



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

INGENIERÍA QUÍMICA

“ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO Y OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II”.

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

**OSORIO RÍOS JANET
ROMERO FIGUEROA MONICA YESSICA**

DIRECTOR DE TESIS:

I.Q. EDUARDO VÁZQUEZ ZAMORA



México D.F., 2012



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.



AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por permitirme llegar hasta donde estoy, por los problemas que se me presentaron y los que vendrán, por levantarme cuando tropiezo, por darme fuerzas; por todo que es infinitamente grande. Gracias.

A mi madre:

Por el gran amor y la devoción que tienes a tus hijas, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me has dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por haber hecho de mí una mujer de bien, y por ser la mujer que me dio la vida y me enseñó a vivirla. Con amor para mi guía Guillermina Figueroa Vergara.

A mi padre:

Quien a lo largo de mi vida ha velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Domingo Romero Robles.

A mi Hermana:

Sé que no compartimos muchas palabras y las dos tenemos secretos que la otra desconoce, quizá no te conozca cómo te conoce mamá, quizá no siempre haga lo que como hermana debo hacer. Tengo siempre muchas dudas de cómo debo ser contigo, pero hay algo de lo que estoy segura y es que te requequé amo un chingo. Te agradezco tu gran apoyo tanto económico como emocional, porque te privaste de varias cosas para que yo diera este gran paso por ello con mucho amor y cariño le dedico todo mi esfuerzo y trabajo puesto para la realización de esta tesis, sencillamente a una gran mujer Ruth Elizabeth Romero Figueroa.

Agradezco a mi esposo:

Te agradezco por llenar aquel vacío, por endulzar mis labios, por inundar mis ojos de esperanza por estremecer mi piel y enamorara a mi alma. Gracias por darme una razón para vivir y seguir luchando. Gracias por acompañarme, por tenderme una mano y estrecharme en tus brazos. Gracias por ocupar todos mis sueños. Gracias por escucharme y aconsejarme. Por consentirme y contenerme. Gracias por ser mi luz, mis ojos, mis pasos, mis palabras, mis caricias, mi risa y mi llanto. Mi aroma, mi aire, mi locura, mi pasión, mi capricho, mi sombra, mis pensamientos, mis alas, mi imaginación, mi recuerdo, mi inspiración, mi mejor opción, mi orgullo, mi admiración, mi ternura y el más profundo de mis sentimientos. Sencillamente ¡Gracias por Ser mi Todo Oswaldo Bastida Yáñez!



AGRADECIMIENTOS

A mi Asesor de tesis:

“Ingeniero Eduardo Vásquez” que nos asesoro, porque con sus valiosas aportaciones, me ayudo a crecer como persona y como profesionalista. Por su comprensión y cariño y por la gran calidad humana que me ha demostrado con una actitud de respeto.

A mi compañera de tesis:

Janet Osorio Rios, porque la constante comunicación con ella ha contribuido en gran medida a transformar y mejorar mi forma de actuar en mi trabajo, especialmente por su cariño, comprensión y apoyo, dándome con ello, momentos muy gratos.

Mónica Yessica Romero Figueroa

A Dios:

Porque me ama, me bendice, me da serenidad para aceptar las cosas que no puedo cambiar, coraje para cambiar las cosas que puedo y se ocupa de mi vida.

A mi padre Francisco Mauro Osorio Gómez:

Porque el ha sido el principal motor de mi vida, el que me ha enseñado con el ejemplo que el éxito resulta de trabajar y saber persevera. Gracias por brindarme todo el apoyo del mundo, en cualquier momento.

A mi madre Carmen Ríos Barrera:

Porque siempre esta a mi lado para que nunca me derrote ante cualquier problema. Y me ha enseñado a mirar hacia arriba y caminar siempre adelante.

A mis hermanos Miriam y Martín:

Porque forman parte de mi vida y que han compartidos momentos de alegría, tristeza y felicidad.

A mi asesor de tesis:

Por la confianza y el apoyo en la realización de este proyecto. Además que ha forjado en mí la voluntad y optimismo para escalar la cumbre.

A mi compañera de tesis:

Por darme una amistad sincera en la cual hemos compartido sueños, alegrías, tristezas y momentos inolvidables.

A todos les doy mil gracias.

Janet Osorio Ríos



ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1 El agua en la Tierra	3
1.1.1 Distribución del agua en el mundo	3
1.1.2 Contaminación del agua	3
1.2 Agua para uso y consumo humano	4
1.2.1 Definición	4
1.2.2 Enfermedades transmitidas	4
1.2.3 Regulación	4
1.2.4 Agua potable y agua purificada	4
1.3 Normas Oficiales Mexicanas para agua potable	5
1.4 Norma Oficial Mexicana para agua purificada	6
1.5 Fundamentos del tratamiento de agua potable	6
1.5.1 Estructura y propiedades químicas del agua	7
1.5.1.1 Composición química y peso molecular	7
1.5.1.2 Forma de la molécula (polaridad)	7
1.5.1.3 Estructura molecular	7
1.5.1.4 Ionización e hidratación	8
1.5.1.5 Disociación, pH y alcalinidad	8
1.5.1.6 Dureza	9
1.5.2 Propiedades físicas del agua	9
1.5.2.1 Temperatura	9
1.5.2.2 Densidad (p)	10



ÍNDICE

1.5.2.3	Viscosidad	11
1.5.2.4	Cohesión, <i>adhesión</i> y <i>tensión superficial (s)</i>	12
1.5.2.5	Calor específico	14
1.5.2.6	Solubilidad	15
1.5.3	Procesos físicos para la obtención de agua purificada	15
1.5.3.1	Sedimentación	15
1.5.3.2	Filtración	15
1.5.3.3	Ósmosis inversa	15
1.5.3.4	Desinfección por procesos físicos	16
1.5.3.5	Destilación.....	16
1.5.4	Procesos químicos para la obtención de agua purificada	17
1.5.4.1	Coagulación y floculación	17
1.5.4.2	Precipitación.....	17
1.5.4.3	Intercambio iónico	17
1.5.4.4	Electro diálisis.....	17
1.5.4.5	Recarbonatación	18
1.5.4.6	Desinfección química	18
1.5.5	Productos químicos involucrados en la purificación del agua	18
1.5.5.1	Algicidas	18
1.5.5.2	Biocidas o desinfectantes	18
1.5.5.2.1	Agentes oxidantes.....	18
1.5.5.2.2	Agentes que no oxidan.....	19
1.5.5.3	Coagulantes.....	19
1.5.5.4	Floculantes	19
1.5.5.5	Neutralizadores (acondicionadores) de pH	20
1.5.5.6	Oxidantes	20
1.5.5.7	Limpiadores de resinas.....	20



ÍNDICE

CAPÍTULO II: PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA	21
2.1 Tipos de tratamiento.....	21
2.2 Parámetros de calidad.....	21
2.3 Desinfección con Cloro	23
2.3.1 Desinfección	23
2.3.2 Importancia de la desinfección	24
2.3.2.1 Protozoarios	24
2.3.2.2 Bacterias	24
2.3.2.3 Virus.....	25
2.3.3 Desinfección con cloro	25
2.3.4 Subproductos de la desinfección con cloro (SPD)	26
2.3.5 Eficiencia de la cloración	27
2.3.6 Compuestos de cloro que se forman en el agua	27
2.3.6.1 Formas de cloro libre.....	27
2.3.6.2 Especies de cloro combinado	29
2.3.6.2.1 Cloraminas	29
2.3.6.2.2 Cloro combinado no utilizable o demanda.....	30
2.3.6.2.3 Punto de quiebre	31
2.3.7 Relación concentración-tiempo de contacto del cloro en el agua.....	32
2.3.7.1 Ley de Chick-Watson	32
2.3.7.2 El parámetro Ct.....	33
2.3.8 Características del agua que influyen en el proceso de la desinfección.....	35
2.3.8.1 Temperatura.....	35
2.3.8.2 Potencial Hidrógeno.....	36
2.3.9 Microorganismos de interés	36
2.3.10 Interferencias en la cloración.....	38
2.3.11 Aplicación del cloro	38
2.4 Filtración	39
2.4.1 Definiciones.....	39



ÍNDICE

2.4.1.1	Sólidos suspendidos y disueltos	39
2.4.1.2	Turbiedad	39
2.4.2	Clasificación de los filtros	39
2.4.2.1	Según el medio filtrante utilizado	40
2.4.2.2	Según la velocidad de filtración	40
2.4.2.3	Según la profundidad del lecho.....	40
2.4.2.4	Según el sentido del flujo	40
2.4.2.5	Según la carga sobre el lecho filtrante	40
2.4.3	Mecanismos responsables de la filtración	40
2.4.3.1	Mecanismos de transporte	41
2.4.3.1.1	Cernido.....	41
2.4.3.1.2	Sedimentación	41
2.4.3.1.3	Intercepción	41
2.4.3.1.4	Difusión (movimiento browniano)	42
2.4.3.1.5	Impacto inercial	42
2.4.3.1.6	Acción hidrodinámica.....	43
2.4.3.1.7	Efecto gravitacional.....	43
2.4.3.2	Mecanismos de adherencia	43
2.4.3.2.1	Fuerzas de Van der Waals.....	44
2.4.3.2.2	Fuerzas electrostáticas o coulómbicas.....	44
2.4.3.2.3	Puente químico.....	44
2.4.4	Modelos matemáticos de la filtración	45
2.4.5	Parámetros de diseño de filtros	45
2.4.6	Retrolavado de los lechos de filtrado	46
2.5	Adsorción	47
2.5.1	Definiciones generales	47
2.5.2	Tipos de adsorbentes y de adsorción.....	48
2.5.3	Isotermas de adsorción	48
2.5.3.1	Definición	48
2.5.3.2	Obtención experimental.....	48



ÍNDICE

2.5.3.3	Modelos matemáticos.....	49
2.5.3.3.1	Langmuir	49
2.5.3.3.2	Freundlich	50
2.5.3.3.3	Brunauer-Emmet y Teller (BET).....	50
2.5.4	Carbón activado.....	50
2.5.5	Obtención del carbón activado	52
2.5.5.1	Materia prima.....	52
2.5.5.2	Procesos de fabricación.....	52
2.5.6	Tipos de carbón activado.....	52
2.5.7	Usos del carbón activado granular	53
2.5.8	Eficiencia de los filtros de carbón activado granular.....	53
2.5.9	Parámetros de operación de un filtro.....	55
2.5.10	Regeneración de los filtros de carbón activado	57
2.5.11	Uso del carbón activado en polvo (PAC)	57
2.6	Desinfección con ozono.....	57
2.6.1	Ozono.....	57
2.6.2	Uso del ozono como desinfectante	58
2.6.3	Generación del ozono	58
2.6.4	Productos derivados de la desinfección con ozono	60
2.6.5	Factores que influyen en la dosis requerida.....	60
2.6.5.1	Temperatura.....	60
2.6.5.2	pH	61
2.6.5.3	Sistema de aportación (de contacto) de ozono	61
2.6.5.4	Demanda inicial de ozono	61
2.6.6	Parámetros de diseño	63
2.6.7	Aplicación del ozono al agua.....	64
2.7	Desinfección con UV.....	65
2.7.1	Radiación ultravioleta	65
2.7.2	Clasificación de la radiación ultravioleta.....	66
2.7.3	Desinfección con UV.....	66



“ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA
PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II”.



ÍNDICE

2.7.4	Factores que afectan la desinfección con UV	68
2.7.5	Uso de las lámparas de UV	68
2.7.6	Parámetros de diseño	70
2.8	Sistemas de tratamiento	72
 CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II....		73
3.1	Equilibrio del agua	73
3.2	Test kit medidor para agua en nuestro tratamiento de la planta purificadora de campus II	73
3.2.1	Problemas que se presentaron por el desajuste de PH	74
3.2.2	¿Cómo se niveló el pH?	74
3.2.3	Ficha Técnica del pH:	75
3.2.4	Kits utilizados durante el tratamiento para la lectura de la alcalinidad y de Dureza:	77
3.3	Tratamiento químico del agua	80
3.3.1	Desinfectantes	80
3.3.1.1	Cloración	80
 CAPÍTULO IV: OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA.....		82
4.1	Principios de operación	82
4.2	Principios de mantenimiento	83
4.3	Objetivos de la operación	83
4.4	Parámetros de control de operación	84
4.5	Descripción Del Proceso:	85
4.6	Descripción Del Proceso:	85
 RESULTADOS		91
DISCUSIÓN DE RESULTADOS		93
CONCLUSIONES		94
RECOMENDACIONES.....		95



“ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA
PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II”.



ÍNDICE

ANEXOS

ANEXO A.- Normas Oficiales Mexicanas de la Comisión Nacional del Agua	96
ANEXO B.- Norma Oficial Mexicana 127 de la Secretaría de Salud	97
ANEXO C.- Norma Oficial Mexicana 041 de la Secretaría de Salud	100
ANEXO D.- Cálculo de capacidad para filtros	103
ANEXO E.- Filtro Carbón Activado.....	105
ANEXO F.- Equipos.....	108
ANEXO G.- Diagrama de flujo de proceso de la planta purificadora de la FES ZARAGOZA “Campus II”	112
ANEXO H.- Esquema del sistema de tubería de los bebederos.....	113
BIBLIOGRAFÍA	114



RESUMEN

RESUMEN

Para llevar a cabo este trabajo de graduación se recolectaron muestras de agua en la planta de tratamiento de agua de campus II, que surte el agua en los nueve puntos distintos donde se localizan los bebederos: L4, Cerfis, Consultorio, Gym, Canchas, Edificio de Gobierno, Pasillo, Biblioteca y entrada (Anexo H).

Los parámetros físicos Y químicos fueron realizados y evaluados según métodos y especificaciones dictados por la Norma Oficiales 127 para uso y consumo humano y la Norma Oficial 041 para Agua purificada envasada.

Se determinó que el agua que provee la planta de tratamiento de campus II, a los bebederos es apta para consumo humano. Esto implica, que el método de desinfección para la destrucción de bacterias se está empleando correctamente.

En este proyecto se realizó el análisis de la planta purificadora de agua en la "FES Zaragoza" campus II, la cual integra los procesos y operaciones de tratamiento para que sea operada adecuadamente y pueda satisfacer los requerimientos de calidad de agua potable, tomando en cuenta el comportamiento que han tenido las purificadoras de agua en México así como las normas que las rigen. Por lo cual, la planta de purificación debe tener máxima confiabilidad y flexibilidad, mínima operación y mantenimiento, solamente los controles e instrumentación indispensable.

Después de haber revisado las normas mexicanas vigentes que rigen la calidad del agua para consumo humano, se analizó el proceso para purificar agua con ciertas características físicas y químicas. Para ello en el capítulo uno se estudió los conceptos y procesos fundamentales de tratamiento para la obtención de agua purificada. En el capítulo dos se estudiarán los procesos físicos y químicos implementados en la purificación de agua. En el capítulos tres y cuatro el análisis de tratamiento y operación de agua de la planta purificadora de campus II.

Este trabajo no incluirá el diseño arquitectónico o estructural de la planta purificadora, sino solamente el análisis del agua tratada. Para ello no se creará un nuevo sistema de purificación de agua, tan sólo se aplicará la operación de la planta purificadora de campus II más conveniente para el caso de estudio. Además el proyecto no se enfocará en el embotellamiento, producción o ventas.



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Objetivo:

Determinar la calidad física y química del agua que produce la Planta Purificadora de la FES ZARAGOZA campus II, la cual actualmente se surte del sistema de abastecimiento de la municipalidad de Iztapalapa, y cuya agua se distribuye en los bebederos de campus; con el fin de verificar que el agua sea apta para consumo humano y que cumpla con todas las normas de calidad requeridas (Norma Oficial 127 para uso y consumo humano y la Norma Oficial 041 para Agua purificada envasada), ya que de otra forma el agua es una fuente de innumerables enfermedades.

La purificación del agua es cada día más necesaria, dados los crecientes niveles de contaminación en el mundo actual. Este nuevo siglo trae consigo el aumento de la población mundial, la escasez del agua, y cada día es más común la costumbre y necesidad de consumir agua embotellada.

A la vez que este trabajo es presentado, nuevas necesidades de tratamiento surgen, nuevas tecnologías son aplicadas, los procesos existentes son refinados y nuevos productos químicos son descubiertos, todo con el fin de maximizar la calidad del producto terminado. Sin embargo, los fundamentos son básicamente los mismos: la necesidad de hacer una filtración acorde a las características del agua, la aplicación de los procesos más eficientes de desinfección, y tal vez algún proceso de ablandamiento según la calidad del agua a tratar.

Este trabajo no contempla todos los aspectos del problema, pues éste pudiera incluir el tratamiento con membranas de ósmosis inversa para remover sales y contaminante orgánicos, un proceso de suavización del agua, o incluso niveles más avanzados de filtración. Sin embargo, se han plasmado los aspectos más importantes de la filtración y la desinfección, procesos básicos en la purificación del agua.

No se puede decir que exista un modelo "correcto" de operar una planta purificadora de agua, pues las necesidades y la normatividad pueden variar de un lugar a otro, además de que el agua siempre tiene alguna característica especial en cada lugar.

La realización de este proyecto ha sido productiva, pues ha mostrado que las necesidades son tan amplias como nos las podamos imaginar, y en la práctica pueden surgir problemas inesperados a los cuales haya que dar una solución dentro de los parámetros establecidos por las normas y apropiados para la situación en particular.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 El agua en la Tierra

1.1.1 Distribución del agua en el mundo

El agua ocupa tres cuartas partes de la superficie de la Tierra. El 98% del agua en la tierra es agua salada y se encuentra en los mares y océanos. El 2% restante es difícil aprovecharla ya que la mayor parte de ella (69%) está en los glaciares y nieves eternas, 30% es agua subterránea y menos del 1% se encuentra en la superficie (ríos y lagos).

1.1.2 Contaminación del agua

A pesar de la definición química del agua como una sustancia constituida exclusivamente por 2 átomos de hidrógeno y 1 de oxígeno, en la naturaleza no se encuentra nunca en ese grado de pureza, más bien siempre está contaminada con una serie de componentes orgánicos e inorgánicos. El agua es rica en vida, a diferencia del aire que es pobre en organismos vivientes. Las reacciones bioquímicas requieren agua y no aire para que se puedan llevar a cabo. La presencia de sustancias orgánicas en el agua puede causar enfermedades, además de producir olores, sabores, colores y espumas. Las sustancias inorgánicas pueden causar envenenamiento, cáncer, asfixia, vómitos, náuseas, dolores, contracciones musculares y desórdenes síquicos.



Figura 1.1 Alejandro Carrillo-Chávez, Unidad de Ciencias de la Tierra UNICIT, Campus UNAM-Juquilla; Octubre, 2000



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.2 Agua para uso y consumo humano

1.2.1 Definición

El agua es una de las sustancias más imprescindibles para el ser humano. Su uso y consumo es indispensable y vital para todo ser humano. Trasciende desde los hogares hasta las grandes industrias.

Se entiende por agua para uso y consumo humano aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos, sustancias orgánicas, minerales o agentes infecciosos, no causa efectos nocivos para la salud y además no tiene olor, color ni sabor.

1.2.2 Enfermedades transmitidas

Debido al constante brote de epidemias de cólera en países subdesarrollados, la gente ha tomado conciencia de la calidad del agua que consume, procurando preservar su salud ante la amenaza de ésta y de otras enfermedades que se transmiten por el agua y que son tan letales como aquélla, como la fiebre tifoidea, disentería crónica, gastroenteritis y hepatitis tipo A.

1.2.3 Regulación

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades como las ya mencionadas.

Para lograr este propósito es necesario establecer límites permisibles para las características del agua. Por ese motivo existen normas que regulan la calidad del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano.

1.2.4 Agua potable y agua purificada

Normalmente se usan con un mismo significado las palabras agua potable y agua purificada. Sin embargo, tienen algunas diferencias, que consisten primordialmente en la calidad de la misma, teniendo como distintivos principales los sólidos totales disueltos (TDS por sus siglas en inglés), la dureza total y el cloro. Esto se puede notar cotidianamente ya que el agua que se tiene en la llave es "potable", sin embargo, el agua que consumimos es agua "purificada" embotellada, ya que la mala calidad del agua suministrada a los hogares ha hecho indispensable la compra de agua purificada. Esta es la principal razón de presentar este estudio.

En las siguientes dos secciones se revisarán las características establecidas por las Normas Mexicanas para el agua potable y para el agua purificada.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.3 Normas Oficiales Mexicanas para agua potable

Existen dos tipos de Normas Oficiales Mexicanas para agua potable: las que regulan su aprovechamiento y preservación y las que regulan su calidad.

Las primeras son expedidas por la Comisión Nacional del Agua a través de su Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, y por medio de ellas ejerce las atribuciones que le confiere la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, como son aprovechar adecuadamente y proteger el recurso hídrico nacional. Dichas normas establecen las disposiciones, las especificaciones y los métodos de prueba que permiten garantizar que los productos y servicios ofertados a los organismos operadores de sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, cumplan con el objetivo de aprovechar, preservar en cantidad y calidad y manejar adecuada y eficientemente el agua (véase Anexo A).

El segundo tipo es la que expide la Secretaría de Salud, y establece los límites permisibles de calidad de las características físicas, químicas y biológicas que debe cumplir el agua potable (véase Anexo B).



Figura 1.2 Alejandro Carrillo-Chávez, Unidad de Ciencias de la Tierra UNICIT, Campus UNAM-Juriquilla; Octubre, 2000



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.4 Norma Oficial Mexicana para agua purificada

La Norma Oficial Mexicana para agua purificada tiene límites más estrictos para las características físicas y organolépticas, químicas y bacteriológicas que la norma para agua potable (véase Anexo C). Donde se puede observar que, para agua purificada, el límite permisible de cloro residual libre, dureza total, sólidos disueltos totales, sulfatos y THMs totales es la mitad de lo permitido para agua potable. Este requerimiento se puede cumplir realizando un tratamiento más avanzado, el cual incluya adsorción con carbón activado y desinfección por ozonificación y radiación UV. Estos procesos generalmente no se llevan a cabo en la potabilización tradicional de agua.



Figura 1.3 Alejandro Carrillo-Chávez, Unidad de Ciencias de la Tierra UNICIT, Campus UNAM-Juquilla; Octubre, 2000

1.5 Fundamentos del tratamiento de agua potable

El agua es una sustancia única sobre la faz de la Tierra. Es, a la vez, tan ordinaria para el ser humano en su uso, como extraña en cuanto a propiedades se refiere.

A continuación se describirán las propiedades físicas y químicas más importantes del agua. Estas propiedades son las que caracterizan al agua y la hacen tan diferente de cualquier otra sustancia sobre esta Tierra.

Después se clasificarán y describirán los principales procesos que intervienen en la purificación del agua. El nivel de tratamiento que se le debe dar al agua está en función de la calidad de la misma. Esto puede variar mucho según la fuente del agua.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.5.1 Estructura y propiedades químicas del agua

Las propiedades químicas del agua son muy importantes ya que, aunque no se vean a simple vista, definen las propiedades físicas de la misma, que son las que generalmente percibimos. Además influyen en la forma en que otros compuestos o sustancias se mezclan con el agua. A continuación se presentan las principales propiedades químicas del agua.

1.5.1.1 Composición química y peso molecular

El agua está formada por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno. Sin embargo, ya que existen 3 isótopos conocidos del hidrógeno y 6 del oxígeno, existen múltiples combinaciones de ellos en el agua. Los que forman la mayor parte del agua son el ^1H (Hidrógeno) y el ^{16}O (Oxígeno). El peso molecular del agua varía alrededor de 18 en función de la proporción de otros isótopos en su molécula.

1.5.1.2 Forma de la molécula (polaridad)

La molécula del agua es bipolar. Su forma es angular con el oxígeno en el vértice y las uniones formando un ángulo de aproximadamente 104.5° en un estado de equilibrio ideal (que en la realidad no existe, pues los núcleos de las moléculas vibran constantemente y la ubicación de los electrones sólo puede establecerse en términos probabilísticos, más como una densidad electrónica alrededor del núcleo que como un lugar determinado en el espacio).

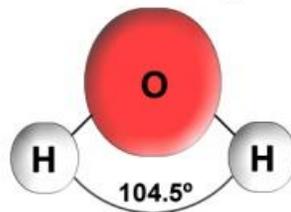


Figura 1.4 Alejandro Carrillo-Chávez, Unidad de Ciencias de la Tierra UNICIT, Campus UNAM-Juriquilla; Octubre, 2000.

1.5.1.3 Estructura molecular

En la actualidad se cree que las moléculas del agua se atraen formando grupos cerrados, con las distancias interatómicas más expandidas que en los sólidos. Cada molécula está unida a las otras por medio de puentes de hidrógeno. Esta estructura no es fija sino que se modifica constantemente al girar o reorientarse las moléculas. Al incrementarse la temperatura la



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

velocidad de reorientación aumenta, por lo que a la temperatura de ebullición, las moléculas se separan completamente.

1.5.1.4 Ionización e hidratación

Al disolver en agua una sustancia, ésta no puede conservar sus moléculas intactas, sino que éstas se ionizan o fraccionan en átomos o grupos de átomos (radicales, llamados cationes si están cargados positivamente, y aniones si tienen carga eléctrica negativa). Esto se debe al carácter bipolar del agua, ya que cuando el soluto se dispersa, cada extremo de la molécula de la sustancia es atraído por el dipolo de carga opuesta, lo que produce la ruptura molecular y por lo tanto la disociación iónica. Si un compuesto está ionizado parcialmente se llama electrolito fuerte, y si está ionizado totalmente se le llama electrolito débil. Las propiedades de los compuestos totalmente ionizados son las de sus iones individuales y no las de sus moléculas completas.

Cada ion crea y transporta su propio campo eléctrico y por lo tanto, produce una atracción electrostática entre él y los dipolos, los cuales quedan formando una envoltura a su alrededor orientada según sea la carga. Cuanto más intenso sea el campo del ion, más moléculas atraerá hacia sí. Este fenómeno se llama solvatación en general e *hidratación* cuando se refiere particularmente al agua. La ionización e hidratación son fenómenos simultáneos, el uno consecuencia del otro y por lo tanto, cuando se habla de iones en solución acuosa siempre debe entenderse que éstos se encuentran hidratados.

1.5.1.5 Disociación, pH y alcalinidad

Las moléculas de agua se encuentran enteras, excepto una fracción muy pequeña que se disocia así:



Aplicando a esta reacción la ley de acción de masas se obtiene:

$$(H^+)(OH^-) = K (H_2O) \quad (1.1)$$

Como la cantidad de moléculas enteras de agua es mucho mayor que las que se encuentran disociadas, K se puede considerar constante y entonces:

$$(H^+)(OH^-) = K \quad (1.3)$$

Para agua pura y a 25°C, $K=10^{-14}$. Cuando existen concentraciones iguales de H^+ y OH^- , el agua es neutra y $K=10^{-7}$. Si se introduce un ácido en el agua, la concentración de H tiene que aumentar en proporción a la cantidad de ácido agregado y la de OH disminuir para conservar K constante.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

El pH es definido en términos de la actividad del ión hidronio (hidrógeno hidratado) (H_3O^+) como: $pH = -\log_{10} [a_H]$ ó $10^{-pH} = a_H$. El pH de una sustancia es una medición de su acidez. Un valor específico de pH define la acidez exacta. Los potenciómetros (aparatos para determinar el pH) miden la corriente eléctrica inducida por la transferencia de carga electrostática producida por las asociaciones de los protones que saltan con gran facilidad de una a otra molécula del ion hidronio.

La alcalinidad es la capacidad del agua para amortiguar o neutralizar cambios en el PH (capacidad de buffer), evitando que el nivel de pH del agua llegue a ser demasiado ácido o básico. La alcalinidad estabiliza el agua en los niveles del pH alrededor de 7. Se expresa en ppm o en mg/L de carbonato equivalente de calcio. También se puede entender como la cantidad de iones en el agua que reaccionarán para neutralizar iones de hidrógeno. Se logra añadiendo carbón al agua. La alcalinidad total del agua es la suma de las 3 clases de alcalinidad (del carbonato, del bicarbonato y del hidróxido o hidroxilo). Cada mol de CO_3^{2-} neutraliza dos moles de H^+ .



1.5.1.6 Dureza

Es la concentración de cationes multivalentes, principalmente de sales de calcio (Ca^{2+}) y de magnesio (Mg^{2+}), y en menor proporción de hierro, aluminio y otros metales. El calcio y el magnesio son los más abundantes en aguas naturales, por lo que en general la dureza total se obtiene así:

$$\text{Dureza Total} = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] \quad (1.5)$$

1.5.2 Propiedades físicas del agua

1.5.2.1 Temperatura

La temperatura es muy importante porque determina numerosas propiedades físicas del agua, como densidad, viscosidad, tensión superficial, calor específico, solubilidad, etc. Además influye en la velocidad de las reacciones químicas involucradas en la purificación de la misma (por cada $10^\circ C$ de aumento de temperatura, se duplica la velocidad de las reacciones). También determina la presencia de actividad biológica (a mayor temperatura, mayor actividad biológica).



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.5.2.2 Densidad (ρ)

Es la masa contenida en la unidad de volumen. Es una propiedad inherente a la forma de la estructura molecular de la sustancia, es decir, depende de los mecanismos de unión de las moléculas. En el agua la densidad es máxima a 3.98°C y a partir de allí disminuye ligeramente al aumentar o disminuir la temperatura. Esto es lo que hace que el hielo flote en el agua, ya que su densidad es menor que la del agua líquida. La densidad del agua, y de los líquidos en general, es prácticamente independiente de la presión (incompresibilidad), pero cambia al combinarla con otros compuestos o sustancias.

Esta propiedad se puede expresar en cualquiera de las siguientes 3 formas:

- Densidad o masa específica:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad (1.6)$$

- Peso específico, volumétrico o unitario:

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}} = \rho \cdot g \quad (1.7)$$

- Densidad relativa o gravedad específica, que es la razón a dimensional de la densidad o peso específico de cualquier líquido y la máxima densidad o peso específico del agua (es decir, a 3.98° C):

$$\frac{\rho}{\rho_{w \max}} \quad \text{ó} \quad \frac{\gamma}{\gamma_{w \max}} \quad (1.8)$$



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

En la siguiente tabla se muestra la variación de la densidad del agua a diferentes temperaturas.

Tabla 1.1 Densidad del agua a **diferentes temperaturas**

Temperatura (°C)	Densidad		Temperatura (°C)	Densidad	
	(gr/cm ³)	(kg/m ³)		(gr/cm ³)	(kg/m ³)
0 (hielo)	0.91700	917.00	19	0.99843	998.43
0 (agua)	0.99987	999.87	20	0.99823	998.23
1	0.99993	999.93	21	0.99802	992.02
2	0.99997	999.97	22	0.99780	997.80
3	0.99999	999.99	23	0.99757	997.57
4	1.00000	1000.00	24	0.99753	997.53
5	0.99999	999.99	25	0.99707	997.07
6	0.99997	999.97	26	0.99681	996.81
7	0.99993	999.93	27	0.99654	996.54
8	0.99988	999.88	28	0.99626	996.26
9	0.99981	999.81	29	0.99597	995.97
10	0.99973	999.73	30	0.99568	995.68
11	0.99963	999.63	40	0.99224	992.24
12	0.99952	999.52	50	0.98807	988.07
13	0.99940	999.40	60	0.98324	983.24
14	0.99927	999.27	70	0.97781	977.81
15	0.99913	999.13	80	0.97183	971.83
16	0.99897	998.97	90	0.96534	965.34
17	0.99880	998.80	100	0.95838	958.38
18	0.99862	998.62			

Fuente: Welty, James R.; Wicks, Charles E.; Wilson, Robert. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons. 1969

1.5.2.3 Viscosidad

Esta propiedad no puede ser descubierta en un líquido en reposo, ya que ella se manifiesta sólo cuando el líquido está en movimiento. Es una medida de la resistencia del fluido a la rapidez de deformación o desplazamiento bajo la acción de esfuerzos de corte, como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas. La viscosidad de los fluidos, a diferencia de la de los sólidos, es relativamente baja. El agua es un fluido newtoniano, es decir el esfuerzo tangencial o cortante es directamente proporcional a la rapidez de la deformación angular. Existen dos sistemas para referirse a la constante de proporcionalidad:

- Dinámico o absoluto μ : se expresa en g/cm·s (poises)
- Cinemático $\nu = \mu/\rho$: se expresa en cm²/s (stokes)



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

La viscosidad del agua depende muy poco de la presión. Hasta 32°C de temperatura, con el aumento de la presión, la viscosidad disminuye muy ligeramente.

