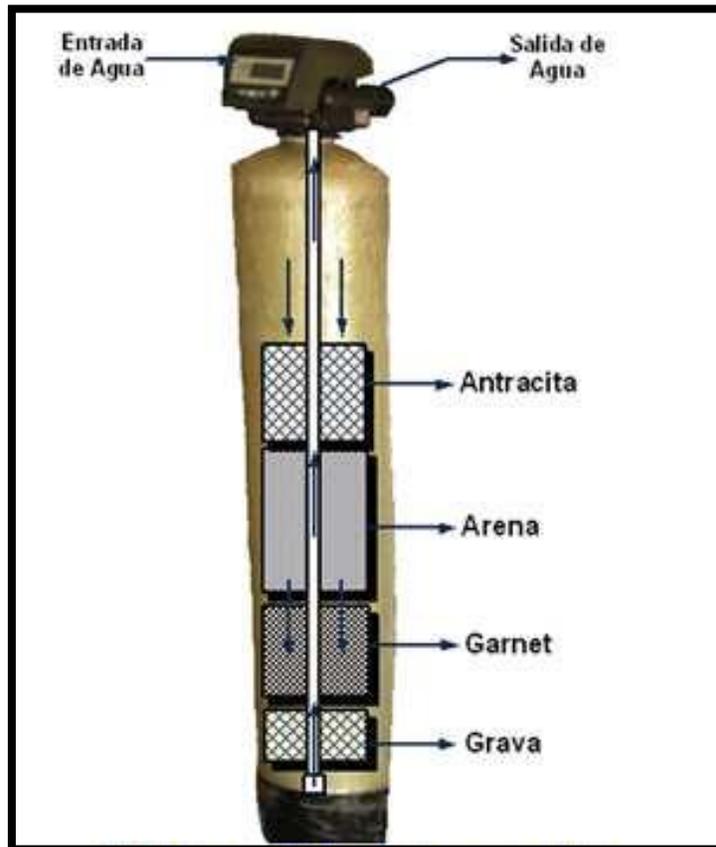


Figura 3.6 Composición de filtro multimedia (KPG Water Engineering, 2021).

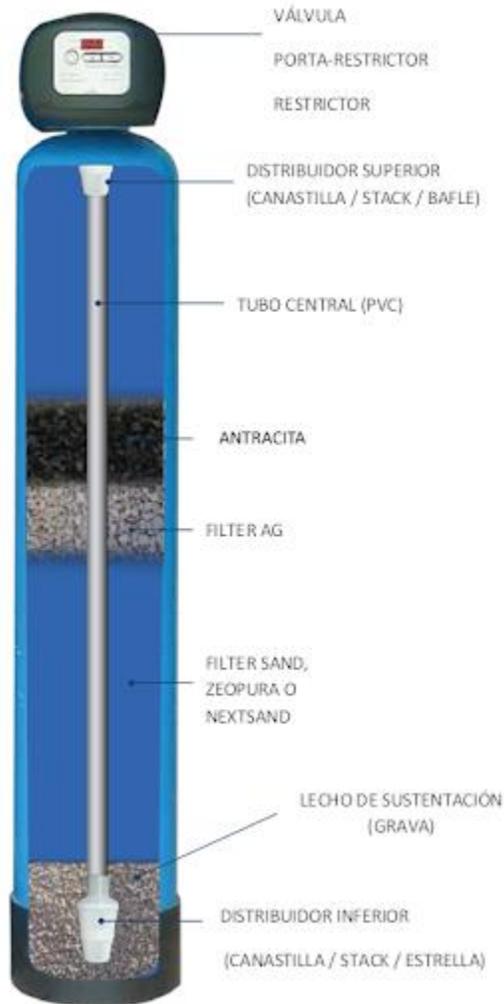


Figura 3.7 Componentes de filtro automático granular (KPG Water Engineering, 2021).

Las aplicaciones de este tipo de filtros en el agua van desde la retención de materia suspendida, distintos tipos de precipitados y se emplean como tratamiento terciario en las plantas de tratamiento de agua residual.

En el tratamiento del agua proveniente de la red municipal para usos industriales, una filtración con medios granulares bastará para retener las partículas que contenga el agua, ya que antes de ser distribuida por la red es tratada previamente.

Hay situaciones en las que el agua municipal recibe un tratamiento previo (tomando en cuenta que tengan un origen de río o lagos) antes de la etapa de filtración, en la que se añade un proceso de coagulación-floculación, esto sucede cuando existe

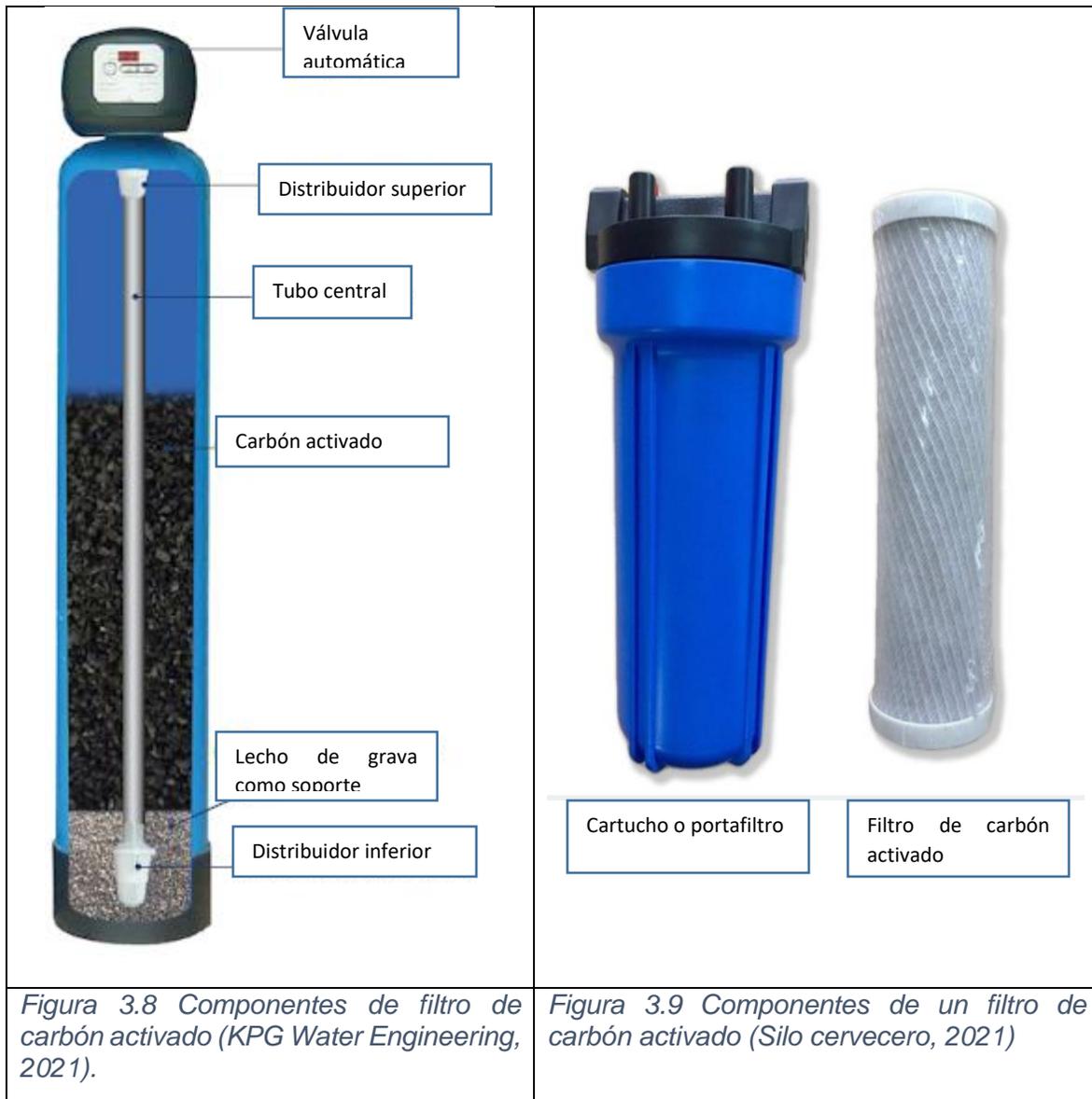
un alto contenido de coloides, que consisten en partículas tan pequeñas que no pueden ser retenidas por un filtro granular, además tienden a estabilizarse mediante la repulsión de sus cargas, por lo cual para poder ser eliminados se usa el pretratamiento ya mencionado de floculación-coagulación, con el objetivo de desestabilizar las cargas y formar aglomerados que al tener un tamaño más grande de partícula pueden ser retenidos mediante una filtración

Una vez que las partículas se han depositado en el medio granular, es necesario eliminarlas mediante un proceso de retrolavado al interior del tanque, esto se logra haciendo fluir desde el fondo una corriente de agua que permite la expansión del lecho. Existen algunas configuraciones de filtros que se apoyan con la inyección de aire al interior de los tanques, de esta manera se consigue una mejor expansión del lecho y mejora la eficiencia en la eliminación de partículas.

### **3.3 Filtros de carbón activado**

El carbón activado es un material que se caracteriza por su variedad de aplicaciones industriales para la separación y purificación de líquidos y gases, esto es posible gracias a la alta cantidad de poros internos con los que cuenta el material, esto conlleva a una mayor área superficial en donde los contaminantes deseados quedan retenidos. Sus usos principales van desde el tratamiento de aguas potables para la eliminación de color, olor y sabor, recuperación de solventes, eliminación de compuestos orgánicos y metales ligados a moléculas orgánicas, soportes catalíticos y en el control de emisiones de gases a la atmósfera. (Groso & Brosa Echeverría, 1999).

Este tipo de medios son contenidos por algún cartucho (*figura 3.9*) o en un tanque de fibra de vidrio o acero (*figura 3.8*) esta última es la preferida para el tratamiento de aguas potables en el sector industrial, mientras que en el sector doméstico al tener caudales de agua menores, se prefiere usar los filtros de cartucho.



El método de operación de los filtros de carbón activado granular, es similar a los filtros de gravas y arenas, teniendo como componentes principales un tanque contenedor del medio, una válvula de control, junto con los distribuidores superior e inferior del filtrado y su tubo de inmersión central.

Pese a que los componentes del equipo y la operación son los mismos, el fundamento de la operación unitaria es distinto, por usos y costumbres se ha denominado como “filtro” a estos equipos, pero en realidad son adsorbedores, ya que su principio se basa en la operación unitaria de adsorción. Esta operación se lleva a cabo sobre la superficie interna de los poros de las partículas de carbón

activado, en donde las impurezas se adhieren mediante fuerzas de atracción de Van der Waals cuando se trata de fisisorción, o adhiriéndose en sitios activos internos del carbón activado mediante el fenómeno de quimisorción. (Atkins & De Paula, 2008). En la *figura 3.10* se muestra el mecanismo de adsorción de las moléculas orgánicas sobre el carbón activado, donde el tamaño y tipo de molécula definirá el sitio de adsorción.



*Figura 3.10 Mecanismo de adsorción de carbón activado (Lainco, S.A., 2021)*

El carbón activado es posible obtenerlo a través de algún tratamiento físico o químico.

### **3.4 Intercambio iónico**

Existen ciertas aplicaciones en la industria e inclusive de uso doméstico, que requieren la eliminación de los minerales disueltos en el agua, principalmente se busca eliminar la *dureza* del agua, término otorgado a la cantidad de iones de Calcio y Magnesio presentes en un determinado volumen de agua. Estos iones tienen su origen en las formaciones calcáreas por las que pasa el agua en su ciclo natural, la cantidad de dureza dependerá del tipo de formaciones rocosas por las que tenga su paso el agua. (Aguas de Mataró, s.f.).

