



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

## Facultad de Química- Farmacia

### Departamento de Ingeniería Química

# Trabajo de Diploma

Análisis de alternativas para el tratamiento de agua en  
la Planta Potabilizadora de la Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas.

Autor: Robert Albert Brown

Tutora: Dra. Ana Margarita Contreras Moya

Asesora: MSc. Pastora Martínez Nodal

Curso: 2013 - 2014



## Dedicatoria

A mi madre por ser mi fuente de inspiración,

A mi esposa por estar siempre a mi lado,

A mi familia por apoyarme en todos los momentos.

## Agradecimiento

A mi madre Grace Brown por su esfuerzo y amor incondicional

A mi esposa por su apoyo incondicional,

A mi hermano Roderick, y hermanas Carol y Terry, y tío Stafford y a toda mi familia por creer en mí,

A mi tutora Ana Margarita por su tiempo, dedicación y consejos,

A la profesora Pastora por su cooperación,

Al Laboratorio CNICA Territorial Villa Clara, principalmente a Idaimy y a los técnicos de laboratorio,

Al colectivo del CEQA,

Al colectivo de trabajadores de la planta potabilizadora en la UCLV,

A mis amigos,

Al gobierno cubano por la oportunidad para realizar mis estudios,

Y a todos que de una manera u otra colaboraron en la realización de este trabajo.

### **Resumen**

El agua es un recurso imprescindible para la vida. En respuesta a la problemática de la contaminación en la actualidad, agudizada por los efectos negativos de diversas enfermedades de origen hídrico, se han desarrollado diferentes métodos para el tratamiento del agua potable. Estos se implementan mediante la construcción de las plantas potabilizadoras que consisten en un conjunto de equipos destinados a tratar el agua de modo que sea apta para el consumo humano.

El trabajo actual tiene como finalidad el análisis de alternativas para potabilizar el agua en la planta de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV), dado el deterioro de la misma. En este se realiza un diagnóstico de la infraestructura de la planta y una evaluación del funcionamiento de la misma que permitieron proponer las medidas necesarias para mejorar su operación.

Como resultado principal se obtienen los problemas fundamentales que afectan la planta, la evaluación de los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos que definen la calidad del agua y por tanto la eficiencia del proceso, así como el dimensionamiento de dos alternativas con las capacidades necesarias para realizar el tratamiento adecuado del agua para consumo humano en la UCLV.

Atendiendo al análisis económico unido a la importancia y necesidad de dicha instalación en este centro se propone acometer la inversión para la alternativa I, que tiene básicamente la estructura de la instalación actual, con las mejoras identificadas en el diagnóstico realizado y con la capacidad requerida para satisfacer la demanda de agua potable actual

Palabras claves: *agua potable, calidad del agua, planta potabilizadora, tratamiento de agua, alternativas de tratamiento.*

## Summary

### **Summary**

Water is an indispensable resource for life. In answer to the problem of contamination at the present time, made worse by the negative effects of diverse illnesses of hydric origin, different methods have been developed for the treatment of drinking water. These are implemented through the construction of treatment plants that consist on a group of equipments dedicated to treat the water so it is adequate for human consumption.

The purpose of the current is the analysis of alternatives for the treatment of water in the plant of the Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV), given the deterioration of the same. In this is carried out a diagnosis of the infrastructure of the plant and an evaluation of the operation of the same that allowed to propose the necessary measures to improve their operation.

As the main result the fundamental problems are obtained that affect the plant, the evaluation of the main physical chemical and microbiological parameters, that define the quality of the water and therefore the efficiency of the process, as well as the designing of two alternatives with the necessary capacities to carry out the treatment of the water adequately for human consumption in the UCLV.

Assisting to the economic analysis together with the importance and necessity of this installation in this centre intends to carry out the investment for the alternative I that has the structure of the current installation basically, with the improvements identified in the diagnosis carried out and with the capacity required to satisfy the demand of current drinking water.

Key words: Drinking water, water quality, treatment plants, water treatment, treatment alternatives.