Sin embargo la viscosidad disminuye regularmente con la temperatura. La viscosidad cambia más rápidamente que la densidad y por eso afecta notablemente todos los procesos de tratamiento del agua. La siguiente tabla da los valores de viscosidad en los dos sistemas para varias temperaturas.

Tabla 1.2 Viscosidad del agua

Temperatura	Viscosidad dinámica o absoluta	Viscosidad cinemática	Temperatura	Viscosidad dinámica o absoluta	Viscosidad cinemática
(°C)	(poises)	(stokes)	(°C)	(poises)	(stokes)
0	0.01792	0.01792	19	0.01034	0.01036
1	0.01732	0.01732	20	0.01009	0.01010
2	0.01674	0.01674	21	0.00984	0.00986
3	0.01619	0.01619	22	0.00961	0.00963
4	0.01568	0.01568	23	0.00938	0.00940
5	0.01519	0.01519	24	0.00916	0.00919
6	0.01473	0.01473	25	0.00895	0.00897
7	0.01429	0.01429	26	0.00875	0.00877
8	0.01387	0.01387	27	0.00855	0.00858
9	0.01348	0.01348	28	0.00836	0.00839
10	0.01310	0.01310	29	0.00818	0.00821
11	0.01274	0.01274	30	0.00800	0.00804
12	0.01239	0.01240	40	0.00653	0.00658
13	0.01206	0.01206	50	0.00549	0.00556
14	0.01175	0.01176	60	0.00466	0.00474
15	0.01145	0.01146	70	0.00406	0.00415
16	0.01116	0.01117	80	0.00354	0.00364
17	0.01088	0.01089	90	0.00315	0.00326
18	0.01060	0.01061	100	0.00284	0.00296

Fuente: Yunus Cengel, *Termodinamica*, SQEde. 2006, Me Graw Hill

1.5.2.4 Cohesión, adhesión y tensión superficial (s)

La tensión superficial se debe a que entre las moléculas de un líquido se pequeñas presentan fuerzas de cohesión (atracción) en las 3 dimensiones (fuerzas de Van der Waals) que facilitan al líquido resistir pequeños esfuerzos de tensión. Esta atracción es particularmente perceptible entre las moléculas de la capa superficial de un líquido en contacto con otro fluido, ya que como no tienen moléculas con que enlazarse hacia afuera, utilizan su exceso de energía de



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

enlace para aumentar su cohesión a lo largo de la superficie, resultando una tensión que tiende a reducir el área de contacto al mínimo y concentrando la mayor cantidad de moléculas en ella. Bajo la acción de estas fuerzas resulta como si la superficie del líquido estuviese cubierta por una película uniformemente tensada, la cual tiende a darle al volumen del líquido la forma con menor superficie.

Si un líquido está limitado por una superficie sólida sus moléculas son atraídas por fuerzas de adherencia a la superficie y por fuerzas de cohesión intermolecular. Si las fuerzas adhesivas entre el líquido y la superficie sólida son mayores que las de cohesión intermolecular en el líquido (como es el caso del agua en una superficie de vidrio), el líquido se extenderá sobre la superficie, es decir, la moja. Si acontece lo contrario (por ejemplo, con el mercurio), una pequeña gota del líquido colocada sobre la superficie del sólido permanecerá con su forma de gota y entonces no mojará la superficie.

La tensión superficial causa la elevación del agua (o el descenso del mercurio) en tubos capilares, la forma esférica de las gotas de agua o de las burbujas de jabón, las aparentes atracciones o repulsiones que se observan en los cuerpos que flotan en la superficie de un líquido (como una aguja), la forma redondeada de los meniscos, etc.

La tensión superficial del agua es mayor que la de la mayoría de los líquidos orgánicos pero menor que la de los metales licuados. La presencia de glicina, sales, etc., disueltos en el agua incrementan el contenido electrolítico y por lo tanto, la tensión superficial. Algunas sustancias orgánicas como los detergentes, jabones, alcoholes o ácidos la disminuyen (esto se puede notar en las burbujas que se pueden formar con agua jabonosa). El aumento de la temperatura también disminuye los valores de la tensión superficial del agua, como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 1.3 Tensión superficial de varios líquidos en el límite de separación con el aire

Compuesto	Temperatura (°C)	Tensión (N/m)
Ácido fórmico	20	0.03760
Acetona		0.02370
Alcohol metílico		0.02261
Benceno		0.02885
Cloroformo		0.02714
Etanol		0.02230
Glicerol		0.06340
Fenol		0.04090
Mercurio		0.49000
Petróleo		0.02500
Plata líquida		970
Oro líquido	1070	1.00000
	0	0.07560



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

Agua	5	0.07490
	10	0.07420
	15	0.07350
	20	0.07280
	25	0.07200
	30	0.07120
	40	0.06956
	50	0.06791
	60	0.06730
	70	0.06555

Fuente: Perry, Robert H.; Green, Don W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** McGraw Hill 1999. 7th Edition.

1.5.2.5 Calor específico

Es la cantidad de calor necesario para elevar 1° C la temperatura de 1 g de agua. En la mayoría de los líquidos el calor específico aumenta con la temperatura, pero en el agua tiene su mínimo a 35° C, y es mucho más elevado que en compuestos como el alcohol, benceno, etc., que tienen CE de 0.4 a 0.6 cal/g. En otras palabras, se necesita una gran cantidad de calor para poder elevar la temperatura del agua, lo que hace muy costosos los procesos de destilación. Por eso es que grandes masas de agua tienen un efecto regulador en la temperatura del ambiente. La siguiente tabla muestra calores específicos del agua.

Tabla 2.4 Calor específico del agua a diferentes temperaturas (Arboleda, 2000)

Temperatura (°C)	Calor específico (cal/g)	Temperatura (°C)	Calor específico (cal/g)
0	1.0080	30	0.9987
1	1.0072	35	0.9986
2	1.0064	40	0.9987
3	1.0056	45	0.9989
4	1.0049	50	0.9992
5	1.0043	55	0.9996
10	1.0019	60	1.0001
15	1.0004	65	1.0006
16	1.0002	70	1.0013
17	0.9999	75	1.0021
18	0.9998	80	1.0029
19	0.9996	85	1.0039
20	0.9995	90	1.0050
25	0.9989	95	1.0063

Fuente: Perry, Robert H.; Green, Don W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** McGraw Hill 1999.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.5.2.6 Solubilidad

El agua disuelve muchas sustancias con dependencia de la temperatura.

1.5.3 Procesos físicos para la obtención de agua purificada

1.5.3.1 Sedimentación

Consiste en promover condiciones de reposo en el agua para depositar, mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas que el agua, como aceite, etc., en el tanque de sedimentación. Estos contaminantes pueden ser removidos fácilmente después de haber alcanzado el fondo del depósito. Se llama decantación cuando involucra una floculación previa.

1.5.3.2 Filtración

Consiste en hacer pasar el agua a través de rejillas para remover todo tipo de sólidos. Existen diversos procesos de filtración como:

- *Cribado o cernido.* Es para remover sólidos de tamaño considerable, como ramas, palos, etc.
- *Filtración.* Remueve turbiedad y sólidos suspendidos y disueltos.
- *Adsorción.* Es un tipo especial de filtración, que consiste en un filtro muy fino con un área muy grande en la cual se adhieren los contaminantes orgánicos.

1.5.3.3 Ósmosis inversa

Consiste en hacer pasar el agua a presión a través de una membrana fina semipermeable, con el fin de remover sólidos disueltos y componentes orgánicos e inorgánicos de ella. Normalmente se aplica para desalinizar el agua, es decir, remover el exceso de sales, principalmente de cloruros.

La ósmosis directa toma lugar cuando el agua pasa de una solución menos concentrada a una solución más concentrada a través de una membrana semipermeable. El agua fluirá debido a esta diferencia de energía de la solución de menos concentración a la de más concentración hasta que el sistema alcanza el equilibrio. La adición de presión a una solución más concentrada detendrá el flujo de agua a través de la membrana de la solución de menos concentración cuando la presión ejercida iguale la presión osmótica aparente entre las dos soluciones. La presión osmótica aparente es la medida de la diferencia de la energía potencial entre las dos soluciones. Mientras se aplique más presión a la solución más concentrada, el agua empezará a fluir de la solución de más concentración a la de menos concentración (ósmosis inversa). La cantidad de



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

agua filtrada depende de la presión aplicada a la solución de más concentración, la presión osmótica aparente y el área de la membrana que está siendo presurizada. La presión requerida para sobreponerse a la presión osmótica es dependiente de la concentración molar de la solución y de la temperatura absoluta. 100 mg/L de sólidos disueltos son equivalentes a aproximadamente 1 psi de presión osmótica.

La membrana de ósmosis inversa es una película de acetato de celulosa parecido al celofán usado para envolver la comida. Estas membranas pueden ser formuladas para dar grados variantes de rechazo de 50 a 98%. La palabra rechazo es usada para describir la repulsión de los iones por la membrana. El material filtrante de la membrana tiene una multitud de poros submicroscópicos en su superficie. El tamaño del poro de la membrana (0.0005 a 0.002 micrones) es mucho más pequeño que las aberturas de un filtro mecánico normal (1 a 25 micrones) que se requiere un diferencial de presión mucho más grande para hacer que el agua pase por la membrana que el diferencial requerido por un material filtrante normal. Como la membrana "tipo celofán" tiene poca fuerza mecánica y debido al diferencial requerido para el flujo de agua, la membrana debe tener un soporte fuerte para prevenir descompostura.

1.5.3.4 Desinfección por procesos físicos

Se refiere a la destrucción de patógenos por medios físicos como calor, luz, etc.

1.5.3.5 Destilación

Es la evaporación del agua para separarla de las sales (desalinización), como por ejemplo calcio y magnesio (causantes de la dureza del agua). Posteriormente se deja condensar. Otro ejemplo de este proceso es la eliminación de la sal del agua de mar y de las aguas salobres para obtener agua dulce, especialmente en las áreas desérticas y semidesérticas.

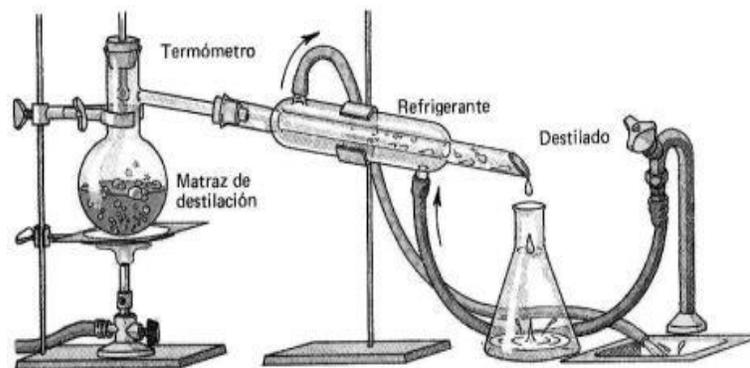


Figura 1.5 Alejandro Carrillo-Chávez, Unidad de Ciencias de la Tierra UNICIT, Campus UNAM-Juquilla; Octubre, 2000.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.5.4 Procesos químicos para la obtención de agua purificada

1.5.4.1 Coagulación y floculación

Consiste en adicionar al agua una sustancia química (coagulante) que transfiera sus iones a la sustancia que se desea remover, neutralizando así la carga eléctrica y favoreciendo la formación de flóculos de mayor tamaño y peso. Los coagulantes más comunes son las sales trivalentes de aluminio y hierro. Este proceso está influenciado de manera importante por el pH y la alcalinidad del agua. Se utiliza para remover turbiedad, color y precursores de DBPs (productos secundarios de la desinfección).

1.5.4.2 Precipitación

Consiste en adicionar al agua una sustancia química soluble cuyos iones reaccionen con los de la sustancia que se desea remover formando un sólido precipitado que puede ser filtrado del agua. Tal es el caso de la remoción de dureza mediante la adición de cal y carbonato de sodio. Otro caso es el de los fertilizantes como fosfato, que se remueven a través de la adición de hierro. El caso inverso también es posible, en que el hierro se estabiliza añadiendo poli fosfatos. Los detergentes contienen ciertos agentes separadores que inactivan las sustancias causantes de la dureza del agua.

1.5.4.3 Intercambio iónico

El agua dura contiene un gran número de iones positivos en la forma de minerales disueltos como calcio, magnesio y hierro. La remoción de estos minerales (suavización o ablandamiento del agua) se logra a través de un proceso de intercambio de iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} por iones de Na^{2+} entre el mineral que se quiere remover y un tanque de resina a través del cual se hace pasar el flujo de agua y en el cual los minerales disueltos son atrapados. El uso del suavizador disminuye las sales disueltas antes de pasar al equipo de ósmosis inversa, lo cual aumenta la vida de las membranas del equipo.

1.5.4.4 Electro diálisis

Se utiliza para desalinizar aguas salobres. Cuando la sal se disuelve en agua, se separa en iones positivos y negativos, que se extraen pasando una corriente eléctrica a través de membranas aniónicas y catiónicas.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

1.5.4.5 Recarbonatación

Es la aplicación de anhídrido carbónico (H_2CO_3^*) o CO_2 (g) para bajar el pH del agua después del ablandamiento, sin afectar dureza, alcalinidad, etc.

1.5.4.6 Desinfección química

Existen procesos químicos para desinfectar el agua. Entre los principales se encuentra la desinfección con cloro, sus compuestos y con ozono. Estos procesos se estudiarán a detalle en los siguientes capítulos.

1.5.5 Productos químicos involucrados en la purificación del agua

1.5.5.1 Algicidas

Matan a las algas, pero no quitan las toxinas que son lanzadas por ellas antes de morir. No son muy recomendables para las floraciones de algas por razones ambientales. Algunos ejemplos de algicidas son: sulfato de cobre, sales de hierro, etc.

1.5.5.2 Biocidas o desinfectantes

Son compuestos tóxicos para los microorganismos. Hay varios tipos de biocidas, algunos de los cuales tienen una amplia gama de efectos sobre muchas y diversas clases de bacterias. Se pueden dividir en agentes que oxidan y agentes que no oxidan. Los agentes que no oxidan son menos eficaces como biocidas.

1.5.5.2.1 Agentes oxidantes

- *Cloro.* Es el gas más usado. Retira sabores y olores del agua. La cantidad necesaria de cloro es función del tiempo de contacto, pH, temperatura y volumen del agua.
- *Dióxido de cloro.* Es un gas explosivo. Se utiliza para aguas superficiales con problemas de olor y sabor. Es eficaz en rangos más amplios de pH. Tiene efectos menos perjudiciales para el ambiente y la salud humana que el cloro. No forma los ácidos hipoclorosos en agua sino existe como dióxido disuelto del cloro. El ClO_2 penetra la pared bacteriana de la célula y reacciona con aminoácidos vitales en el citoplasma de la célula para matar a los organismos. El subproducto de esta reacción es clorito.



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

- *Isocianatos de cloro.* En hidrólisis dan el ácido hipocloroso y en agua ácido cianhídrico, que reduce la pérdida de cloro debido a las reacciones fotoquímicas con la luz UV, de modo que más ácido clorhídrico se origina y la acción biocida se ve realizada.
- *Hipoclorito.* Es la sal del ácido hipocloroso. Se aplica generalmente como hipoclorito de sodio (NaOCl) e hipoclorito de calcio (Ca (OCl)₂).
- *Ozono (O).* Es naturalmente inestable, pero lo tanto es un oxidante muy fuerte. Consiste en las moléculas del oxígeno con un átomo de oxígeno adicional. Cuando el ozono entra en contacto con olor, bacterias o virus, el átomo de oxígeno adicional las rompe directamente, por medio de la oxidación. El tercer átomo de oxígeno de las moléculas del ozono es el que se pierde y sólo permanece el oxígeno.

1.5.5.2.2 Agentes que no oxidan.

- *Acrolina.* Es extremadamente inflamable y tóxica. Puede atacar y torcer grupos de las proteínas y reacciones de síntesis de las enzimas.
- *Fenoles clorados.* Inhiben el crecimiento de los microorganismos adsorbiéndose a la pared celular de los microorganismos para difundirse dentro de la célula donde quedan en suspensión y precipitan las proteínas.
- *Aminas.* Pueden potenciar el efecto biocida de los compuestos fenólicos clorados.
- *Compuestos órgano-sulfúricos.* Inhiben el crecimiento de la célula. En las células bacterianas la energía se transfiere normalmente cuando el hierro reacciona de Fe³⁺ a Fe²⁺. Los compuestos órgano-sulfúricos quitan el Fe por complejación como sal de hierro. Entonces la transferencia de la energía a través de las células es parada e inmediatamente se produce la muerte de la célula. Hay una gran variedad de compuestos órgano-sulfúricos para diversos valores de pH.

1.5.5.3 Coagulantes

Son preferidos los iones positivos con alta valencia. Generalmente son aplicados el aluminio como Al₂ (SO₄)₃ y el hierro como FeCl₃ ó Fe₂ (SO₄)₃.

1.5.5.4 Floculantes

Son polímeros de sólidos (poli electrolitos) que se usan para promover enlaces entre las partículas y así formar flóculos en el agua. La carga, peso molar y grado molecular de ramificación de los polímeros influyen en el efecto que éstos pueden tener. Son solubles en agua y su peso molar varía entre 10⁵ y 10⁶ g/mol. Puede haber varias cargas en un floculante, ya que hay



CAPITULO I.-MARCO TEÓRICO

polímeros catiónicos (basados en nitrógeno), aniónicos (basados en los iones del carboxilato) y los polianfolitos, que llevan cargas positivas y negativas.

1.5.5.5 Neutralizadores (acondicionadores) de pH

Las aguas municipales a menudo requieren un ajuste de pH para prevenir la corrosión de tuberías y la disolución de plomo en el suministro de agua. Para aumentar o disminuir el pH se adicionan ácidos o bases. Para aumentar el nivel del pH se utiliza la solución del hidróxido de sodio (NaOH), el carbonato de calcio o la suspensión de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Para declinar niveles del pH se usa el ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4) o ácido clorhídrico diluido (HCl). Las reacciones de neutralización causan un aumento en la temperatura.

1.5.5.6 Oxidantes

Se usan para reducir niveles de DQO/DBO y para remover componentes inorgánicos y orgánicos oxidables. Los procesos pueden oxidar totalmente los materiales orgánicos a dióxido de carbono y agua. Existen varios oxidantes, por ejemplo:

- *Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)*. Es un oxidante seguro, eficaz, de gran alcance y versátil. Ayuda al control del olor, corrosión, oxidación orgánica, oxidación del metal y de la toxicidad.
- *Ozono*. Puede oxidar halógenos orgánicos absorbibles, nitritos, hierro, manganeso, cianuros, pesticidas, óxidos de nitrógeno, sustancias olorosas, hidrocarburos tratados con cloro, etc.
- *Oxígeno*. Se puede aplicar para oxidar hierro o manganeso. Estas son las reacciones de oxidación de estos dos elementos con oxígeno:



1.5.5.7 Limpiadores de resinas

Sirven para eliminar contaminantes orgánicos en resinas de intercambio de iones. Después de esto, pueden ser reusadas. Un limpiador común es dióxido de cloro. Al usarlo, 500ppm de este compuesto pasan por la resina y los contaminantes se oxidan.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

CAPÍTULO II: PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.1 Tipos de tratamiento

Los tratamientos para potabilizar el agua, se pueden clasificar de acuerdo con:

- Los componentes o impurezas a eliminar.
- Parámetros de calidad.
- Grados de tratamientos de agua.

En tal sentido, se puede realizar una lista de procesos unitarios necesarios para la potabilización del agua en función de sus componentes. De esta forma, la clasificación sería la siguiente:

Tabla 2.1 Procesos unitarios posibles a llevar a cabo en función de los contaminantes presentes.

TIPO DE CONTAMINANTE	OPERACIÓN UNITARIA
Sólidos gruesos	Desbaste
Partículas coloidales	Coagulación+Floculación+Decantación
Sólidos en suspensión	Filtración
Materia Orgánica	Cloración al Breakpoint
Amoniaco	Afino con Carbón Activo
Gérmenes Patógenos	Desinfección
Metales no deseados (Fe, Mn)	Precipitación por Oxidación
Sólidos disueltos (Cl-, Na+, K+)	Osmosis Inversa

Fuente: Calidad y tratamiento del Agua, 2002. American Water Works Association.

2.2 Parámetros de calidad

Las aguas superficiales susceptibles de ser destinadas al consumo humano quedan clasificadas, según el grado de tratamiento que deben incluir para su potabilización, en los 3 grupos siguientes:

- TIPO A1: Tratamiento físico simple y desinfección
- TIPO A2: Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección
- TIPO A3: Tratamiento físico y químico intensivo, afino y desinfección

Según la normativa europea del año 1988, los tipos de agua se definen por los siguientes parámetros:



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Tabla 2.2 Principales parámetros de clasificación de tipos de agua

Parámetro	Unidad	Tipo A1	Tipo A2	Tipo A3
Ph	-	(6.5-8.5)	(5.5-9)	(5.5-9)
Color	Escala Pt	20	100	200
Sólidos en Suspensión	mg/l	(25)	-	-
Temperatura	°C	25	25	25
Conductividad a 20 C	S/cm	(1000)	(1000)	(1000)
Detergentes	Lauril Sulfato	0.2	0.2	0.5
Plaguicidas Totales	mg/l	.001	.0025	.005
DQO	mg/l O ₂	-	-	30
Oxígeno disuelto	% Saturación	70	50	30
DBO ₅	mg/l O ₂	3	5	7
Coliformes totales 37 C	100 ml	50	5000	50000
Coliformes fecales	100 ml	20	2000	20000

Fuente: European Community environment legislation. Normativa 98/83. Calidad del Agua 2000.

Los procesos unitarios que corresponde cada grado de tratamiento serán los siguientes:

Tabla 2.3 Procesos unitarios referidos a cada grado de tratamiento.

GRADO DE TRATAMIENTO	COMPOSICIÓN DEL TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
TIPO A1	Tratamiento Físico simple + Desinfección	Filtración rápida + Desinfección
TIPO A2	Tratamiento Físico normal + Tratamiento Químico + Desinfección	Precloración + Coagulación / Floculación + Decantación + Filtración + Desinfección
TIPO A3	Tratamiento Físico y Químico Intensos + Afino + Desinfección	Cloración al Breakpoint + Coagulación / Floculación + Decantación + Filtración + Afino con Carbón Activo + Desinfección

Fuente: Pre-Treatment Field Guide: American Water Works Association. 2007.

Debido a que hay tres grados de tratamiento, procederé a explicar las operaciones unitarias del más completo de ellos.

2.3 Desinfección con Cloro

2.3.1 Desinfección

La desinfección del agua se refiere a la destrucción, inactivación, remoción o reducción de los microorganismos patógenos (organismos que causan enfermedades) presentes en ella. Aunque los procesos de filtración pueden lograr esto, generalmente no es su principal objetivo.

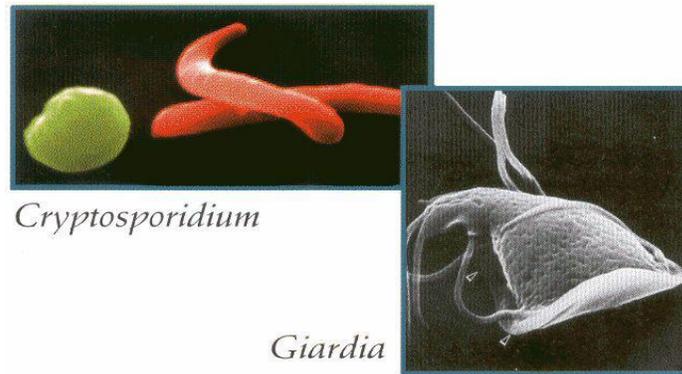


Figura 2.1 Ejemplos de Patógenos del Agua

Fuente: Microbiology for drinking water personnel: American Water Works Association.2006.

La desinfección puede ser natural ó artificial. La desinfección natural se refiere a la muerte progresiva de las bacterias, producida por agentes naturales como la luz del sol, la sedimentación, la filtración en las capas arenosas del suelo, o la estabilización de la materia orgánica que disminuye la reserva de alimento para los microorganismos. La desinfección artificial es la que el hombre provoca deliberadamente y es a la que se refiere este trabajo. Se puede realizar mediante agentes físicos como el calor, la radiación UV, etc., o químicos, por ejemplo los halógenos (Cl y sus derivados, Br, I), el ozono, dióxido de cloro, plata ionizada, permanganato de potasio, etc.

En los procesos de desinfección química los microorganismos son oxidados por el químico (pierden electrones), y por lo tanto mueren, al tiempo que el compuesto oxidante se reduce (gana electrones) y en la mayoría de los casos forma productos probablemente dañinos para la salud (cancerígenos) como bromatos, clorito, clorato, halometanos, etc.

Las condiciones que debe de tener un desinfectante ideal para ser usado en una planta purificadora son:

- Debe ser capaz de destruir los organismos patógenos a la temperatura del ambiente y en un tiempo razonable.
- Debe ser de fácil obtención, manejo sencillo y económico.
- No debe hacer al agua tóxica ni de sabor desagradable



CAPITULO II.- PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.3.2 Importancia de la desinfección

La desinfección es tan importante ya que las bacterias, virus y protozoarios son microorganismos (especies vivientes de tamaños diminutos) capaces de producir infecciones, transmitir enfermedades y provocar efectos nocivos a la salud humana. Los microorganismos de tamaño promedio pesan menos de 10^{-12} g. Los microorganismos no se consideran como plantas ni como animales, más bien se consideran dentro de un tercer reino conocido como protista. Varían en tamaño, forma, complejidad, formas de reproducción y habilidad para alimentarse.

2.3.2.1 Protozoarios

Los protozoarios son organismos eucariotas con características similares a las de los animales y pueden ser unicelulares o multicelulares. Son muy difíciles de remover. Se encuentran normalmente en aguas superficiales. Miden más o menos entre 10 y 100 micras.

Las enfermedades producidas por los protozoarios son de las más comunes. Producen trastornos gastrointestinales de intensidades variables. Algunos ejemplos de protozoarios y las enfermedades que causan son:

- *Cryptosporidium parvum* (cryptosporidiasis)
- *Giardia lamblia* (giardiasis)
- *Entamoeba histolytica* (disentería amebica)

2.3.2.2 Bacterias

Están presentes en aguas superficiales y subterráneas. Miden en promedio una micra. Según su forma se clasifican en cocos (forma esférica), bacilos (forma cilíndrica) y espirilos (espiral). Según sus necesidades de oxígeno se clasifican en aerobias (necesitan oxígeno para metabolizar sus alimentos), anaerobias (no requieren oxígeno) y anaerobias facultativas, que oxidan la materia orgánica para alimentarse ya sea en presencia o en ausencia de oxígeno libre. Según la temperatura a la que operan se clasifican en termofílicas (40-80°C), mesofílicas (20-40°C) y psicofílicas (<20°C). La mayoría de las bacterias prefieren un pH neutro. Algunas bacterias son capaces de formar esporas bajo condiciones ambientales adversas. Las esporas son altamente resistentes a condiciones desfavorables, pueden permanecer en estado latente por mucho tiempo. Son fáciles de eliminar ya que su respiración la hacen en la superficie de la célula, por lo que son muy sensibles a que los desinfectantes reaccionen o sustituyan sus compuestos vitales. Las siguientes son de las más comunes:

- *Escherichia coli* (diarreas)
- *Salmonella typhi* (tifoidea)
- *Salmonella* (salmonelosis)
- *Vibrio cholerae* (cólera)
- *Shigella* (disentería bacilar)



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

- Yersinia (yersinosis)
- Aerobacter aerogenos
- Legionella
- Campylobacter
- Mycobacteria
- Coliformes

2.3.2.3 Virus

Estos contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Miden de una centésima de micra a algunas décimas. Son parásitos que se reproducen invadiendo células huéspedes y obligándolas a producir más virus. Contienen una porción de material genético (ácido nucleico) protegido por una envoltura. Generalmente entre más complejo sea el virus, más fácil es inactivarlo. Afortunadamente la concentración de virus en el agua es baja, pues aún en aguas negras es una cien milésimas partes de la de las bacterias coliformes. Los más comunes son:

- Hepatitis infecciosa (hepatitis infecciosa o A)
- Norwalk virus (gastroenteritis)
- Rotavirus (gastroenteritis)
- Adenovirus (enfermedades respiratorias)
- Reovirus (enfermedades respiratorias, enteritis)
- Enterovirus
- Poliovirus (poliomelitis paralítica y meningitis)
- Coxsackievirus (meningitis, meningitis herpangina, pleurodimia, miocarditis infantil)
- Echo virus (meningitis, enfermedades respiratorias, enteritis, erupciones)
- Calicivirus
- Parvo virus

2.3.3 Desinfección con cloro

El cloro (Cl_2) es, en condiciones normales de presión y temperatura (1.033 kg/cm^2 y 0°C) un gas verde, 2.5 veces más pesado que el aire. Se obtiene en forma gaseosa desintegrando por electrólisis el cloruro de sodio (NaCl) en sodio y cloro, el cual se comprime a 1.74 at y se enfría a -4 ó -18°C hasta licuarlo, después se envasa en cilindros metálicos de 100, 150 y 2000 libras que lo conserven a alta presión. El cloro es un poderoso oxidante y potente germicida. Es eficiente, seguro cuando se usa adecuadamente, es el desinfectante más económico y fácil de aplicar.

La cloración es la forma más conocida de desinfección química. El cloro para la desinfección se puede obtener directamente del cloro gas ($\text{Cl}_{2(g)}$) ya mencionado, de soluciones en agua (al 5%) de hipoclorito de sodio (NaOCl) o bien de hipoclorito de calcio sólido ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$). Estas tres formas de cloro son químicamente equivalentes para propósitos de desinfección (ya que se puede decir que tienen prácticamente la misma efectividad para suministrar cloro inerte). El



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

hipoclorito de sodio es una sal formada de la unión de ácido hipocloroso (HOCl) e hidróxido de sodio (NaOH). Cuando el cloro se aplica en forma de alguna de sus sales, el proceso se conoce como hipo cloración.

El cloro elimina las bacterias, hongos, virus, esporas y algas presentes en el agua. Además reduce malos olores y sabores ya que el cloro oxida muchas sustancias como Fe(II) y Mn(II), destruye el sulfuro de hidrógeno, remueve amoníaco y otros compuestos nitrogenados que tienen sabores desagradables y que obstaculizan la desinfección. Además, los desinfectantes basados en cloro son los únicos con las propiedades residuales duraderas que previenen el recrecimiento microbiano y proporcionan protección continua. Esta propiedad es muy importante en los sistemas tradicionales de potabilización de agua (plantas municipales), ya que la presencia de un residuo sostenido mantiene la higiene del agua de la salida de la planta de tratamiento a la llave del consumidor. Este efecto residual se puede medir por sistemas muy simples y al alcance de todos. En cambio, tiene la desventaja de ser corrosivo y en algunos casos puede formar subproductos posiblemente peligrosos para la salud y producir sabor desagradable en el agua.

2.3.4 Subproductos de la desinfección con cloro (SPD)

Durante la desinfección de agua con cloro éste reacciona con ciertos materiales orgánicos (como compuestos de nitrógeno orgánico y fenoles) para crear subproductos órgano-clorados y trihalometanos (THMs), entre los cuales se encuentra el cloroformo y en cantidades menores otros THMs. La determinación analítica de los THMs requiere el uso de cromatografía de gas o medidores especializados. La cantidad de THMs que se producen depende de la concentración total de precursores presentes en el agua, la cual se relaciona con la concentración del carbono orgánico total.