Para la eliminación de dureza y su transformación en agua *suavizada* en la industria se suelen emplear resinas de intercambio iónico, siendo sólidos poliméricos granulares e insolubles, su gran característica es que dentro de su estructura molecular se tienen iones moleculares, ácidos o básicos. En el mercado se pueden encontrar resinas tipo gel y las de tipo poroso, siendo las preferidas en la industria por su resistencia y capacidad de intercambio iónico. Para el caso de la eliminación de la dureza total del agua generalmente las resinas empleadas son de tipo sódico, mientras que para aplicaciones de desmineralización del agua suelen emplearse resinas catiónicas y aniónicas, las cuales se presentan normalmente en el mercado como resinas tipo ion hidrógeno ( $H^+$ ) y tipo ion hidroxilo ( $OH^-$ ). (Reyna Ávila, 2014)

Dependiendo el tipo de industria, se buscará eliminar o reducir el contenido de sales disueltas, si su contenido es superior a los límites definidos por las industrias y sus procesos, pueden traer diversos problemas consigo, por ejemplo, en la industria de bebidas se busca alcalinidades bajas, ya que suele afectar el sabor de las bebidas preparadas. Asimismo algunos alimentos requieren conservadores que al tener un carácter ácido pueden ser afectados por la alcalinidad del medio, siendo otra área que requiere un contenido bajo de sales disueltas, la cual normalmente se obtiene mediante el típico tren de filtración combinado con ósmosis inversa y/o desmineralización.

Los iones de Calcio y Magnesio son los principales causantes de problemas de incrustación en las líneas de agua y equipos industriales que estén en contacto con el agua dura (Lenntech, 2021). Por esta razón lo más habitual es que todo tren de tratamiento de agua potable en la industria, contenga en su proceso un equipo capaz de eliminar la dureza del agua, como se explicó en párrafos anteriores en el mercado existen distintos tipos de resinas, para fines de eliminación de dureza se suelen emplear resinas catiónicas plásticas de tipo perla (figura 3.11).



*Figura 3.11 Resina catiónica utilizada para la eliminación de dureza en el agua. (Novo Agua SA de CV, 2021)*

Las resinas de intercambio iónico contienen en su estructura molecular iones fijos, los cuales han sido “inmovilizados”. Para mantener la neutralidad de la carga en la resina, se neutraliza la carga con un ion de carga opuesta, el cual tiene como característica principal ser un ion móvil, que le permite entrar y salir de la resina. (Reyna Ávila, 2014). En la figura (3.12) se representa el mecanismo de intercambio iónico en un monómero del polímero de la resina de intercambio, en el cual inicialmente se tienen cuatro iones de Sodio en su estructura, los cuales son desplazados por dos iones de Calcio, de esta manera la neutralidad de las cargas se mantiene.

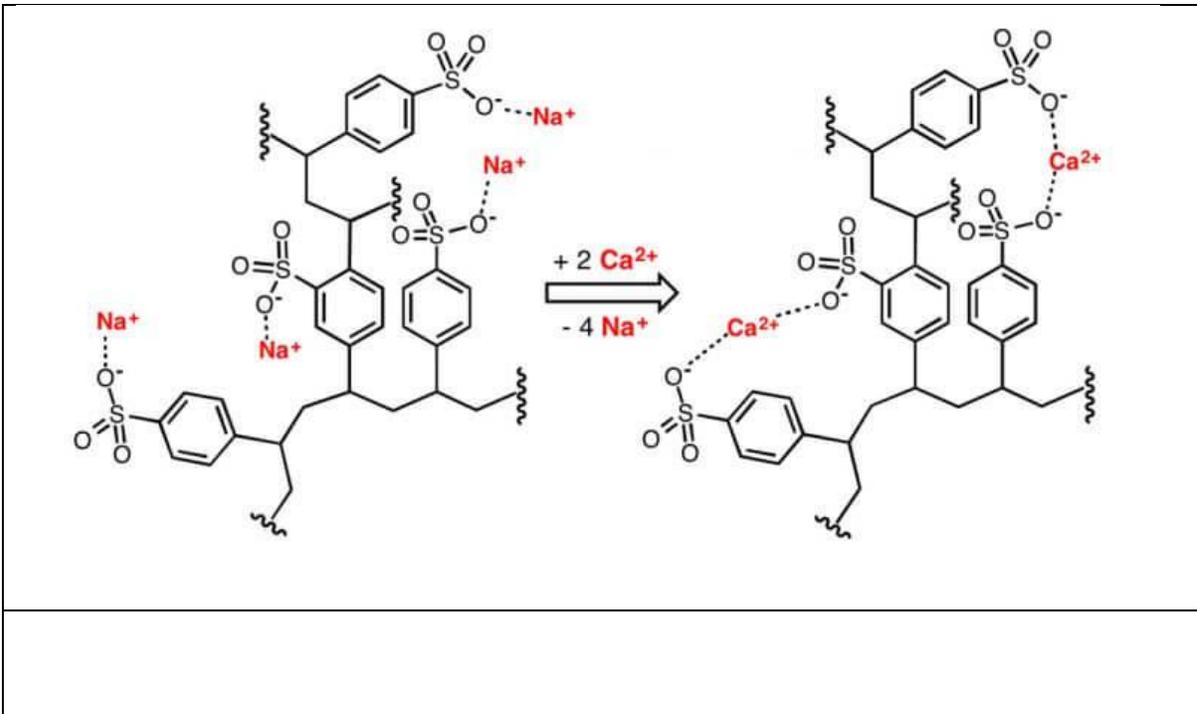


Figura 3.12 Estructura molecular de una resina de intercambio iónico. En la cual se visualiza su estructura inicial y después del intercambio iónico en la suavización de agua (Ionic Systems, 2021).

El intercambio iónico se lleva a cabo hasta el punto en que los iones de Calcio y Magnesio han saturado todos los espacios disponibles en la resina desplazando a los iones de Sodio iniciales, una vez que esto sucede es necesario llevar a cabo una regeneración, la cual consiste en el desplazamiento de los iones retenidos mediante un enjuague con una solución de salmuera, la cual provocará que los iones capturados sean desplazados por un gradiente de concentración de iones de Sodio, al finalizar esta etapa y el resto de enjuagues en el proceso de regeneración, la resina está lista para iniciar un nuevo ciclo. (Carbotecnia SA de CV, 2020)

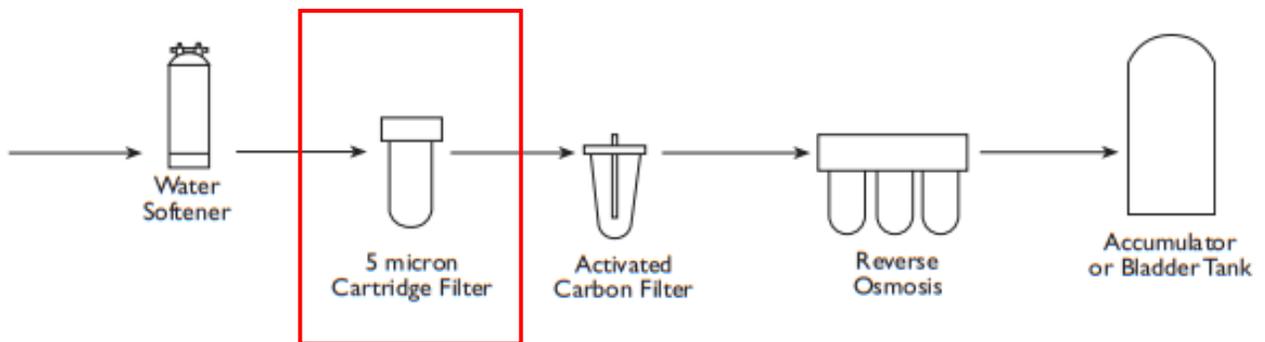
El intercambio iónico es una etapa fundamental en la obtención de agua ultra pura para distintos procesos.

Las resinas de intercambio iónico son contenidas en el mismo tipo de tanque que los medios granulares de un tren de filtración de agua. La principal diferencia radica en el tipo de válvula automática, ya que para una resina de intercambio iónico se requieren etapas como la succión de salmuera y enjuagues para garantizar que no

queden restos de la solución salina cuando esté en operación el suavizador. (Carbotecnia SA de CV, 2020)

### 3.5 Filtros de cartucho

En la industria es común utilizar filtros de cartucho en todo tren de filtración de agua potable, desde la destinada como agua de servicio en el calentamiento o enfriamiento de equipos de proceso, hasta su uso como pulidores en la producción de agua purificada y agua ultrapura, los cuales son colocados al final del tren de filtración-adsorción con medios granulares y antes de algún equipo de ósmosis inversa. Su función en los sistemas con ósmosis inversa es retener aquellas partículas que no hayan sido retenidas por el medio granular, asimismo previene que las partículas finas de los medios granulares lleguen hasta las membranas de la ósmosis inversa, tal y como lo muestra la *figura 3.13*.



*Figura 3.13 Diagrama de un sistema típico de ósmosis inversa casero, el cual incluye una etapa de pretratamiento con un filtro de cartucho de 5 micras (Osmonics, Inc, 1997).*

Durante la carrera profesional del autor ha sido posible detectar los distintos arreglos y tipos más comunes en la industria en general, por lo que solo se centrará el estudio en aquellos empleados en el tratamiento de agua potable empleada para alimentar sistemas de ósmosis inversa. En el capítulo 3.1 se hace una breve mención de los materiales en que se pueden presentar estos filtros.

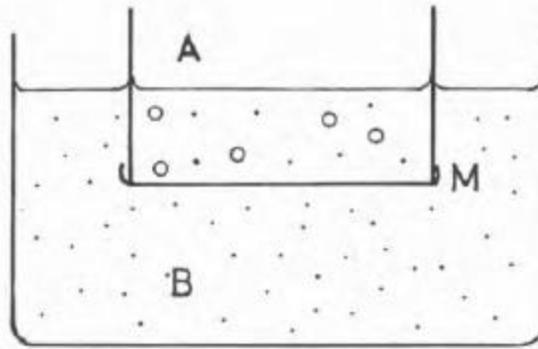
Los niveles de filtración en los que se hace uso de un *portafiltros* abarca desde microfiltración, nanofiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa, aunque también suelen llamarse *portamembranas*.

### **3.6 Separación por membrana**

A lo largo de los años la tecnología de membranas ha avanzado lo suficiente para estar en múltiples aplicaciones, tales como la obtención de proteínas, desalinización del agua, tratamiento de aguas residuales, obtención de componentes volátiles, etc. (Vidal Brotons).

Su funcionamiento radica en la separación mediante el tamaño de partícula y la diferencia de pesos moleculares, el transporte de las sustancias a través de las membranas se efectúa gracias a un gradiente, ya sea de concentración o de presión, forzando el paso de los componentes a través de las membranas, las cuales deben de cumplir con el requisito de ser semipermeables (Ramírez-Nava, 2016).

El desarrollo de esta tecnología surge desde tiempos remotos, se estima que en el año de 1688 M. La Hire, fue el primer científico en realizar trabajos científicos con membranas, quien evaluó la permeabilidad de las vejigas de cerdo con relación al agua y al alcohol, detectando que la primera sustancia presenta una mayor permeabilidad. Fue hasta 1861 que fue posible demostrar que algunos tipos de membranas son permeables a sustancias de bajo peso molecular, mientras que los coloides permanecen prácticamente impermeables a esta membrana. El experimento del científico Graham, consistió en tener un disolvente (agua) en un recipiente e introducir otro recipiente con una sustancia que contiene macromoléculas y coloides, el cual tiene en el fondo una membrana. Demostrando que los iones y partículas de bajo peso molecular, migran del sistema disperso al disolvente mediante difusión, esto se ejemplifica en la *figura 3.14* (Aguilar Peris, 1983).