## Índice

### **Capítulo 1: Revisión Bibliográfica**

1.1 Agua Potable. Conceptos Básicos.....	3
1.2. Antecedentes Históricos.....	3
1.3. La Problemática global del agua.....	4
1.3.1. Distribución del agua en la Tierra... ..	4
1.3.2. Situación actual del agua potable en el mundo. ....	5
1.3.3. Situación actual del agua potable en Cuba.....	5
1.4. Captación.....	6
1.4.1. Captación de aguas superficiales.....	7
1.4.2. Captación de aguas subterráneas.....	7
1.5. Características que determinan la calidad del agua... ..	7
1.5.1. Características organolépticas y físicas.....	7
1.5.2. Características químicas.....	8
1.5.3. Características biológicas.....	11
1.5.4. Características radiológicas o radioactivas del agua.....	11
1.6. El agua y su papel en la salud humana .....	11
1.6.1. Posibles efectos perjudiciales del agua sobre la salud.....	12
1.6.2. Prevención de los posibles efectos perjudiciales del agua sobre la salud.....	13
1.7. Potabilización.....	14
1.7.1 Tecnología de membranas aplicada a la potabilización.....	24
1.8. Impactos ambientales de la potabilización del agua.....	26

### **Capítulo 2: Diagnóstico de la planta potabilizadora de agua de la UCLV**

2.1. Descripción del sistema actual para la potabilización del agua en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.....	33
2.1.1 Diagnóstico de la infraestructura instalada para la potabilización del agua en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.....	33

## Índice

2.1.2 Análisis de los resultados del diagnóstico en la planta.....	36
2.1.3 Evaluación del comportamiento de los principales parámetros que afectan la calidad del agua en la planta.....	38
2.1.3.1. Discusión de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio.....	42
2.1.3.2. Monitoreo de cloro residual en la red de distribución de agua en la UCLV.....	44
2.2 Determinación de la demanda de cloro.....	46
2.2.1 Procedimiento desarrollado para la determinación de la Demanda de Cloro.....	47
<b>Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.</b>	
3.1. Análisis de la alternativa I para la potabilización del agua en la UCLV.....	50
3.1.1. Descripción del sistema de tratamiento de la alternativa I.....	50
3.1.2. Dimensionamiento de los equipos para la alternativa I.....	50
3.1.3. Análisis económico de la alternativa I.....	57
3.2. Evaluación de la alternativa II para la potabilización del agua en la UCLV.....	63
3.2. 1 Descripción del sistema de tratamiento de la alternativa II.....	63
3.2.2. Dimensionamiento de los equipos para la alternativa II.....	63
3.2.3. Análisis económico de la alternativa II.....	65

## Introducción

### **Introducción**

A lo largo de la historia el agua ha sido un recurso natural fundamental para el desarrollo de la sociedad en que vivimos. Sin embargo el desarrollo económico y el incremento en los estándares de vida han aumentado la presión sobre este recurso hasta convertirlo en un recurso escaso, pues solo 2,5 por ciento del agua en el mundo es dulce. La escasez del agua es uno de los principales retos enfrentado por diversas sociedades de todo el mundo de este siglo, dado por diferentes factores como el aumento de la población, la distribución desigual, la mala gestión del recurso y la contaminación creciente entre otros. Además de enfrentar el problema de la escasez del agua, hoy en día son motivo de preocupación las diferentes y cuantiosas enfermedades causadas por el agua contaminada que por consiguiente son resultados del cambio de la naturaleza y acciones del propio hombre. Una de estas acciones puede ser el resultado de la mala aplicación de los procesos de tratamiento del agua en las plantas potabilizadoras.

La función principal de una planta potabilizadora consiste en la producción de un agua libre de microorganismos y sustancias que afectan a la salud humana mediante el uso de diferentes procesos. Desde la época antigua se han empleado diferentes procesos para la potabilización del agua, pero en la actualidad, en todo el planeta se trabaja en función de mejorar dichos procesos y se han buscado opciones más eficientes para la eliminación de un mayor número de contaminantes encontrados en el agua para cumplir con los requisitos establecidos por las normas en cada país.

Al igual que otros países, Cuba ha avanzado en los estudios concernientes a la busca de mejores métodos para el tratamiento del agua, teniendo actualmente una cobertura de más de 90% de agua potable. Como ilustración, se han construido varias plantas de agua potable en todo el país aunque algunas presentan infraestructuras que tienen años prolongados de explotación y sin mantenimiento adecuado.