Actualmente los estudios sobre si los SPD con cloro son cancerígenos no son concluyentes. Además, si esto fuera cierto, se necesitarían niveles mucho mayores de cloroformo, de los que se encuentran normalmente en el agua potable. Por otra parte los riesgos para la salud suscitados por los agentes patógenos microbianos se deben colocar como prioridad frente a los contaminantes químicos en el tratamiento de agua, ya que los riesgos de enfermarse por tomar agua no desinfectada son de miles de veces mayores que los riesgos debidos a los SPD. Por lo tanto, no hay que enfatizar demasiado este problema.

Si la cloración fuera el único recurso usado para desinfectar el agua, sería muy importante controlar los SPD cuidando no comprometer la protección microbiana. Afortunadamente la adsorción por medio de carbón activado tiene la capacidad de eliminar los precursores orgánicos y de THMs, con lo cual se controlan los SPD.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.3.5 Eficiencia de la cloración

Como la cloración es una reacción, su eficiencia como germicida depende diversos factores, por lo tanto se puede analizar desde los siguientes puntos de vista:

- a) Compuesto de cloro que se forma en el agua
- b) Relación concentración-tiempo de contacto del cloro en el agua
- c) Características del agua (pH, temperatura)
- d) Tipo de microorganismo que se intenta destruir

2.3.6 Compuestos de cloro que se forman en el agua

2.3.6.1 Formas de cloro libre

Al contacto con el agua el cloro libre se hidroliza y produce en dos etapas HOCl (ácido hipocloroso), OCl⁻ (ion hipoclorito) ó Cl_{2(aq)}. Estas etapas son:

- a) Hidrólisis, que se efectúa en fracciones de segundo:



- b) Disociación o ionización, en que el HOCl, inestable parcialmente (ya que es un ácido relativamente débil), se ioniza así:



Entonces una parte del cloro residual queda en el agua como HOCl y otra parte como OCl⁻, que resulta de la ionización del HOCl. La proporción en que existe cada especie depende directamente del pH y tiene mucha importancia porque el HOCl es un germicida poderoso y estable, mientras que el OCl es muy pobre. En la práctica se considera que de las tres formas de cloro libre el HOCl es la única que actúa en la desinfección. Entre menor sea el pH, mayor concentración de HOCl habrá, por lo tanto se puede notar que el pH influye fuertemente en el grado de desinfección que se puede alcanzar con un cierto nivel de cloro.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

La siguiente figura muestra la distribución de las tres posibles especies de cloro según su pH, para una temperatura de 25°C:

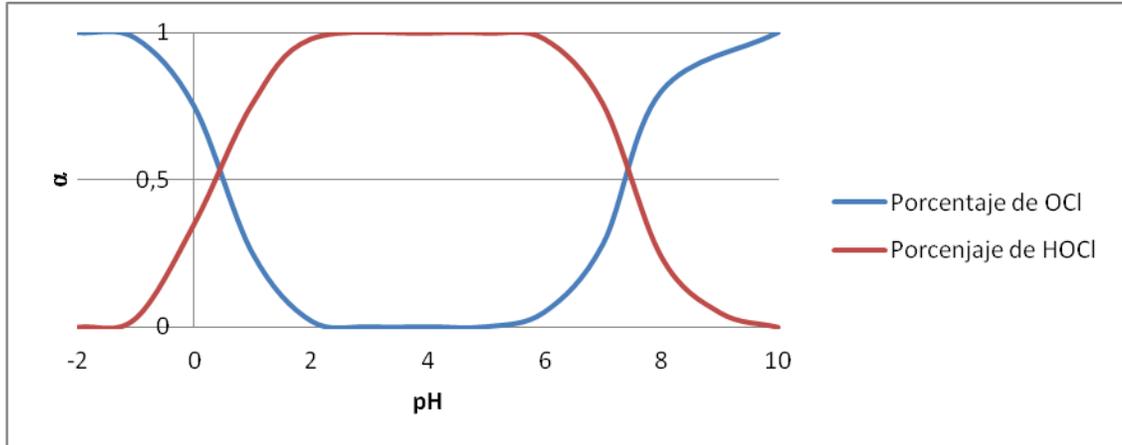


Figura 2.1 Diagrama de distribución de las especies de cloro a 25°C para distintos valores del pH (Snoeyink y Jenkins, 1980).

En la siguiente figura se puede observar con más detalle cómo están distribuidos estos compuestos a 10°C y a 20°C para pH entre 5 y 10. A un pH igual o mayor a 10, todo el cloro libre está en forma de ión hipoclorito, en cambio, aun pH igual o inferior a 5.5 todo el cloro libre está en forma de ácido hipocloroso. A un pH de 7.5 la actividad HOCl y OCl⁻ es igual. El HOCl predomina a pH menores 7.5, mientras que a pH mayores de 7.5, la especie predominante es OCl⁻.

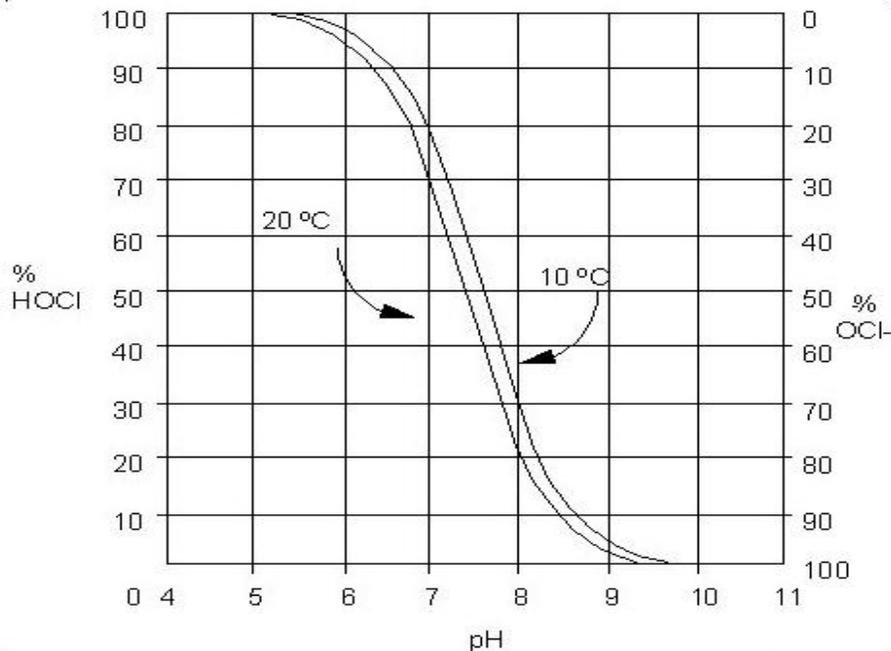


Figura 2.2 Porcentaje de HOCl y OCl⁻ para distintos valores del pH (Arboleda, 2000).



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

El % de HOCl también se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$(\%HOCl) = \frac{100}{1 + K \cdot 10^{pH}} \quad (2.3)$$

donde K es la constante de ionización, que varía de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Valores para la constante K para diferentes temperaturas (Arboleda, 2000).

Temperatura (°C) $K \times 10^{-8}$	0	5	10	15	20	25
	2.0	2.3	-2.6	3.0	3.3	3.7

Las reacciones del hipoclorito de calcio y de sodio son similares a las del cloro gaseoso:



En ambas reacciones aparece el ión hipoclorito, que reacciona con el hidrógeno para formar ácido hipocloroso:



El ácido hipocloroso y el ión hipoclorito se equilibran, al igual que en el caso del cloro gaseoso, en base a la concentración de iones H^+ , o sea del pH.

2.3.6.2 Especies de cloro combinado

Como el cloro es un fuerte oxidante se combina, a través de una reacción de oxidación-reducción, con muchas de las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua. La reacción más importante del cloro es la que hace con los compuestos nitrogenados, especialmente con el amoníaco, produciendo cloraminas y demanda.

2.3.6.2.1 Cloraminas

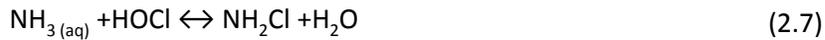
Son compuestos de cloro y nitrógeno amoniacal. En este caso el cloro pierde electrones. Su poder de oxidación es más débil que el del cloro libre pero suficiente como para combinarse con indicadores de cloro (tales como la ortotolidina) y producir con ellos una coloración que permita conocer la concentración de cloro remanente en el agua. Como germicida viral y parasitario son dudosos. Presentan niveles menores de formación de THMs. Sin embargo, sí producen SPD. Su efecto dura mucho tiempo en el agua ya que son compuestos muy estables. Son tóxicos para los peces y son perjudiciales para los pacientes de diálisis. Dependiendo de varios factores, se pueden producir NH_2Cl (monocloraminas), $NHCl_2$ (dicloraminas) ó NCl_3



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

(tricloraminas o tricloruros de nitrógeno). Este último compuesto es explosivo y tiene un mal olor, por lo que debe evitarse que aparezca.

La formación de las cloraminas se puede ver como un proceso gradual así:



Estas reacciones están en términos de HOCl, pero se puede usar indistintamente Cl₂ ó OCl₂. La distribución en el agua de cada tipo de cloramina depende del pH, de la temperatura y de la proporción entre el cloro y el amoníaco expresado como nitrógeno.

$$\frac{\text{Peso molécula de cloro}}{\text{Peso molécula del nitrógeno}} = \frac{2 \times 35.46}{14.008} = \frac{70.92}{14.008} = 5.06 \quad (2.10)$$

$$(\text{CN})=5(\text{N}) \quad (2.11)$$

Para que todo el cloro reaccione con el amoníaco, la proporción teórica debe ser 5 a 1 en peso, o sea que una parte de cloro reaccione con 5 de nitrógeno. A esta proporción, y con un pH superior a 9, prácticamente todo el residual es monocloramina, para pH entre 5 y 9 hay proporciones variables de monocloramina y dicloramina, si el pH está entre 4 y 5 todo el residual es dicloramina, y debajo de 4.4 comienza a aparecer el tricloruro de nitrógeno. Entre más baje el pH y más suba la concentración de cloro, más NCl₃ se produce.

2.3.6.2.2 Cloro combinado no utilizable o demanda.

Son los compuestos que forma el cloro con el amoníaco, aminoácidos, materiales proteínicos y orgánicos y ciertas sustancias químicas (Fe²⁺, Mn²⁺, NO₂⁻, SO₂⁻, H₂S), produciendo cloruros, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno, nitritos, nitratos, etc., que constituyen la demanda. En este caso el cloro gana electrones y por eso el producto formado no tiene propiedades desinfectantes y no reacciona con los indicadores de cloro. Esta parte del cloro que se aparentemente consume se denomina demanda.

La demanda es resultado de varias reacciones en las que el cloro es consumido por los constituyentes del agua (especialmente el nitrógeno amoniacal) y se puede calcular así:

$$\text{Demanda} = \text{Cloro dosificado} - \text{Cloro residual después de un tiempo de contacto.}$$

Cada producto derivado de la oxidación del amonio (nitrógeno gas, nitratos, etc.), requiere una relación diferente de cloro reducido a nitrógeno amoniacal oxidado [Cl₂] / [NH₃-N], que se puede expresar en moles o en gramos.



2.3.6.2.3 Punto de quiebre

La formación de cloraminas y la oxidación del nitrógeno amoniacal se combinan para formar una curva única “dosis-residuo” para la adición de cloro en soluciones que contienen amonio, que se presenta a continuación:

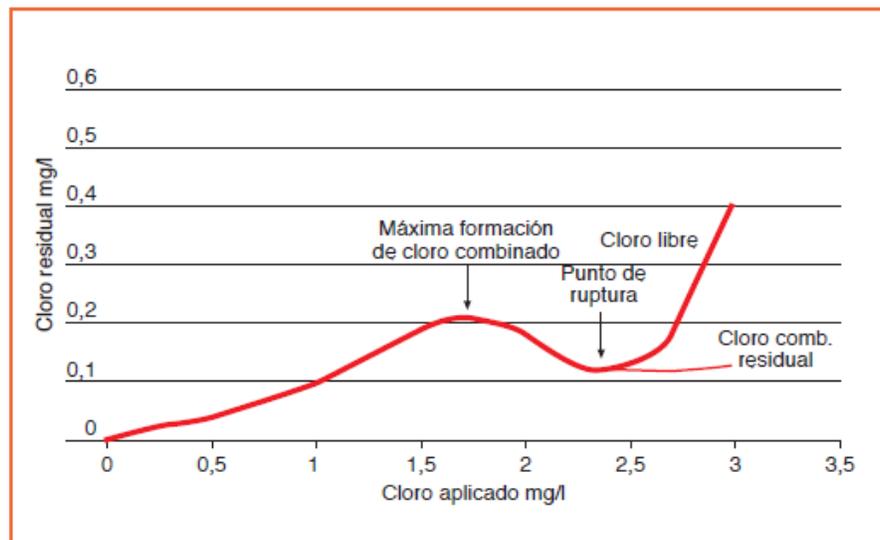
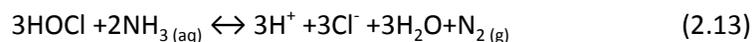
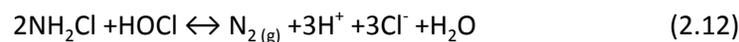


Figura 2.3 Curva de punto de quiebre (AWWA, 1999).

En la curva se pueden observar tres zonas o fases, descritas a continuación:

- Fase o Zona 1. A medida que la dosis de cloro aumenta, el cloro residual crece hasta un punto máximo que es en donde la relación en peso de dosis de $[Cl_2]$ a $[NH_4^+]$ es de 5. En esta fase el NH_4^+ y el Cl_2 se combinan para formar cloraminas.
- Fase o Zona 2. Después del punto máximo, al seguir aumentando la dosis de cloro, el cloro residual baja hasta llegar a un valor cercano a 0. La dosis de cloro correspondiente a este mínimo se denomina dosis de punto de quiebre, y ocurre a una relación de $[Cl_2]$ a $[NH_4]$ en peso de 7.6. La reacción que causa que la concentración de cloro residual disminuya hasta llegar al punto de quiebre se puede representar en cualquiera de las siguientes formas, y se conoce como reacción de punto de quiebre.



En esta fase las cloraminas formadas en la fase anterior se combinan con el Cl_2 disponible formando otros compuestos que constituyen la demanda.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

- Fase o Zona 3. Después del punto de quiebre, el incremento en el cloro residual será aproximadamente igual al del cloro dosificado. En esta fase el Cl_2 se convierte en HOCl y en OCl^- .

El cloro residual presente antes del punto de quiebre está constituido enteramente por cloro residual combinado o cloraminas (monocloramina y dicloramina), mientras que después de este punto el cloro residual es en su mayoría cloro libre (HOCl y/o OCl^-) con evidencia de cloro combinado (dicloramina y tricloramina).

2.3.7 Relación concentración-tiempo de contacto del cloro en el agua

2.3.7.1 Ley de Chick-Watson

Chick y Watson propusieron que el proceso de desinfección del agua se puede representar así:

$$dN/dt = -kC \tag{2.14}$$

donde: N = número de microorganismos vivos en el instante

t = tiempo de contacto

k = constante de inactivación (es función del desinfectante, temperatura, pH)

C = concentración de desinfectante (mg/L), que para la desinfección con cloro se asume constante Integrando llegamos a:

$$\ln N/N_0 = -kCt \tag{2.15}$$

$$N/N_0 = e^{(-kCt)} \tag{2.16}$$

donde N_0 es el número de microorganismos vivos en $t = 0$

Esta fórmula nos dice que la relación de microorganismos vivos decrece al aumentar Ct, ya que k es constante. Según este modelo el tiempo para matar un determinado tipo de microorganismos con un desinfectante es directamente proporcional al logaritmo de la relación de organismos remanentes (vivos) sobre organismos iniciales. De allí que al graficar el tiempo de contacto contra la relación de organismos sobrevivientes, el eje de esta relación tenga escala logarítmica.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

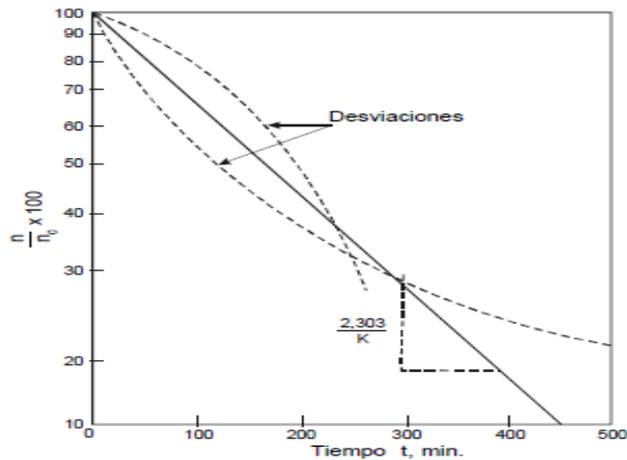


Figura 2.4 Representación gráfica de la ley de Chick (Arboleda, 2000).

En la práctica el proceso de destrucción de los microorganismos presenta desviaciones a la Ley de Chick (matemáticamente no siempre se comporta como una reacción de primer orden), como lo muestra la figura anterior. La tasa de destrucción ($\text{Log } N/N_0$) puede aumentar o disminuir con el tiempo debido a:

- Presencia de sustancias interferentes que impiden mantener un residual adecuado del desinfectante.
- Errores experimentales.
- Diferente susceptibilidad de los organismos.
- Mezcla inapropiada del desinfectante con el agua.
- Existencia de colonias de bacterias de tamaños variados que establecen una concentración no uniforme de los organismos en el agua.

Debido a esto, la Ley de Chick se usa más para evaluar el comportamiento de un proceso de desinfección, dado N/N_0 , en que se quiere calcular K .

2.3.7.2 El parámetro Ct

Ct es el parámetro de diseño y por lo tanto la variable más importante en el proceso de desinfección. Es el producto de la concentración del desinfectante (mg/L) por el tiempo en que se debe exponer el agua al residuo desinfectante (min.). Por lo tanto se mide en mg·min/L o mg/L/min. Se deriva de la ley de Chick. Al aumentar ya sea la concentración o el tiempo de contacto, y manteniendo la otra variable constante, la efectividad en el proceso de inactivación de los microorganismos es mayor.

$$Ct = \int_{t_0}^t C dt \quad (2.17)$$



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Se puede notar que al graficar C contra t, resulta que Ct sería el área bajo la curva C desde t_0 hasta t.

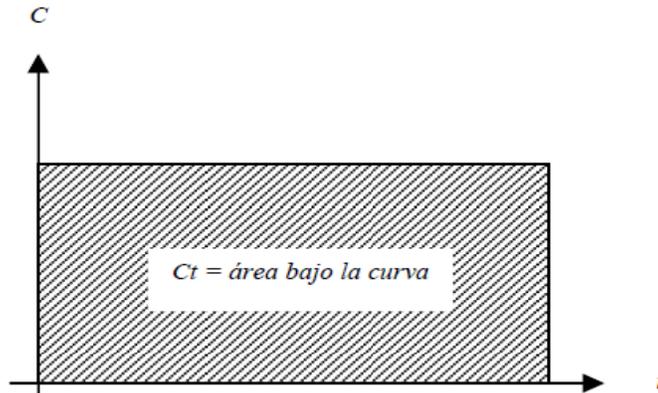


Figura 2.5 Representación gráfica de C contra t.

Para cada microorganismo existe una relación concentración-tiempo necesaria para realizar la desinfección, como lo muestra la siguiente figura:

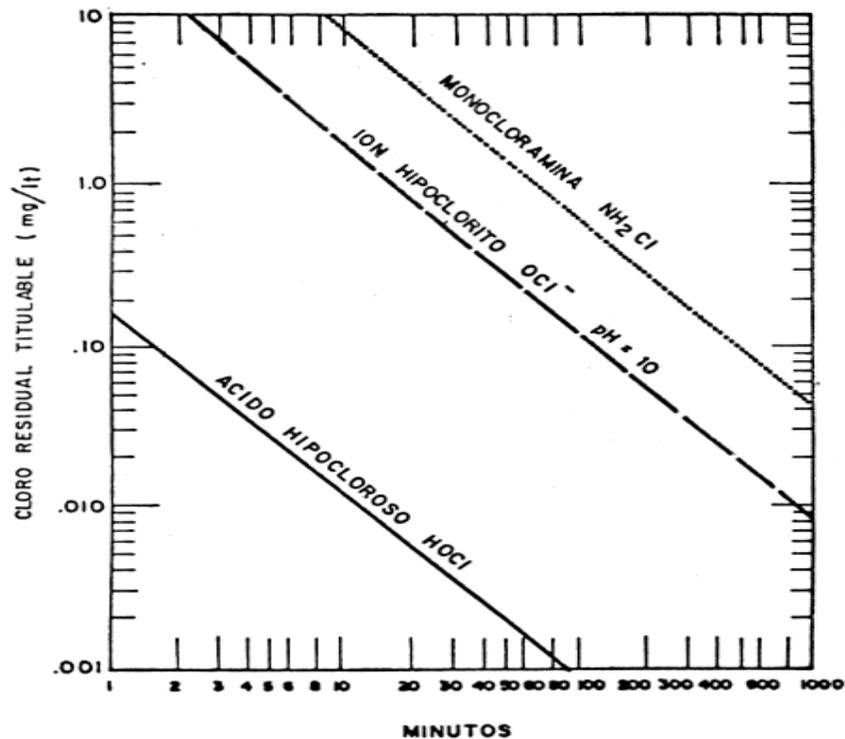


Figura 2.6 Relación Ct para 99% de inactivación de diversos microorganismos. (1) Giardia lamblia, cloro libre, 5°C, pH 6.0. (2) E. coli, cloro libre, 2-5°C, pH 8.5. (3) E. coli, cloro libre, 20-25°C, pH 8.5. (4) Poliovirus 1 (Mahoney), cloro libre, 2°C, pH 6. (5) E. coli, cloro combinado, 3-5°C, pH 7. (6) Poliovirus 1 (Mahoney), ozono, 20°C, pH 7.2. (7) Giardia muris, ozono, 5°C, pH 7 (AWWA, 1999).



2.3.8 Características del agua que influyen en el proceso de la desinfección

2.3.8.1 Temperatura

La temperatura es un parámetro que afecta la desinfección de muchas maneras:

- Las bacterias no existen a cualquier temperatura. Normalmente pueden vivir entre 5°C y 80°C.
- La temperatura influye en la rapidez de las reacciones. En general, a mayor temperatura, mayor rapidez de las reacciones. Por eso, entre mayor sea la temperatura del agua, la desinfección es más rápida y eficiente, y la constante K aumenta. Se ha encontrado la siguiente expresión para relacionar la constante K con la temperatura:

$$K = K_{20}(1 - \theta)^{T-20} \quad (2.18)$$

donde: K = constante de desinfección a la temperatura considerada (°C)

K_{20} = constante a 20°C

T = temperatura (°C)

θ = factor que varía entre 0.06 y 0.08

- La densidad, viscosidad y solubilidad del cloro líquido disminuyen a medida que aumenta la temperatura como lo muestran las siguientes figuras:



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.3.8.2 Potencial Hidrógeno

Las bacterias son muy susceptibles al pH. No sobreviven a potenciales muy altos o muy bajos. Las siguientes figuras muestran esta relación. El pH óptimo de los microorganismos es alrededor de 7.

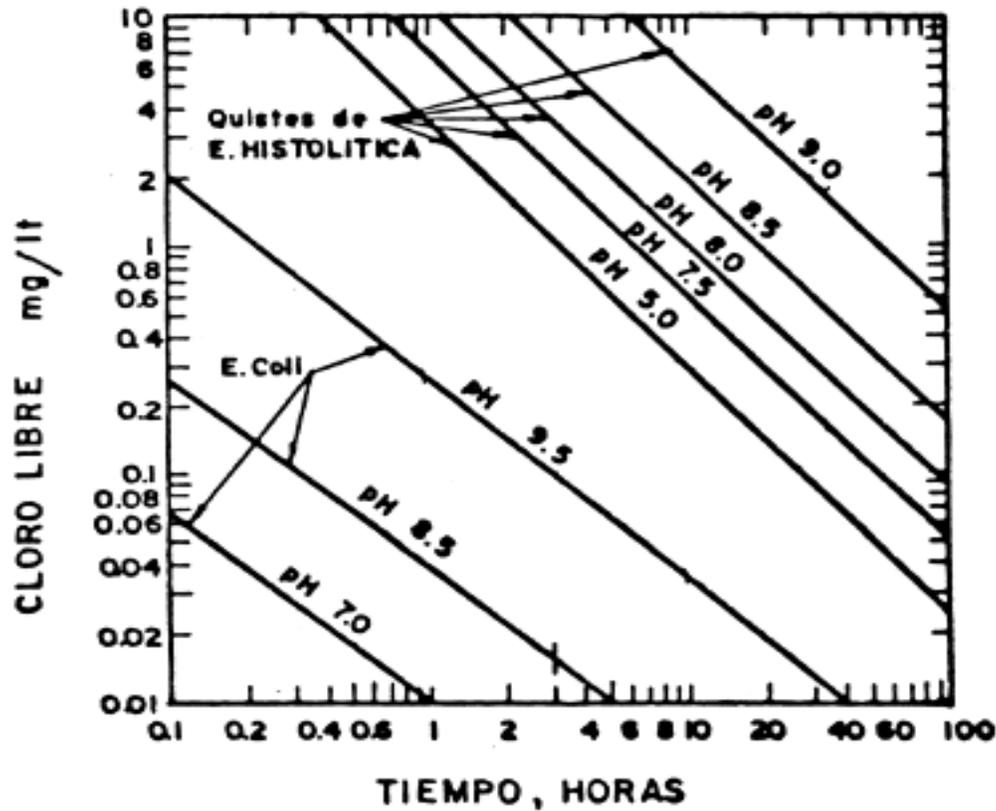


Figura 2.7 Supervivencia de E. coli y S. tífosa a diferentes pH (Arboleda, 2000).

Además, la eficiencia del cloro libre disminuye al aumentar el pH. Esto se debe a que a diferentes pH varía la proporción de HOCl y de OCl⁻.

2.3.9 Microorganismos de interés

El número de organismos presentes en el agua no afecta el proceso de desinfección. En cambio, cada tipo de microorganismo tiene una sensibilidad notablemente distinta a la desinfección, como se puede ver en la siguiente figura:



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

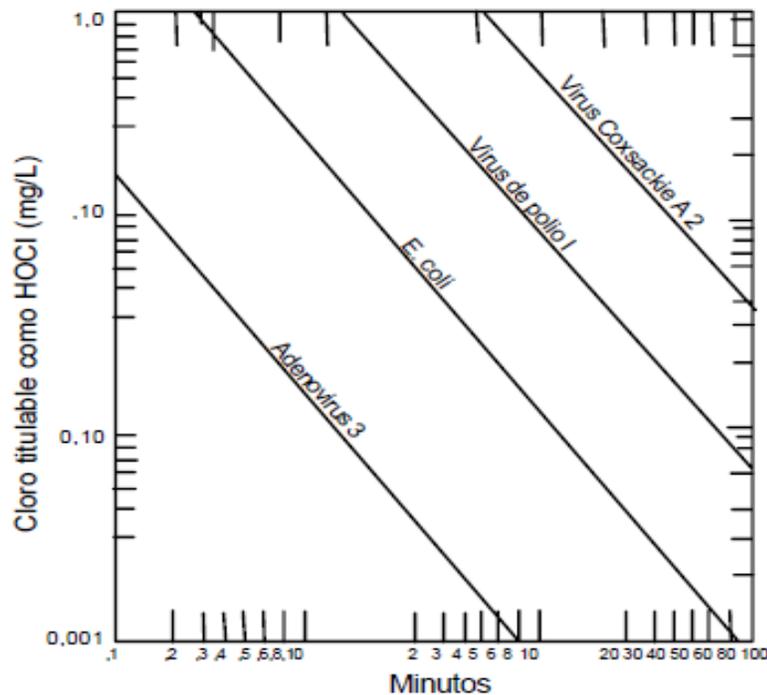


Figura 2.8 Relación entre concentración y tiempo en que el HOCl destruye diferentes microorganismos a 0-6°C (Arboleda, 2000).

El *Cryptosporidium parvum* es el microorganismo de diseño en la cloración, ya que es el más resistente de los patógenos que se encuentran normalmente en el agua cruda. Es de forma elipsoidal, del orden de unas cuantas micras. Estos son los valores del parámetro Ct requeridos para los diferentes desinfectantes de cloro para lograr un 99% de inactivación (2 logaritmos):

- HOCl: 3,500 mg-min/L
- NH₂Cl: 10,000 mg-min/L

Como la cloración es sólo una parte (preliminar) de todo el proceso de purificación, el nivel de remoción del 99% es bastante aceptable. Un Log en la escala representa 90% de remoción; 2 loas representan 99%; 3 loas representan 99.9% y 4 loas 99.99%.

Los quistes de protozoarios soportan pH de 1 a 13. Son muchísimo más resistentes que las bacterias y que los virus. Sin embargo son susceptibles al calor. Temperaturas mayores de 50°C los destruyen en 2 minutos.

Los virus resisten más que las bacterias, aunque éstas resisten muy poco a la cloración, por lo que los organismos coliformes mueren muy rápidamente. Las esporas bacterianas son más resistentes debido al estado de deshidratación parcial de su protoplasma.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.3.10 Interferencias en la cloración

La eficiencia de la cloración puede quedar total o parcialmente interferida por diversos factores físicos y químicos. Los principales son:

- *Turbiedad.* Hace más lenta la acción del cloro, ya que ciertos microorganismos como el E. coli tienden a crecer en colonias y encapsularse en los microfragmentos de materias fecales o depositarse dentro de partículas orgánicas y minerales, haciendo más lenta la acción del cloro, que tendría que difundirse hasta el interior de la masa de esas partículas antes de poder llegar hasta ellos. Esto haría necesario aumentar el tiempo de contacto o la concentración para obtener resultados satisfactorios.
- *Nemátodos.* El cloro, aún en altas dosis, no destruye los nemátodos (que son un tipo de gusanos delgados como por ejemplo las lombrices), que pueden contener en su tracto intestinal bacterias y virus patógenos.
- *Temperatura.* Las bajas temperaturas interfieren en la cloración. Los valores de Ct aumentan significativamente al bajar la temperatura.
- *Calcio.* Concentraciones pequeñas, del orden de 1 mg/L pueden perjudicar la eficiencia de la desinfección.
- *pH.* Los altos pH del agua (>9) desaceleran las reacciones químicas entre el cloro y el amoníaco e inducen la formación de compuestos clorados de baja efectividad.
- *Fenol.* Es la interferencia más detectable, ya que el fenol reacciona con el cloro formando compuestos que producen un sabor a yodoformo que se puede detectar en concentraciones tan pequeñas, del orden de 0.002 mg/L. Es decir, 2 g podrían darle mal gusto a un tanque de almacenamiento de 1,000 m. Estos olores se remueven con el filtro de carbón activado.

2.3.11 Aplicación del cloro

Al abrir la válvula del cilindro de cloro la presión disminuye, parte del cloro líquido vuelve a su estado gaseoso y así es succionado por los cloradores e inyectado al agua en solución. Al contacto con el agua el cloro se hidroliza. El clorador se adapta directamente al cilindro de cloro y opera al vacío. El vacío se crea al hacer pasar un flujo de agua a presión determinada por el evector. En la siguiente figura se pueden ver los componentes de un sistema de cloración:

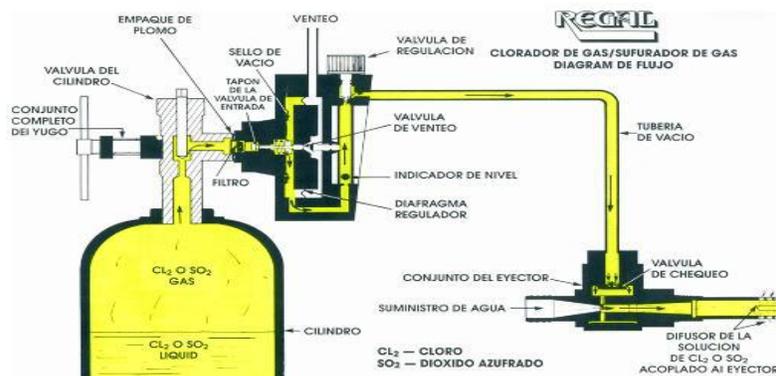


Figura 2.9 Ejemplo de operación de un clorador REGAL (Agua y Aire, 2005).