*Fig. 1*

Dializador de Graham. En A se situa la solución que encierra macromoléculas o partículas coloidales (○) y pequeñas moléculas o iones (·); en B el disolvente; entre los dos la membrana M. Las partículas de débil peso molecular pasan de A a B por difusión

*Figura 3.14 Experimento de Graham. Transporte de iones de una solución a un disolvente a través de una membrana (Aguilar Peris, 1983).*

Las clasificaciones actuales de las membranas van en función de dos parámetros principales, su naturaleza y estructura. En la *figura 3.15* se ejemplifica de una manera general las clasificaciones más comunes de la tecnología de membranas acorde a su naturaleza, ya sea biológica (por lo regular se usan en los campos médico y farmacéutico) o sintética. Una manera distinta de clasificar a las membranas es acorde a la estructura que presentan, ya sea macroscópica o microscópica, tal y como lo muestra la *figura 3.16*.

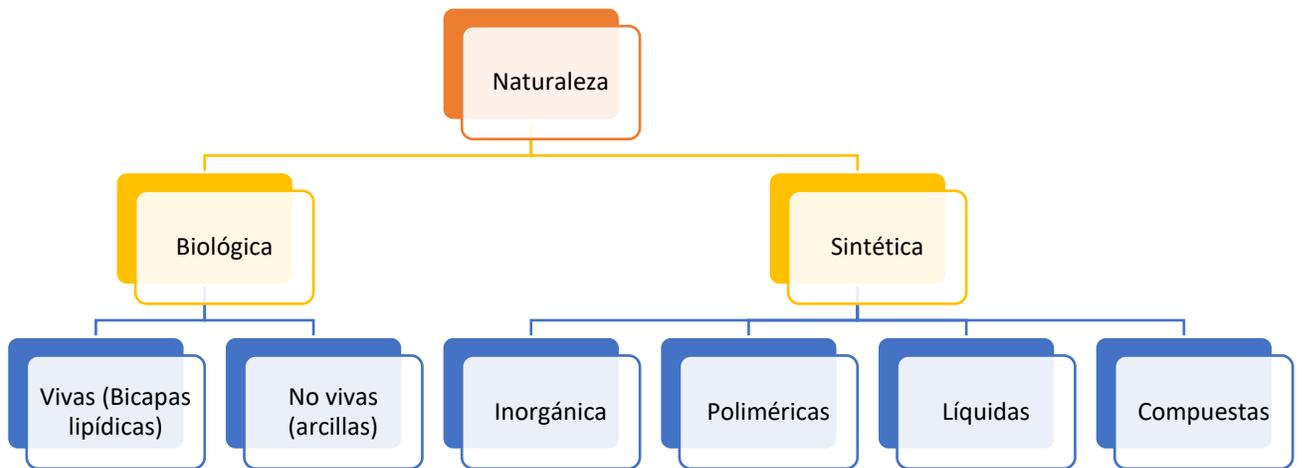
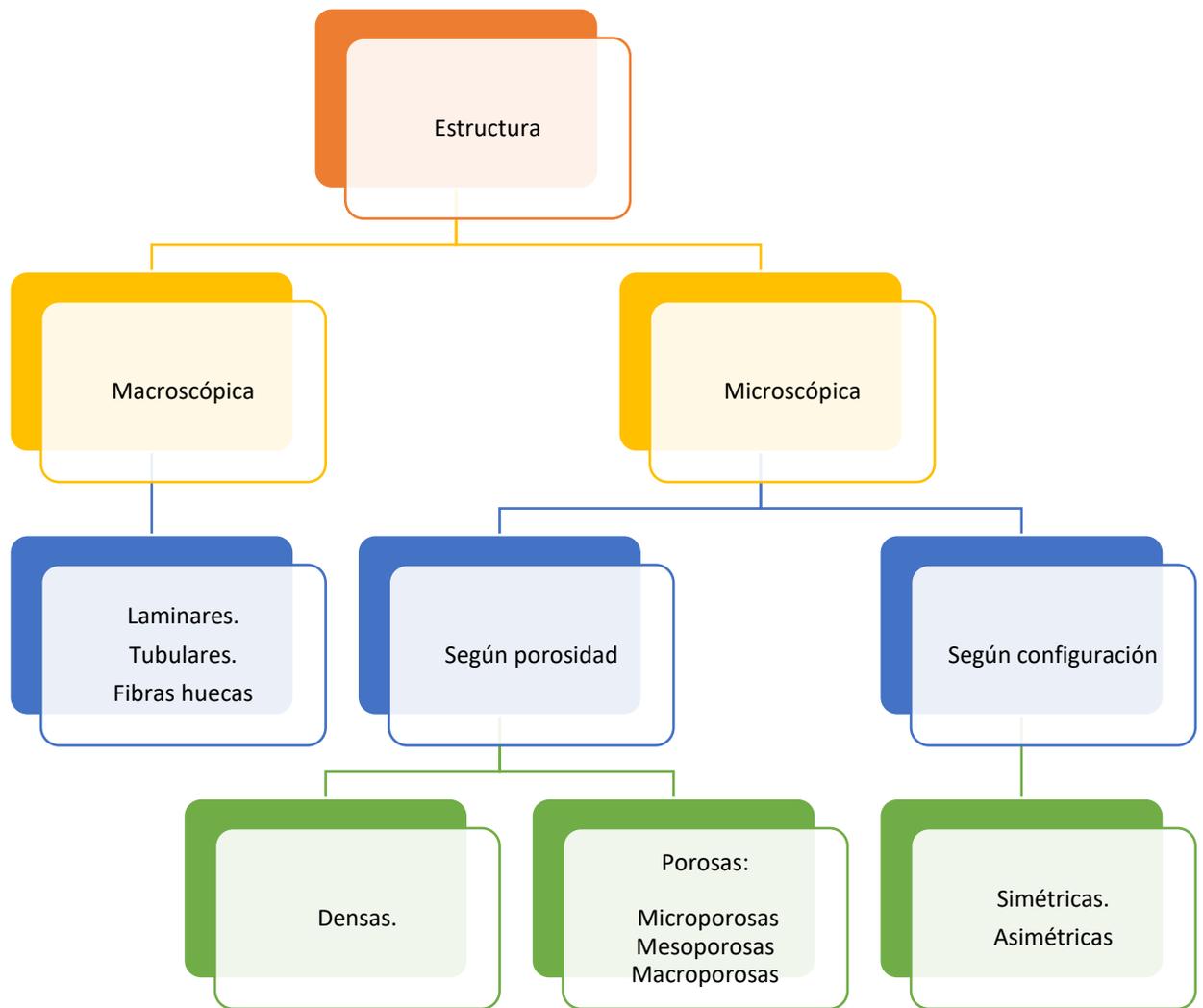


Figura 3.15 Clasificación de membranas acorde a su naturaleza (Hernández, 1990).



*Figura 3.16 Clasificación de membranas acorde a su estructura (Hernández, 1990).*

En la industria y en términos generales, las membranas para líquidos se clasifican de acuerdo al tipo de partículas que pueden retener, abarcando niveles de filtración tales como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

### 3.7 Microfiltración

En ocasiones las fuentes de agua potable pueden estar contaminadas con materia orgánica, en donde los tratamientos convencionales como la coagulación, clarificación y/o filtración no pueden remover, principalmente cuando se tiene una carga alta de color o de carbón orgánico total. Actualmente para estas situaciones ya se hace uso de la tecnología de membranas de microfiltración y ultrafiltración, las cuales han demostrado ser una tecnología comprobada también capaz de retener quistes y oocitos de parásitos como *Cryptosporidium* y *Giardia*. De esta manera también se reduce el uso de químicos para desinfectar el agua. (Mourato).

En el desarrollo de la microfiltración para tratamientos de agua potable, se buscó emplear membranas que fueran de bajo costo y con un fácil mantenimiento, capaces de retener partículas, microorganismos y moléculas de bajo peso molecular. El rango de operación de estas membranas va de los 0.05 – 10 micrómetros, de esta manera se asegura la separación física de las partículas.

Por tanto aquellas sustancias que tengan un tamaño menor al tamaño de poro de la membrana pasarán a través de ella, mientras que aquellas mayores al tamaño de poro serán retenidas por la membrana. En la figura 3.17 se muestra las sustancias retenidas por los sistemas de membrana.

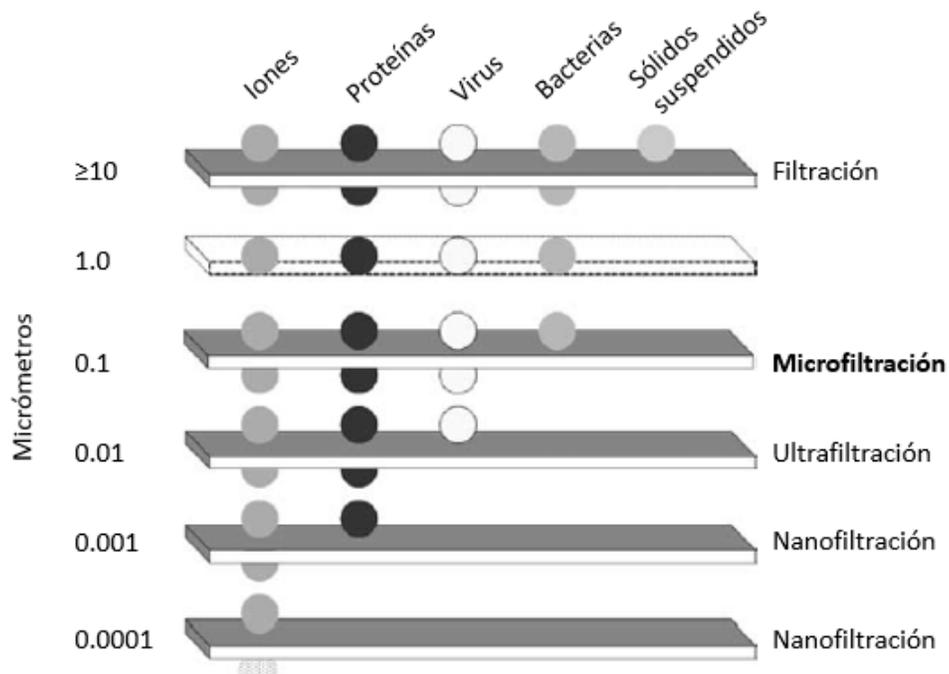
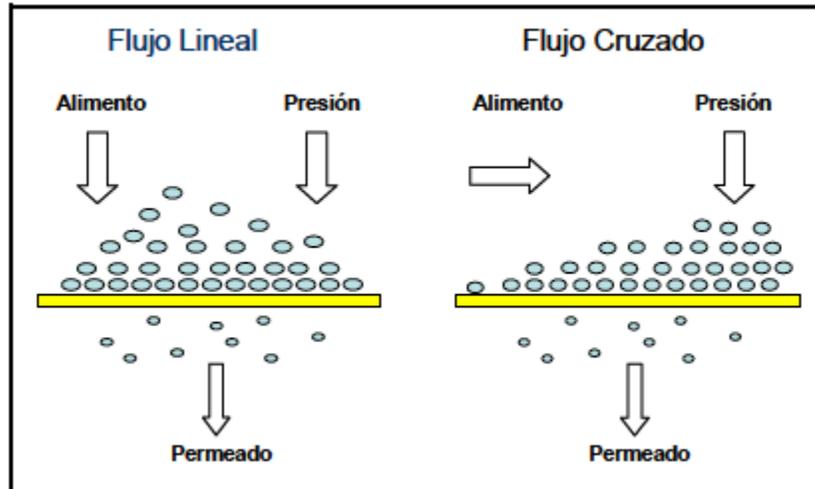


Figura 3.17 Capacidad de remoción de los sistemas de membrana (Nalco Company, 2009)

A diferencia de la filtración convencional, en las operaciones de membrana como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, se tiene la opción de realizar retrolavados capaces de dar una mayor vida útil a las membranas.