En la provincia de Villa Clara, específicamente, en la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV) se sitúa una de las plantas potabilizadoras de la provincia. Esta planta está destinada a distribuir el agua a toda la universidad y a algunas partes de la comunidad cercana a la misma, como los repartos Universitario y El Callejón de los Patos. Su principal función era el tratamiento de las aguas del río Ochoa pero actualmente su fuente de agua es la presa Minerva. La infraestructura fue construida en la década del 50 y tiene un alto nivel de deterioro, por lo que requiere de reparación por presentar diversos problemas en la parte mecánica, eléctrica y en los equipos existentes.

En este trabajo investigativo se realiza un diagnóstico en dicha planta potabilizadora con el objetivo de identificar los problemas concretos que presenta y proponer medidas para la solución de los mismos, de manera que se pueda asegurar el cumplimiento de los requisitos establecidos por la norma cubana para agua potable.

## Introducción

Basando en lo antes dicho, el **problema científico** radica en la no existencia de un diagnóstico actualizado en la planta potabilizadora de la UCLV, que permita identificar los problemas de la misma para proponer medidas que garanticen la obtención de un agua que cumpla con los límites establecidos por la NC 827:2012.

### **Hipótesis:**

Si se realiza un diagnóstico en la planta potabilizadora de la UCLV se podrán identificar los problemas en la infraestructura y funcionamiento de la misma y proponer alternativas de solución que permitan obtener agua con las características adecuadas para el consumo de la población universitaria.

### **Objetivo general:**

Realizar un diagnóstico en la planta potabilizadora de agua de la UCLV y análisis de alternativas para mejorar el proceso de tratamiento de agua en la misma.

### **Objetivos específicos:**

1. Revisar el estado técnico de la tecnología instalada en la planta potabilizadora de agua de la UCLV.
2. Evaluar la operación de la planta en función del comportamiento de los principales parámetros que afectan la calidad del agua.
3. Realizar análisis de alternativas de tratamiento de agua para la correcta operación de la planta.

El trabajo se estructura en la siguiente manera: en el Capítulo I se presenta la revisión bibliográfica referente al tema objeto de estudio. En el capítulo II se realiza un diagnóstico de la planta de potabilización de agua en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, mientras que en el capítulo III se analizan posibles alternativas para mejorar el tratamiento que se realiza actualmente en la planta. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos del trabajo.

## **Capítulo 1. Revisión Bibliográfica**

### **1.1. Agua Potable. Conceptos Básicos**

El agua es una de las sustancias químicas más abundantes en la naturaleza y es esencial para la mayoría de las formas de vida. Desde el punto de vista químico no se encuentra en estado puro, sino que en su composición están presentes sales, iones, sustancias disueltas y en suspensión, así como diferentes microorganismos, entre otros. En las relaciones hombre-consumo de agua se aprecia que el hombre se relaciona con el agua para satisfacer sus necesidades básicas de alimentación e higiene, producir alimentos, obtener productos industrializados, y generar energía. El agua para consumo debe ser, obligatoriamente potable. El término potable proviene del latín *potabilis*: que se puede beber. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el agua potable es aquella que no debe contener microorganismos ni sustancias químicas a concentraciones que puedan amenazar la salud del hombre. Debe ser fresca, transparente e incolora y carecer de sabores u olores desagradables (Díaz, 2006).

El agua potable debe estar certificada por las normas correspondientes que establezcan cuales son los límites máximo admisible de sustancias y microorganismos que pueden estar presentes en el agua, sin que afecten la salud del hombre. En cada país existe una norma que establece los requisitos sanitarios del agua potable, que en Cuba se corresponde con la NC 827:2012

### **1.2. Antecedentes Históricos**

La historia del agua potable es muy remota. En Siria y Babilonia se construyeron conducciones de albañilería y acueductos para acercar el agua desde sus fuentes a lugares próximos a las viviendas. Los antiguos pueblos orientales usaban arena y barro poroso para filtrar el agua, también en Europa los romanos construyeron una red de acueductos y estanques e instalaron filtros para obtener agua de mayor calidad.

Hay métodos registrados para mejorar el sabor y el olor del agua desde 4.000 años antes de Cristo mediante filtración a través de carbón, exposición a los rayos solares y ebullición.