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

La forma en que se aplica del cloro afecta la química del agua. La aplicación de cloro gaseoso al agua baja su alcalinidad. Sin embargo si el cloro es aplicado como hipoclorito la alcalinidad y la dureza total del agua aumenta. Los hipocloradores son sencillos de manejar. El costo de la hipo cloración es más alto que el de la cloración con cloro gaseoso.

2.4 Filtración

2.4.1 Definiciones

La filtración es la remoción de partículas suspendidas, disueltas y coloidales (turbiedad) del agua, haciéndola pasar a través de un medio poroso, que puede ser arena, antracita, algún material prefabricado, etc.

2.4.1.1 Sólidos suspendidos y disueltos

Los sólidos pueden ser partículas orgánicas (microorganismos) o partículas inorgánicas (componentes del suelo) que deben removerse del agua porque adsorben otros compuestos, aumentan la demanda de desinfectante, pueden ser biodegradables, pueden ser patógenos, incrementan el potencial de formación de DBPs (productos cancerígenos derivados de la desinfección), etc.

Los sólidos se clasifican en suspendidos y disueltos con la ayuda de un filtro de poro nominal del 0.45μ . Los sólidos retenidos en la membrana son suspendidos; los que pasan a través de ella se consideran disueltos. Para estimar la presencia de sólidos orgánicos disueltos se usa radiación UV a 254 nanómetros (nm).

2.4.1.2 Turbiedad

Es una medición de la capacidad del agua para absorber o refractar la luz. Se mide en UTN (unidades de turbiedad nefilométricas). La turbiedad puede proteger a los microorganismos patógenos de los efectos del desinfectante utilizado en el tratamiento, por lo tanto es necesario removerla del agua.

2.4.2 Clasificación de los filtros

Un filtro convencional consta de un tanque de algunos metros de profundidad, en el cual se coloca el lecho filtrante sobre un sistema adecuado de drenaje. El flujo pasa del frente del tanque a los drenes del fondo atravesando el medio filtrante.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.4.2.1 Según el medio filtrante utilizado

- Arena sílicea
- Antracita
- Granate
- Ilmenita
- Magnetita
- Grava
- Cáscara de coco, pistache, cacahuate, etc.
- Pastas arcillosas
- Mixtos

2.4.2.2 Según la velocidad de filtración

- Filtros lentos
- Filtros rápidos

2.4.2.3 Según la profundidad del lecho

- Filtros convencionales ($L = 0.6 - 0.75 \text{ m}$)
- Filtros profundos ($L = 0.9 - 2.40 \text{ m}$)

2.4.2.4 Según el sentido del flujo

- Flujo ascendente
- Flujo descendente
- Flujo mixto
- Flujo horizontal

2.4.2.5 Según la carga sobre el lecho filtrante

- Filtros presurizados (sistema de bombeado)
- Filtros por gravedad

2.4.3 Mecanismos responsables de la filtración

La remoción de partículas suspendidas del agua (de tamaño muchísimo más pequeñas que los poros del medio filtrante) no se realiza solamente por el simple efecto físico de cernido, sino involucra 2 tipos de mecanismos, que varían según sea el tamaño de las partículas, su densidad y características electroquímicas.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Aunque no todos los mecanismos necesariamente actúan al mismo tiempo, más de uno deberá entrar en acción para transportar y adherir los diferentes tamaños de partículas al medio filtrante.

2.4.3.1 Mecanismos de transporte

Las partículas se transportan dentro de los poros del medio filtrante debido a fenómenos físicos e hidráulicos, influenciados por los factores que gobiernan la transferencia de masas. Los siguientes son los mecanismos que pueden realizar el transporte.

2.4.3.1.1 Cernido

Ocurre cuando las partículas son de mayor tamaño que los poros del lecho filtrante y por lo tanto quedan atrapados en los intersticios. En general sólo actúa en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.

2.4.3.1.2 Sedimentación

La remoción de partículas menores que el tamaño de los poros puede hacerse por sedimentación de ellas en la superficie de los granos del medio filtrante. La sedimentación sólo se puede producir con material suspendido relativamente grande (mayor de $1 \mu\text{m}$) y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta, y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja.

2.4.3.1.3 Intercepción

A velocidades bajas el régimen de flujo es generalmente laminar y, por lo tanto, las partículas contaminantes se mueven a lo largo de líneas de corriente. En la constricción las partículas contaminantes que viajan cerca son removidas por contacto con el lecho o con otras partículas ya depositadas o adheridas a él. La siguiente figura esquematiza esta idea:

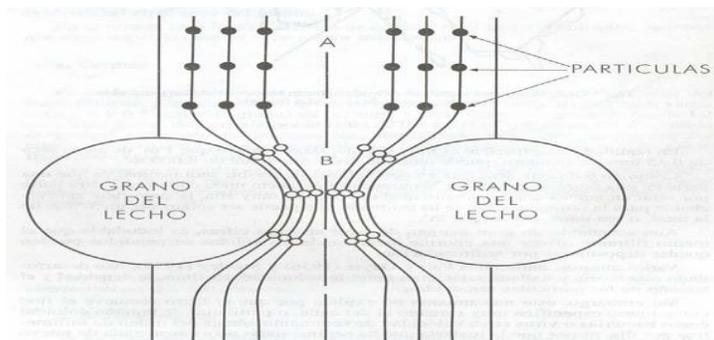


Figura 2.10 Contacto casual de las partículas con el medio filtrante (Arboleda, 2000)

CAPITULO II.- PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

La interceptación es más efectiva a medida que el tamaño de las partículas aumenta. La eficiencia del filtro debida a la interceptación es directamente proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula e inversamente proporcional al diámetro del grano.

2.4.3.1.4 Difusión (movimiento browniano)

Es el movimiento errático de las partículas pequeñas (con tamaño $< 1 \mu\text{m}$, que son la mayoría de las partículas que llegan al filtro), que depende de la energía térmica del agua y controla el impacto con el medio poroso. Las partículas pequeñas tienden a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración. Por esto se pueden encontrar sólidos adheridos a los granos del medio filtrante en puntos donde la velocidad del flujo es prácticamente nula. La eficiencia del filtro debida a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de la partícula y del grano. La influencia de la difusión en la acción del manto filtrante en profundidad es pequeña dado que la relación entre el diámetro de la partícula y el del grano está estimada entre 0.0002 y 0.6.

2.4.3.1.5 Impacto inercial

Cuando la velocidad del flujo es alta y las partículas son grandes, los efectos de la inercia pueden hacer que aquéllas sigan una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo. Esto implica que al pasar una suspensión alrededor de un obstáculo, como sucede en la siguiente figura, mientras las líneas de flujo se curvan, las partículas continúan su trayectoria original debido a la inercia y chocan con el grano del filtro adhiriéndose a él.

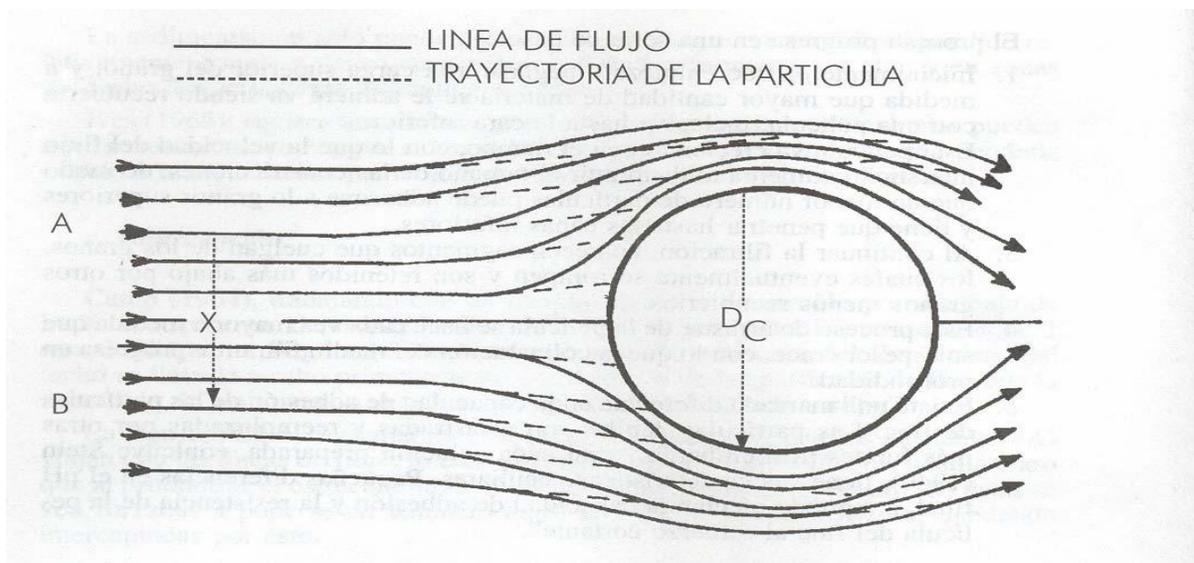


Figura 2.11 Impacto inercial (Arboleda, 2000)



CAPITULO II.- PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

La eficiencia de este mecanismo es directamente proporcional a la velocidad del flujo e inversamente proporcional al diámetro del medio filtrante. Sin embargo, la viscosidad del fluido hace difícil que la materia suspendida pueda adquirir suficiente cantidad de movimiento como para que el impacto inercial sea significativo.

2.4.3.1.6 Acción hidrodinámica

El gradiente de velocidades puede provocar que las partículas de tamaño relativamente grande en un medio viscoso en movimiento laminar puedan tener en sus extremos velocidades diferentes, como se muestra en la Figura 3.3. La diferencia de esas velocidades hace girar a la partícula, produciendo una diferencia de presión perpendicular al escurrimiento, lo cual provoca que la partícula sea conducida a una región de velocidad menor.

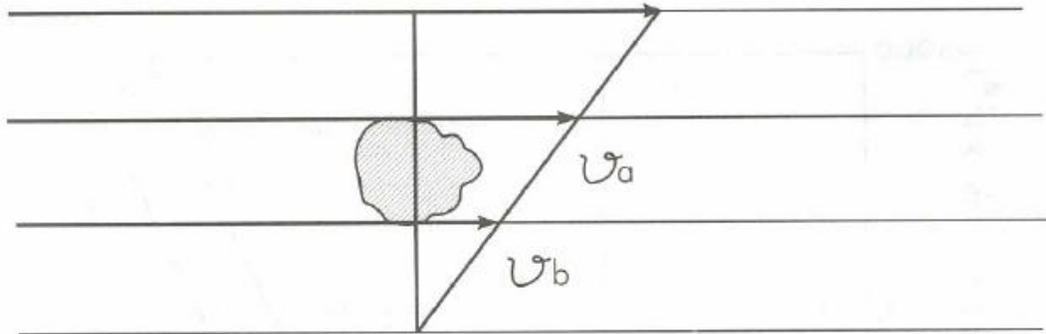


Figura 2.12 Acción hidrodinámica (Arboleda, 2000)

2.4.3.1.7 Efecto gravitacional

En la filtración las fuerzas gravitacionales son más importantes que las inerciales.

2.4.3.2 Mecanismos de adherencia

La adherencia entre las partículas suspendidas y los granos del lecho filtrante depende de las características de ambos. Las partículas se adhieren al medio poroso siempre y cuando resistan las fuerzas ejercidas por el flujo del agua. Esto se debe a fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros físicos y químicos. Hay varios fenómenos químicos y electroquímicos que controlan la efectividad de la adherencia de las partículas al medio filtrante, los más importantes de los cuales se mencionan a continuación.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.4.3.2.1 Fuerzas de Van der Waals

Son las principales responsables de la adhesión de las partículas a los granos del filtro. Son independientes del pH y de las características de la fase acuosa. Dependen de la densidad y tamaño de las partículas, así como de la distancia entre éstas y los granos del filtro.

2.4.3.2.2 Fuerzas electrostáticas o coulómbicas

Se pueden considerar tres casos:

- Los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas tienen diferente carga eléctrica. Entonces existe una fuerza de atracción entre el medio y las partículas, lo que hace que cuando éstas se acercan a los granos del lecho, se produzca atracción y adhesión.
- Los granos del medio tienen carga y las partículas no. En este caso no hay ninguna barrera de energía que impida que cuando las partículas se pongan en contacto con el medio terminen adheridas al mismo.
- Los granos del medio filtrante y las partículas tienen la misma carga. En este caso existe repulsión entre ellos. Sin embargo aún en este caso las fuerzas hidrodinámicas pueden ocasionalmente vencer la barrera de energía y aproximar las partículas lo suficiente como para que las fuerzas de Van der Waals puedan actuar. La probabilidad de adherencia de las partículas es menor que en los casos anteriores.

2.4.3.2.3 Puente químico

Si se inyectan ayudantes de filtración o poli electrolitos aumenta la adherencia de la materia suspendida al medio filtrante ya que este material intermediario forma segmentos que se extienden en el agua y pueden establecer un enlace químico entre partículas y entre éstas y el medio filtrante. Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y de las cargas electrostáticas. La Figura 3.4 explica este proceso:

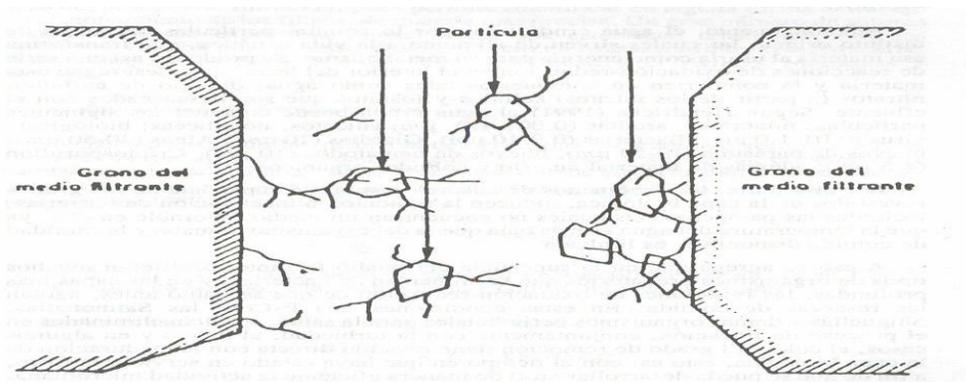


Figura 2.14 Esquema de la acción de los polímeros en un medio granular (Arboleda, 2000)



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.4.4 Modelos matemáticos de la filtración

A pesar de todos los esfuerzos, no existe hasta ahora un modelo matemático que describa con precisión el comportamiento de los filtros y permita calcular los parámetros que afectan su funcionamiento. Entre los autores que han desarrollado expresiones matemáticas que establecen relaciones entre las diferentes variables del proceso, se encuentran Iwasaki, Mackrle, Shekhtman, Deb, Yao, Payatakes, Habibbian, Ginn, Adin y Rebhun, Mintz y Krisful, Ives y Clough, Camp y Stein, O'Melia y Stumm, Maroudas y Einsenklan, etc.

2.4.5 Parámetros de diseño de filtros

Existen varios factores que, en conjunto, son responsables del comportamiento del filtro. La eficiencia de la filtración generalmente se mide con el parámetro de turbiedad (la NOM establece 5 UTN como límite).

Por otra parte, la velocidad de filtración es inversamente proporcional a la eficiencia del filtro. La velocidad V_F en que pasa el agua por el medio filtrante se mide como tasa de filtración o carga superficial q_F , (cociente entre el caudal Q y el área filtrante A_F) con la siguiente expresión:

$$q_F = \frac{Q}{A_F} = v_F \quad (2.19)$$

La tasa de filtración se mide normalmente en $m^3/m^2/d$, mientras que la velocidad de filtración suele indicarse en m/hr o cm/s.

El medio filtrante también influye en la eficiencia de la filtración ya que ésta es inversamente proporcional al diámetro de las partículas del filtro.

Las características físicas y químicas de la suspensión afectan el comportamiento de los filtros y la turbiedad del agua que se produce de manera a veces más significativa que el tamaño y clase de medio filtrante que se usa.

De las características físicas, a mayor volumen de la partícula más rápido se llenan los poros del filtro y el gradiente hidráulico aumenta más rápidamente. Las fuerzas de Van der Waals aumentan con la densidad de las partículas. Además el tamaño de las partículas determina los tamaños de las mismas que son retenidas en el proceso.

Por el lado químico, a pH alto la concentración de iones (OH) es alta y por lo tanto el potencial zeta es más electronegativo. A pH bajo predominan los iones H^+ y por lo tanto el P.Z. tiende a ser positivo. En otras palabras a mayor pH el P.Z. es más electronegativo y la turbiedad va disminuyendo hasta un valor mínimo, a partir del cual vuelve a aumentar a medida que el pH sigue aumentando. Por lo tanto existe un valor óptimo de pH para filtrar el agua.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

En general los mecanismos físicos y químicos de la filtración se aceleran a mayores temperaturas.

2.4.6 Retrolavado de los lechos de filtrado

El filtro sólo puede producir agua con determinada calidad durante un periodo de tiempo fijo, a partir del cual empiezan a quedar impurezas en el agua filtrada. Esto se debe a que las partículas removidas en la parte superior del lecho filtrante forman un manto con las impurezas retenidas por la filtración que obstruye el paso del flujo e impide el uso de la parte profunda del filtro. Por eso, el medio poroso debe regenerarse periódicamente dándole un retrolavado a presión para desalojar esas impurezas y así restaurar la eficiencia del proceso. El momento en que el filtro debe retrolavarse se llama punto de rotura. Las impurezas son enviadas al sistema de drenaje.

Al principio de la filtración, es decir cuando el filtro está limpio (ya sea nuevo o después de haberlo lavado), éste tiene un periodo inicial de maduración en que la turbiedad del agua filtrada es alta. Por ello se desecha el agua filtrada durante los primeros 3 a 5 minutos. Después sigue un periodo de buena calidad que se debe a que las impurezas (hasta cierto punto) contribuyen a que se adhieran más partículas a los granos del filtro. Por último se da el paso de las impurezas a través del lecho como se muestra en la siguiente figura.

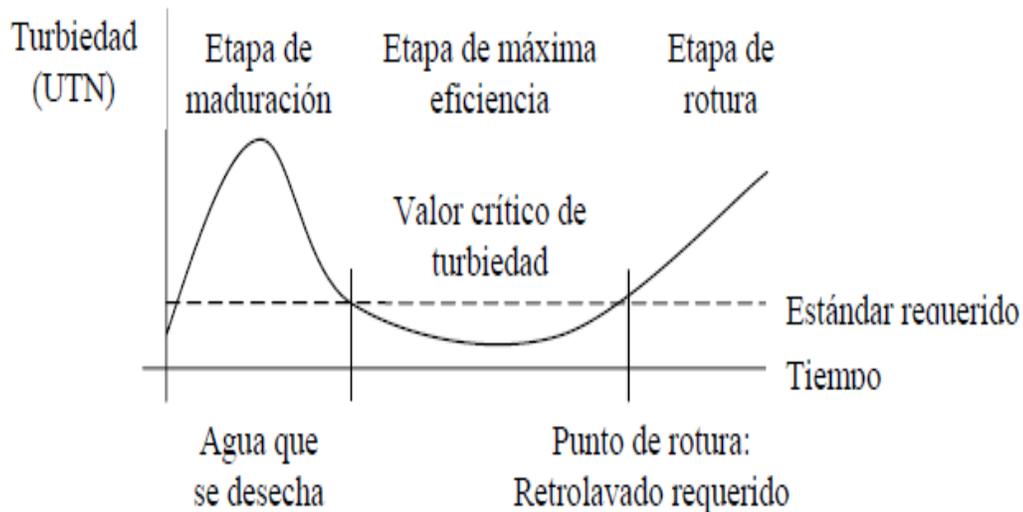


Figura 2.15 Forma de trabajo de un filtro



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Otra razón por la que se lava el filtro es para disminuir la pérdida de carga producida por la fricción que el fluido sufre al atravesar los poros del lecho filtrante. Al comenzar la operación del filtro, los granos del lecho están limpios y la pérdida de carga se debe solamente al tamaño, forma y porosidad (características hidráulicas) del medio filtrante y a la viscosidad y velocidad del agua. Las partículas que se remueven del agua van poco a poco recubriendo los granos del lecho incrementando sus diámetros y disminuyendo su porosidad inicial, con lo cual la pérdida de carga se incrementa debido a la disminución del área de paso del flujo. Se observa entonces que existe una pérdida de carga inicial y una pérdida de carga por colmatación que es función del tiempo.

Se suele retrolavar cuando la pérdida alcance de 6 a 9 ft. El agua pasa a través del lecho de filtrado debido al efecto combinado de una carga positiva y un efecto de succión proveniente del fondo.

En general, un filtro rápido se debe lavar una vez cada 24 horas con una tasa de 15gpm/ft² por 5 a 10 minutos.

El lavado se puede hacer:

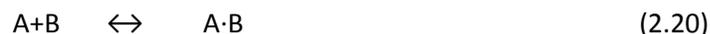
- Raspando las capas superficiales, lavándolas por separado y volviéndolas a colocar en el filtro (para filtros lentos).
- Invertiendo el sentido del flujo en el filtro, inyectando agua a presión en los drenes y recolectándola en la parte superior (para filtros rápidos). Esta operación dura unos 5 a 15 minutos más o menos.

2.5 Adsorción

2.5.1 Definiciones generales

En las interfaces de un sistema, la concentración de la sustancia (ya sea líquida o gaseosa) en la superficie es mayor que en el volumen total. Este fenómeno se llama *sorción* y la sustancia (ya sea líquida o gaseosa) en la cual se efectúa dicho fenómeno es el *sorbente*. La sorción abarca varios fenómenos, entre los más importantes destacan la *absorción* y la *adsorción*.

- La *absorción* es el proceso en el cual la sustancia es succionada hasta el *Interior* del *sorbente* y allí mantenida. Por ejemplo, la disolución de un gas en el volumen de un líquido.
- La *adsorción* es la remoción, por adherencia, de las impurezas (líquidos, gases, materia suspendida, coloides, moléculas, átomos e iones disueltos) de la sustancia en la *superficie* (que incluye los poros o superficie interna) del *sorbente* (interfase entre las dos fases). Este proceso es sumamente necesario e imprescindible para una planta purificadora de agua. Se puede representar con la siguiente reacción química:





CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Donde A es el adsorbato o sustancia adsorbida, B es el adsorbente y A·B es el compuesto formado con la adsorción.

2.5.2 Tipos de adsorbentes y de adsorción

Para el tratamiento de agua se usan diversos adsorbentes como:

- Carbón activado
- Resinas adsorbentes de intercambio iónico
- Óxidos metálicos
- Hidróxidos
- Carbonatos
- Alúmina activada
- Arenas

La adsorción es gobernada por una atracción electro-química y no por un proceso mecánico. Aun así, se le considera como un tipo de filtración muy fina. Las fuerzas moleculares en la superficie del adsorbente están en un estado de insaturación. Según la naturaleza del enlace de adsorción, ésta puede ser física, en la cual las moléculas están unidas a la superficie por fuerzas físicas o de dispersión, o química, en la que las fuerzas de adsorción son de naturaleza química, y por lo tanto conocida como quimisorción.

2.5.3 Isotermas de adsorción

2.5.3.1 Definición

La capacidad de adsorción está definida en base a las isotermas de adsorción en disolución. La isoterma de adsorción es la relación de dependencia, a una temperatura constante, de la cantidad de adsorbato adsorbido por peso unitario de adsorbente, con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio.

2.5.3.2 Obtención experimental

Para obtener la isoterma de un determinado adsorbato se realizan experimentos en los cuales una solución de concentración C_0 conocida se hace pasar por un adsorbente de varios pesos. Después de la adsorción se mide la concentración de la solución filtrada C_e , y la diferencia de concentraciones es la cantidad de sustancia disuelta que ha sido adsorbida por el carbón. Esta diferencia se divide entre la cantidad de adsorbente utilizado y la relación obtenida representa la capacidad de intercambio en el equilibrio q_e , la cual se grafica contra la concentración de equilibrio C_e , que es la concentración (ideal) del adsorbato en la cual se detiene el proceso de adsorción, como se ve en la Figura 4.1:

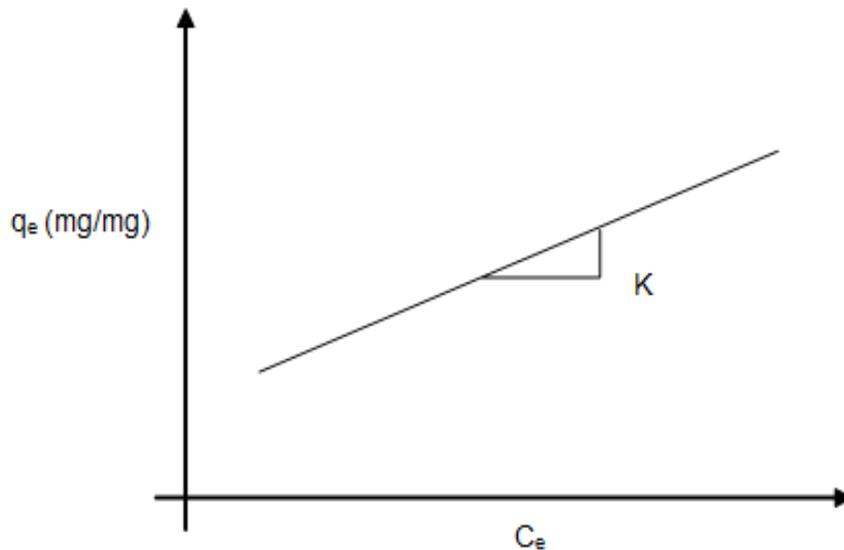


Figura 2.16 Isotherma

La pendiente de la isoterma es la constante K de equilibrio de la reacción (que depende de la temperatura), y representa la adsorptividad, que es la facilidad con la cual el adsorbato es adsorbido. Cada adsorbato tiene una adsorptividad diferente, por lo cual es muy difícil hacer el diseño de un filtro de carbón activado en base a esta consideración. Así surge el concepto de carbón orgánico total, que reúne las propiedades de muchos compuestos orgánicos en uno solo, con fines de diseño.

Existen muchos compuestos cuya adsorción podría continuar por años y no parar. Es entonces prácticamente imposible alcanzar el equilibrio para esos compuestos y, por lo tanto, C_e . Es por esto que no se suele buscar la isoterma de un compuesto con fines de diseño.

2.5.3.3 Modelos matemáticos

Se ha intentado en muchas ocasiones desarrollar ecuaciones o modelos matemáticos que se ajusten a las distintas isotermas experimentales. Las ecuaciones que se usan más frecuentemente son las propuestas por Langmuir, Freundlich y Brunauer-Emmet y Teller.

2.5.3.3.1 Langmuir

Es una de las ecuaciones más conocidas y mejor fundamentadas. Se admite generalmente para la quimisorción y para la adsorción física a presiones bajas y temperaturas moderadamente altas. Su ecuación general es:



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

$$\frac{c_s}{q_s} = \frac{1}{QK} + \frac{c_s}{Q} \quad (2.21)$$

donde Q es la constante relacionada con los lugares ocupados y libres en la superficie del adsorbente.

2.5.3.3.2 Freundlich

Se usa para presiones bajas. Expresa la relación entre la concentración en el carbón y la concentración en la solución. Su ecuación general viene dada por:

$$q_s = K(C_s)^{1/n} \quad (2.22)$$

donde n es una constante adimensional que depende de la temperatura.

2.5.3.3.3 Brunauer-Emmet y Teller (BET)

Su ecuación describe muy satisfactoriamente los distintos tipos de isotermas encontradas experimentalmente. La superficie que le corresponde a un gramo de adsorbente (superficie específica) puede encontrarse así:

$$S = a_m W_m N_A \cdot 10^{-20} \quad (2.23)$$

donde S = superficie específica (m²/gr)

a_m = capacidad de monocapa (mol/gr)

W_m = superficie que ocupa una molécula en la superficie (angstroms²)

N_A = número de Avogadro = 6.023·10²³ mol⁻¹

Se puede usar la isoterma de cualquier sustancia para determinar la superficie específica si se conoce la superficie que ocupa la molécula del adsorbato en un adsorbente dado.

2.5.4 Carbón activado

El carbón activado es un material natural que tiene una superficie específica de 500 a 1500 m²/g. La capacidad adsorbente del carbón activado es tal, que 1 gramo puede adsorber aproximadamente otro gramo de gases y líquidos. Químicamente está compuesto por carbono, oxígeno, hidrógeno y cenizas.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

El carbón activado adsorbe:

- contaminantes orgánicos
 - colores, olores y sabores desagradables
 - volátiles
 - insecticidas, pesticidas, plaguicidas, herbicidas, detergentes
 - derivados del petróleo
 - compuestos con trihalometanos
 - compuestos fenólicos
- sustancias activas al azul de metileno
- sustancias halogenadas (I, Cl, Br, H, F)
- ozono residual
- sólidos pesados (plomo, mercurio)
- gases
- turbiedad
- materia disuelta
- algas

Los compuestos orgánicos volátiles pueden causar (a altas concentraciones) problemas psicológicos como depresión, decaimiento y estupor; además pueden irritar o atacar las membranas mucosas. De ahí la importancia de eliminar todo este tipo de compuestos orgánicos.

Hay dos tipos de color: el aparente, causado por sólidos suspendidos y el verdadero, producido por sólidos disueltos. Los residuos orgánicos, tintes, colorantes, óxidos de hierro y de manganeso, etc., son compuestos que producen color y por lo tanto son de interés para los procesos de purificación del agua. Las principales razones por las que debemos remover el color del agua son por estética, porque el color eleva la demanda de desinfectante y por la posible formación de productos secundarios de la desinfección. Para medir el color en el laboratorio se compara el color del agua con estándares preestablecidos, y las unidades son TCU (unidades de color verdadero). Un TCU es el color producido por 1 mg/L de platino.

Los minerales, metales y compuestos derivados de actividad biológica pueden producir olor y sabor. Hay que remover el olor y sabor del agua por razones estéticas y por la presencia de compuestos con potencial cancerígeno. Para medir estas cantidades se usa la cromatografía de gases y líquidos.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.5.5 Obtención del carbón activado

2.5.5.1 Materia prima

Para obtener el carbón activado se pueden usar diversos materiales orgánicos como carbón vegetal, madera, hulla, serrín, turba, lignito, caña de azúcar, residuos celulósicos, hueso de aceituna, cáscara de coco, nueces, arroz, etc., mazorca de maíz, melaza, petróleo, etc. Debido al pobre rendimiento en la producción de carbón activado, se usa la materia prima que esté en mayor disponibilidad, al menor costo y en grandes cantidades en un área geográfica determinada.

2.5.5.2 Procesos de fabricación

La fabricación del carbón activado puede hacerse por procesos físicos o químicos. Ambos procesos incluyen carbonización y activación. La carbonización es la transformación de la materia prima a carbón. La activación es el proceso de oxidación lenta del carbón resultante por medio del cual se forman millones de poros microscópicos (cuya dimensión varía entre una millonésima y una diez millonésima de milímetro) en la superficie del carbón, que adhieren los contaminantes presentes en el agua.

En la activación física, la carbonización se realiza normalmente en ausencia de oxígeno a temperaturas menores de 700°C. La activación se hace inyectando gases oxidantes como vapor de agua o anhídrido carbónico (CO₂) a temperaturas de 800 a 950°C. Estos compuestos son los que crean los poros al oxidar parte de las moléculas de carbono. La activación química combina las etapas de carbonización y activación (todo el proceso a una temperatura de 500°C más o menos). El cloruro de zinc (ZnCl₂) y el ácido fosfórico (H₃PO₄) son agentes deshidratantes que aumentan la capacidad de adsorción. El ácido fosfórico retarda la oxidación del carbón, mientras que el carbonato de sodio la acelera, lo cual influye en las propiedades del producto final.

2.5.6 Tipos de carbón activado

Según la materia prima de la cual se obtuvo, el carbón activado puede ser vegetal o de hueso. El carbón de hueso tiene aproximadamente 10% de carbono, mientras que el vegetal hasta 98%.