Industrialmente existen dos mecanismos de filtración: flujo lineal y cruzado. En el flujo lineal, la alimentación de agua cruda se hace pasar de manera transversal a través de la membrana, la capacidad de retención se ve reducida con el atascamiento de los poros, reduciendo su diámetro y provocando una mayor restricción de las partículas. En la filtración de flujo cruzado, el flujo de alimentación pasa de manera paralela a la superficie de la membrana entre capa y capa, reduciendo la adsorción de partículas sobre la misma (Sotto Díaz, 2008). Estos mecanismos de filtración se representan en la figura 3.18.



*Figura 3.18* Mecanismos de filtración lineal y cruzado. Se representa el flujo de alimentación transversal y paralelo a la superficie de la membrana respectivamente (Sotto Díaz, 2008).

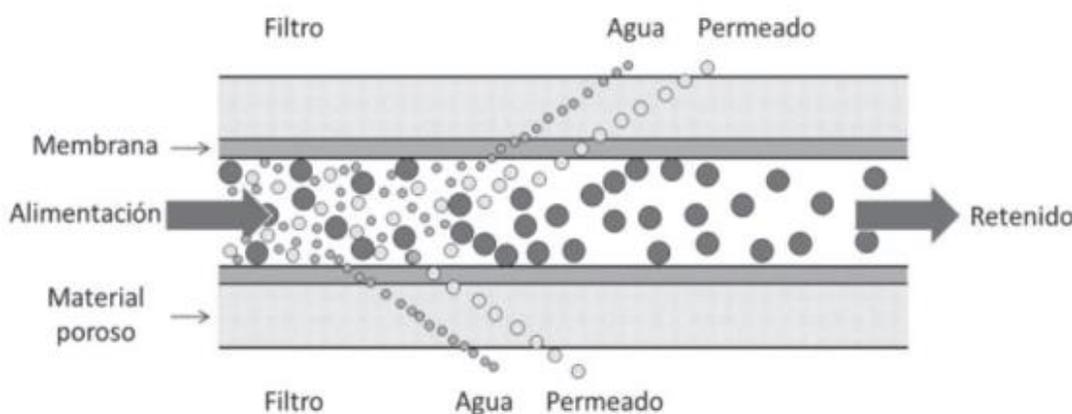
De acuerdo a la aplicación industrial requerida y calidad del flujo de alimentación, las membranas pueden acomodarse en distintos arreglos y configuraciones, lo que comúnmente se conocen como módulos a cada unidad de membrana en un solo sistema.

Los tipos de membranas comerciales pueden ser de placas, tubulares, de fibra hueca, o espirales, los cuales son el arreglo preferido para aplicaciones de ósmosis inversa en el tratamiento de aguas.

### 3.8 Ultrafiltración

Es una operación que emplea membranas especiales en diferentes tipos de arreglos para separar macromoléculas en solución de contaminantes más pequeños, por medio de un gradiente de presión (Huerta Ochoa). El rango de filtración va de los 0.1 – 0.01 micrómetros, logrando eliminar las macromoléculas de peso molecular entre 1000 y 200,000 Da, partículas coloidales, virus y bacterias.

Las moléculas que no alcanzan a pasar por la membrana, se les conoce como concentrado, mientras que aquellos componentes que si logran atravesar la membrana se les conoce como permeado, estos componentes pueden ser disolventes, sales y azúcares. (Solís, 2017). El proceso de separación de una membrana es representado en la *figura 3.19*.



*Figura 3.19 Representación de flujos de permeado y concentrado o retenido (Solís, 2017)*

Las membranas de ultrafiltración han despertado un interés en la industria como método físico de desinfección, logrando tasas de desinfección de hasta un 100% en todos los grupos microbianos (Hagen, 1998).

Las configuraciones de las membranas de ultrafiltración son de tipo hoja plana, membrana tubular y membrana de fibra hueca.

Algunos factores como el pH de la solución, la cantidad de solutos retenidos, el material de la membrana y la presión transmembranaria pueden llegar a perturbar el flujo del permeado, disminuyendo los rendimientos. Esto conlleva a que sea necesario la limpieza de la membrana, o en su defecto el desecho. Actualmente se

prefiere realizar limpiezas o barridos con soluciones químicas para alargar la vida de la membrana, este tipo de limpiezas químicas son más comunes en las membranas de espiral para ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

### 3.9 Ósmosis inversa

#### 3.9.1 Fundamentos de la ósmosis

La ósmosis es un sistema de difusión de transporte de masa, en el que se tiene una solución concentrada y una solución de menor concentración, separadas por una membrana semipermeable, la cual solo permite el paso del disolvente. Este fenómeno de difusión no requiere de una fuerza motriz, simplemente se da por un proceso natural, el cual llegará al equilibrio una vez que las concentraciones de ambas soluciones sean iguales. Mientras mayor sea la cantidad de sólidos disueltos, existirá una mayor diferencia de altura entre las soluciones. La diferencia de alturas generada entre las soluciones, corresponderá a la presión osmótica. (Nalco Company, 2009).

Los fenómenos de ósmosis existen de forma natural en las células de los organismos para regular la cantidad de agua que ingresa a las mismas.

En la figura 3.20 inicialmente se tiene una solución diluida (a) y solución concentrada en sólidos disueltos (b) separados por una membrana semipermeable. El solvente de la solución más diluida migrará a la solución más concentrada para intentar igualar las concentraciones aumentando la presión osmótica en la solución más concentrada (Lubo Matallana, 2002)

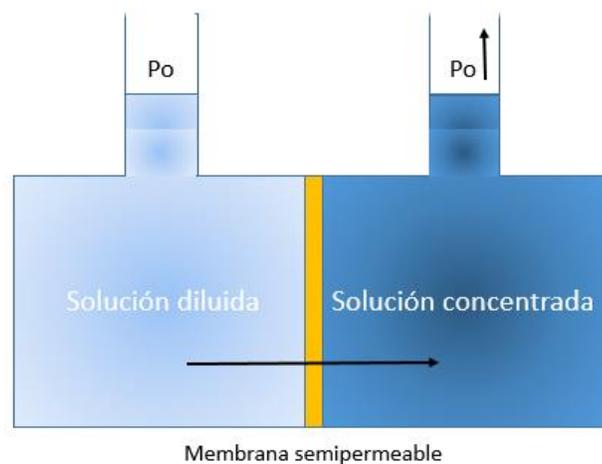
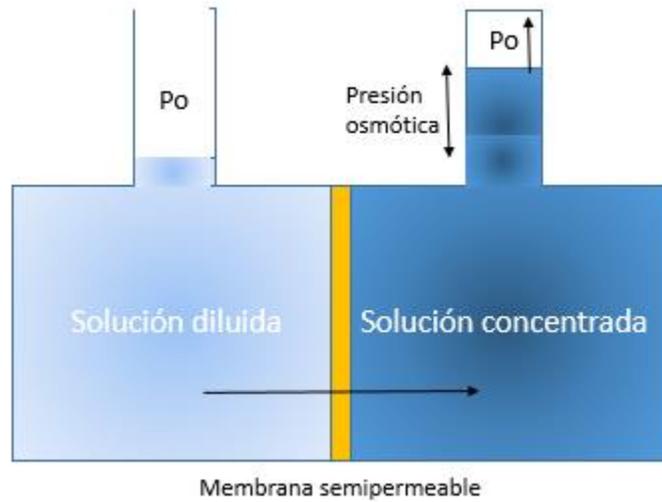


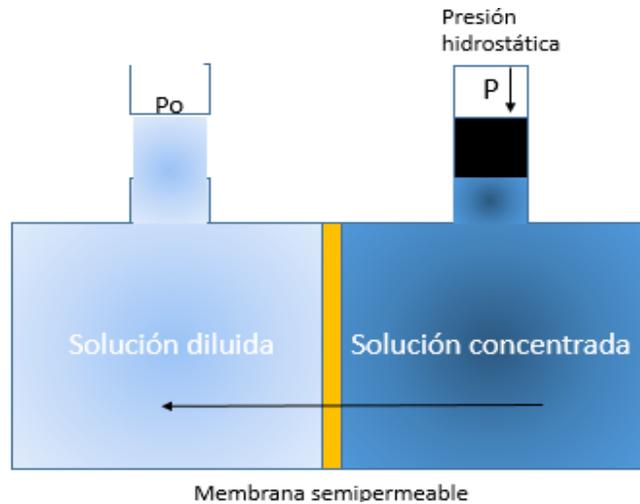
Figura 3.20 Fenómeno de ósmosis entre dos soluciones (Lubo Matallana, 2002)

Una vez que las concentraciones se han igualado entre ambas soluciones la presión osmótica del sistema más concentrado aumentará, lo cual se verá reflejado en un aumento de altura de esta solución, esto se ve representado en la figura 3.21 (Lubo Matallana, 2002).



*Figura 3.21 Presión osmótica en un sistema de ósmosis (Lubo Matallana, 2002)*

Pero si la solución concentrada se somete a una presión hidrostática superior a su presión osmótica natural, el fenómeno ocurre a la inversa, por tanto el agua de la solución concentrada migrara a la solución diluida dejando la solución inicial más concentrada, a este fenómeno se le llama ósmosis inversa, lo cual se puede observar en la *figura 3.22* (Lubo Matallana, 2002).



*Figura 3.22 Fenómeno de ósmosis inversa (Lubo Matallana, 2002).*

Una vez comprendidos los procesos de ósmosis y ósmosis inversa es adecuado conocer como está compuesta una membrana, para así ubicar los flujos de alimentación, permeado y rechazo.

En la figura 3.23 es posible visualizar la estructura de la membrana de ósmosis inversa, la cual consta del enrollamiento de distintas láminas de diferentes materiales sobre un tubo colector perforado. El flujo de alimentación pasa de manera transversal al módulo y se filtra por medio de la membrana, el cual es recolectado por una malla y fluye de manera radial al tubo colector, el cual está perforado y de esta manera sale como un flujo de permeado libre de cierto porcentaje de sales. Las sales disueltas retenidas salen de manera transversal por el otro extremo de la membrana, en un flujo llamado rechazo o concentrado. (Nalco Company, 2009)

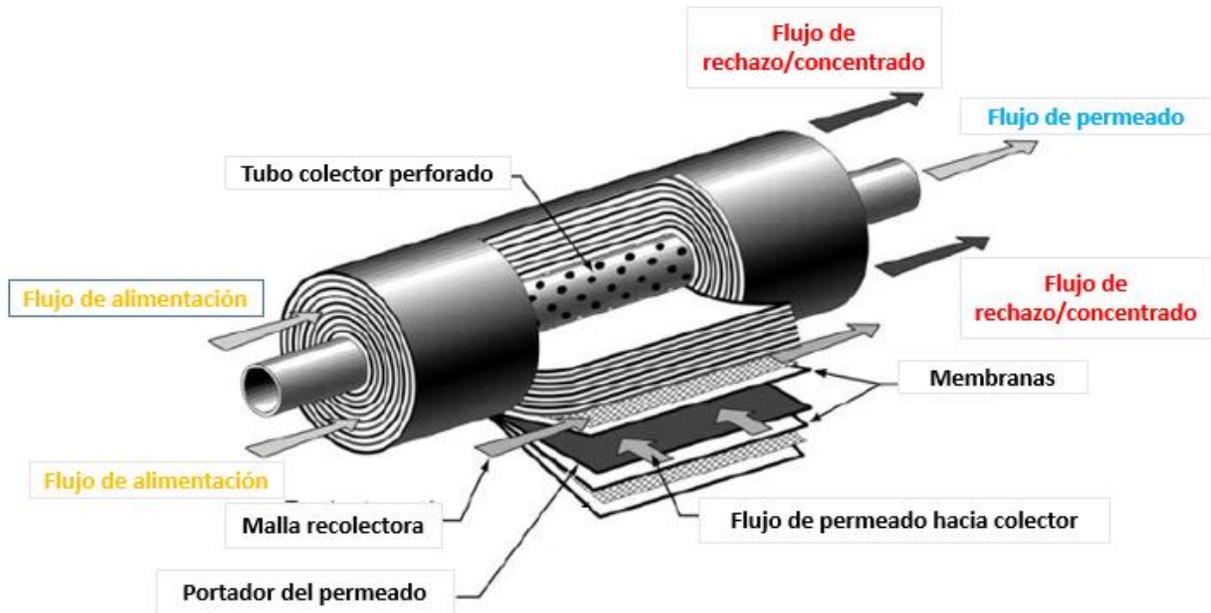


Figura 3.23 Estructura de membrana de ósmosis inversa (Nalco Company, 2009).