En el antiguo Egipto dejaban reposar el agua en vasijas de barro durante varios meses para decantarla. En otras ocasiones incorporaban ciertas sustancias minerales y extractos vegetales para facilitar la precipitación de partículas y clarificar el agua (coagulación). En los comienzos del 1500 antes de Cristo, se tiene referencias de que los egipcios usaban ya el alumbre para lograr precipitar partículas suspendidas en el agua.

Ya en el siglo XVIII de nuestra época se estableció la filtración como tal, aunque el grado de claridad logrado no era medible. En el siglo XIX empezó a usarse de forma más regular la

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

filtración lenta sobre arena y los científicos alcanzaron conocimientos sobre las fuentes y efectos de los contaminantes del agua potable. En 1855 se probó que el cólera era una enfermedad de transmisión hídrica por un brote en Londres a consecuencia de la contaminación de un pozo público por aguas residuales. En 1880 Pasteur explicó cómo organismos microscópicos podían transmitir enfermedades a través del agua. En el siglo XX se descubrió que la turbiedad del agua no era solo un problema estético.

En los comienzos del siglo XX la filtración se mostró como un método de tratamiento efectivo para reducir la turbiedad y desinfectantes como el cloro jugaron un gran papel en la reducción del número de brotes epidémicos. En 1908 se empleó el cloro por primera vez como un desinfectante del agua potable de New Jersey y el ozono empezó a emplearse.

El primer sistema de suministro de agua potable a toda una ciudad, fue llevado a cabo por John Gibb, en 1804. En 1806 empieza a funcionar en París la mayor planta de tratamiento de agua conocida hasta el momento. Allí, el agua sedimentaba durante 12 horas antes de su filtración. Los filtros consistían en arena y carbón. En 1827 el inglés James Simplón construye un filtro de arena para la purificación del agua potable. Hoy en día todavía se considera el primer sistema efectivo utilizado con fines de salud pública.

Los avances más recientes en el tratamiento del agua han sido el empleo de membranas para osmosis inversa y otras técnicas como la ozonización ([www.elaguapotable.com](http://www.elaguapotable.com)).

### **1.3. La Problemática global del agua**

#### **1.3.1. Distribución del agua en la Tierra**

La cantidad de agua en el mundo es una cuestión considerable pero también irregular pues no es un recurso infinito.

Examinando un mapa podemos deducir que alrededor de un 70% de la superficie del globo es mar, razón por la cual podríamos concluir que la provisión de agua consumible sería una situación resuelta, pero no es tan así, la mayor cantidad corresponde a los océanos con un 97,50%, no disponible por efecto de la salinidad.

Una pequeña porción (no salina) que corresponde al 2,50% forma parte de los casquetes polares, glaciares, nieve, agua subterránea, humedad del suelo, biota, atmósfera, ríos y lagos. De toda el agua dulce, el 80% está formando los polos y zonas heladas de la Tierra; el 19% es agua subterránea y el 0,7% está formando parte de la atmósfera.

El agua dulce disponible en ríos y lagos es el 0,3% del total. Es una cantidad escasa para toda la humanidad, por lo que es necesario conservarla y evitar su contaminación para la continuación de vida en el planeta ([www.observatori.org](http://www.observatori.org)).

### **1.3.2. Situación actual del agua potable en el mundo**

La escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del ser humano. Hay suficiente agua en el planeta para abastecer a las personas que lo habitan, pero ésta está distribuida de forma irregular, se desperdicia, está contaminada y se gestiona de forma insostenible. Además, el problema de escasez de agua potable en el mundo es causado por la permanente creciente demanda debido al aumento de la población, mal manejo del suelo (deforestación, desertización) y mejoras en la calidad de vida (www.taringa.net).

Según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (www.un.org) la escasez de agua afecta ya a todos los continentes. Cerca de 1.200 millones de personas, casi una quinta parte de la población mundial, vive en áreas de escasez física de agua, mientras que 500 millones se aproximan a esta situación. Otros 1.600 millones, alrededor de un cuarto de la población mundial, se enfrentan a situaciones de escasez económica de agua, donde los países carecen de la infraestructura necesaria para transportar el agua desde ríos y acuíferos. En la figura 1 del Anexo I se señalan los países del mundo donde existe escasez física y económica de agua.

Se proyecta que para el 2025, 1.800 millones de personas vivirán en países o regiones con escasez absoluta de agua. La escasez de agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI al que se están enfrentando ya numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, van en aumento las regiones con niveles crónicos de carencia de agua (WWAP, 2012).