Según su uso el carbón activado se puede dividir en:

- *Carbón activado para adsorber gases.* Sus poros son más pequeños que los del carbón para líquidos. Se usan como materias primas cáscaras de nueces, carbón y hulla principalmente.
- *Carbón activado para el tratamiento de líquidos.* Muchos carbones para gases no son efectivos para tratar ciertos líquidos. Los materiales menos densos son más apropiados para tratar líquidos.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Dependiendo si es sometido a un proceso de granulación o pulverización, el carbón activado se puede presentar como:

- *Carbón Activado en Polvo o PAC (Powdered Activated Carbon)*. Es un polvo fino negro. Se usa en la elaboración de medicamentos antidiarreicos y adsorbente intestinal.
- *Carbón Activado Granular o GAC (Granular Activated Carbon)*. En granos de hasta 2mm se usa en los filtros de columna o cama para el tratamiento de agua. Es un proceso más fácil, pero más caro, que el del carbón activado en polvo. Actualmente el GAC gana importancia ante el PAC, por lo que es el GAC el que se estudia en este capítulo.

2.5.7 Usos del carbón activado granular

En la purificación de agua el GAC se puede usar en sustitución de los filtros de arena, actuando como filtro mecánico (es decir, removiendo las partículas por obstrucción) y como adsorbente, o bien como complemento de éstos (en este caso sólo funciona como adsorbente con una mayor eficiencia en la retención de micro contaminante).

Sin embargo, normalmente el GAC se usa después de haber filtrado el agua por lechos de arena. En este caso el GAC se empaca en torres filtrantes a través de las cuales el agua se infiltra lentamente según la dirección de su flujo. Esto se puede hacer de dos maneras:

- Sistema activo: el agua pasa a través del filtro de CA, aunque no es la forma más eficiente de usarlo.
- Sistema pasivo: el agua no incide directamente contra la masa de CA, sino se mueve lentamente entre sus granos y tiende a ocupar de forma efectiva sólo una parte del lecho filtrante. La adsorción se da lentamente y solamente en la superficie externa de los granos de carbón. Aunque se tarda más en eliminar los contaminantes se adsorbe lo más posible. Es más eficiente y funciona con la mínima atención.

2.5.8 Eficiencia de los filtros de carbón activado granular

La eficiencia del carbón activado en la adsorción de compuestos presentes en el agua, y por lo tanto la cantidad a utilizar y su vida útil, es función de diversos factores como:

- Concentración de GAC. Es la cantidad de GAC requerido por volumen de agua filtrada. Es una medida de la eficiencia del GAC para adsorber los contaminantes del agua. El porcentaje de remoción disminuye al aumentar la concentración de CA, como lo muestra la gráfica siguiente:



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

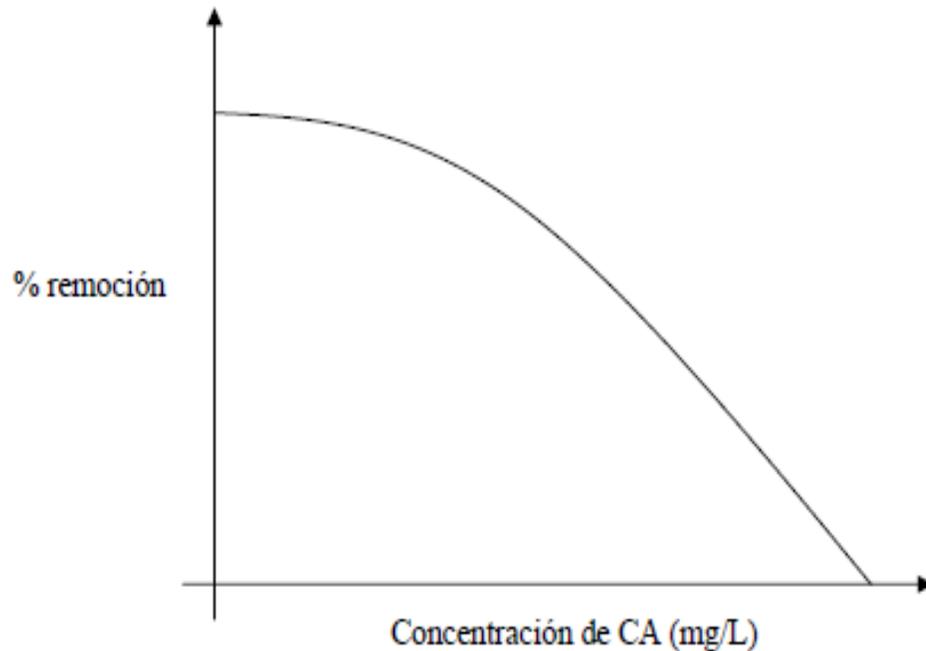


Figura 2.17 Relación entre el % de remoción y la concentración de CA aplicado

- Superficie específica: varía de unos cientos a más de 1500 m/g. Está en función del tamaño de los granos. Entre más fino sea el grano, tendiendo a pulverizado, mayor será la superficie de adsorción.
- Concentración de cloro residual u otros compuestos orgánicos, ya que el cloro compite fuertemente con los componentes orgánicos por los poros "disponibles" del carbón activado para la adsorción.
- pH del agua. Si es alto se favorece la adsorción de iones negativos, y si es bajo se favorece la adsorción de compuestos ácidos.

Existen otros indicadores, que indirectamente, proporcionan una medida de la capacidad de adsorción del carbón, como los siguientes:

- Número de Yodo
- Número de azul de metileno
- Valor de adsorción de fenol
- Actividad de tetracloruro de carbón

Sin embargo, el mejor indicador del desempeño del CA son las isotermas.

2.5.9 Parámetros de operación de un filtro

El diseño de los filtros de CA depende de la calidad del agua, de la disponibilidad de espacio y de las etapas de tratamiento necesarias.

Los parámetros de operación de un filtro de CA son:

- tiempo de contacto
- granulometría del CA
- altura del lecho

Si se hace un corte longitudinal de un filtro de CA, y sobre esa figura se construye un sistema de ejes coordenados (L =longitud del filtro, C_0 =concentración inicial o de entrada y C =concentración a la salida del filtro), se tiene lo siguiente:

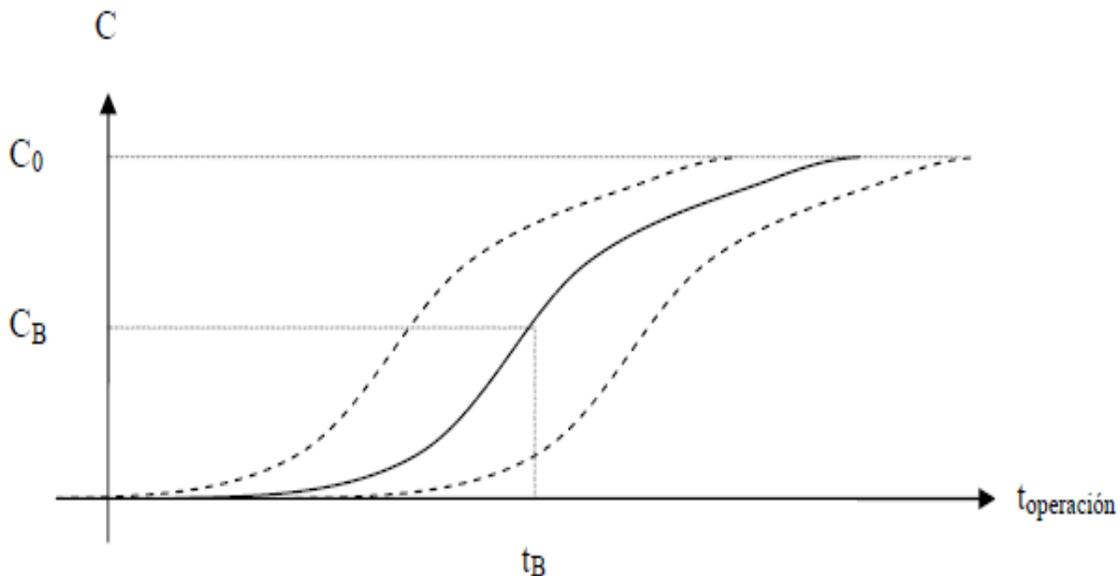


Figura 2.18 Influencia del tiempo de operación del filtro sobre la concentración de salida

Las curvas punteadas representan el comportamiento de otros contaminantes. Estas curvas se mueven a la izquierda o a la derecha en función de la adsorptividad K de la sustancia. Si su adsorptividad es menor (lo cual indica que se adsorben con mayor dificultad), la curva se mueve a la izquierda, y si K es mayor, entonces la curva se mueve a la derecha.

Normalmente esta gráfica se sustituye por una muy similar. En el eje de las Y se grafica la concentración de salida C , dividida entre la concentración inicial, C_0 , que es constante a lo largo del tiempo. Esta relación C/C_0 representa el % de remoción medido a la salida del filtro. En el eje X se sustituye el tiempo de operación por el número de “filtros” de agua que han pasado por el filtro, entendiéndose por “filtro” al volumen de agua que cabe en el filtro. Esto resulta en la misma gráfica, ya que en realidad el “tiempo de operación” empleado en la gráfica anterior, se refiere al tiempo utilizado, es decir, las veces que el filtro se ha usado, y no al concepto de tiempo como

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

instantes, minutos, horas, meses, etc., que no tendría ningún sentido si el filtro durante todo ese lapso no estuviera en operación.

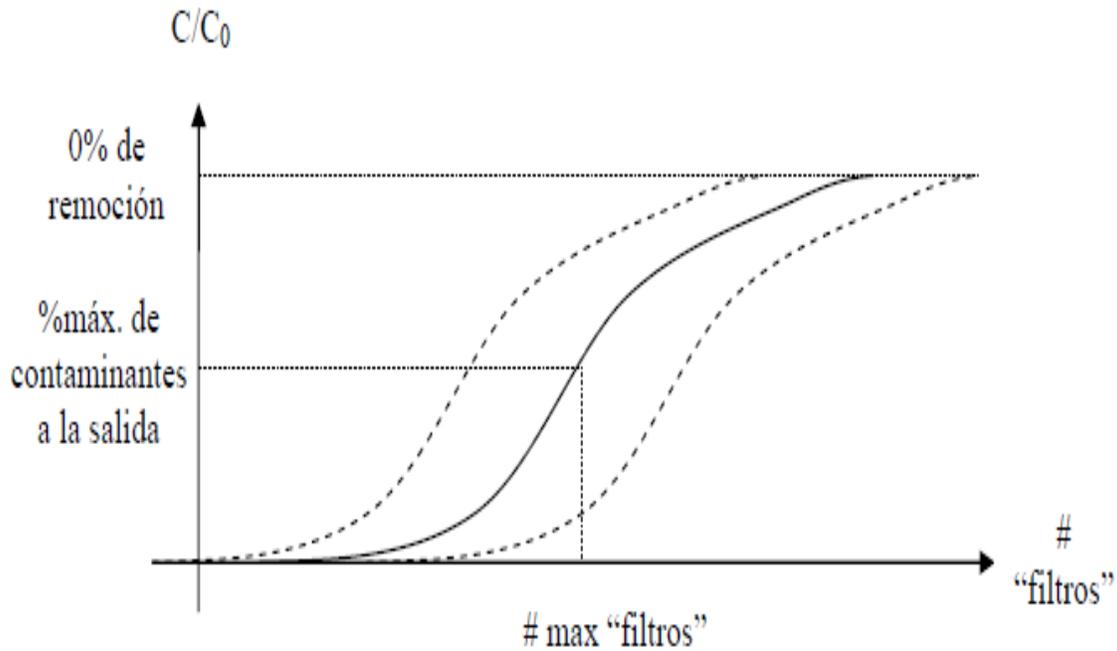


Figura 2.19 Relación entre el número de filtros y el % de remoción a la salida

Aquí se puede observar que de acuerdo al % de remoción deseado, se puede encontrar el # correspondiente de filtros necesarios para lograr el objetivo. Esto se puede hallar en diversas tablas.

Ya que se conoce el volumen del filtro y el flujo que pasa a través de él, es fácil calcular el tiempo que tarda el agua en pasar a lo largo del mismo:

$$t_{\text{retención}} = \frac{\text{Vol}_{\text{filtro}}}{Q} \quad (2.24)$$

El número máximo permisible de “filtros” para lograr el % de remoción deseado representa el volumen de diseño. Ya que el flujo que pasa a través del filtro es constante, se puede obtener el tiempo máximo de operación de un filtro análogamente:

$$t_{\text{operación}} = \frac{\#\text{filtros}_{\text{máx}}}{Q} \quad (2.25)$$



2.5.10 Regeneración de los filtros de carbón activado

El CA nuevo adsorbe rápida y eficientemente la materia disuelta en el agua, pero a medida que pasa el tiempo se va agotando esta capacidad de adsorción ya que el filtro se satura. Esta limitación de su capacidad de adsorción se debe contrarrestar reemplazando periódicamente los filtros.

Para probar la efectividad del carbón cuando ya ha transcurrido un cierto tiempo de uso, se puede colocar en la entrada del agua al filtro unas cuantas gotas de azul de metileno. Si el agua sale del filtro cristalina y sin coloración, el carbón permanece activo. En cambio, si el agua sale ligeramente azulada, el carbón está agotado o a punto de agotarse y por lo tanto debe renovarse. La duración de la vida útil del CA depende de la cantidad de sustancias que contenga el agua.

2.5.11 Uso del carbón activado en polvo (PAC)

Hay 2 formas de aplicar el PAC. La primera consiste en usar el carbón seco, mojarlo y aplicarlo al agua. La otra forma consiste en hacer una suspensión con el PAC en un barril y aplicarla al sistema.

Cuando no hay filtros de arenas en la purificación, se debe aplicar PAC en suspensión directamente a los depósitos del agua. La suspensión se distribuye en la superficie del depósito de la manera más uniforme posible, es decir, se debe aplicar mayor cantidad de la suspensión de PAC en las áreas donde el depósito es más profundo. El PAC se asienta completamente en 1 ó 2 días.

Para corregir problemas de sabor las dosis pueden ir desde 1 hasta 1200 libras por millón de galones de PAC. 80% de los olores y sabores pueden ser removidos con dosis de 10 a 40 libras por millón de galones de CA.

2.6 Desinfección con ozono

2.6.1 Ozono

El ozono (O₃) es una forma alotrópica del oxígeno elemental que en lugar de dos átomos tiene tres. Es un gas de color azulado y olor fuerte, más pesado que el aire. Su masa molecular es de 48, su densidad es de 2144 g/L. Se encuentra en estado natural diluido en grandes masas de oxígeno. La capa de ozono (ozonósfera) está comprendida en una región entre los 25 y 30 Km. de altitud. Su presencia en la estratosfera es fundamental en nuestro ecosistema, ya que filtra la radiación solar y absorbe la fracción ultravioleta que de otra manera alcanzaría la superficie terrestre.



2.6.2 Uso del ozono como desinfectante

El ozono realiza la misma función que el cloro, es decir, desinfección del agua por oxidación química. El ozono es actualmente, tanto por su costo como por su eficiencia como desinfectante, el más serio competidor del cloro.

El ozono es un desinfectante químico con una elevada capacidad oxidante que sobrepasa a la del cloro libre o combinado. Mata a las bacterias e inactiva los virus, quistes, hongos, toxinas, algas y protozoos, algunos de los cuales no son sensibles a la desinfección con cloro.

Debido a su gran poder oxidante, el ozono además de desinfectante se utiliza en la oxidación de hierro y manganeso y para remover materia orgánica (fenoles, pesticidas, detergentes), inorgánica (cianuros, sulfuros, nitritos), sales pesadas, olores, colores y sabores. También inhibe el crecimiento de hongos y algas y reduce la turbiedad. El ozono es el mayor oxidante conocido después del flúor, ya que su potencial electroquímico (E) es de 2.07 V (el del cloro gas es de 1.36 eV). Además actúa de manera rápida.

El ozono destruye los microorganismos en unos cuantos segundos por un proceso llamado destrucción de celda. La ruptura molecular de la membrana celular provocada por el ozono dispersa el citoplasma celular en el agua y lo destruye, por lo que la reactivación es imposible.

Debido a su elevada reactividad, el ozono se desintegra rápidamente en el agua de forma que su efecto residual se considera prácticamente nulo. A diferencia del cloro, no deja olor ni sabor después del tratamiento. Aún así, a igualdad de residuales, el ozono es mucho más activo que el cloro. Sin embargo, debido a esta falta de un residual persistente, la ozonificación generalmente se acompaña de otro proceso de desinfección como la cloración.

2.6.3 Generación del ozono

El ozono se produce a partir de oxígeno aplicándole una descarga de alto voltaje que lo convierte en ozono. Esto se logra haciendo pasar aire seco (u oxígeno puro proveniente de un generador de oxígeno) entre los electrodos de un generador tipo corona, como se muestra en las figuras 6.1 y 6.2. Entre dichos electrodos hay un tubo dieléctrico que transporta la electricidad por inducción por el que se hace pasar el oxígeno que recibirá la descarga eléctrica constante (llamado efecto corona) y que se ha generado en un transformador. Este hecho produce la oxidación del oxígeno (las moléculas de oxígeno del aire son excitadas lo suficiente para descomponerse en oxígeno atómico), y las colisiones entre los átomos provocan la formación del ozono. Los generadores de ozono son equipos bastante costosos, altamente sofisticados, de difícil mantenimiento y de gran consumo de energía eléctrica. El ozono así generado es fuertemente inestable. Se descompone en oxígeno diatómico (O_2) al contacto con sustancias químicas y por la acción del calor.

CAPITULO II.- PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Los voltajes requeridos son de 110 voltios para generadores pequeños y 220/440 para generadores grandes. Este voltaje es elevado a 25000 voltios con frecuencias de 1000 Hz.

Aproximadamente el 2% del oxígeno presente (en peso) en la corriente de aire (si se usa aire para la producción) se transforma en ozono. Si se usa oxígeno puro como fuente, entonces se puede generar una corriente que contenga del 5 al 7% (Vol. /Vol.) de ozono.

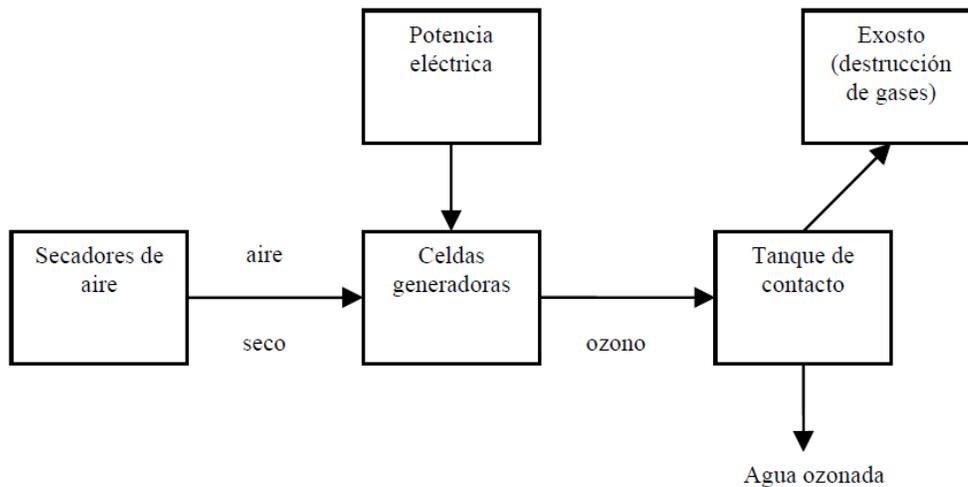


Figura 2.20 Diagrama de la generación de ozono y contacto con el agua (Arboleda, 2000).

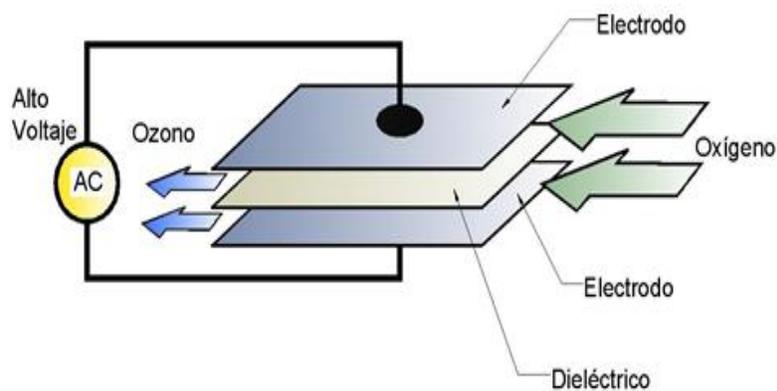


Figura 2.21 Detalle de las celdas generadoras de ozono (Arboleda, 2000).



CAPITULO II.- PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.6.4 Productos derivados de la desinfección con ozono

Al contacto con el agua, el ozono reacciona con iones de hidroxilo (OH^\cdot) para formar radicales orgánicos y radicales hidroxilo (OH) que aceleran la descomposición del ozono. Debido a esto la vida del ozono en el agua es muy corta, del orden de segundos o minutos. Si el agua contiene además altas concentraciones de bromuros, éstas pueden desacelerar la descomposición del ozono y formar productos secundarios como los bromatos.

Aunque el ozono no produce trihalometanos, sí tiene otros productos de la oxidación que son tan numerosos como los del cloro y se conoce menos sobre su efecto en la salud. Los bromuros reaccionan con el ozono produciendo ácido hipobromoso, hipobromito y bromatos (BrO_3^-). La siguiente figura resume la formación de los bromatos, que es muy importante ya que éstos son subproductos potencialmente cancerígenos.

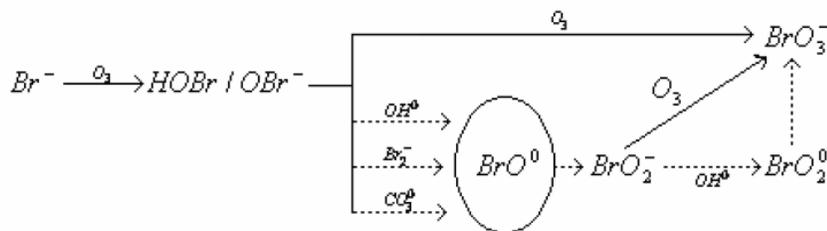


Figura 2.22 Formación de los bromatos (AWWA, 1999) Nota: Las líneas continuas representan reacciones con ozono y las líneas punteadas reacciones con radicales.

El ozono reacciona rápidamente con los cianuros formando productos que hasta ahora no han sido plenamente identificados y caracterizados.

Otra de sus principales desventajas es que pequeñas cantidades de manganeso (0.05 mg/L) producen precipitación y flotación de las partículas minerales oxidadas.

2.6.5 Factores que influyen en la dosis requerida

2.6.5.1 Temperatura

Si es baja favorece la acción germicida del ozono, ya que se disuelve mejor en el agua y permanece más tiempo. Por otro lado, a temperaturas elevadas el ozono ataca mejor a las bacterias porque tienen menos resistencia a esporular y romper la espora. Sin embargo, la temperatura influye menos en la desinfección que en el caso de la cloración.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.6.5.2 pH

También es menos influyente que en la desinfección con cloro. Afecta la solubilidad y estabilidad del ozono residual. El ozono disuelto es más estable a pH bajos.

2.6.5.3 Sistema de aportación (de contacto) de ozono

Las características que promueven la transferencia eficiente del ozono al agua (particularmente la agitación intensa), propician condiciones hidráulicas que disminuyen la eficiencia en la desinfección (corto-circuitos).

2.6.5.4 Demanda inicial de ozono

Es la variable más importante, ya que determina qué cantidad de ozono es necesario dosificar para lograr el Ct propuesto.

El ozono se transfiere de la fase gaseosa al agua de acuerdo a la ecuación siguiente, que representa su tasa de transferencia:

$$\frac{dC}{dt} = -K_1CD - K_2C \quad (2.26)$$

Donde:

- C (mg/L) = concentración predominante de ozono en el agua, que es función del tiempo y de la demanda inicial (a diferencia del caso del cloro, en que la C es constante).
- K1 (min⁻¹) = coeficiente de la primera fase de la transferencia (gráficamente es la pendiente de la primera parte de la gráfica de C vs. t para el ozono).
- -K2 (min⁻¹) = coeficiente de la segunda fase de la transferencia (min) (pendiente de la segunda parte de la gráfica de C vs. t)
- D = Demanda inicial de ozono

El primer término de la parte derecha de esta ecuación diferencial constituye la demanda inicial de ozono, mientras que el segundo término es la descomposición natural del mismo. Se puede despreciar la demanda inicial de ozono, aunque con ello se incurre en un error, el cual, a medida que aumenta el tiempo, es relativamente menor. Gráficamente, esto queda representado así:

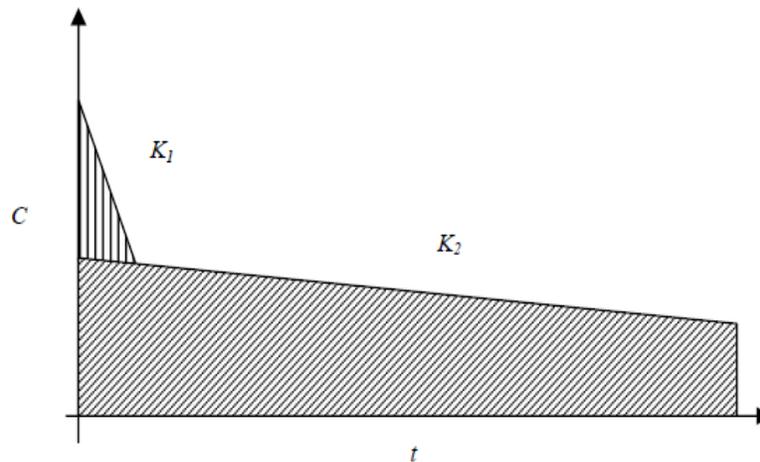


Figura 2.23 Partes de la curva de demanda inicial de ozono.

En la figura anterior se observa que el área correspondiente a la primera fase de la transferencia es pequeña comparada con el área de la segunda fase, por lo cual se puede despreciar y así facilitar la resolución de la ecuación diferencial. Por lo tanto queda:

$$\frac{dC}{dt} = -K_2 C \quad (2.27)$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t -K_2 dt \quad (2.28)$$

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -K_2 t \quad (2.29)$$

$$C = C_0 e^{-K_2 t} \quad (2.30)$$

Al sustituir la ecuación 6.5 en la ecuación general $Ct = \int C dt$ queda la siguiente expresión, que se utiliza en la práctica para el diseño.

$$Ct = \int_0^t C_0 e^{-K_2 t} dt = \frac{C_0}{K_2} [1 - e^{-K_2 t}] \quad (2.31)$$

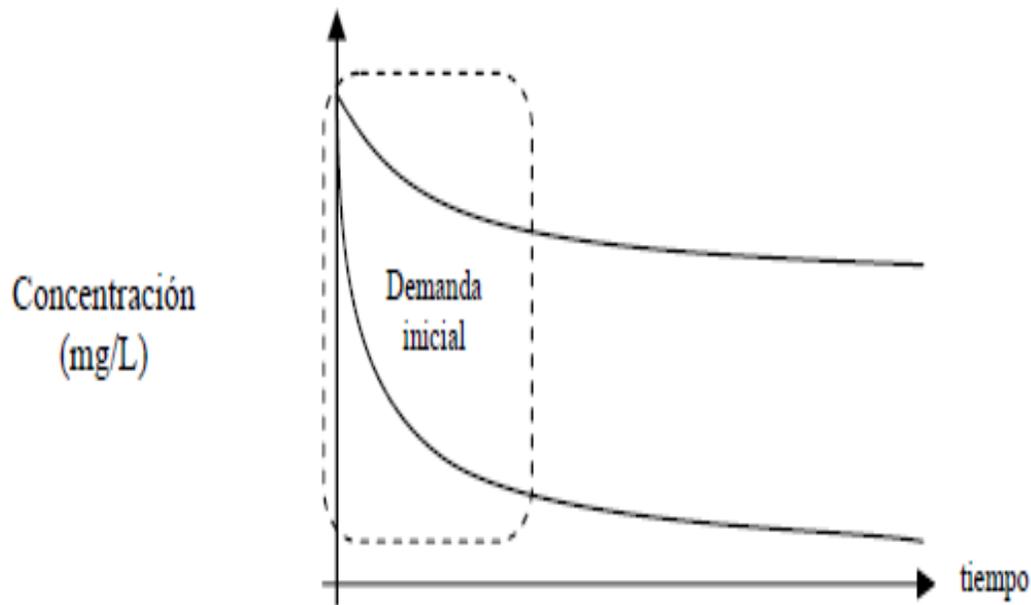


Figura 2.24 Demandas iniciales de ozono para diferentes concentraciones.

2.6.6 Parámetros de diseño

Las dosis de ozono necesarias para desinfectar el agua cambian según la calidad de ésta, por ejemplo:

- Para aguas subterráneas de buena calidad con baja turbiedad y contenido mineral: 0.25 a 0.5 mg/L (ó g/m)
- Para aguas superficiales de buena calidad bacteriológica y el ozono aplicado después de la filtración: 2 a 4 mg/L
- Para aguas superficiales contaminadas y con el ozono aplicado después de la filtración: 2.5 a 5 mg/L

Los tiempos de contacto requeridos para que el ozono inactive los microorganismos a estas dosis es de unos 4 minutos (puede variar desde unos segundos a algunos minutos), a diferencia de los grandes tiempos de contacto característicos de la desinfección con cloro.

Debido a la rapidez con que el ozono mata los microorganismos estos pequeños tiempos de contacto no crean mayor problema.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

En la Tabla 6.1 se enlistan algunas concentraciones de ozono disuelto que se requieren para inactivar 99% de algunos microorganismos.

Tabla 2.2 Concentraciones de ozono (mg/L) para inactivar 99% de diferentes microorganismos con un tiempo de contacto de 10 minutos y a 5 °C de temperatura.

Microorganismos	Concentración (mg/L)
Bacterias entéricas	0.01
Virus	0.10
Esporas	0.20

Fuente: Arboleda Valencia Jorge, «Teoría y Práctica de la Purificación del Agua», pp 57-66, Acodal, Mc Graw Hill, tercera edición, 2000.

2.6.7 Aplicación del ozono al agua

Debido al costo del ozono, se trata de maximizar la eficiencia de la transferencia del mismo. La transferencia del ozono generado en forma gaseosa al agua se puede hacer de distintas maneras:

- Para aplicaciones a baja escala:
 - Por medio de un difusor
 - Mediante tubos venturi
- Para aplicaciones a mayor escala:
 - Mediante tanques de contacto con burbujeo del ozono gas a contracorriente

El tubo venturi inyecta el gas en el agua vía un vacío. Su instalación es compacta y su rendimiento de hasta 90%. Usa un sistema de chorro de burbuja.

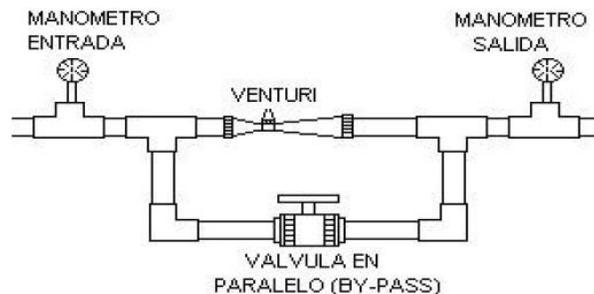


Figura 2.25 Instalación del tubo venturi (Arboleda 2000).

Un difusor en cambio, trabaja bajo presión, creando una columna de burbujas. Sus ventajas son un alto rendimiento, construcción simple y ventajas para altas velocidades de flujo (por ejemplo en sistemas de agua potable). Como desventajas tiene la superficie que requiere y la necesidad de edificios altos para aumentar la eficiencia.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

El tanque de contacto más común es un tanque con difusor a contracorriente. En este reactor el gas que contiene el ozono forma pequeñas burbujas al pasar por un medio poroso en el fondo del tanque. Al ascender las burbujas en el tanque, se transfiere el ozono de la fase gaseosa al agua.