Si existieran más módulos en el sistema de ósmosis inversa, es posible mandar el rechazo como un nuevo flujo de alimentación a los siguientes módulos y obtener un mayor porcentaje de permeado de la alimentación inicial.

Para que el sistema sea lo suficientemente eficiente se debe de contar con un tren de filtración previo al sistema de ósmosis inversa el cual debe contar con filtros de arena, carbón activado, suavizador, filtros pulidores de cartucho y si fuera necesario el empleo de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración, todo depende de la calidad de permeado que se desee obtener, pero para fines del presente trabajo, se limitará el sistema hasta los filtros pulidores, ya que se está partiendo de agua potable provista del sistema municipal, el cual le da un tratamiento previo para ser apta para el consumo humano. (Osmonics Inc, 1997)

### **3.9.2 Aplicaciones de la ósmosis inversa en la industria**

Las aplicaciones de un sistema de ósmosis inversa no solo se limitan a la producción de agua ultrapura. Las diferentes industrias en búsqueda optimizar sus procesos han hecho uso de este sistema para la desalación de agua salobre en lugares donde el agua dulce es escasa, así como para la producción de agua ultrapura que alimente calderas y el vapor generado sea capaz de mover turbinas para la generación de energía eléctrica. En la industria alimenticia los sistemas de ósmosis inversa son empleados para la recuperación de sustancias de valor como pueden ser proteínas, azúcares e ingredientes activos para la fabricación de medicamentos (Nalco Company, 2009).

En industrias como la automotriz, refinerías de petróleo, industria de pulpa y papel e industrias químicas, al ser grandes consumidores de agua, buscan reducir sus consumos y descargas de efluentes, lo cual lo consiguen con sistemas de ósmosis inversa, aunque para el caso del reúso de efluentes puede ser necesario el uso de trenes de filtración y/o procesos oxidativos (Vourch, 2008)

La industria láctea por ejemplo, en algunos productos se requiere que sean lo suficientemente concentrados por lo que la sustancia de interés es el concentrado, el cual es rico en aminoácidos y proteínas, mientras que el permeado carece de estos elementos (Makardij, 1999). En un caso opuesto, algunos contaminantes que pueden representar un riesgo físico o biológico son retenidos en la membrana.

La leche al contener agua en su composición y tras los distintos tratamientos en su proceso, genera una gran cantidad de residuos líquidos, en el rango de 0.2 a 10 litros de leche procesada, por lo que la ósmosis inversa ha sido utilizada para el tratamiento de los efluentes y poder utilizar el permeado para el reciclaje dentro de algunos procesos operativos (Cheryan, 1998).

La industria azucarera normalmente siempre ha usado sistemas de evaporación para la concentración de azúcares, pero ha visto una opción en términos de eficiencia energética estos sistemas para concentrar azúcares, teniendo ahorros en

combustibles empleados para la generación de calor en los sistemas evaporadores (Cancino, 2009).

Actualmente la industria farmacéutica es uno de los grandes consumidores de agua, elemento fundamental para sus procesos, en los cuales se requieren distintas calidades, las cuales son básicamente cuatro tipos: agua potable, suavizada, purificada y para preparaciones inyectables. El agua potable puede ser empleada para el lavado de exteriores, riego de áreas verdes, en torres de enfriamiento, lavado de utensilios no esterilizados y como materia prima para la producción de agua suavizada. El agua suavizada se utiliza para la alimentación de calderas, pero también como elemento para producir agua purificada, que será utilizada para el proceso de fabricación de medicamentos, generación de vapor de alta pureza, lavado de áreas blancas y procesos de esterilización (de Andrade, 2017).

La industria farmacéutica tiene protocolos bien definidos para el agua de soluciones inyectables, sueros, jarabes y algunos kits de diagnóstico, para lo cual existen tecnologías como la destilación, desmineralización, ultrafiltración y ósmosis inversa (Belkacem, 2008).

Para la reutilización de efluentes en la industria farmacéutica y alimenticia, se requiere cumplir con estrictos requisitos dada la naturaleza de sus productos, siendo el principal uso para la alimentación de equipos como calderas, torres de enfriamiento y procesos de limpieza fuera de áreas operativas (de Andrade, 2017).

Una interesante aplicación de los sistemas de ósmosis inversa en la industria cervecera, es en las cervezas con bajo contenido de alcohol, pasando de un 4% a un 1%, las cuales se consiguen pasando la cerveza por las membranas de ósmosis inversa, en donde el permeado obtenido contendrá el alcohol y el agua, mientras que en el concentrado se tendrán las moléculas de aroma y sabor. El flujo de permeado se puede regresar a la alimentación o combinarse en la proporción deseada con el concentrado, al igual que combinarse con agua desmineralizada, de esta manera se puede conservar el aroma y sabor, pero manteniendo una menor concentración de alcohol en el producto final (Ambrosi, 2014).

## 4 CASO DE ESTUDIO

---

### 4.1 Estudio de agua cruda de la zona

En el Valle de México, el agua consumida en la región es abastecida en buena parte por el sistema Cutzamala, el cual abastece a la región en un 25%. Este sistema es alimentado con agua de lluvia de 7 presas. Desafortunadamente no es capaz de suministrar a toda la región, por lo cual ha sido necesario extraer agua de otras cuencas aledañas y del subsuelo (Banco Mundial y Comisión Nacional del Agua, 2015).

Considerando como una opción de fuente de agua proveniente de pozo, se buscó un proveedor del valle de México que fuera capaz de surtir agua potable proveniente de pozo. De esta manera se asegura un suministro confiable que no dependa de la red de agua municipal, que debido a los cortes que en ocasiones suele haber por temas de mantenimiento, no se asegura un suministro confiable.

Se seleccionó a un proveedor del municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México que surte su agua del municipio de Naucalpan de Juárez, debido a su ubicación estratégica con las zonas industriales de Naucalpan, Tlalnepantla, Atizapán de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli, de esta manera es posible abastecer las necesidades de la industria en estos municipios.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana *NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua*, el agua utilizada para uso y consumo humano los sistemas de abastecimiento público y privado deben de cumplir con los parámetros mencionados en las tablas 2.2 – 2.4 de este trabajo.

En el *Anexo 1* se presentan los resultados del análisis de agua del proveedor mencionado bajo la *NOM-127-SSA1-1994* y a continuación una breve descripción de las técnicas empleadas.

Para la medición de elementos como Cadmio, Arsénico, Plomo, Estaño, Cobre, Hierro, Zinc y Mercurio bajo la *NOM-117-SSA1-1994*, la técnica empleada fue

espectrometría de absorción atómica, la cual consiste en hacer pasar un haz de luz monocromática a cierta frecuencia, que será captado por el analito presente en el vapor atómico, la intensidad luminosa captada antes y después de su paso, permitirá conocer el porcentaje de absorción. La medida de absorción aumenta con la concentración del elemento en la muestra (Secretaría de Salud, 1994).

El método empleado para la medición de Aluminio y Bario se emplea el método directo de llama de óxido nitroso-acetileno (SM 3111-D) en conjunto con un equipo de absorción atómica (Baird, R., 2017). El empleo de una llama de óxido nitroso-acetileno disminuye las interferencias que pueden causar estos metales en la medición, ya que al ser una temperatura de flama mayor es capaz de descomponer totalmente los compuestos refractarios y evitar la formación de óxidos e hidróxidos u ocasionalmente carburos o nitruros, debido a la reacción de los átomos libres con los productos de la combustión de la llama (Razmilic, 1994).

Para las determinaciones de Manganeso, Sodio y Cromo total, de igual manera se hace uso de absorción atómica pero con el método directo de llama aire-acetileno, técnica SM 3111-B, ya que para la determinación de estos compuestos no se tienen problemas de interferencias químicas (Baird, R., 2017).

En la determinación de cianuros totales, es posible realizarlo mediante dos técnicas de acuerdo a la NOM-201-SSA1-2015, ya sea por método espectrométrico o mediante el método potenciométrico. Para el primer caso es necesario liberar los iones cianuro como ácido cianhídrico (HCN) por reflujo con un ácido fuerte. Posterior a esto el HCN se absorbe en una disolución de NaOH haciéndose reaccionar con cloramina-T a un pH menor de 8 para formar el cloruro de cianógeno, al cual posteriormente se adiciona el reactivo ácido pirudin barbitúrico, que formará un compuesto colorido que se mide espectrométricamente a una longitud de 578 nm (Secretaría de Salud, 2015).

Para el caso del segundo método aprobado para la determinación de cianuros, de igual forma mediante reflujo y con la adición de un ácido fuerte se liberan los cianuros como HCN, para después absorberse en una solución de NaOH.

Finalmente el ion Cianuro se determina con un electrodo selectivo del ión  $CN^-$  en conjunto con un electrodo de referencia (Secretaría de Salud, 2015).

La determinación de cloruros es realizada mediante la técnica SM-4500-Cl-B, en donde la técnica realizada consiste en un método argento-métrico con nitrato de plata. Se requiere que sea una solución neutra o ligeramente alcalina (pH 7-10) con Cromato de Potasio en el medio como indicador visual, la cual será valorada con Nitrato de Plata, la sal formada de Cloruro de Plata precipitará cuantitativamente en la solución antes de que se forme el Cromato de Plata, el cual es un compuesto que pintará la solución de un color rojo. Algunos compuestos que pueden interferir son los bromuros, yoduros y cianuros. También pueden causar interferencias los iones sulfuro, tiosulfato y sulfitos los cuales pueden ser eliminados con Peróxido de Hidrógeno (Baird, 2017).

La dureza del agua es uno de los parámetros más importantes del monitoreo diario en los sistemas de tratamiento de aguas. Para el análisis del agua bajo la NOM-127-SSA1-1994 la dureza fue determinada mediante titulación con EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) mediante la técnica SM-2340 Dureza-C. El EDTA forma complejos quelados con los iones metálicos presentes en el medio. Si a una solución con iones de Calcio y Magnesio a un pH=10 se le agrega Negro de Eriocromo T, la solución se torna de color rojo vino, al comenzarla a titular con EDTA los iones de Ca y Mg son quelados por el EDTA y forman una solución de color azul, la cual indica el fin de la reacción (Baird, 2017).

Los fenoles son compuestos hidroxilados derivados del benceno, que se pueden encontrar en casi cualquier fuente de agua, desde aguas naturales, potables y residuales. Algunos tratamientos para la eliminación de este compuesto indeseable, incluyen la adsorción con carbón activado, ozonización, tratamiento con dióxido de cloro, etc. En el estudio de agua potable del proveedor estudiado (anexo 1), para la determinación de fenoles, se hace uso de la técnica SM-5530 Fenoles-C, la cual emplea una destilación de fenoles y extracción haciendo uso de Cloroformo. La solución se somete a una destilación, donde los vapores reaccionan con 4-aminoan-tipirina en un rango de pH de 7-9 en presencia de Ferrocianuro de Potasio,

obteniéndose un tinte coloreado, el cual se extrae en una solución acuosa de Cloroformo, para después finalmente ser medida la absorbancia de la solución (Baird, 2017).

Los Fluoruros y Nitratos (como N) son realizados de acuerdo a la Nom-201-SSA1-2015. Los primeros pueden ser medidos espectrométricamente o con un potenciómetro usando un electrodo para fluoruros, combinados con un electrodo de referencia combinado. Para el caso del nitrógeno de nitrato, se emplea el método de absorción de luz UV a dos longitudes de onda, 220 y 275 nm, a 220 nm los nitratos y materia orgánica tienen una absorbancia máxima, mientras que a 275 nm solo la materia orgánica absorbe, la diferencia de lecturas menos 2 veces la absorbancia a 275 nm es proporcional a la concentración de nitratos (Secretaría de Salud, 2015).

El nitrógeno amoniacal está presente de manera natural en las aguas superficiales y subterráneas, proveniente de la degradación natural de la materia orgánica, el cual se ve influido por la actividad biológica. Asimismo, cuando este tiene un alto contenido de Nitrógeno Amoniacal se tiene una reducción en el oxígeno disuelto, disminuyendo la calidad del agua, ocasionando la muerte de las especies acuáticas que habitan en este medio al no tener el oxígeno requerido en el agua (González, 2013). Para la determinación de Nitrógeno Amoniacal compuesto fue empleada la técnica SM-4500-NH<sub>3</sub>-D en la cual se hace uso de un electrodo selectivo de Amoniacó con una membrana hidrofóbica (Baird, 2017).

El contenido de Sulfatos no suele presentar un problema en el agua potable, pero cantidades superiores a los 300 mg/L pueden ocasionar trastornos gastrointestinales (Grupo de Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Sevilla., s.f.). La técnica SM-4500-SO<sub>4</sub>-E empleada consiste en la precipitación del ion sulfato en un medio ácido de ácido acético en presencia de Cloruro de Bario, formándose los cristales de Sulfato de Bario, los cuales se buscan mantenerlos en suspensión homogénea durante un tiempo determinado para poder realizar la absorbancia producida por la solución, la

concentración se determina comparando la lectura contra una curva estándar de calibración previamente obtenida (Baird, 2017).

El pH es un parámetro monitoreado en todas las fases de suministro del agua, desde agua potable, agua purificada y aguas residuales, el cual se utiliza en las mediciones de alcalinidad, dióxido de carbono y otros equilibrios ácido-base. De acuerdo a la técnica empleada SM-4500-H+, la medición de pH se realiza mediante la medición potenciométrica de la actividad de los iones hidrógeno, utilizando un electrodo de hidrógeno (electrodo de platino) y un electrodo de referencia (Baird, 2017).

Los sólidos en el agua pueden afectar la calidad del agua, los cuales pueden estar suspendidos o de forma disuelta, cuando el agua se encuentra altamente mineralizada con las sales disueltas, puede no ser la mejor opción para aplicaciones industriales. El análisis de sólidos es aplicable tanto para fuentes de agua potable como residuales, la importancia de su estudio ayuda a evaluar los procesos de tratamiento biológico y fisicoquímico, así como como para evaluar el cumplimiento de sus limitaciones que regulan su vertido en fuentes de agua (Baird, 2017).

La medición de color usa la escala denominada Platino – Cobalto (Pt-Co), en donde la muestra libre de turbiedad, previamente filtrada o centrifugada, es comparada visualmente contra una escala estandarizada de soluciones madre de Platino – Cobalto (Secretaría de Salud, 2015).

Como se mencionaba en el párrafo anterior, la turbiedad puede causar interferencias para la medición de color, al ser un parámetro que indica la cantidad de materia flotante. Cuantos más sólidos haya en suspensión en la muestra de agua, la apariencia pareciera más sucia, por lo que el principal impacto que tiene en el agua es estético, causando un rechazo por parte del consumidor. En este método se evalúa la comparación entre la intensidad de luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas, la cual se compara contra una muestra de referencia en condiciones semejantes. Para realizar las lecturas se utiliza un equipo llamado turbidímetro (Secretaría de Salud, 2015).

El nitrito se considera como una etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno, el cual puede estar en el agua principalmente por la descomposición biológica de materiales proteicos. En las aguas superficiales crudas, la presencia de nitrito indica contaminación (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2006). El método empleado se basa en que los nitratos presentes reaccionan en un medio ácido, a un pH de 1.9 – 2.5 diazotación con la sulfanilamida para formar una sal de diazonio, la cual por copulación con el diclorhidrato N-(1-naftil) etilendiamina forma un colorante azoico de color púrpura rojizo que se mide espectrofotométricamente (Secretaría de Salud, 2015).

Por último el tener cloro residual en el agua, dentro de un parámetro de 0.2 – 1.5 mg/L garantiza que en el agua no crecerán microorganismos, por lo que es usado como método de desinfección. En aguas superficiales y subterráneas no es común tener cloro residual. El método empleado por la Norma Oficial de productos y servicios, agua y hielo para consumo humano, indica que se hace uso de una técnica colorimétrica, que posteriormente será medida espectrométricamente a una longitud de onda de 515 nm (Secretaría de Salud, 2015).

Conociendo la calidad fisicoquímica del agua a emplear para el sistema de ósmosis inversa propuesto, se garantiza que la calidad inicial será la adecuada para el proceso, obteniéndose un agua purificada adecuada para los requerimientos de la industria.

## 4.2 Propuesta de sistema de ósmosis inversa.

Para la búsqueda del sistema de ósmosis inversa requerido, se apoyo de un proveedor experto en el tratamiento de aguas y sistemas de filtración llamado Carbotecnia, los cuales están ubicados en Guadalajara, Jalisco. Se tomo como base las necesidades y procesos actuales de la industria, por lo que el equipo cotizado cumple con tales requerimientos. Se le indico al proveedor que el gasto de permeado a obtener es de 10 – 20 metros cúbicos de agua diarios, que se considerara una dureza de 100 a 120 ppm para tener un rango adecuado que tomara en cuenta las variaciones que pudiera haber y que la planta debe de operar en un turno de 8 horas, el tiempo de una jornada laboral en México.

De esta manera se acotan los distintos arreglos, dimensiones y flujos de permeado a obtener de las diferentes plantas de ósmosis inversa que puede haber en el mercado.

Los equipos recomendados, mostrados en la *tabla 4.1* tienen las siguientes características:

*Tabla 4.1 Costos de equipos para tren de tratamiento de agua osmoseada*

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo USD</b>
<b>Filtro multimedia automático</b>	Tanque de fibra de vidrio de 24x72 pulgadas, con carga multimedia de 10 pies cúbicos (garnet, arena, antracita y grava como soporte). Incluye válvula Clack modelo WS2 EE. Flujo de servicio: 18.8 – 25.1 gpm. Flujo de retrolavado (25°C) 60 gpm.	\$3,869
<b>Equipo de carbón activado automático</b>	Tanque de fibra de vidrio de 24x72 pulgadas marca Aquatrol, con carga de 9.0 pies cúbicos de carbón activado de concha de coco con grava como soporte. Incluye válvula Clack modelo WS1.5EE. Flujo de servicio para deodorizar y potabilizar: 22.6 gpm. Flujo de retrolavado (25°C): 50.3 gpm.	\$2,806

Tabla 4.2 Costos de equipos para tren de tratamiento de agua osmoseada (Continuación).

Equipo	Descripción	Costo USD
<b>Suavizador Automático</b>	<b>Tanque de fibra de vidrio de 21x62 pulgadas marca Aquatrol con 7.0 pies cúbicos de resina catiónica marca Resinex K-8 FG con grava sílica como soporte (incluye tanque de salmuera completo). Rango de flujo de servicio recomendado 14.0 – 35.0 gpm. Equipo calculado para saturarse en 16 horas a un caudal de 22 gpm con una dureza de 120 ppm</b>	<b>\$2,415</b>
<b>Sistema de ósmosis inversa</b>	Equipo con membranas Hydranautics/Toray (a elegir), portamembranas de fibra de vidrio, estructura y gabinete metálicos recubiertos con pintura electrostática horneada, tablero de control y sensores digitales de sólidos disueltos totales de agua producto. Flujo de agua producto hasta 40 LPM ( <b>19.2 metros cúbicos en un turno de 8 horas</b> ). Incluye bomba multietapas de 3 hp, prefiltro de cartucho desechable de 1 micra, 3 rotámetros, 4 manómetros en glicerina con caja inoxidable, válvula control presión tipo globo inoxidable, válvula para flush automático, válvula de entrada tipo bola unión doble, tuberías y conexiones PVC C80. Presión de operación típica del sistema 90 – 120 psi y presión máxima 160 psi. Rechazo iónico 99%. Voltaje trifásico 220V. Incluye tanque para dosificación de producto químico antiincrustante y bomba dosificadora Pulsatron	\$17,111

Tabla 4.3 Costos de equipos para tren de tratamiento de agua osmoseada (Continuación).

Equipo	Descripción	Costo USD
<b>Esterilizador UV Instapura</b>	Equipo esterilizador de Luz UV marca Instapura UV NUVO-012 para 12 gpm	\$157
<b>Cartucho y filtro desechable de 1 micra</b>	Cartucho y filtro desechable plegabl de 1 micra, material polipropileno, marca Purikor.	\$43

El sistema de ósmosis inversa ofrecido por el proveedor Carbotecnia está representado en la *figura 4.1*.



Figura 4.1 Equipo en venta de ósmosis inversa industrial de Carbotecnia (Carbotecnia SA de CV, 2020).

Como se ha comentado en capítulos anteriores las membranas también se llegan a saturar, a una presión fija y para cada tipo de agua, la membrana dejará pasar algunos metros cúbicos de agua antes de ensuciarse. Las limpiezas frecuentes también acortan la vida útil de la membrana. Eventualmente puede ocurrir que las

limpiezas en la membrana no sean realizadas con la frecuencia adecuada por lo que la remoción de suciedad puede ser incompleta, con lo que esta se irá acumulando hasta obstruir el paso del permeado a través de la membrana (Riley, 2010).

Dentro de las membranas sucede un fenómeno denominado como efecto de la capa límite, el cual sucede cuando el flujo de alimentación fluye perpendicularmente a la membrana, pasando el permeado y dejando atrás los sólidos disueltos, formándose una alta concentración de sales, que pueden adsorberse sobre la superficie de la membrana (Riley, 2010).

La recuperación de permeado en un sistema de ósmosis inversa para agua potable está determinada en un rango de 50-75% los cuales son determinados por la calidad de agua a tratar y los arreglos de recirculación que pudieran existir, en el sistema propuesto, al ser un sistema de 2 etapas el proveedor asegura un 75% de recuperación.

Un tren de filtración en el sistema de ósmosis inversa es indispensable ya que previene tres factores críticos: incrustación, ensuciamiento y ataque (químico o bacteriano) a las membranas. Si suceden los primeros dos fenómenos se traduce en una disminución del rendimiento de la planta o un aumento en la presión de operación. Cuando se tiene un ataque a las membranas, el tamaño de poro se ve aumentado permitiendo el paso de sales y agua (Riley, 2010).

El uso de filtros de cartucho antes de la bomba de alta presión del sistema de ósmosis inversa es indispensable, ya que protege al sistema de cualquier partícula abrasiva proveniente de la fuente de agua o de algún medio granular que se haya fugado, protegiendo a las membranas de un taponamiento (Riley, 2010).

Se recomienda mantener una concentración de cloro residual de 0.2 – 0.5 ppm en el agua cruda, de esta manera se asegura que los microorganismos pasen a través de todo el tren de filtración y que se puedan alojar en las membranas. Pero es importante mantenerse en este rango, porque las altas concentraciones dañan químicamente a las membranas de acetato de celulosa. En el tanque de

almacenamiento del permeado del sistema de ósmosis inversa, para inhibir el crecimiento microbiológico se recomienda recircular a través de luz UV (Riley, 2010).