El ozono es tóxico y corrosivo. En el aire concentraciones mayores de 1 mg/L respiradas durante un cierto tiempo producen daños en el sistema respiratorio. Concentraciones de 9 mg/L producen congestión y edema pulmonar que puede requerir varios meses para su recuperación. Por eso se debe prestar atención en los materiales usados en la construcción de las plantas que generan y usan ozono para el tratamiento de agua. El metal en contacto con el ozono debe ser acero inoxidable 304, y el material de las juntas debe ser alguna forma de polímero inerte como un fluorocarbono. Para los tanques se usa comúnmente concreto, pero las grietas deben rellenarse con un material inerte.

2.7 Desinfección con UV

2.7.1 Radiación ultravioleta

El espectro electromagnético comprende muchos tipos de radiación, cada uno de las cuales comprende un intervalo definido por una magnitud característica, que puede ser la longitud de onda (λ) o la frecuencia (f). La siguiente figura muestra las diferentes ondas del espectro electromagnético:

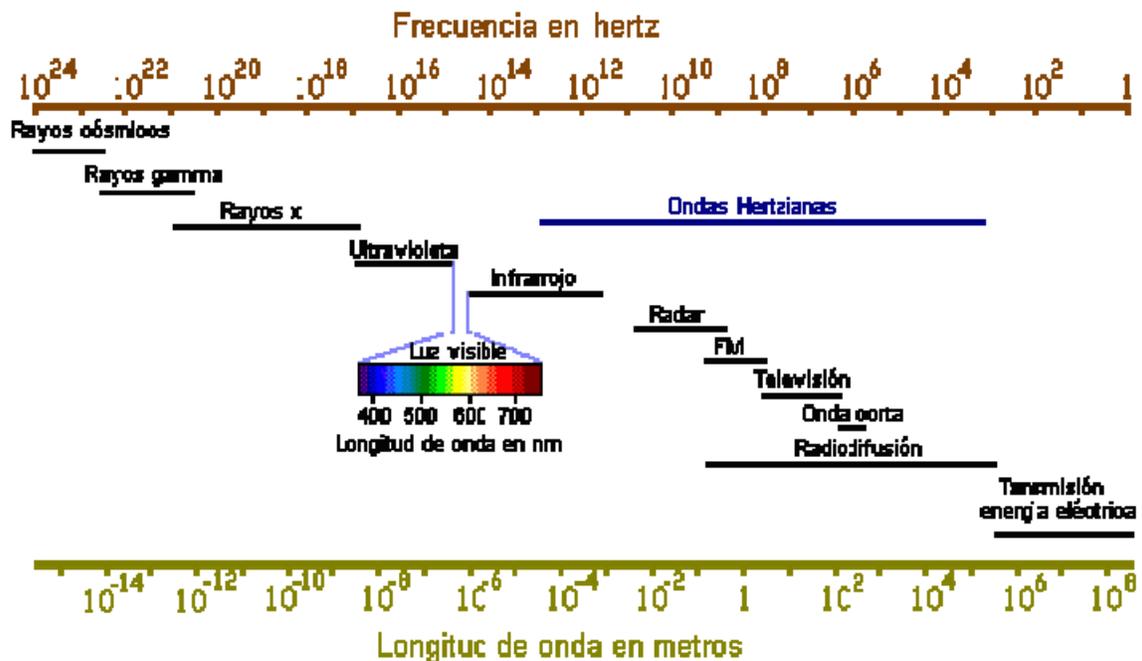


Figura 2.26 Espectro electromagnético (Edison. 2005).



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Los rayos UV son ondas electromagnéticas de corta longitud de onda, más corta (y por lo tanto de mayor frecuencia y energía) que la luz visible. Se extienden desde los 100 nm hasta los 400 nm. A pesar de estar fuera del espectro de luz visible por nuestros ojos (380 a 780 nm), es posible reconocer un fluorescente de UV debido a un colorante que llevan incorporado.

2.7.2 Clasificación de la radiación ultravioleta

La radiación UV consiste en rayos UV-A, UV-B y UV-C, según su longitud de onda:

La radiación UV-A tiene longitud de onda larga (entre 320 y 400 nm). Constituye el 98% de la radiación UV contenida en la radiación solar. Puede atravesar la capa de ozono, el vidrio y la dermis profunda de la piel.

La radiación UV-B tiene longitud de onda media (de 290 a 320 nm). Causa el mayor daño inmediato a la piel en la forma de bronceado. Es la principal causa de cáncer de piel. Se puede reducir notablemente a su paso en las nubes y en los lentes y ropa.

El tipo C tiene longitudes de onda corta (de 200 a 290 nm). Son los más cortos y los potencialmente más dañinos de los rayos UV. Estos son absorbidos por la estratosfera gracias a la capa de ozono. Sin embargo, existen lugares del planeta donde, debido a la contaminación, esta protección ya no es segura. Se usa para el tratamiento del agua, ya que la radiación UV de 253.7 nm es la que tiene mayor capacidad germicida.

2.7.3 Desinfección con UV

Cuando están expuestos a la luz del sol, se eliminan los gérmenes y las bacterias y los hongos se previenen de separarse. Este es un proceso natural de desinfección. Sin embargo, puede usarse más eficientemente aplicando la radiación UV de forma controlada. La desinfección con rayos UV es un proceso físico, a diferencia de la cloración y ozonificación que son procesos químicos. Se usa principalmente en piscinas y plantas de tratamiento de agua. No deja efecto residual, por lo que no se puede determinar en el agua la cantidad aplicada en forma fácil. No es aconsejable para acueductos.

El potencial de las reacciones con UV para producir subproductos orgánicos es insignificante ya que las intensidades requeridas para la desinfección con UV son menores que las que se requieren para causar efectos fotoquímicos. Sin embargo, dosis elevadas de UV pueden oxidar materia orgánica y formar, potencialmente, esos subproductos.

La radiación UV penetra la pared celular de los microorganismos y es absorbida por los materiales celulares, produciendo mutaciones en su ADN que resultan letales en los organismos unicelulares y que sin serlo de forma instantánea en otro tipo de organismos sí puede provocar su debilitamiento o detener su reproducción. Las bacterias, gérmenes, virus, algas y esporas mueren al contacto con la luz. El ADN de las células de los microorganismos absorbe la máxima cantidad de

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

UV cuando la longitud de onda de los rayos UV es de 254 nm. Esto hace que las células sean más susceptibles a sufrir alteraciones. Se puede observar en la siguiente figura:

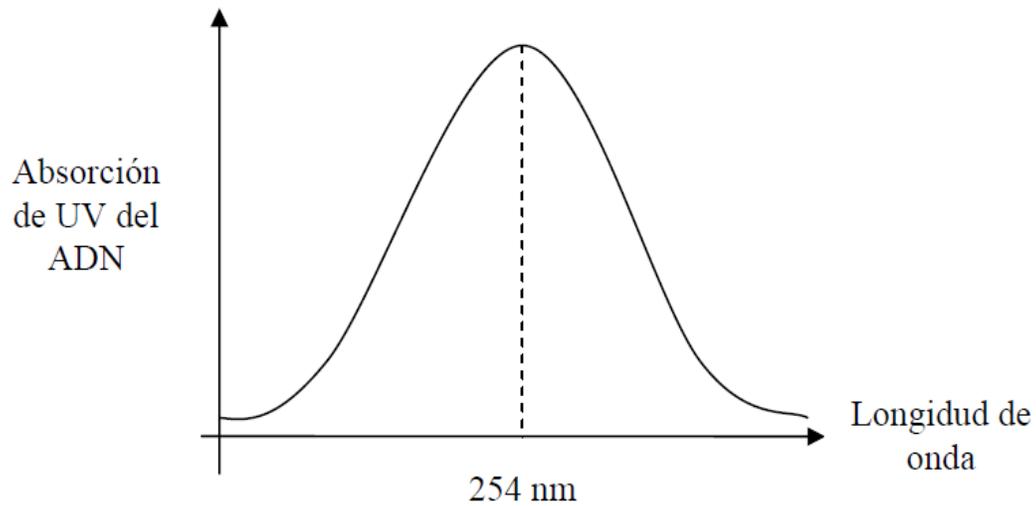


Figura 2.27 Absorción máxima de UV del ADN.

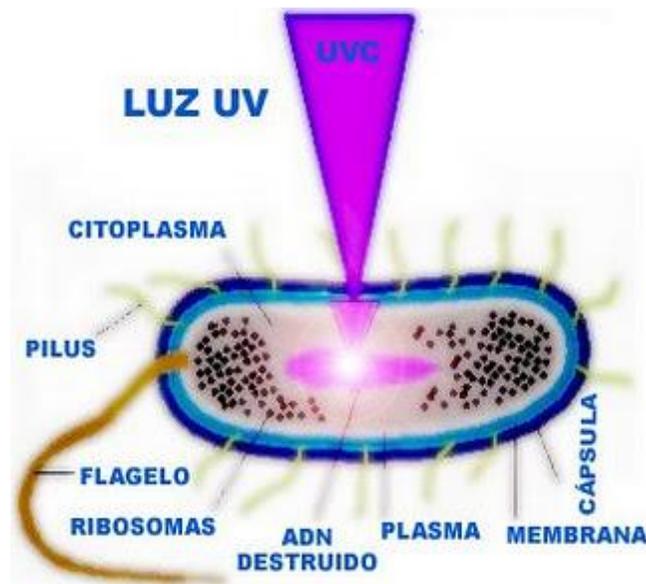


Figura 2.28 Destrucción de microorganismos por luz ultravioleta (Arboleda 2000).

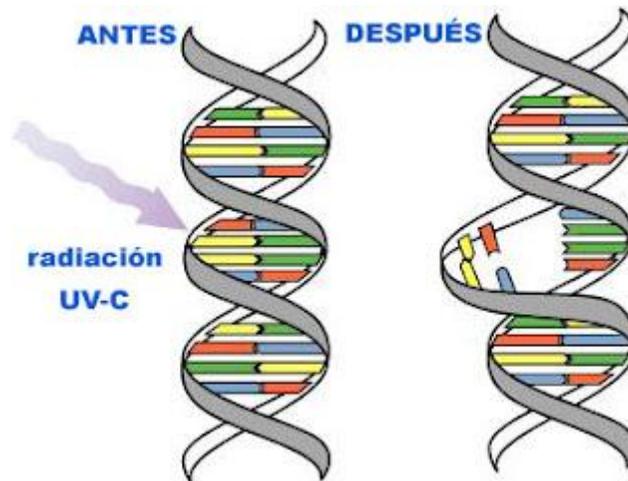


Figura 2.29 Antes y Después del la radiación por luz ultravioleta del ADN del microorganismo.

2.7.4 Factores que afectan la desinfección con UV

- *Temperatura.* La eficiencia de la lámpara aumenta con la temperatura, teniendo a los 40°C los mejores resultados. Aun así, el efecto de la temperatura en el desempeño de los rayos UV es menor que en los desinfectantes químicos como ozono y cloro.
- *pH.* Como el mecanismo de inactivación con UV es un proceso físico, el pH no afecta directamente la eficiencia de la desinfección. Sin embargo el pH puede afectar indirectamente la eficiencia de la inactivación al afectar las características de los materiales de adsorción de la luz UV.
- *Turbiedad.* La penetración de los rayos, y por lo tanto la eficiencia de la desinfección, depende de la turbiedad del líquido, ya que ésta podría proteger a los microorganismos de la radiación.
- *Distancia a la fuente de radiación.* La intensidad luminosa de la lámpara y por lo tanto la efectividad de la desinfección es inversamente proporcional a la distancia entre el punto de emisión de los rayos y el punto de contacto con el agua.

2.7.5 Uso de las lámparas de UV

La radiación UV se puede producir usando lámparas de vapor de mercurio (o más recientemente de antimonio) de baja presión e intensidad baja/alta o de media presión y alta intensidad. Es importante que las lámparas germicidas tengan las correspondientes protecciones, ya que el impacto de la radiación UV en los ojos tiene un efecto nocivo para la salud.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Las lámparas de presión baja generan un 85% de radiación de 254nm de longitud de onda, lo cual las hace muy eficientes. Las lámparas de presión media en cambio, generan entre un 7 y un 15% de radiación cerca de los 254nm.

Existen varias configuraciones físicas para las lámparas en la desinfección de agua. Las lámparas básicamente pueden estar sumergidas en el líquido o suspendidas fuera de él.

Lámparas sumergidas en el líquido. La lámpara de UV se aísla colocándola en el centro de un tubo de cuarzo (ya que el cuarzo es uno de los pocos materiales casi totalmente transparentes a la radiación UV). Esto es con el fin de evitar riesgos si el agua llegara a entrar en contacto con las conexiones eléctricas. Dentro de las lámparas hay reflectores que garantizan la radiación uniforme en la superficie. El agua circula alrededor de la lámpara, entrando por un extremo del tubo y saliendo por el extremo opuesto libre de gérmenes vivos. La siguiente figura ilustra esto:

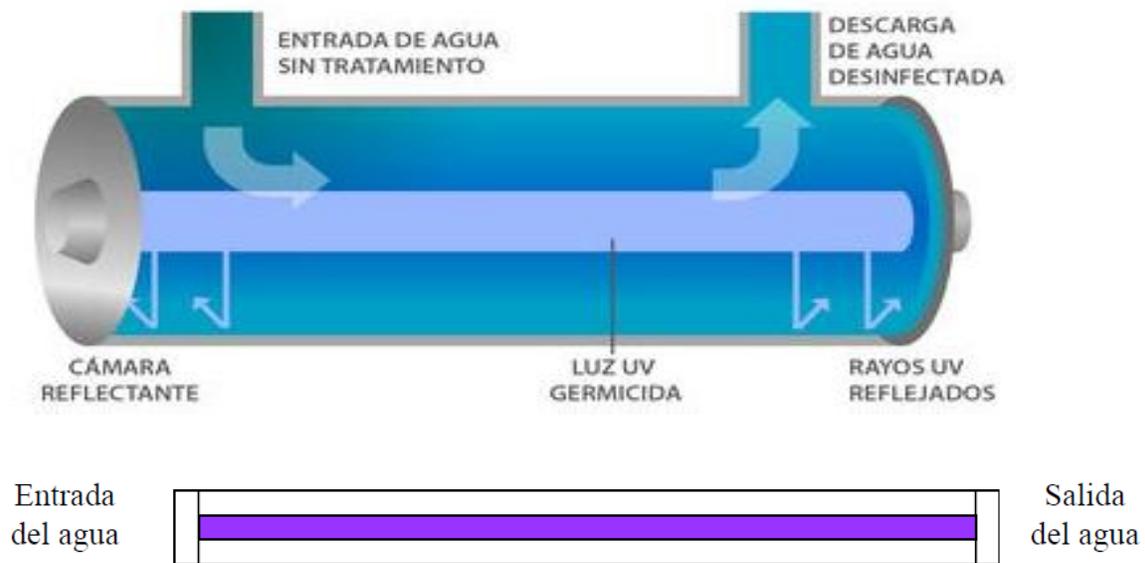


Figura 2.30 Lámpara de luz UV.

Lámparas suspendidas fuera del líquido. Esta configuración consiste en hacer pasar el agua a través de un tubo de teflón (que es relativamente transparente a la radiación UV), el cual se encuentra rodeado por lámparas de UV.

Para propósitos de diseño, es necesario garantizar que exista turbulencia (para que toda el agua pase lo suficientemente cerca de la superficie de la lámpara) y también que se minimice el grado de mezcla transversal (corto-circuitos). De este modo se garantiza la máxima eficiencia.



CAPITULO II.- PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

Para efectos operacionales, es esencial contar con un programa de limpieza efectivo para remover periódicamente los materiales biológicos y químicos que ensucian la envoltura de la lámpara o la superficie de los tubos de teflón.

Para alargar la vida de la lámpara el agua debe estar lo más limpia posible, lo cual además evita que partículas en suspensión dificulten la acción de la lámpara germicida. Esto se logra con los filtros instalados previamente a la lámpara de luz UV en nuestro proceso de tratamiento.

La potencia de las lámparas está directamente relacionada con el volumen de agua a tratar como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 2.3 Potencia de las lámparas germicidas y volumen de agua que tratan (Alaqualrum. 2005).

Potencial de la lámpara (Watts)	Máximo volumen de agua (Litros)
6	80
8	200
15	500
30	1500

Para tratar volúmenes mayores se pueden instalar varias lámparas en serie.

Las lámparas germicidas tienen una vida limitada, es decir, su capacidad germicida va disminuyendo con el paso del tiempo. Pasadas unas 2000 horas de funcionamiento, la lámpara pierde el 20% de su potencia. Es recomendable que a las 5000 horas de funcionamiento se cambie el tubo de UV.

2.7.6 Parámetros de diseño

El microorganismo de diseño en la desinfección con UV son los coliformes totales, que son mucho más resistentes a la radiación UV que los protozoarios. Es posible que existan algunos virus, bacterias o protozoarios que resistan más que los coliformes totales a la radiación UV, pero aquéllos generalmente son más fáciles de matar o inactivar con cloro. La dosis de UV necesaria para inactivar el 99% de coliformes es de $50\text{mJ}/\text{cm}^2$.

Los tiempos de contacto (t) para los sistemas de desinfección con UV son bastante pequeños, generalmente del orden de 10 a 20 segundos solamente. Por lo tanto, el espacio requerido para la desinfección con UV es relativamente pequeño. Sin embargo, como no hay residuales, normalmente se combina con algún otro proceso de desinfección.

CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

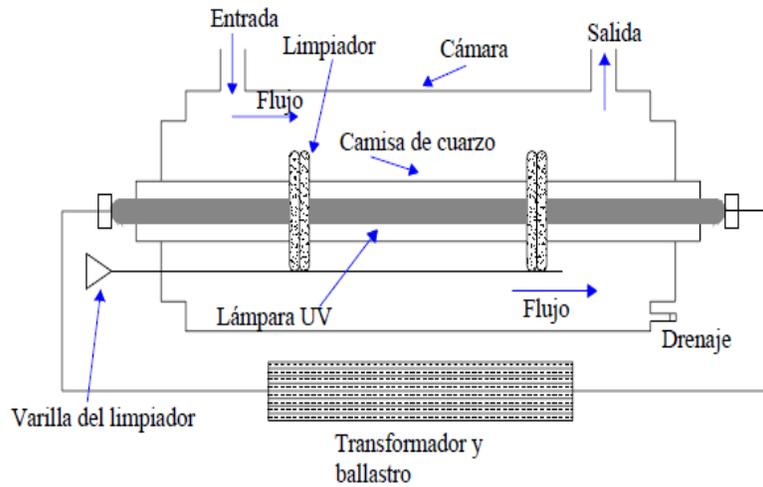


Figura 2.31 Instalación típica de la radiación U.V, (Arboleda 2000).

La intensidad luminosa que emite la lámpara en el rango germicida (I) es una medida de su potencia por unidad de área de fluido bajo la radiación. Se puede calcular así:

$$I \left(\frac{mW}{cm^2} \right) = \frac{Potencial (mW)}{Área(cm^2)} \quad (2.32)$$

El área de contacto de la lámpara de UV se calcula así:

$$A = \pi DL \quad (2.33)$$

Donde D es el diámetro de la lámpara y L su longitud (ambos en cm).

La dosis de UV se calcula así:

$$Dosis = I \left(\frac{mW}{cm^2} \right) \cdot t(seg) = I \cdot t \left(\frac{mJ}{cm^2} \right) \quad (2.34)$$

Despejando para t :

$$t = \frac{Dosis UV}{I} \quad (2.35)$$

Da el tiempo mínimo de contacto (en segundos), requerido para lograr la inactivación.



CAPITULO II.-PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS IMPLEMENTADOS EN LA PURIFICACIÓN DE AGUA

2.8 Sistemas de tratamiento

La calidad del agua cruda oscila de una fuente a otra; por ello el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable y/o purificada, también varia. Dependiendo de la calidad de esta, el grado de complejidad del tratamiento es diferente; sin embargo, se utiliza con mayor frecuencia la desinfección con cloro, filtración (lecho profundo, carbón activado, suavizador y pulidor), ósmosis inversa, desinfección por luz ultravioleta y ozono (Solorio, 2002).

El diseño de una planta de tratamiento eficiente y económica requiere un estudio basado en la calidad de la fuente y en la selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuados y económicos para producir agua de la calidad requerida (Romero, 1999).



CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

Para que la planta purificadora de agua de campus II cumpliera su debida función es primordial que su higiene sea la adecuada, para eso contamos con diversos equipos que nos permiten tener el agua en perfectas condiciones. Dentro de estos adminículos tenemos el test kit para plantas purificadoras de agua, podríamos definirlo como un conjunto de productos que nos permite testear y comprobar las propiedades del agua. Pero más allá de la ambigüedad del término, básicamente, estos kits incluyen todo lo necesario para purificar el agua ya que su utilidad se basa en garantizar la presencia de agua limpia y cristalina.

3.1 Equilibrio del agua

El Equilibrio del agua se define como una condición en la que el agua no es ni corrosiva ni proclive a la formación de incrustaciones calcáreas. Los principales factores que determinan el equilibrio de agua son pH, la alcalinidad total y la dureza del calcio. El suministro de agua también juega un papel significativo en el equilibrio del agua y esto se encuentra en la sección de zonas de aguas duras y blandas.

3.2 Test kit medidor para agua en nuestro tratamiento de la planta purificadora de campus II

El test kit para plantas purificadoras de agua lo empleamos básicamente como elemento de comprobación del agua, éste suele incluir niveladores de pH y materiales como probetas y tubos de ensayo para poder llevar a cabo la correspondiente experimentación. Para averiguar en qué condiciones se encuentra el agua, tomamos una muestra de 30 cm por debajo de la superficie, recordando siempre mantener los frascos en buenas condiciones para evitar falsas interpretaciones. Se aplicaron una serie de reactivos en las muestras que hemos obtenido, éstos también se incluyen en el test kit para plantas purificadoras de agua, y su función es indicar los niveles de cloro y pH. Las muestras no debieron agitarse sino que manipularse suavemente; cuando adquirimos el kit, debimos fijarnos en la fecha de caducidad de los reactivos y así evitar inconvenientes en las mediciones, ya que éstos duran no más de 6 meses. El test kit nos proveerá de un pequeño manual de instrucciones de interpretación del agua y sus estados, muy a menudo, los problemas que las plantas purificadoras suelen presentar se relacionan con los descuidos del sistema de filtración o de desinfección.

El pH es uno de los componentes más importantes del agua de la planta purificadora de agua; su valor define si una sustancia es ácida o básica; su escala tiene una variación que va desde 0 a 14 y un pH adecuado debe situarse en el número 7 de acuerdo a la literatura. Un agua con un pH inferior (agua ácida) o superior (agua básica) a este número es incorrecta, resultando, entre otras cosas, que los productos químicos e incluso el cloro no actuarán en el agua de manera



CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

correcta. El pH tipo ácido posee un sabor agrio y tienden a destruir los tejidos vivos. Mientras que el pH tipo básico posee un sabor amargo y ataca la materia orgánica. El valor ideal de éste está comprendido entre 7,2 y 7,6, en caso de que estos valores sean superados o inferiores al mínimo el agua presentará ciertas distorsiones.

3.2.1 Problemas que se presentaron por el desajuste de PH

Cuando el pH se vio distorsionado notamos ciertas reacciones en nuestro organismo y del agua que nos alertaron que el mismo debió ser restablecido; no dejamos pasar por alto estos inconvenientes ya que afectarían de forma muy profunda la salud de los consumidores. Cuando el pH fue inferior a 7 los problemas que se presentan son: cloración del agua, inestabilización de productos clorados.

Cuando el pH fue mayor a 7,8, el consumo de desinfectante fue más elevado, los filtros tuvieron a bloquearse y el agua permaneció turbia, entre otras cosas. Pero el pH no es el único factor importante del agua de la planta purificadora, también está la alcalinidad del agua, la cual se relaciona íntimamente con él. La alcalinidad indico el contenido de carbonatos, hidróxidos y bicarbonatos que el agua debe contener; estas sales actúan como reguladores de pH amortiguando sus posibles fluctuaciones. Una correcta alcalinidad debe estar entre 80 y 250mg Ca CO₃/l de acuerdo a la literatura. Cuando se dio el caso de que se dieron desajustes de esta sustancia se presentaron los siguientes problemas; cuando la misma fue menor a 250mg, el agua se puso turbia, el pH era alto y difícil de regular. Cuando se dio el caso de que la alcalinidad fue mayor a 80mg, el pH vario bruscamente y tendió a bajar.

3.2.2 ¿Cómo se niveló el pH?

Cuando obtuvimos un pH neutro quiso decir que el agua se encuentra estabilizada en acidez y alcalinidad; para darnos cuenta de esto se necesito lo que se conoce comúnmente como un Test- Kit el cual contiene una pequeña probeta de dos goteros y dos tubos los cuales poseen Rojo Fenol y chlorine/bromine. Procedimos a tomar una muestra de agua del tanque de almacenamiento introduciéndola luego en la probeta; una vez hecho esto, debió colocarse el reactivo en la cantidad de gotas que el envase índico (5 gotas). Se coloco una tapa, se agito durante unos segundos y esperamos otros más para comprobar los resultados. El reactivo amarillo chlorine/bromine se coló en la probeta que corresponda al análisis de cloro; y el Fenol en la probeta de pH; la comparación que llevamos a cabo en ese momento fue colorimétrica, es decir observamos el color del contenido y lo compararemos con el que es indicado en el envase. Cuando el control realizado no nos brindo un resultado satisfactorio, entonces adicionamos un producto regulador conocido con el nombre carbonato de sodio denso (solido en polvo) y bisulfato de sodio globular (solido en polvo), cada producto se aplico para una situación en especial. El primer caso cuando necesitamos subir los niveles de PH y el segundo cuando necesitamos disminuirlo.



CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

3.2.3 Ficha Técnica del pH:

Se analizo diariamente el tenor de cloro y pH del agua de la planta purificadora de agua en temporada de uso. Debió contener en todo tiempo una cantidad residual de cloro que asegure su desinfección. El pH ideal mejoro la acción desinfectante del cloro y evito la corrosión del equipamiento.

- 1) Se enjuago el comparador de análisis con agua del propio tanque de almacenamiento de la planta purificadora de agua antes y después de cada uso.
- 2) Se introdujo el comparador con la boca de los tubos hacia abajo, hasta 30cm de profundidad se lleno y se retiro la muestra obtenida.
- 3) Se bajo levemente el nivel y se adicionaron 5 gotas de solución A (envase amarillo), en la muestra correspondiente al cloro, y 5 gotas de solución B (envase rojo) en la correspondiente a PH. Luego se tapo correctamente.
- 4) Se agito ligeramente hasta mezclar y se comparo el color de la muestra analizada con la correspondiente a la escala colorimétrica.

Valores de cloro:

De acuerdo a lo siguiente se actuó:

- Amarillo tenue: bajo tenor de cloro. Se adiciono tricloro inmediatamente.
- Amarillo suave: tenor ideal (1.0 a 2.2ppm).
- Amarillo fuerte: alto tenor de cloro. Se bajo la dosis diaria.

Se tomaron las muestras inmediatamente después de haber adicionado productos químicos.

Valores de PH:

- Rojo tenue: agua ácida-Se adiciono elevador de pH (solido en polvo, carbonato de sodio denso)
- Rojo suave: valor ideal (7.2 a 7.6)
- Rojo fuerte: agua alcalina-Se adiciono reductor de PH (solido en polvo, bisulfato de sodio)



CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

Tabla 3.1 Cantidad de bicarbonato de sodio para aumentar PH 5000 galones

Lectura de pH	Cantidad que se requiere
Más de 7.6	Ninguna
7 a 7.6	Intervalo ideal
6.8 a 7	6
6.5 a 6.8	8
Debajo de 6.5	10

Tabla 3.2 Cantidad de bisulfato de sodio para bajar pH base 5000 galones de agua

Lectura de pH	Cantidad de disulfato de sodio
Debajo de 7	Ninguna
7 a 7.6	Intervalo ideal
7.6 a 8.0	10
8.0 a 8	8
Arriba de 8	1



CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

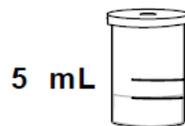
3.2.4 Kits utilizados durante el tratamiento para la lectura de la alcalinidad y de Dureza:

HI 38014 alcalinidad total test Kit

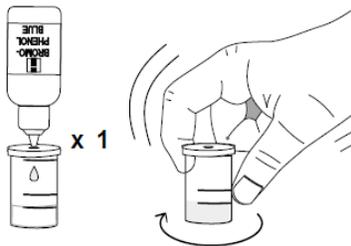
LEA LAS INSTRUCCIONES ANTES DE USAR EL KIT

Determinación de la alcalinidad total:

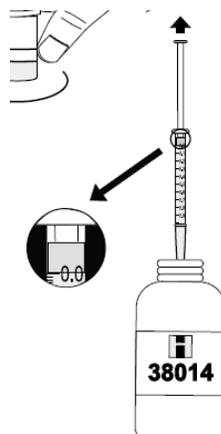
- Quite la tapa del plástico buque. Enjuague el vaso de plástico con muestra de agua, llene hasta la marca de 5 ml y coloque la tapa.



- A través del orificio de la tapa, agregar una gota azul de bromofenol Indicador y mezclar. Si la solución es de color amarillo, entonces es ácido y una prueba de acidez deben llevarse a cabo (ver HI 3820- Acidez Hanna Test Kit). Si la solución es de color verde o azul, proceder al siguiente paso.



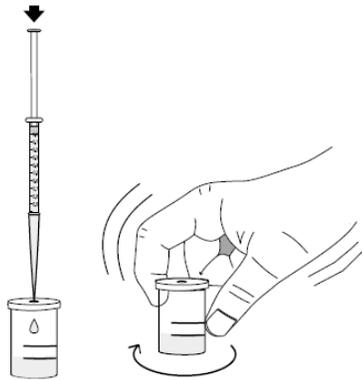
- Tomar la jeringa y empuje el émbolo completamente en la jeringa. Inserte la punta en el HI 38014-0 alcalinidad Reactivo y tire de la émbolo hasta que el menor borde de la punta esté en la 0,0 ml marca de la jeringa.





CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

- Coloque la punta de la jeringa en el orificio de la tapa del plástico recipiente y añada la caída de solución de titulación gota, haciéndolo girar tras cada gota.



- Continúe añadiendo solución de titulación hasta que la solución del vaso de plástico se vuelve amarillo.
- Lea los mililitros de solución de titulación de la jeringa y multiplique por 500 para obtener gpg CaCO₃ de La alcalinidad total.

$$\text{ml de valorante} \times 500 = \text{gpg CaCO}_3$$

Test Kit
HI 38033
Dureza Total
0-30 gpg rango

LEA LAS INSTRUCCIONES ANTES DE USAR EL KIT

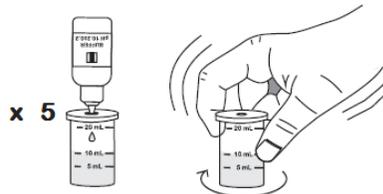
- Quite la tapa del recipiente de plástico. Enjuague el plástico recipiente con la muestra de agua, llene hasta la marca de 10 ml y coloque la tapa.



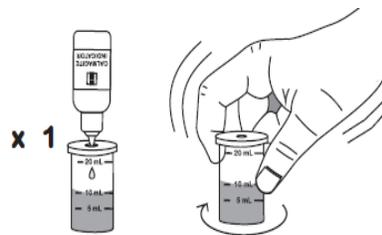


CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

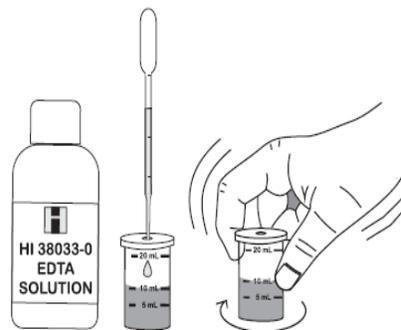
- Añadir 5 gotas de solución tampón a través del orificio de la tapa y mezclar cuidadosamente haciendo girar el vaso en pequeños círculos.



- Añada 1 gota de Indicador Calmagita a través del orificio de la tapa y la mezcla como se describe anteriormente. La solución se convierte en un redviolet color.