De acuerdo al sistema propuesto de tren de filtración y ósmosis inversa, el diagrama del sistema está representado en la *figura 4.2*

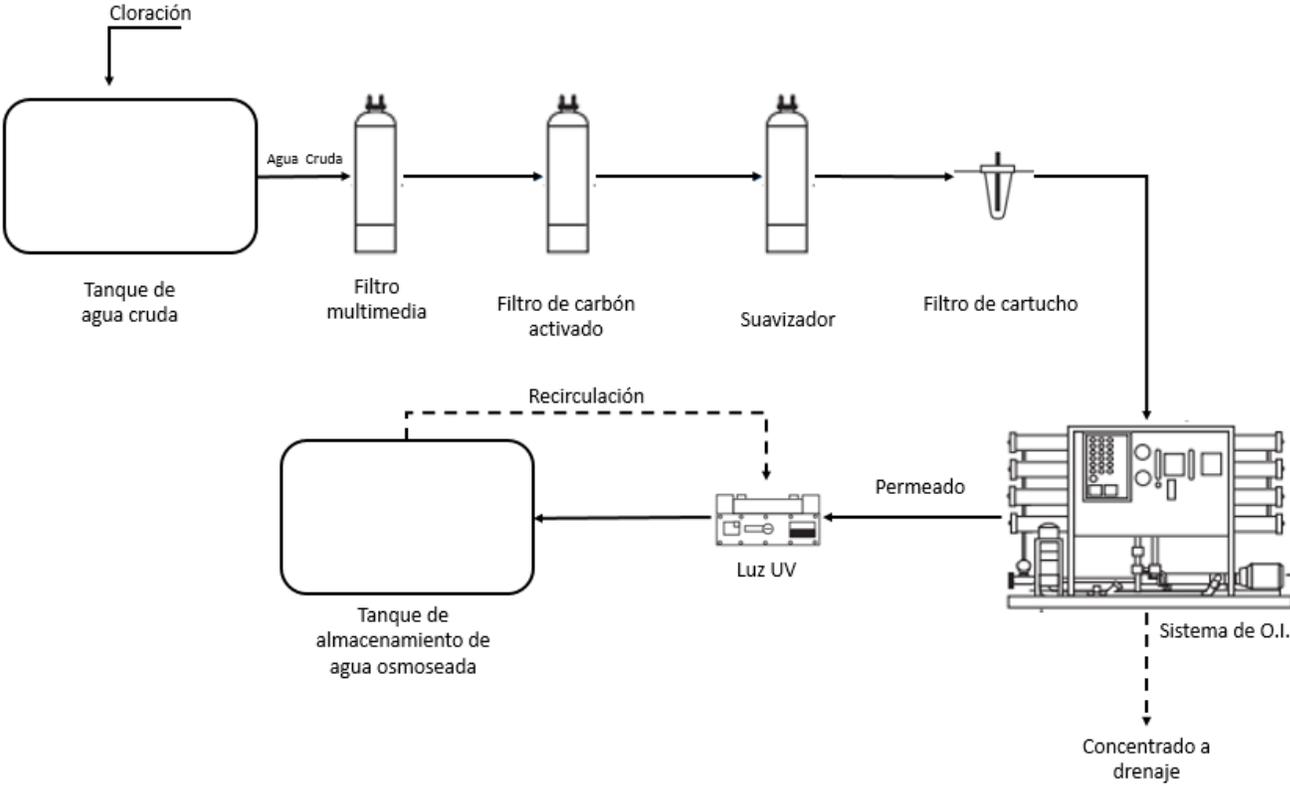


Figura 4.2 Diagrama de tren de tratamiento de agua propuesto para su venta a la industria

El monto de inversión total del sistema es de \$26,401 USD.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 5.1 Conclusiones

La calidad de permeado obtenido es adecuado para las necesidades de la industria en agua purificada, partiendo de un pozo de agua potable, el cual cumple con los parámetros fisicoquímicos, organolépticos y microbiológicos establecidos con respecto a las Normas Oficiales Mexicanas vigentes, para aquellas personas físicas o morales que se deseen dedicar al tratamiento, distribución y venta de agua purificada. El agua producto (permeado) obtenido al final de todo el tratamiento, cumple con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos requeridos por las industrias como la química, jabonera, cosmética, alimentos y bebidas, circuitos electrónicos, cervecera, etc.

El sistema propuesto de ósmosis inversa es capaz de suministrar un flujo de agua producto de 5072.64 gal/día, obtenidos en un turno laboral de 8 horas, para lo cual sería necesario alimentar al sistema 6763.52 gal/día, esto considerando que el sistema propuesto tiene un rendimiento del 75%. De acuerdo al objetivo teórico planteado de 5000 gal/día, se estaría obteniendo con este sistema un excedente de 72.64 gal/día.

De acuerdo con el estudio realizado bajo la NOM-127-SSA1- 1994 al agua de pozo de Naucalpan, utilizada como materia prima, se tiene una concentración inicial de 387 +/- 63.47 ppm de sólidos totales disueltos, con el equipo propuesto y las membranas recomendadas por el proveedor se estaría consiguiendo el 99% de retención de sólidos totales disueltos, teniendo a la descarga del permeado un contenido de 3.87 ppm de sólidos totales disueltos. Recordando que la conductividad es directamente proporcional a la concentración de STD y de acuerdo a la relación de  $1.4 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$  (Hanna Instruments, s.f.). Se estaría obteniendo una conductividad de 5.41  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , estrictamente el valor obtenido con el sistema de

ósmosis inversa para la calidad de agua a tratar estaría por arriba del objetivo planteado.

## **5.2 Recomendaciones**

Si en un futuro se deseará aumentar el volumen de permeado diario recuperado, se deberá aumentar la cantidad de horas trabajadas del sistema o aumentando la presión de operación, considerando que esta opción hay que evaluarse cuidadosamente por la disminución de la calidad de permeado que pudiera causar tal modificación.

Es importante señalar que con el sistema propuesto y la calidad de agua a emplear, se estaría obteniendo una conductividad de agua producto de  $0.41 \mu\text{S}/\text{cm}$  por arriba del objetivo planteado de  $5.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ , para tales situaciones, en la industria muchos insumos químicos e inclusive en el agua purificada, se suelen utilizar parámetros de liberación para los productos establecidos, con lo cual se pueden dar tolerancias a los  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  propuestos, y de esta manera declararlo en un Certificado de Calidad por parte del proveedor, con lo cual se compromete a que el producto es liberado dentro de especificación y las tolerancias marcadas. De esta manera queda a consideración del consumidor su compra y uso, recordando que cada empresa tiene sus tolerancias.

Una opción para mejorar la calidad del permeado del sistema de ósmosis inversa en la producción de agua ultrapura, es añadiendo un tanque con resina mixta (aniónica y catiónica) a la salida del permeado como pulidor de sales. La ventaja de instalar este equipo a la descarga del permeado de la unidad de O.I. está basada en la disminución de hasta un 99% de sus sólidos disueltos (en el modelo planteado), por tanto la carga iónica a tratar será menor, que si el equipo estuviera antes del sistema de O.I. De esta manera se alarga la vida útil de la resina, disminuyendo las frecuencias en los cambios.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. Acuña, F., Groel, N., & Pedrini, G. (2006). Los filtros industriales de cartucho. *Sociedad Acuariológica del Plata*. Recuperado el 1 de Mayo de 2021
2. Agsararattananont, P. (Marzo de 2021). *www.123rf.com*. Recuperado el 28 de Marzo de 2021
3. Aguas de Mataró. (s.f.). *Aigües de Mataró*. Recuperado el 29 de Mayo de 2021, de <https://www.aiguesmataro.com/es/dureza-del-agua>
4. Aguilar Peris, J. (1983). Fenómenos de Transporte a través de membranas. *Revista Portuguesa de Química*, 11 - 12. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de <https://studylib.es/doc/5279431/fenomenos-de-transporte-a-traves-de-membranas>
5. Alberto, V. (Febrero de 2021). *iagua*. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-osmosis>
6. Ambrosi, A., Medeiros Cardozo, N. S., & Tessaro, I. C. (April de 2014). Membrane Separation Processes for the Beer Industry: a Review and State of the Art. *Food and Bioprocess Technology*, 921-936. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/260529863\\_Membrane\\_Separation\\_Processes\\_for\\_the\\_Beer\\_Industry\\_A\\_Review\\_and\\_State\\_of\\_the\\_Art](https://www.researchgate.net/publication/260529863_Membrane_Separation_Processes_for_the_Beer_Industry_A_Review_and_State_of_the_Art)
7. American Water Works Association. (2016). *ANSI/AWWA B100-16 Granular Filter Material*. Recuperado el 30 de Abril de 2021
8. Aquatreatment. (2017). *Aquatreatment.co*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de <https://www.aquatreatment.co/filtracion-por-membrana/>
9. Atkins, P., & De Paula, J. (2008). *Atkins. Química Física*. Editorial Médica Panamericana. Recuperado el 14 de Mayo de 2021
10. Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23 ed.). Washington DC: American Public Health Association. Recuperado el 8 de Diciembre de 2021
11. Banco Mundial y Comisión Nacional del Agua. (2015). *Cutzamala, diagnóstico integral*. Banco Mundial. Recuperado el 5 de Diciembre de 2021
12. Belkacem, M., Bensadok, K., Refes, A., & Nezzal, G. (2008). Water produce for pharmaceutical industry: role of reverse osmosis stage. *Desalination*, 221, 298-302. Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916407007060?via%3Dihub>
13. Cancino, B., Ulloa, L., & Astudillo, C. (2009). Presión osmótica de soluciones salinas y azucaradas: su influencia en procesos de ósmosis inversa en la industria de alimentos. *Información Tecnológica*, 20(3). Recuperado el 2 de Marzo de 2021

14. Carbotecnia SA de CV. (18 de Febrero de 2020). *Carbotecnia*. Recuperado el 18 de Febrero de 2021, de Carbotecnia.info
15. Cheryan, M. (1998). *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. Lancaster, Estados Unidos: CRS Press. Recuperado el 22 de Noviembre de 2021
16. de Andrade, B., de Lacerda, P. S., & Oliveira, J. (2017). Technical feasibility of reuse of effluent generated from reverse osmosis system in a pharmaceutical plant. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 12. Recuperado el 22 de Noviembre de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/319259695\\_Technical\\_feasibility\\_of\\_reuse\\_of\\_effluent\\_generated\\_from\\_reverse\\_osmosis\\_system\\_in\\_a\\_pharmaceutical\\_plant](https://www.researchgate.net/publication/319259695_Technical_feasibility_of_reuse_of_effluent_generated_from_reverse_osmosis_system_in_a_pharmaceutical_plant)
17. Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. (2010). Recuperado el 19 de Marzo de 2021
18. González, L. (2013). Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Mente & Materia*, 4(1). Recuperado el 5 de Diciembre de 2021, de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/mente-y-materia/article/view/334>
19. Groso, G., & Brosa Echeverría, J. (1999). *El carbón activado, materias primas y aplicaciones*. Recuperado el 11 de Mayo de 2021
20. Grupo de Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Sevilla. (s.f.). *Ambientum*. Recuperado el 6 de Diciembre de 2021, de [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/aguas/determinacion\\_de\\_sulfatos.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/determinacion_de_sulfatos.asp)
21. Hagen, K. (1998). Removal of Particles, bacteria and parasites with ultrafiltration for drinking water treatment. 85-91. Recuperado el 2 de Noviembre de 2021
22. Hanna Instruments. (s.f.). <https://www.hannainst.es>. Recuperado el 03 de Enero de 2022, de Hanna instruments: <https://www.hannainst.es/blog/79/conductividad-y-solidos-disueltos>
23. Hernández, A., Tejerina, F., Arribas, J., & Martínez, L. (1990). *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa*. Murcia, España: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021
24. Huerta Ochoa, S. (s.f.). *UAM Iztapalapa*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2021, de [http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Procesos\\_de\\_Membrana.pdf](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Procesos_de_Membrana.pdf)
25. Inquinat. (Marzo de 2021). *Inquinat.cl*. Recuperado el 28 de Marzo de 2021
26. Ionic Systems. (2021). *Ionic Systems*. Recuperado el 16 de Junio de 2021, de <https://limpieza-cristales-altura.es/tratamiento-de-agua/>
27. Jenkins, D. (1999). *Química del agua*. Limusa. Recuperado el 22 de Enero de 2021

28. KPG Water Engineering. (Abril de 2021). Recuperado el 9 de Abril de 2021, de [kpgwater.com.mx](http://kpgwater.com.mx)
29. Laboratorios Valquer. (17 de Enero de 2014). *La importancia del agua purificada en cosmética*. Recuperado el 28 de Marzo de 2021, de <https://www.valquer.com/agua-purificada/?lang=en>
30. Lainco, S.A. (2021). *Ultra Adsorb*. Recuperado el 14 de Mayo de 2021, de <https://www.ultraadsorb.es/profesional-sanitario.php>
31. Lenntech. (Marzo de 2021). *lenntech.es*. Recuperado el 30 de Marzo de 2021, de <https://www.lenntech.es/particulas-coloidales.htm#:~:text=Para%20quitar%20los%20coloides%20del,el%20paso%20de%20la%20floculaci%C3%B3n>.
32. Lubo Matallana, N. A. (2002). *Estudio de Potabilización del agua en la alta Guajira mediante ósmosis inversa*. Bogotá, Colombia. Recuperado el 9 de Noviembre de 2021
33. Makardij, A., Chen, X., & Farid, M. (1999). Microfiltration and ultrafiltration of milk: some aspects of fouling and cleaning. *Food and bioproducts Processing*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2021
34. Medina Rosero, J. S., & Miranda Almeida, G. A. (2007). *Diseño de una unidad de filtración de agua de formación de pozos petroleros*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 9 de Abril de 2021
35. Mourato, D. (s.f.). Microfiltración y nanofiltración en el área de agua potable. *Zenon Enviromental Inc*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021
36. Muñoz Lucas, S., & Sánchez García, R. (2018). El agua en la industria alimentaria. *Sociedad Española de Hidrología Médica*, 157-171. Recuperado el 25 de Febrero de 2021
37. Nalco Company. (2009). *The Nalco Water Handbook*. Mc Graw Hill. Recuperado el 12 de Febrero de 2021
38. Novo Agua SA de CV. (2021). *Novoagua.com*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de <https://novoagua.com/producto/resina-cationica-fuerte/>
39. Osmonics, Inc. (1997). *Pure Water Handbook* (2nd ed.). Minnetonka: Osmonics. Recuperado el Enero de 2021
40. Padillo, B. (12 de Septiembre de 2016). Recuperado el 4 de Febrero de 2021, de [iagua: https://www.iagua.es/blogs/beatriz-pradillo/parametros-control-agua-potable](https://www.iagua.es/blogs/beatriz-pradillo/parametros-control-agua-potable)
41. Pochteca. (02 de Febrero de 2021). Recuperado el 2 de Febrero de 2021, de Pochteca: <https://www.pochteca.com.mx/dureza-del-agua-y-detergencia/#:~:text=El%20inconveniente%20del%20agua%20dura,de%20minerales%20en%20las%20tuber%C3%ADas>.

42. Ramírez-Nava, J. S. (2016). Tecnología de membranas: desarrollo histórico. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 89. Recuperado el Septiembre de 2021
43. Razmilic, B. (Mayo de 1994). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de <https://www.fao.org/3/ab482s/ab482s04.htm>
44. Reyna Ávila, B. (Junio de 2014). El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico. Ciudad de México, México. Recuperado el 16 de Junio de 2021
45. Riley, B. (2010). *Manual Práctico de ósmosis inversa* (Cuarta Edición ed.). UOPFluid Systems. Recuperado el 11 de Diciembre de 2021
46. Sánchez Crispín, D. A. (2013). *Lineamientos para el proceso de producción de agua purificada para uso farmacéutica libre de contaminación microbiológica*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. Recuperado el 15 de Marzo de 2021
47. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2006). NMX-AA-099-SCFI-2006 - Análisis de agua - Determinación de Nitrógeno de Nitritos de Aguas Naturales y Residuales - Métodos de Prueba. Recuperado el 5 de Diciembre de 2021
48. Secretaría de Salud. (15 de Agosto de 1994). NORMA Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de Cadmio, Arsénico, Plomo, Estaño, Cobre, Hierro, Zinc y Mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 21 de Marzo de 2021
49. Secretaría de Salud. (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. Recuperado el 3 de Febrero de 2021
50. Secretaría de Salud. (22 de Diciembre de 2015). Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias. Recuperado el 21 de Marzo de 2021
51. *Silo cervecero*. (2021). Recuperado el 11 de Mayo de 2021, de [silocervecero.com.ar](http://silocervecero.com.ar)
52. Solís, C. A., Vélez, C. A., & Ramírez Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*(22), 26 - 36. Recuperado el 2 de Noviembre de 2021
53. Sotto Díaz, A. (2008). *Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos*. Universidad Rey Juan Carlos, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología. Recuperado el 25 de Septiembre de 2021
54. Vidal Brotons, D., Gras Romero, M. L., & Castello Gómez, M. (s.f.). Separación por membranas. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Tecnología de Alimentos. Recuperado el 15 de Julio de 2021

55. Vourch , M., Balannec, B., & Chaufer, B. (2008). Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, 219, 190-202. Recuperado el 12 de Noviembre de 2021

# 7 ANEXOS

Anexo 1. Estudio de agua cruda de pozo del municipio de Naucalpan del caso de estudio



**DESARROLLO ECOLOGICO INDUSTRIAL S.A. DE C.V.**  
SERVICIO INTEGRAL AMBIENTAL, DE HIGIENE, SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

**INFORME DE RESULTADOS  
VALORACIÓN MICROBIOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA EN AGUA POTABLE  
NOM-127-SSA1-1994 MOD-2000**

Ref. O.T. MB 201

**PIPAS SAN AGUSTÍN**

Camino Santa María Tianguistengo No. 21,  
San José Buenavista, C.P. 54710,  
Cuautitlán Izcalli, México.

**AT'N: JOSE AGUSTÍN AMARO**

Fecha del muestreo: 22 de Marzo de 2021.  
Fecha de informe: 13 de Abril de 2021.  
Muestreo realizado por: Tec. Sergio Vázquez Pérez.

Fecha de entrada a laboratorio: 22 de Marzo de 2021.  
Fecha de salida de laboratorio: 12 de Abril de 2021.

IDENTIFICACIÓN:	SALIDA DE POZO MUNICIPAL NAUCALPAN	NO. ÚNICO:	625-1
		TEMPERATURA:	23,3 °C

**ESTUDIO FÍSICOQUÍMICO**

DETERMINACIÓN	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
ALUMINIO	< 0.02	mg/L	0.20	0.02	SM 3111-D
ARSÉNICO	< 0.001	mg/L	0.025	0.001	NOM-117-SSA1-1994
BARIO	< 0.5	mg/L	0.70	0.50	SM 3111-D
CADMIO	< 0.0005	mg/L	0.005	0.0005	NOM-117-SSA1-1994
COBRE	< 0.05	mg/L	2.00	0.05	NOM-117-SSA1-1994
CROMO TOTAL	< 0.05	mg/L	0.05	0.05	SM 3111-B
FIERRO	< 0.1	mg/L	0.30	0.10	NOM-117-SSA1-1994
MANGANESO	< 0.05	mg/L	0.15	0.05	SM 3111-B
MERCURIO	< 0.0005	mg/L	0.001	0.0005	NOM-117-SSA1-1994
PLOMO	< 0.0025	mg/L	0.01	0.0025	NOM-117-SSA1-1994
SODIO	26.538 ± 2.47	mg/L	200.00	5.0	SM 3111-B
ZINC	< 0.05	mg/L	5.00	0.05	NOM-117-SSA1-1994
CIANUROS	< 0.018	mg/L	0.07	0.018	NOM-201-SSA1-2015
CLORUROS	21.74 ± 2.74	mg/L	250.00	20	SM-4500-CI-B
DUREZA TOTAL	143.04 ± 13.87	mg CaCO <sub>3</sub> /L	500.00	20	SM-2340 DUREZA-C
FENOLES	0.024 ± 0.0025	mg/L	0.3	0.01	SM-5530 FENOLES-C
FLUORUROS	< 0.1	mg/L	1.50	0.1	NOM-201-SSA1-2015
NITRATOS (COMO N)	2.82 ± 0.21	mgN-NO <sub>3</sub> /L	10.00	0.2	NOM-201-SSA1-2015

OBSERVACIONES: MUESTRA TOMADA DE SALIDA DE PIPA.  
mg/L = Miligramo por litro, mg CaCO<sub>3</sub>/L = Miligramos de carbonato de calcio por litro, mg N-NO<sub>3</sub>/L = Miligramo de Nitrógeno de Nitratos por Litro

Emisión: 16 Marzo 2021

Próx. Emisión: 16 Marzo 2025

FOR-350

Revisión: 03

IDENTIFICACIÓN:	SALISA DE POZO MUNICIPAL NAUCALPAN	NO. ÚNICO:	625-1
-----------------	------------------------------------	------------	-------

**ESTUDIO FISCOQUÍMICO**

DETERMINACIÓN	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
NITRÓGENO AMONICAL	< 0,2	mg/L	0,50	0,2	SM-4500-NH3-D
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	387 ± 63,46	mg/L	1000,00	15	SM-2540-SDT-C
SULFATOS	17,4 ± 1,88	mg/L	400,00	5,0	SM-4500-SO <sub>4</sub> -E
SAAM	< 0,025	mg/L	0,50	0,025	NOM-201-SSA1-2015
COLOR	APARENTE 0 pH 8,02; VERDADERO 0 pH 8,03	UC	20	---	NOM-201-SSA1-2015
TURBIEDAD	< 0,8	UNT	5	0,8	NOM-201-SSA1-2015
NITRITOS (COMO N)	< 0,01	mgN-NO <sub>2</sub> /L	1,00	0,01	NOM-201-SSA1-2015
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)	8,02 ± 0,052	U de pH	6,5 - 8,5	0,01	SM-4500-H*
YODO RESIDUAL LIBRE	< 0,104	mg/L	0,2 - 0,5	0,104	SM-4500-I-B
**CLORO RESIDUAL	0,0	mg/L	0,2 - 1,50	<0,2	NOM-201-SSA1-2015

mg/L = Miligramo por litro, UC = Unidades de Color (Escala Platino-Cobalto), UNT = Unidades Nefelométricas de Turbiedad, mg N-NO<sub>2</sub>/L = Miligramos de nitrógeno de nitritos por litro, U de pH = Unidades de pH, \*\*Parámetro en campo

**ESTUDIO ORGANOLEPTICOS**

DETERMINACIÓN	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
*SABOR	AGRADABLE	--	AGRADABLE	----	SM-2160-SABOR
**OLOR	AGRADABLE	--	AGRADABLE	----	SM 2150
OBSERVACIONES: MUESTRA TOMADA DE SALIDA DE PIPA.					

\*Parámetro no acreditado, \*\*Parámetro en campo

\*Para los casos donde el resultado se encuentre por debajo del límite establecido pero con la suma de la incertidumbre expandida rebasa dicho límite o cuando el valor obtenido se encuentre por encima del máximo permisible, pero que al restarle la incertidumbre el valor quede dentro de especificación; en estos casos "No es posible declarar cumplimiento o no cumplimiento".

  
**Q. F. B. ALBERTO TÉLLEZ GIRÓN BRAVO**  
**JEFE DE LABORATORIO**

Este informe representa únicamente las características de las muestras sometidas a prueba; no se refiere a la población de donde proviene, no podrá ser reproducido ni alterado parcialmente sin la autorización previa por escrito de DEISA, S.A. de C.V.