- Llene la pipeta de plástico con HI 38033-0 Solución EDTA e inserte la punta en el orificio de la tapa del vaso de plástico. Añadir la solución gota a gota, agitando la mezcla después cada gota, mientras se mantiene un recuento exacto del número de gotas que se añade a la solución en el vaso.





CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

- Continúe añadiendo solución de titración hasta que la solución del vaso de plástico se convierte en morado. A continuación, mezcle por 15 segundos Después de cada gota adicional hasta que la solución se vuelve azul.
- Registre el número de gotas necesarias para obtener la final cambian de color como gpg CaCO_3 de dureza total de su muestra.

gotas de reactivo = gpg CaCO_3

Este instrumento se calibro

3.3 Tratamiento químico del agua

El agua nueva o ya filtrada, si bien se ve transparente, es muy probable que contenga contaminantes que pueden provocar su descomposición, daños a las instalaciones o a los que la consumen. La sola filtración no elimina bacterias, virus, hongos, algas, sudor, orina, cosméticos y otros contaminantes. Todo esto se elimina de inmediato a la vez que se obtiene un agua cristalina y químicamente pura utilizando *cloro*, el mejor desinfectante y el más utilizado nivel mundial.

3.3.1 Desinfectantes

Este grupo de productos químicos es el más importante en el tratamiento de la planta purificadora. Su trabajo consiste en matar rápidamente cualquier tipo de bacterias o virus que penetran en el agua para que no se puedan multiplicar y causen infecciones en los consumidores. En consecuencia, desempeñan un papel importante para obtener el agua de la planta purificadora limpia y clara.

3.3.1.1 Cloración

La cloración o desinfección del agua se logro mediante la adición de hipoclorito de sodio al 5% (conocido comúnmente como cloro) al agua, el cual elimina la mayoría de bacterias, hongos, virus, esporas y algas presentes en el agua.

En la cloración, el cloro se debió mantener un residual no mayor a 0.5 partes por millón (ppm) ósea 0.5 mililitros por metro cubico o 5 mililitros por 10 metros cúbicos.



CAPITULO III.-ANÁLISIS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PLANTA PURIFICADORA DE CAMPUS II

La cloración generalmente se hace en los tanques cisternas en donde se almacena el agua en el inicio del proceso.

Una vez que el agua ha sido balanceada, procede la eliminación de organismos infecciosos, excesos orgánicos y la prevención del crecimiento de algas. Esto se obtiene aplicando TRICLORO en la dosis correcta y manteniendo un residual constante de cloro en el agua (entre 1.0 y 2.0 ppm).

El TRICLORO se puede obtener en forma de Granular, Polvo y Tabletas de 3" Y 1" Utilizando en cualquiera de sus formas se obtiene óptimo rendimiento. Para mayor comodidad de uso, costo controlado y un residual de cloro constante se utilizo el tricloro granular.

El TRICLORO en presentación granular y polvo, se dosifica de 10 a 20 grs. Por cada 10,000 litros de agua. El análisis rutinario de cloro nos indico la cantidad correcta a agregar. Con esto, se evito por completo el agua verdosa y se protegió el agua cuando se dio el caso de quedar momentáneamente sin cloro. La dosis a utilizar se encuentra en los envases correspondientes.



CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

CAPÍTULO IV: OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

Consideraciones generales de operaciones y mantenimiento de plantas de purificación de aguas

4.1 Principios de operación

Toda planta de tratamiento de agua debe estar diseñada para que con una operación adecuada pueda producir continuamente el caudal de diseño y satisfacer las normas de calidad de agua establecidas. Dependiendo de las características propias de cada diseño, cuatro factores principales determinan que una planta posea las condiciones requeridas para una operación y mantenimiento óptimos. Estos cuatro factores son:

- Confiabilidad.
- Flexibilidad.
- Mano de obra.
- Automatización y control.

La confiabilidad es el factor más importante puesto que en el caso de plantas de purificación de agua potable ésta debe satisfacer en todo momento los requerimientos de calidad estipulados. Para ello, todos los equipos y unidades de la planta deben operar satisfactoriamente con caudales mínimos o máximos, así como bajo condiciones extremas de calidad del agua. Por lo tanto, los operadores deben estar en capacidad de agua y a las modificaciones de calidad de la misma.

La flexibilidad asegura la producción normal de la planta; la planta debe estar en capacidad de operar continuamente aunque haya uno o más equipos o unidades fuera de servicio por mantenimiento o reparación. Los operadores deben asegurarse de que toda pieza de equipo esencial: bombas, motores, dosificadores de sustancias químicas, válvulas, etc., tenga una unidad de reserva disponible.

La mano de obra es esencial en todo programa de operación y mantenimiento. En toda planta de purificación de agua es necesario que el personal de operación tenga capacidad técnica para operar el equipo y las unidades de la planta, así como para adecuar la dosificación de sustancias químicas y el grado de tratamiento a las variaciones de calidad del agua cruda.



CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

El grado de automatización y control debe ser tal que provea máxima confiabilidad en la operación de la planta. Por lo tanto, equipos y controles automáticos de difícil operación manual no son recomendables, pues pueden causar más problemas que benefician en la operación general de la planta.

4.2 Principios de mantenimiento

El mantenimiento es esencial para una operación óptima de la planta de purificación. En un sistema de purificación de agua, el mantenimiento puede considerarse de dos tipos:

- **Mantenimiento preventivo.**
Conjunto de actividades, recursos y ayudas programados para identificar o prevenir defectos, reemplazar rutinariamente elementos fungibles, registrar e informar daños mayores en la planta de tratamiento y para conservarla, por lo menos, durante su vida económicamente útil.
- **Mantenimiento correctivo.**
Conjunto de actividades, recursos y ayudas destinados a reparar defectos y daños mayores para restablecer la producción normal de la planta de tratamiento.

Entre los principales factores por considerar para un mantenimiento satisfactorio, se tienen los siguientes:

- La responsabilidad del mantenimiento debe estar claramente definida y asignada a personal competente.
- Los recursos financieros deben estar claramente definidos y asegurada su disponibilidad oportuna.
- Se debe contar con el tipo y la cantidad de herramientas, repuestos y equipos apropiados para proveer el mantenimiento.
- Todas las actividades de mantenimiento preventivo deben ser planeadas y programadas.
- Debe existir un sistema de control y registro apropiado de las labores de mantenimiento.

4.3 Objetivos de la operación

Cuando se habla de la calidad del agua, el objetivo de máximo interés no es realmente el agua sino los materiales presentes en ella. Dichos materiales determinan la potabilidad del agua y, por lo tanto, la magnitud del tratamiento requerido. Por ello, los objetivos de la operación de la planta de purificación son básicamente:



CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

- Proteger la salud de la comunidad.
- Suministro un producto estéticamente deseable.
- Proteger la propiedad del usuario.

La protección de la salud pública implica agua segura, carente de organismos patógenos y libres de sustancias tóxicas en concentraciones que puedan constituir riesgos de la salud para los consumidores.

El suministro de un agua estéticamente deseable supone un agua con un contenido tan bajo como sea posible de color, turbiedad, sólidos suspendidos, libre de olores y sabores y con una temperatura tan fría como las condiciones ambientales lo permitan.

La protección de la propiedad del usuario se refiere, en el caso de plantas municipales, a la necesidad de suministrar un agua no corrosiva; ni incrustantes y con un grado de calidad tal que permita a los industriales su uso, o tratamiento adicional, con un costo mínimo.

4.4 Parámetros de control de operación

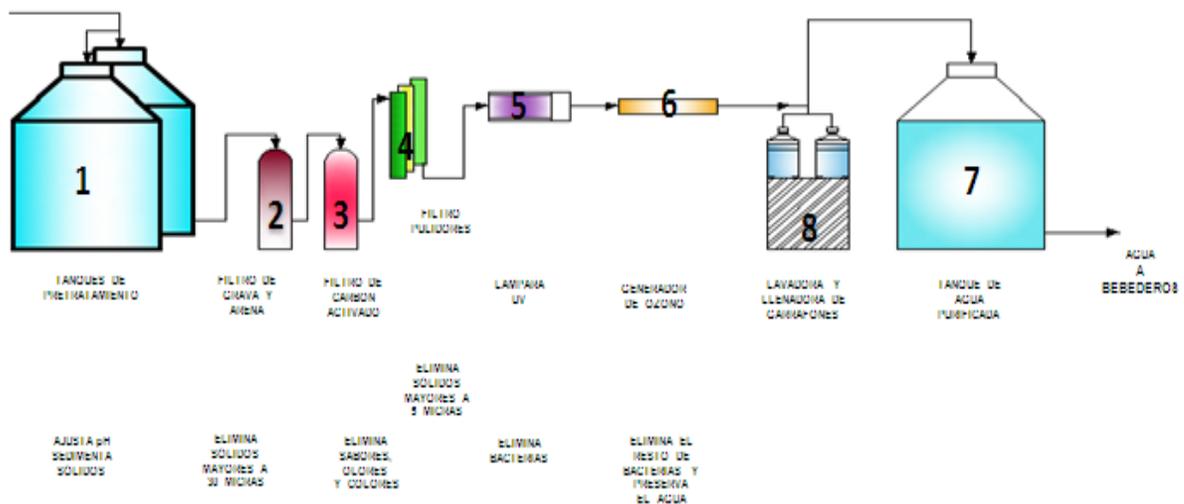
El operador de una planta fundamenta la operación de la misma en el mantenimiento de la máxima calidad de su producto. Para ello hace uso, principalmente, de análisis físico, químico y bacteriológico, de conformidad con un programa de muestreo y análisis, cuya frecuencia e intensidad son función de los problemas particulares de calidad de agua de cada planta. En todos los casos deben satisfacer los requerimientos estipulados en el Decreto 2105/83. Mediante registros permanentes de las características evaluadas, el operador está en capacidad de demostrar la calidad de su producto, tanto a las autoridades en cargadas del control sanitario, como a los usuarios del sistema de abastecimiento. Dichos registros son requeridos por muchas industrias para conocer las características del agua suministrada. El contenido de cada catión y anión es valioso para las relaciones con el público y para rebatir críticas infundadas a la operación de la planta.

El personal requerido, las facilidades de laboratorio y la habilidad o capacidad técnica del personal de operación, son función del tipo de plantar de tratamiento operada. La necesidad de ejercer una supervisión estricta de la operación, las 24 horas del día durante los 7 días de la semana, es función de la variabilidad de la calidad del agua cruda y de los métodos de tratamiento usados. Por ejemplo, una planta para remoción principalmente de turbiedad y color de agua cruda proveniente de un embalse, recibirá un agua de calidad relativamente constante y, por lo tanto, requerirá menos supervisión que una planta de ablandamiento o de remoción de hierro y

CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

magnesio que esté tratando aguas cridas de calidad variable. La planta convencional de tratamiento tiene una capacidad de recepción de cargas variables súbitas de contaminación y de caudales, mayor que una planta de filtración directa y, por consiguiente, requiere personal menos especializado. En toda planta de tratamiento, no importa su tamaño, es esencial contar con instalaciones y equipo de laboratorio adecuados. El equipo debe ser suficiente para realizar los análisis requeridos para control continuo y permanente de la operación.

4.5 Descripción Del Proceso:



4.6 Descripción Del Proceso:

1. Cloración-Desinfección del agua:

Se alimentaron 2500ltrs de agua (proveniente de la Delegación de Iztapalapa) al 1ºtanque de almacenamiento, presentando esta un olor, color y sabor, no aptas para el consumo humano que en determinado momento lleva sólidos en suspensión.



CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

Procedimos a tomar una muestra de agua del tanque de almacenamiento introduciéndola luego en la probeta; una vez hecho esto, colocamos el reactivo en la cantidad de gotas que el envase índico (5 gotas). Se colocó una tapa, se agitó durante unos segundos y esperamos otros más para comprobar los resultados. El reactivo amarillo chlorine/bromine se coló en la probeta que corresponda al análisis de cloro; y el Fenol en la probeta de pH; observamos el color del contenido y lo compararemos con el que es indicado en el envase. Como el pH resultó ser de 7.8 y no presentaba Cl, entonces se le agregó bisulfato de sodio globular (sólido en polvo), ya que necesitamos disminuirlo y en el caso de Cl le agregamos 2 cucharadas (lo que equivale a 13 gr) de tricloro concentrado granular de rápida solución y otra cucharada de tricloro granular de lenta solución para que aumentara la cantidad de cloro, ya que sin presencia de este se presentarían patógenos.



2. Tren de Filtros:

Se llevo a cabo el arranque de la planta solo haciendo funcionar el 2º filtro de lecho profundo mediante una bomba, (que proporciona el caudal y la presión necesarios para llevar a cabo la filtración) durante 2hrs, cuya función de este filtro fue la de detener las impurezas grandes (sólidos hasta 30 micras) que trae el agua al momento de pasar por las camas de arena y quitarle lo turbio al agua, este filtro se regenera periódicamente. Dándoles un retro lavado a presión, para ir desalojando las impurezas retenidas al momento de estar filtrando y remover sedimentos pesados y sólidos suspendidos. Las capas de material filtrante se acomodan de la siguiente manera: las más gruesas en la parte superior, que retendrá los sedimentos y sólidos suspendidos de mayor tamaño; y las siguientes capas son de materiales de menor tamaño que



CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

atraparan a las partículas más pequeñas. La gravedad específica de los materiales y su tamaño, han sido seleccionados de tal manera que estos no se pueden mezclar y siempre se acomodan en el mismo orden aun después del retro lavado.

Se realizó después de su uso en 4hrs durante 4 días un retro lavado para mantener la cama filtrante limpia y en buenas condiciones, lo que permitió un buen flujo de agua con una excelente calidad de filtración. Posteriormente se arranca la planta, haciendo pasar al agua a los demás equipos, después de haber pasado por el filtro de lecho profundo pasa a un ³ filtro de Carbón Activado cuya función fue la eliminación de cloro, sabores y olores característicos del suministro y una gran variedad de contaminantes orgánicos, categorizados como productos químicos dañinos tales como: pesticidas, herbicidas, metilato de mercurio e hidrocarburos clorinados. Este filtro, además se utilizó para reducir efectivamente el sabor y olor que produce el cloro en el agua. El agua entra por la parte superior del filtro pasa por toda la cama de carbón activado granular, logrando así un máximo tiempo de contacto y en consecuencia una adsorción excelente.

Este proceso fue el segundo para el purificado del agua para la planta purificadora de campus II, Al terminar este proceso el agua tuvo un sabor y olor excelente.

En seguida pasa ser llevado a los ⁴ filtros pulidores cuya función de estos filtros fue la de detener las impurezas pequeñas (sólidos hasta 5 micras). Estos filtros eliminaron partículas de tamaño específico, con su retención el agua se abrigó, en el proceso de purificación esto fue muy importante porque permitió que el equipo de luz ultravioleta trabajara mejor al subir la transmitancia del agua (menos turbia). Después de este paso se pudo tener un agua brillante, cristalina y realmente purificada, la cual se encuentra dentro de las normatividades existentes.





CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

3. Esterilización con L.U.V

Posteriormente pasada a la ⁵Lámpara ultravioleta que es el equipo responsable de dar la segunda esterilizada al agua, los posibles microorganismos que pudieron sobrevivir al cloro son atacados en su material genético, lo que les impedirá reproducirse.



4. Ozonificación:

Inmediatamente paso al ⁶ozonificador el cual destruye los microorganismos en unos cuantos segundos por un proceso denominado Destrucción de Celda, destruyendo los microorganismos rompiendo por oxidación su capa protectora (lípidos). La ruptura molecular de la membrana celular provocada por el Ozono, dispersa el citoplasma celular en el agua y lo destruye, por lo que la reactivación es imposible, el ozono en agua es 12 veces más soluble que el oxígeno, los productos químicos actúan por envenenamiento enzimático de los centros vitales, por lo que el ozono resulta ser miles de veces más rápido que los productos químicos. Debido a que los microorganismos nunca generarán resistencia al ozono, no fue necesario cambiar periódicamente los germicidas, El ozono actuó sobre nuestra agua potable eliminando por oxidación todos los elementos nocivos para la salud como son virus, bacterias, hongos, además de eliminar metales, los cuales pueden ser filtrados y eliminados del agua.

La forma en que se genera el ozono es la siguiente; el ozono se genera a partir de aire u oxígeno al aplicar una descarga de alto voltaje para convertir parte del oxígeno (O₂), a ozono (O₃). El gas ozonizado se mezcla con el agua, a través de un eyector en línea (venturi). El venturi genera un vacío en la garganta del eyector y succiona el ozono. Esto redujo la posibilidad de fugas de ozono. Permite inyectar ozono en el agua bajo presión sin necesidad de re-bombear el agua después de disolver el ozono. La disolución de venturi se realiza en línea.



CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA



5. Obtención del producto:

El agua ya purificada se almacena en otro ⁷tanque de polietileno de las Características ya antes mencionadas.





CAPITULO IV.-OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA

6. Pruebas

Posteriormente se realizaron nuevamente las pruebas para conocer los niveles del PH, Cl, así como también se utilizaron Kits (capítulo III) para conocer los niveles de alcalinidad y Dureza posterior al tratamiento mencionado.



Dando como producto un pH de 7.6 y un Cl de 1.0, así como una Dureza de 200ppm y 300 ppm de Alcalinidad, comprobando con las Normas Oficiales Mexicanas 127 y 041 de la Secretaría de Salud (Anexo 1), que el agua tratada en la planta purificadora de campus II es apta para el consumo humano.

7. Lavado

De manera muy independiente se llevó a cabo el proceso de recepción, y ⁸lavado tanto el exterior como el interior del garrafón mediante jabón y se enjuago mediante la misma agua que se obtenía como producto.





RESULTADOS

RESULTADOS

El agua que distribuye la Delegación de Iztapalapa a Campus II da como resultado que el agua proveniente tiene una dureza total promedio de 80.6 mg/L de CaCO₃, presenta un olor, sabor, y color desagradables; lo que indica que es moderadamente dura y corrosiva.

Los resultados obtenidos de los análisis físicos y químicos de los puntos de muestreo y la comparación de las normas de calidad de agua (Anexo 1.) para consumo humano se muestran a continuación:

Tabla 1. Parámetros físicos del producto del proceso de tratamiento de la planta purificadora de campus II.

Punto de muestreo	Temperatura °C	Conductividad Eléctrica (µs/cm)	PH (potencial de Hidrogeno)	Color	Olor	Sabor
Planta purificadora	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable

Tabla 2. Parámetros Químicos del agua que abastece la planta de tratamiento de campus II a los bebederos.

Punto de muestreo	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Cl
Planta purificadora	300	200	1.0



RESULTADOS

Tabla 3. Parámetros físicos del agua de los bebederos.

Punto de muestreo	Temperatura °C	Conductividad Eléctrica (µs/cm)	PH (potencial de Hidrogeno)	Color	Olor	Sabor
L4	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Cerfis	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Consultorio	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Gym	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Canchas	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Edificio de Gobierno	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Pasillo	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Biblioteca	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable
Entrada	25	0.0548	7.6	Agradable	Agradable	Agradable

Tabla 4. Parámetros Químicos del agua de los bebederos.

Punto de muestreo	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Cl
L4	300	200	1.0
Cerfis	300	200	1.0
Consultorio	300	200	1.0
Gym	300	200	1.0
Canchas	300	200	1.0
Edificio de Gobierno	300	200	1.0
Pasillo	300	200	1.0
Biblioteca	300	200	1.0
Entrada	300	200	1.0



DISCUSIÓN DE RESULTADOS

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La planta de tratamiento de "Campus II" que suministra el agua a todos los bebederos, es tratada con el método de desinfección de cloración.

En la sección de resultados se muestra por medio de tablas los datos obtenidos de los análisis físico, químico del agua que distribuye la Planta de tratamiento "de campus II" a los bebederos L4, Cerfis, Consultorio, Gym, Canchas, Ed. de gob., Pasillo, Biblioteca y Entrada, con las muestras de agua analizadas se efectuaron los siguientes análisis; conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, cloro, alcalinidad y dureza total.

Agua para consumo humano

Los resultados obtenidos del agua proveniente de la planta de tratamiento de campus II se encontraron dentro de los límites de la Normas Oficiales 127 y 041 como se observa en el Anexo 1.

Parámetros físicos

Los parámetros físicos como color, sabor olor, conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno se encontraron dentro de los máximos permisibles de las la Normas Oficiales 127 y 041 (anexo A, tablas: 1.1 y 1.4) con un promedio de conductividad eléctrica de 0.05483 $\mu\text{s}/\text{cm}$ microhoms potencial de hidrógeno 7.6 y con un color, sabor y olor agradable.

Parámetros químicos

Los resultados obtenidos de las concentraciones de los parámetros químicos muestran que al comparar las concentraciones de alcalinidad, dureza y cloro (tablas II, III,IV,V,VI,VII,VIII,IX y X Anexo 2) estos cumplen con los límites máximos aceptables según la Normas Oficiales 127 y 041 (tablas 1.2 y 1.5, Anexo A).



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. El agua suministrada por la planta de tratamiento "de campus II" a los bebederos esta dentro de las la Normas Oficiales 127 y 041 , por lo tanto, el agua es potable y apta para consumo humano.
2. La calidad del agua proveniente de la Delegación Iztapalapa, la cual se llevo a tratamiento es moderadamente dura y con olor, sabor y color desagradable con características que la hacen no adecuada para uso y consumo humano.
3. La calidad del agua durante el periodo de Noviembre del 2011 hasta el momento, se mantuvo constante en sus diferentes aspectos físicos y químicos.
4. Este proyecto contribuye al mejoramiento de medio ambiente, ya que reduce el volumen de consumo de PET.
5. Ayuda a la economía de los alumnos y trabajadores de la institución, porque disminuye el gasto generado por la compra de garrafones y bebidas embotelladas (agua y refrescos).
6. Reduce egresos a la facultad, por concepto de la compra de garrafones.

Este trabajo pretende ser un modesto aporte a un tema tan vinculado a la salud pública como lo es la potabilización de aguas, en una de sus ramas que todavía tiene mucho camino por delante en el México. La consideración de los riesgos químicos derivados de la desinfección, potenciando el objetivo primario y permanente de reducción de los riesgos biológicos, sin duda deberá abordarse en futuras reglamentaciones y programas de mejoramiento de la calidad del agua de bebida en el México.

Si lo aquí expuesto puede contribuir en una mínima fracción a elevar la calidad de vida de la población a través de la protección de la Salud Pública, eso será suficiente para retribuir el esfuerzo y las horas de trabajo que hay detrás de este documento.



RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Se deben realizar, periódicamente, determinaciones de dureza total, alcalinidad, pH y cloro a la planta purificadora de campus II, donde se utiliza agua proveniente de la zona de Iztapalapa, para evitar daños en el equipo y gastos adicionales.
2. Se deben realizar, periódicamente, determinaciones de dureza total, alcalinidad, pH y cloro a la salida del bebedero L4, donde se utiliza agua proveniente de la planta de tratamiento purificadora de campus II., para evitar daños en el equipo y gastos adicionales.
3. Debe continuar con el plan de control de mantenimiento periódico de la planta de tratamiento para asegurar su limpieza y su efectivo funcionamiento.



ANEXOS

ANEXO A.- Normas Oficiales Mexicanas de la Comisión Nacional del Agua

- NOM-001-CNA-1995. *Sistemas de alcantarillado sanitario. Especificaciones de hermeticidad.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 11 de octubre de 1996.
- NOM-002-CNA-1995. *Toma domiciliaria para abastecimiento de agua potable. Especificaciones y métodos de prueba.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 14 de octubre de 1996.
- NOM-003-CNA-1996. *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 3 de febrero de 1997.
- NOM-004-CNA-1996. *Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 8 de agosto de 1997.
- NOM-005-CNA-1996. *Flujómetros. Especificaciones y métodos de prueba.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 25 de julio de 1997.
- NOM-006-CNA-1997. *Fosas sépticas prefabricadas. Especificaciones y métodos de prueba.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 29 de enero de 1999.
- NOM-007-CNA-1997. *Requisitos de seguridad para la construcción y operación de tanques para agua.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 1 de febrero de 1999.
- NOM-008-CNA-1998. *Regaderas empleadas en el aseo corporal. Especificaciones y métodos de prueba.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 25 de junio de 2001.
- NOM-009-CNA-1998. *Inodoros para uso sanitario. Especificaciones y métodos de prueba.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 2 de agosto de 2001.
- NOM-011-CNA-2000. *Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.* Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 17 de abril de 2002.



ANEXOS

ANEXO B.- Norma Oficial Mexicana 127 de la Secretaría de Salud

NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 18 de enero de 1996 y entró en vigor el día 19 de enero de 1996. En ella se establecen los límites permisibles de calidad para cada una de las características físicas, químicas y biológicas, así como los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

Características físicas y organolépticas

Son las que se pueden detectar sensorialmente. La siguiente tabla muestra las características físicas que se toman en cuenta con su respectivo límite permisible.

Tabla 1.1 Límites permisibles de características físicas y organolépticas a los que debe ajustarse el agua potable (SS, 2005)

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero (TCU) en la escala de platino-cobalto
Olor	Agradable
Sabor	Agradable
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefilométricas (UTN) o su equivalente en otro método

Características químicas

En la siguiente tabla se muestran los elementos o compuestos químicos que pueden causar efectos nocivos a la salud humana. En la siguiente tabla se muestran los elementos y compuestos químicos contenidos en el agua y sus límites permisibles correspondientes.

Tabla 1.2 Contenido de constituyentes químicos (SS, 2005)

Notas: Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos

⁽¹⁾ El límite permisible para el arsénico se debe ajustar, disminuyéndolo en 0.005 mg/L cada año

Constituyente	Límite permisible(mg/L)
Aluminio	0.20
Arsénico⁽¹⁾	0.05
Bario	0.70



ANEXOS

Cadmio	0.005
Cianuros(como CN)	0.07
Cloro residual libre	0.20-1.50
Cloruros (como Cl)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F)	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 (en unidades de pH)	6.5-8.5
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ ²⁻)	400.00
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00
SAAM (sustancias activas al azul de metileno)	0.5 0
Plaguicidas	Lím máx (µg/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

Características biológicas

Para asegurar que una muestra de agua esté libre de organismos patógenos, lo ideal sería analizar la presencia de cada uno de los tipos de gérmenes (especialmente los más importantes por su resistencia a los desinfectantes como virus y protozoarios) que podrían estar presentes en



ANEXOS

la muestra. Sin embargo, el tiempo para ello sería extremadamente largo, el personal requerido sería altamente especializado y los resultados tardarían en obtenerse. Por lo tanto en la práctica se detecta la existencia de organismos indicadores, no necesariamente patógenos, cuya presencia en el agua indica la contaminación fecal y la posible existencia de patógenos perjudiciales para la salud humana.

Los requisitos para un organismo indicador real son: fuente exclusiva, excrementos humanos y de animales, fácilmente detectables y cuantificables, más resistente al agua que la mayoría de los patógenos, pero a la vez no demasiado resistente como para producir falsas alarmas.

La presencia de los organismos indicadores indica que el agua potencialmente tiene organismos patógenos, por el contrario la ausencia de los mismos indica que el agua se puede suponer segura.

Aunque no existe un microorganismo indicador totalmente ideal, las bacterias coliformes satisfacen casi todos los requisitos. Estas bacterias son aerobias o anaerobias facultativas, bacilos, no forman esporas, Gram negativo (se colorean de rojo) y fermentan la lactosa. Las especies más comunes de bacterias coliformes son los coliformes fecales *escherichia coli* y *aerobacter aerogénes*. La siguiente tabla muestra los límites permisibles para estos microorganismos en una muestra simple de agua.

Tabla 1.3

Límites permisibles de organismos coliformes (SS, 2005)

Notas: En unidades de NMP/100 mL (número más probable por 100mL) si se usa la técnica del número más probable o en UFC/100 mL (unidades formadoras de colonias por 100mL) si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

Característica bacteriológica	Límite permisible	
	(NMP/100 mL)	(UFC/100 mL)
Organismos coliformes totales	2	2
Organismos coliformes fecales	No detectables	0



ANEXOS

ANEXO C.- Norma Oficial Mexicana 041 de la Secretaría de Salud

NOM-041-SSA1-1993. Bienes y servicios. Agua purificada envasada. Especificaciones sanitarias. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 18 de enero de 1996 y entró en vigor el día 19 de enero de 1996. En ella se establecen los límites permisibles de calidad para cada una de las características físicas, químicas y biológicas, así como los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. En el apartado de especificaciones sanitarias, se establece que el agua debe cumplir con las siguientes especificaciones físicas, organolépticas, químicas y microbiológicas.

Características físicas y organolépticas

Tabla 1.4 Límites máximos permisibles de características físicas y organolépticas a los que debe ajustarse el agua Purificada (SS, 2005)

Notas: (1) Únicamente el producido por sólidos disueltos en el agua

Característica	Límite máximo
Color	15 TCU ¹ en la escala de platino-cobalto
Olor	Inodoro
Sabor	Insípido
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefilométricas (UTN) o su equivalente en otro método

Características químicas

En la siguiente tabla se muestran los elementos y compuestos químicos contenidos en el agua y sus límites permisibles correspondientes.

Tabla 1.5 Contenido de constituyentes químicos (SS, 2005)

Notas: Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos

⁽¹⁾ El límite permisible para el arsénico se ajustará anualmente, disminuyendo en 0.005 mg/L cada año

Constituyente	Límite permisible (mg/L)
Alcalinidad (como CaCO₃)	300
Aluminio	0.20
Arsénico⁽¹⁾	0.05



"ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA
PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II".



ANEXOS

Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN)	0.05
Cloro residual libre después de un t de contacto mínimo de 30 minutos	0.10
Cloruros (como Cl)	250.00
Cobre	1.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO₃)	200.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F)	0.70
Manganeso	0.05
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno orgánico total (como N)	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido	2.00
Ozono al envasar	0.40
pH (en unidades de pH)	6.5-8.5
Plata	0.05
Plomo	0.02
Sólidos disueltos totales	500.00
Sulfatos (como SO₄²⁻)	250.00
Trihalometanos totales	0.10
Zinc	3.00
SAAM (sustancias activas al azul de metileno)	0.50
PLAGUICIDAS	Lím máx (µg/L)
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
Dicloro Difenil Tricloroetano (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 (ácido 2,4 – diclorofenoxiacético)	30.00



ANEXOS

Características biológicas

Tabla 1.6 Límites máximos permisibles de organismos coliformes (SS, 2005)

Notas: ⁽¹⁾ Los resultados de los exámenes bacteriológicos deben reportarse en unidades de NMP/100 mL (número más probable por 100 mL) si se utiliza la técnica del número más probable
⁽²⁾ Los resultados de los exámenes bacteriológicos deben reportarse en unidades de UFC/100 mL (unidades formadoras de colonias por 100 mL) si se utiliza el método de filtración por membrana
⁽³⁾ Bajo situaciones de emergencia sanitaria la Secretaría de Salud, sin perjuicio de las atribuciones de otras Dependencias del Ejecutivo, establecerá los casos en los que se habrá de determinar la presencia de este agente biológico.

Característica bacteriológica	Límite máximo	
	(NMP/100mL)	(UFC/100 mL)
Organismos coliformes totales	No detectables	0
<i>Vibrio cholerae</i>³	Negativo	



ANEXOS

ANEXO D.- Cálculo de capacidad para filtros

Una vez que tenemos el flujo a tratar, entonces calculamos la capacidad del equipo.

Filtro Multimedia o Multicama.

a. Determinar tamaño del tanque.

Ya que se tiene el flujo de agua que se va a tratar, se hace lo siguiente:

Se usa la siguiente fórmula para obtener el área del tanque y de esta forma su diámetro: Área del tanque = (flujo a tratar (gpm)) / (12.5 gpm/pie²), después se obtiene el diámetro del tanque en pulgadas.

Tenemos un flujo de 10 gpm, entonces, el área del tanque = 10 gpm / 12.5 gpm/pie² = 0.8 pie².

Y después obtenemos el diámetro...

La siguiente tabla puede agilizar el proceso.

Diam.Tanque	Área (pie ²)	Vol. de Medio Filtrante (pie ³)*
8"	0.35	0.75
9"	0.44	1.0
10"	0.55	1.5
12"	0.79	2.0
13"	0.92	2.5
14"	1.07	3.0
16"	1.4	4.0
18"	1.77	5.0
21"	2.41	7.0
24"	3.14	10
30"	4.91	15
36"	7.07	20
42"	9.62	30

*El medio filtrante no incluye la grava.

...esto significa que escogeríamos el tanque de 12" para nuestra planta purificadora de agua.



ANEXOS

b. Determinar retrolavado.

Una vez que se tiene el diámetro y área del tanque, se obtiene, mediante la siguiente fórmula, el retrolavado necesario del mismo para un filtro multicapa o multimedia: Retro lavado (gpm) = Área del tanque (pie²) x 15 gpm/pie².

Para nuestra plantapurificadora de gua sería: Retrolavado = 0.79 pie² x 15 gpm/pie² = 11.85 gpm

c. Escoger la válvula.

Usar la tabla de las válvulas presentada anteriormente, pero excluir la Fleck 9000, la Fleck 9500 y la Osmonics 255.

Para nuestro caso pueden ser las válvulas: **Fleck 2510.**



ANEXOS

ANEXO E.- Filtro Carbón Activado.

a. Determinar tamaño del tanque.

Ya que se tiene el flujo de agua que se va a tratar, se hace lo siguiente:

Se usa la siguiente fórmula para obtener el área del tanque y de esta forma su diámetro:
Área del tanque = (flujo a tratar (gpm)) / (7.5 gpm/pie²), después se obtiene el diámetro del tanque en pulgadas.

Tenemos un flujo de 10 gpm, entonces, el área del tanque = 10 gpm / 7.5 gpm/pie² = 1.33 pie².

Y después obtenemos el diámetro...

La siguiente tabla puede agilizar el proceso.

Diam.Tanque	Área (pie ²)	Vol. de Medio Filtrante (pie ³)
8"	0.35	0.75
9"	0.44	1.0
10"	0.55	1.5
12"	0.79	2.0
13"	0.92	2.5
14"	1.07	3.0
16"	1.4	4.0
18"	1.77	5.0
21"	2.41	7.0
24"	3.14	10
30"	4.91	15
36"	7.07	20
42"	9.62	30

...esto significa que escogeríamos el tanque de 16”.



ANEXOS

b. Determinar retrolavado.

Una vez que se tiene el diámetro y área del tanque, se obtiene, mediante la siguiente fórmula, el retrolavado necesario del mismo para un filtro multicama o multimedia: $\text{Retro lavado (gpm)} = \text{Área del tanque (pie}^2\text{)} \times 10 \text{ gpm/pie}^2\text{.}$

Para nuestro caso sería: $\text{Retrolavado} = 1.4 \text{ pie}^2 \times 10 \text{ gpm/pie}^2 = 14 \text{ gpm}$

c. Escoger la válvula.

Usar la tabla de las válvulas presentada anteriormente, pero excluir la Fleck 9000, la Fleck 9500 y la Osmonics 255; ya que estas válvulas se usan solo para suavizador.

Para el ejemplo pueden ser las válvulas: Fleck 2510

TABLAS PARA SELECCIONAR EQUIPOS POR FLUJO

Filtros Multi-Media de Aquor

Tanque	Area Tanque Pies2	Vol. Tanque Pies3	Vol. Mat. Fil. Pies3	Flujo de Servicio						Retrolavado	
				Excelente		Normal		Pico		GPM	LPM
				GPM	LPM	GPM	LPM	GPM	LPM		
8" x 44"	0.35	1.16	0.75	3.49	13.21	4.36	16.5	5.24	19.8	5.24	19.8
9" x 48"	0.44	1.58	1.00	4.42	16.72	5.52	20.9	6.63	25.1	6.63	25.1
10" x 54"	0.54	2.19	1.50	5.40	20.44	6.75	25.5	8.10	30.7	8.10	30.7
12" x 52"	0.78	3.00	2.00	7.80	29.52	9.75	36.9	11.70	44.3	11.70	44.3
13" x 54"	0.92	3.68	2.50	9.20	34.82	11.50	43.5	13.80	52.2	13.80	52.2
14" x 65"	1.07	5.10	3.00	10.69	40.46	13.36	50.6	16.03	60.7	16.03	60.7
16" x 65"	1.39	6.60	4.00	13.90	52.61	17.38	65.8	20.85	78.9	20.85	78.9
18" x 65"	1.77	8.30	5.00	17.67	66.88	22.09	83.6	26.51	100.3	26.51	100.3
21" x 62"	2.41	11.00	7.00	24.05	91.04	30.07	113.8	36.08	136.6	36.08	136.6
24" x 65"	3.14	13.40	10.00	31.42	118.91	39.27	148.6	47.12	178.4	47.12	178.4
30" x 72"	4.91	25.00	15.00	49.09	185.79	61.36	232.2	73.63	278.7	73.63	278.7
36" x 72"	7.07	35.30	20.00	70.70	267.60	88.38	334.5	106.05	401.4	106.05	401.4
42" x 72"	9.62	46.10	30.00	96.20	364.12	120.25	455.1	144.30	546.2	144.30	546.2
48" x 72"	12.57	61.90	40.00	125.70	475.77	157.13	594.7	188.55	713.7	188.55	713.7
63" x 67"	21.65	80.20	55.00	216.47	819.34	270.59	1024.2	324.71	1229.0	324.71	1229.0
66" x 60"	23.76	118.80	80.00	118.80	449.66	166.32	629.5	237.60	899.3	285.12	1079.2
72" x 60"	28.27	141.35	95.00	141.35	535.01	197.89	749.0	282.70	1070.0	339.24	1284.0
78" x 60"	33.18	165.90	110.00	165.90	627.93	232.26	879.1	331.80	1255.9	398.16	1507.0
84" x 60"	38.48	192.40	130.00	192.40	728.23	269.36	1019.5	384.80	1456.5	461.76	1747.8
90" x 60"	44.18	220.90	150.00	220.90	836.11	309.26	1170.5	441.80	1672.2	530.16	2006.7
96" x 60"	50.27	251.35	170.00	251.35	951.36	351.89	1331.9	502.70	1902.7	603.24	2283.3
102" x 60"	56.75	283.75	190.00	283.75	1073.99	397.25	1503.6	567.50	2148.0	681.00	2577.6
108" x 60"	63.62	318.10	215.00	318.10	1204.01	445.34	1685.6	636.20	2408.0	763.44	2889.6
114" x 60"	70.88	354.40	240.00	354.40	1341.40	496.16	1878.0	708.80	2682.8	850.56	3219.4
120" x 60"	78.54	392.70	260.00	392.70	1486.37	549.78	2080.9	785.40	2972.7	942.48	3567.3
126" x 60"	86.59	432.95	300.00	432.95	1638.72	606.13	2294.2	865.90	3277.4	1039.08	3932.9
132" x 60"	95.03	475.15	315.00	475.15	1798.44	665.21	2517.8	950.30	3596.9	1140.36	4316.3
138" x 60"	103.87	519.35	350.00	519.35	1965.74	727.09	2752.0	1038.70	3931.5	1246.44	4717.8
144" x 60"	113.10	565.50	380.00	565.50	2140.42	791.70	2996.6	1131.00	4280.8	1357.20	5137.0



"ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA
PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II".



ANEXOS

Carbón activado

Tanque	Pies2 Area	Pies3 Tanque	Pies3 Resina	Capacidad						Flujo de Servicio				Retrolavado	
				Económica		Normal		Máxima		Normal		Pico			
				Cap. (gr.)	Cap. (Granos)	Cap. (gr.)	Cap. (Granos)	Cap. (gr.)	Cap. (Granos)	GPM	LPM	GPM	LPM	GPM	LPM
8" x 44"	0.35	1.16	0.75	989	15000	1286	19500	1385	21000	2.25	8.52	3.75	14.19	1.92	7.27
9" x 48"	0.44	1.58	1.00	1319	20000	1715	26000	1979	30000	3.00	11.36	5.00	18.93	2.43	9.20
10" x 54"	0.54	2.19	1.50	1979	30000	2573	39000	2968	45000	4.50	17.03	7.50	28.39	2.97	11.24
12" x 52"	0.78	3.00	2.00	2639	40000	3430	52000	3958	60000	6.00	22.71	10.00	37.85	4.29	16.24
13" x 54"	0.92	3.68	2.50	3298	50000	4288	65000	4947	75000	7.50	28.39	12.50	47.31	5.06	19.15
14" x 65"	1.07	5.10	3.00	3958	60000	5145	78000	5937	90000	15.30	57.91	15.00	56.78	5.88	22.25
16" x 65"	1.39	6.60	4.00	5937	90000	7718	117000	8905	135000	19.80	74.94	20.00	75.70	7.65	28.94
18" x 65"	1.77	8.30	5.00	7256	110000	9433	143000	10884	165000	24.90	94.25	25.00	94.63	9.72	36.79
21" x 62"	2.41	11.00	7.00	9235	140000	12005	182000	13852	210000	33.00	124.91	35.00	132.48	13.23	50.07
24" x 65"	3.14	13.40	10.00	13193	200000	17150	260000	19789	300000	40.20	152.16	50.00	189.25	17.28	65.40
30" x 72"	4.91	25.00	15.00	19789	300000	25726	390000	29683	450000	75.00	283.88	75.00	283.88	27.00	102.18
36" x 72"	7.07	35.30	20.00	26385	400000	34301	520000	39578	600000	105.90	400.83	100.00	378.50	38.89	147.18
42" x 72"	9.62	46.10	30.00	39578	600000	51451	780000	59367	900000	150.00	567.75	150.00	567.75	52.91	200.26
48" x 72"	12.57	61.90	40.00	52770	800000	68602	1040000	79156	1200000	200.00	757.00	200.00	757.00	69.14	261.68
63" x 67"	21.65	80.20	55.00	72559	1100000	94327	1430000	108839	1650000	300.00	1140.00	300.00	1140.00	119.06	450.64
66" x 60"	23.76	118.80	80.00	105520	1600000	137200	2080000	158311	2400000	350.00	1330.00	350.00	1330.00	145.00	540.00
72" x 60"	28.27	141.35	95.00	125305	1900000	162925	2470000	187995	2850000	420.00	1584.00	420.00	1584.00	174.00	640.00
78" x 60"	33.18	165.90	110.00	145090	2200000	188650	2860000	217678	3300000	500.00	1900.00	500.00	1900.00	210.00	780.00
84" x 60"	38.48	192.40	130.00	171470	2600000	222950	3380000	257256	3900000	600.00	2280.00	600.00	2280.00	252.00	930.00
90" x 60"	44.18	220.90	150.00	197850	3000000	257250	3900000	296834	4500000	720.00	2724.00	720.00	2724.00	308.00	1130.00
96" x 60"	50.27	251.35	170.00	224230	3400000	291550	4420000	336412	5100000	840.00	3180.00	840.00	3180.00	364.00	1330.00
102" x 60"	56.75	283.75	190.00	250610	3800000	325850	4940000	375989	5700000	1000.00	3700.00	1000.00	3700.00	440.00	1600.00
108" x 60"	63.62	318.10	215.00	283585	4300000	368725	5590000	425462	6450000	1200.00	4440.00	1200.00	4440.00	528.00	1930.00
114" x 60"	70.88	354.40	240.00	316560	4800000	411600	6240000	474934	7200000	1440.00	5280.00	1440.00	5280.00	616.00	2260.00
120" x 60"	78.54	392.70	260.00	342940	5200000	445900	6760000	514512	7800000	1680.00	6120.00	1680.00	6120.00	712.00	2590.00
126" x 60"	86.59	432.95	300.00	395700	6000000	514500	7800000	593668	9000000	2000.00	7400.00	2000.00	7400.00	840.00	3080.00
132" x 60"	95.03	475.15	315.00	415485	6300000	540225	8190000	623351	9450000	2250.00	8100.00	2250.00	8100.00	910.00	3310.00
138" x 60"	103.87	519.35	350.00	461650	7000000	600250	9100000	692612	10500000	2520.00	9180.00	2520.00	9180.00	1020.00	3710.00
144" x 60"	113.10	565.50	380.00	501220	7600000	651700	9880000	751979	11400000	2800.00	10560.00	2800.00	10560.00	1120.00	4060.00



ANEXOS

ANEXO F.- Equipos

Tanque de Almacenamiento de Agua Dura:

Las cisternas ROTOMEX están fabricadas con resina de polietileno de la más alta calidad aprobado por la FDA (Food and Drug Administration) adecuado para el manejo de alimentos y almacenamiento de agua por no producir olor ni sabor.

Características:

Moldeados rotacionalmente en un pieza sin costuras.

Interior totalmente liso lo que evita que se adhiera suciedad a las paredes.

Indicador de líquidos visible.

Temperatura máxima de almacenamiento 63 grados centígrados.

Para este caso en particular sólo se requiere la cantidad de 2 tanques de 5000Lts, para almacenar la materia prima y el segundo para almacenar el producto.

Bomba

Q: 10-40l/min, H: 39-24m

Maximo Gastos (Q_{máx}) y carga (H_{max})

Q_{max}: 50l/min, H_{max}: 44m

Valores Eléctricos (uso continuo)

Kw0.75 Hp: 1 9A

V115

Este tipo de bombas debido a sus características, son las bombas que más se aplican en la industria. Las razones de estas preferencias son las siguientes:

- Son aparatos giratorios.
- No tienen órganos articulados y los mecanismos de acoplamiento son muy sencillos.
- La impulsión eléctrica del motor que la mueve es bastante sencilla.
- Para una operación definida, el gasto es constante y no se requiere dispositivo regulador.
- Se adaptan con facilidad a muchas circunstancias.
- El peso es muy pequeño y por lo tanto las cimentaciones también lo son.



ANEXOS

Filtro de Lecho Profundo

Operating specifications:

Flujo requerido= $Q= 35\text{LPM} = 9.25\text{ MPM}$.

Dimensiones de Filtro= 12"X54".

Maximum Pressure

150psig 1034Kpa

Maximum Temperature:

120 °F 49 °C

Minimum Temperature:

34°F 1 °C

Maximum vacuum

5" 127mmHg

Filtro de Carbón Activado

Operating specifications:

Flujo requerido= $Q= 35\text{LPM} = 9.25\text{ MPM}$.

Dimensiones de Filtro= 12"X54".

Maximum Pressure

150psig 1034Kpa

Maximum Temperature:

120 °F 49 °C

Minimum Temperature:

34°F 1 °C

Maximum vacuum

5" 127mmHg

Selección de Tubería.

Las Conexiones de PVC CEDULA 40 cementar, cumplen con la aprobación de NSF para conducción de agua potable, el color de su fabricación es en Blanco la Temperatura máxima que se recomienda es de 140 °F (60 °C).

Ventajas:

- a) Durabilidad para aplicaciones en donde se requiere de resistencia química las tuberías de PVC son la mejor opción es por eso que el tiempo de vida útil es el de mayor durabilidad.
- b) Abocinado representa un ahorro de un cople ya que le permite ir uniando las tuberías en un tendido lineal sin necesidad de coples adicionales.
- c) Economía el uso de PVC representa un ahorro significativo en el costo final de la instalación.
- d) Resistencia Química las tuberías de PVC no permiten la corrosión e incrustación de los elementos que conducen.



ANEXOS

- e) Bajo Peso el PVC es ligero y facilita las maniobras de almacenaje, transporte e instalación.

Algunas de las aplicaciones en donde se recomienda utilizar este material son:

- a) Instalaciones en albercas, balnearios, tinas de hidromasaje, etc.
- b) Sistemas de riego en campos de golf.
- c) Tratamiento de agua.
- d) Instalaciones electromecánicas.
- e) Instalaciones hidrosanitarias.
- f) Bajadas pluviales.
- g) Agua helada y torres de enfriamiento.
- h) Líneas de distribución de agua de proceso.
- i) Inyección de cloro y dióxido clorhídrico.
- j) Sistemas de manejo de alumbre y cáusticos.
- k) Presión de Trabajo a 23 ° C



"ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II".



ANEXOS

HOJA DE CÁLCULO DE SISTEMA DE BOMBEO										
INFORMACION DEL PROYECTO					DATOS DE DISEÑO					
# PROYECTO:	Planta purificadora de agua.				Flujo	2.50	9.2			
TÍTULO:	Calculo de la bomba.					m³/h	IGPM	USGPM		
# PU:	105- PU- A/E				gravedad específica		0.997			
DESCRIPCION:					concentración de sólidos		0.00%	wt%		
FECHA:	22/03/12				grav esp sólidos					
POR:					Viscosidad		0.891	cP		
					Viscosidad de Pulpa			cP		
					Presión de vapor			kPa		
Información de la tubería										
Línea No.	Succión			Descarga						
#	1	2	3	1	2	3				
Diámetro nominal (inch)	0.75	0.75	0.75	1.50	10.00	10.00				
Schedule (1=40, 2=80)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00				
Tubería D.I. (mm)	19.05	19.05	19.05	38.10	254.00	254.00				
Velocidad (m/s)	2.44	2.44	2.44	0.61	0.01	0.01				
Velocidad (ft/s)	7.99	7.99	7.99	2.00	0.04	0.04				
Reynolds No.	51930.98	51930.98	51930.98	25965.49	3894.82	3894.82				
Factor de fricción	0.0275	0.0275	0.03	0.03	0.04	0.04				
Factor de Resistencia (K):										
Entrada a la Tubería	1	1.50	1.50	1.50	2	2.00	2.00	2.00		
Long tub (m)	3	3	3	3	150	150	150	150		
Gate Valves	1	0.12	0.12	0.12	2	0.24	0.24	0.24		
Globe Valves	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
Check Valves	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
Ball Valves	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
Butterfly Valves	0	0.67	0.65	0.62	0	0.00	0.00	0.00		
Plug Valves	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
Reducers	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
90° Elbows	2	0.90	0.90	0.90	8	3.60	3.60	3.60		
45° Elbows	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
Hard Tees	0	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00	0.00		
Soft Tees	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00		
Pipe Exit	1	1.00	1.00	1.00	1	1.00	1.00	1.00		
Factor de resistencia total,	4.19	4.17	4.14		6.84	6.84	6.84			
H fricción limpio										
scala permisible, %	10.00%				15.00%					
	1.1				1.15					
Carga (m)										
H fricción limpio		2.58	2.57	2.56		2.84	0.00	0.00		
H fricción sucio		2.84	2.83	2.82		3.27	0.00	0.00		
Presión Recip (m)	1.00	10.36	10.36	10.36	4.50	46.62	46.62	46.62		
Elevación inicial (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	2.00	2.00	2.00		
Flujometro dP (m)					0.00	0.00	0.00	0.00		
Valvula de control dP (m)					0.00	0.00	0.00	0.00		
Interc calor dP (m)					0.00	0.00	0.00	0.00		
Otros Equipos dP (m)					0.00	0.00	0.00	0.00		
Carga Total Succión / desc	8.525	8.532	8.540		51.89	48.62	48.62			
#	1	2	3		1	2	3			
Diámetro	9	(mm)	38.10	254.00	254.00	(in)	1.50	10.00	10.00	
Carga Total		(m)	43.37	40.09	40.08	(ft)	142.29	131.54	131.51	
Presión desc requer		(kPa)	507.50	475.53	475.53	(psi)	22.40	20.98	20.98	
Presión desc requer		(atm)	5.01	4.69	4.69					
Potencia Hidráulica		(kW)	0	0	0	(hP)	0.39	0.37	0.37	
Eficiencia Bombeo		(%)	65.00%	75.00%	75.00%	(%)	0.65	0.75	0.75	
Potencia Instalación		(kW)	0.75	0.75	0.75	(hP)	1.01	1.01	1.01	

A la temperatura de 37 °C el valor de

kT

e

$$\frac{kT}{e} = \frac{(1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}) \cdot (310 K)}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 0,0267 V = 26,7 mV$$

de modo que el potencial de Nernst es

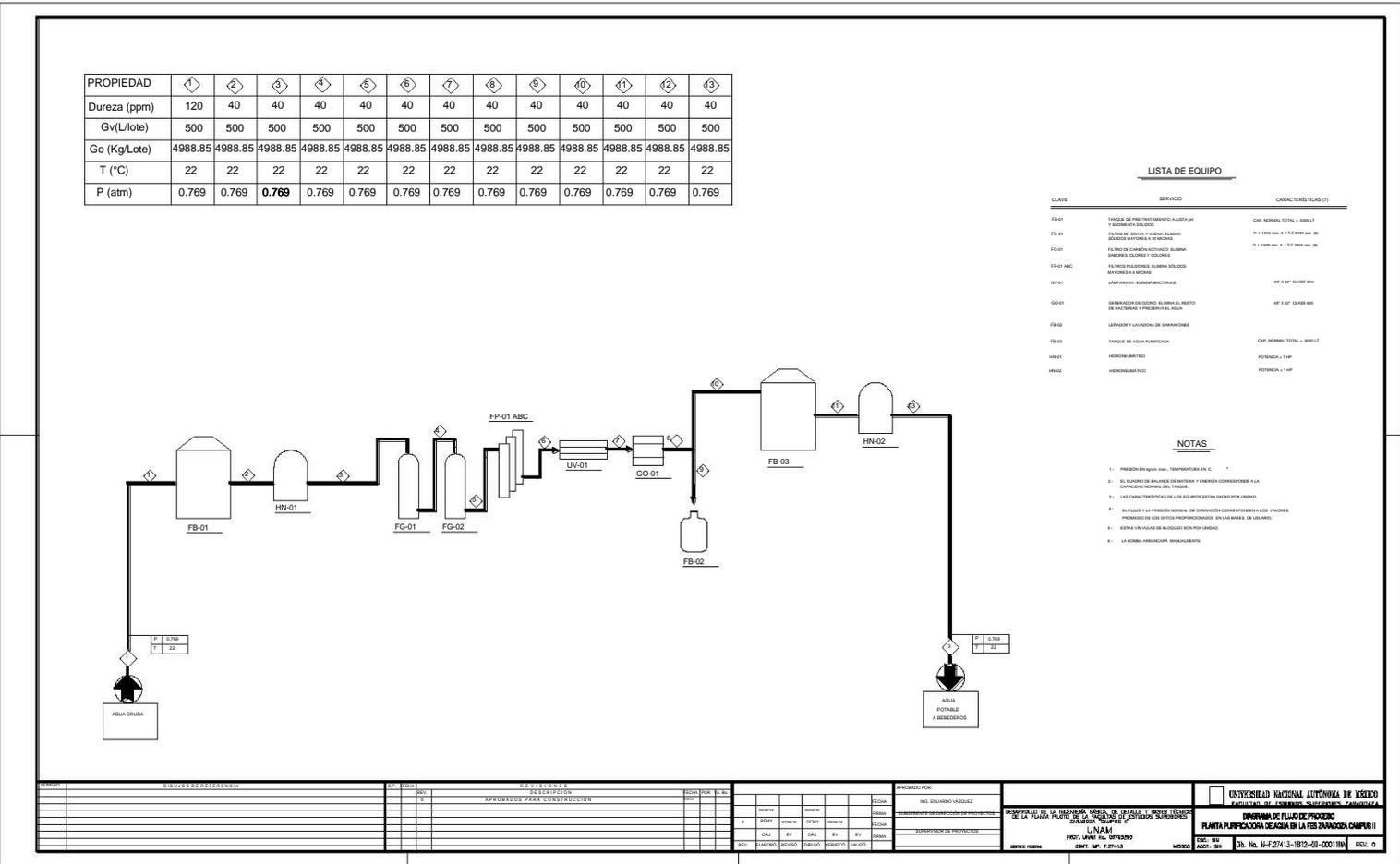
$$V = V_1 - V_2 = \pm(61,4 mV) \log \frac{c_1}{c_2}$$



“ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA PURIFICADORA DE AGUA EN LA FES ZARAGOZA CAMPUS II”.

ANEXOS

ANEXO G.- Diagrama de flujo de proceso de la planta purificadora de la FES ZARAGOZA “Campus II”





ANEXOS

ANEXO H.- Esquema del sistema de tubería de los bebederos

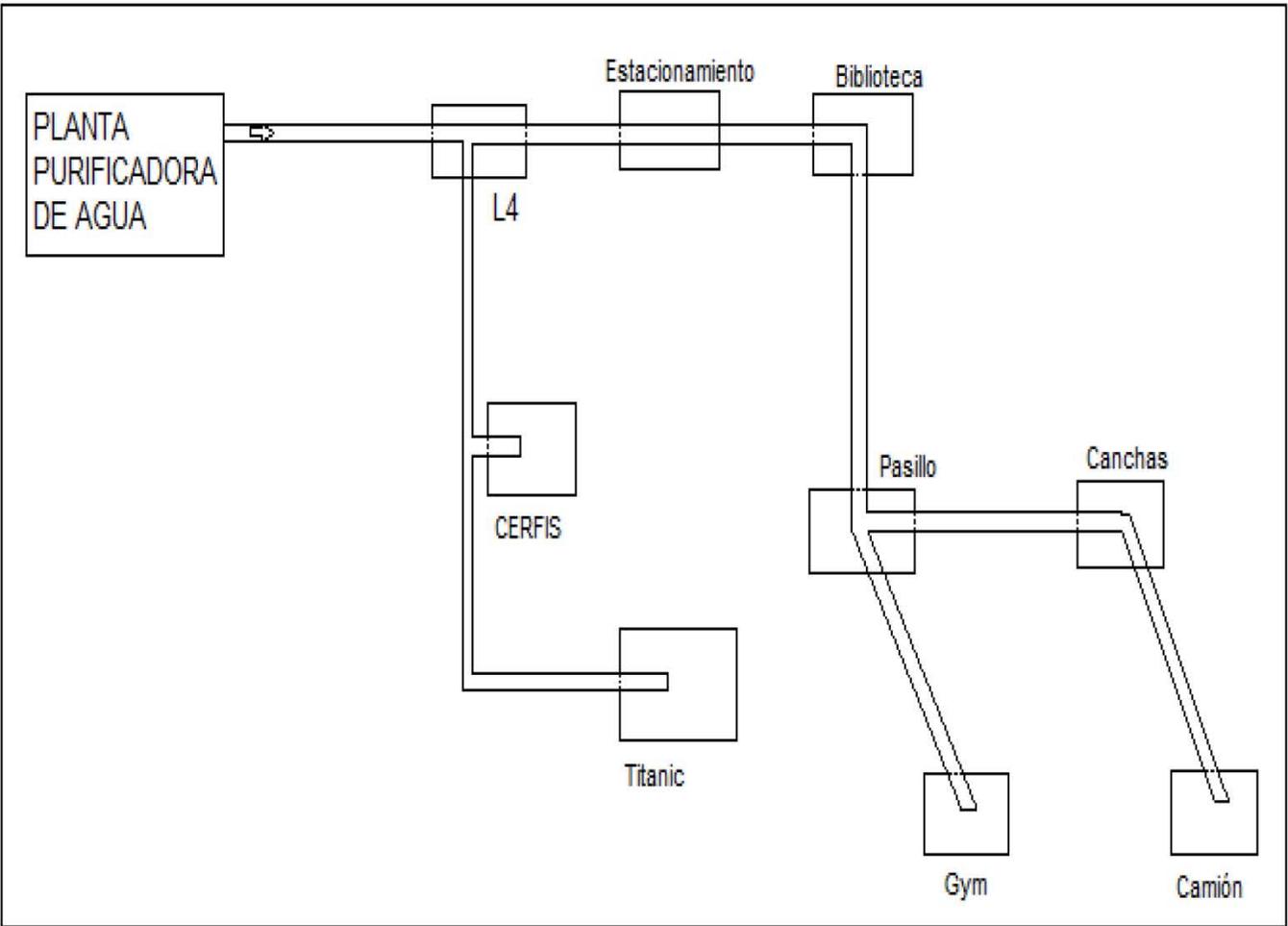


Figura 4.1 Sistema de tubería de los bebederos.



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Kelly., Desinfección con Cloro y Riesgos de los Productos Derivados de la Desinfección. Reynolds, Volumen 2 - Número 4, 1 de Julio de 2002.
2. Amy G.L., Chadik P.A., Chowdhury Z.K., «Developing Models for Predicting THM Formation Potencial and Kinetics, 9 pp, Journal AWWA Vol. 79, Nº 7, Julio 1987.
3. Arboleda Valencia Jorge, «Historia del Desarrollo de la Tecnología de la Purificación del agua», 15 pp, Página de la División Agua Potable (DIAGUA) de Aidis Interamericana, 2003.
4. Arboleda Valencia Jorge, «Teoría y Práctica de la Purificación del Agua», pp 57-66, Acodal, Mc Graw Hill, tercera edición, 2000.
5. Bove, F., "TTHMs, TCE & PCE: Drinking Water Contaminants & Adverse Pregnancy Outcomes," Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), CDC, Atlanta, EE.UU., WC&P, pp. 42-47, Mayo 2002.
6. Carlson M.A., Heffernan K.M., Ziesemer C.C., Zinder E.G., «Comparing Two GACs for Adsorption and Biostabilization», 12pp, Journal AWWA Vol. 86, Nº 3, Marzo 1994.
7. Dallas Water utilities. **Informe sobre la calidad del agua potable 2000.** Junio 2001. Dallas Texas USA. www.alcaldiadedallas.org. 12 de junio de 2004.
8. Echegaray Rubén. **Informe especial de ozono.** <http://fuerzaeditorial.com/b-viendo/diciembre/informe.html>. 16 de julio de 2004.
9. Environmental Protection Agency, «Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual», EPA 815-R-99-014, Abril 1999.
10. Keith A. Christman. **Calidad del agua: Desinfección efectiva.** Consejo de química del cloro. Arlington, VA, USA. [http://C3.org/Calidad del agua desinfección efectiva-C3-org.htm](http://C3.org/Calidad%20del%20agua%20desinfecci%C3%B3n%20efectiva-C3-org.htm). 28 de junio de 2004.
11. Langlais B. **Ozone in water treatment application and engineering,** American Water Works Association, Lewis Publishers, Washington, DC. 1991.
12. Metcalf Eddy. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación, y reutilización de aguas residuales. Cuarta edición. Editorial Labor. 2003 .
13. Monterrubio Rubén, “Experiencias en plantas piloto de ablandamiento, Memorias del 8º congreso internacional de tratamiento de aguas, México, 1989.



BIBLIOGRAFÍA

14. Mott, Robert L. **Mecánica de Fluidos Aplicada**. Prentice Hall Hispanoamericana, 4ª Edición. 1996.
15. Perry, Robert H.; Green, Don W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. McGraw Hill 1999. 7th Edition.
16. Powell Shepard, "Acondicionamiento de aguas para la industria", ED. Limusa, 1966.
17. Rase Howard, Barrow, "Ingeniería de proyectos para plantas de proceso", Ed. Continental, 1981.
18. Rolf A. Deininger, Janice Skadsen, Larry Sanford, Anthony G. Myers. Desinfección del agua con ozono. [www] Disponible en el URL: <www.int-ozone-assoc.org> Octubre 9, 1998.
19. Sánchez, Eduardo. **Manual de procedimientos de medición de ozono residual**. Refrigeración de Morelos S.A. de C.V. Jiutepec, Morelos. 2004.
20. Snoeyink Vernon L., Kirisits Mary J., Pelekani Costas, «Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water», Chapter thirteen: «Adsorption of Disinfection By-Products Precursors», pp 259-284, American Water Works Association, 1999.
21. Uribarren Berrueta, Teresa, «Criptosporidiosis», Departamento de Microbiología y Parasitología, Facultad de Medicina, UNAM, México DF 04510, MEXICO, 2002.
22. U.S. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), "Achievements in Public Health, 1900-1999: Control of Infectious Diseases," CDC, Atlanta, EE.UU., *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 30 de julio, 1999.
23. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), "National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts; Final Rule," USEPA, *Federal Register*, 63(241): 69389-69476, 40 CFR, 16 de diciembre, 1998.
24. Van Wylen, **Termodinámica**, 2^{QEd.} 2002, Limusa.
25. Welty, James R.; Wicks, Charles E.; Wilson, Robert. **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer**. John Wiley and Sons. 1969.
26. Yunus Cengel, **Termodinámica**, SQEde. 2006, Me Graw Hill.