### **1.3.3. Situación actual del agua potable en Cuba**

Al triunfar la Revolución Cubana el 64 % de la población cubana tenía acceso al agua potable. A partir del año 1995 Cuba alcanzó 90 % de cobertura de agua potable. En la tabla I y la figura 2 (Anexo II) se observa la cobertura de agua potable en Cuba y por provincias, respectivamente y atendiendo a la siguiente clasificación de los servicios de agua potable del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos:

- Conexión domiciliaria: es la que proporciona mejor calidad de vida y comodidad al disponer del servicio en la propia vivienda.
- Servicio público: es la entrega que se efectúa por carros cisternas, requiere de un mayor esfuerzo de los usuarios ya que tienen que acarrear el agua hacia el domicilio.

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

- Servicio de fácil acceso: necesidad de buscar el agua hasta distancias de 300 m, siendo el menos confortable porque el esfuerzo es considerablemente alto para la población.

Tabla I. Cobertura de agua potable en Cuba (%).

Conceptos	2011		
	Total	Urbano	Rural
Población con acceso a agua potable	92.3	97.4	76.7
Con:			
Conexión domiciliaria	73.5	85.4	37.3
Servicio público	13.3	9.3	25.4
Fácil acceso	5.5	2.7	14.1
Población sin acceso a agua potable	7.7	2.6	23.3

Fuente: Oficina Nacional de Estadística e Información, a partir de la información del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos

Se aprecia que en el año 2011, el 92,3 % de la población tiene acceso al preciado líquido y el mayor porcentaje con conexión domiciliaria. Las provincias orientales y Pinar del Río son las menos favorecidas por cobertura de agua potable. En Villa Clara se observan altos porcentajes de cobertura. Específicamente, en la Universidad Central de Las Villas existe una planta potabilizadora para satisfacer sus propias necesidades, aunque con problemas asociados a la obsolescencia del equipamiento por los años de explotación sin adecuado mantenimiento.

### **1.4. Captación**

La captación del agua es un proceso usado para recolectar y almacenar el agua que posteriormente es consumido por una determinada población.

El agua captada proviene de diferentes fuentes como las subterráneas y de las superficiales. Para que sea consumible, es imprescindible que pase por un proceso de potabilización que lo transforma en agua potable. La potabilización del agua es un proceso de tratamiento para hacerla apta para el consumo humano.

Al elegir los tipos de captación se tiene en cuenta las características hidrogeológicas del sector, las características hidrodinámicas de los materiales acuíferos que se pretenda captar, el volumen de agua requerido, la distribución temporal de la demanda, el coste de las instalaciones de explotación y mantenimiento de la captación.

Existen dos tipos de captación, captación de aguas superficiales y subterráneas.

#### **1.4.1. Captación de aguas superficiales**

Desde de la antigüedad el hombre utiliza las aguas pluviales como primera forma de abastecimiento (Pérez, 2011). Las aguas de fuentes superficiales no presentan condiciones físicas ni microbiológicas adecuadas para el consumo humano, lo que hace necesario la purificación. Normalmente la captación de aguas superficiales se da a través de las aguas pluviales, ríos, lagos, arroyos, canales y embalses.

La captación de aguas pluviales es hecha a través de las cisternas donde la lluvia es recogida en los tejados, así mucha suciedad puede ser arrastrada con el agua por lo que requiere ser filtrada en la propia cisterna. En los arroyos, ríos y canales, se sugiere un estudio completo de las captaciones, de manera que se garantice su explotación.

#### **1.4.2. Captación de aguas subterráneas**

El agua que se infiltra en suelo pasa a ser parte del agua subterránea. Las aguas subterráneas profundas por lo general son de calidad y normalmente no necesitan ser purificadas. En la captación de aguas subterráneas se usan métodos más comunes tales como zanjas y drenes, galerías de agua, pozos y sondeos (Otero, 2006). Además, hay otro tipo de captación de agua subterránea denominado captación de manantiales.

Los dos procesos de captación son interpretados como medios de abastecimiento del agua y la implementación de cualquiera de ellos, exige un estudio hidrogeológico.

La utilización de una fuente de abastecimiento de agua para consumo público, estará determinada por Índices de calidad sanitaria establecidos por la norma vigente, en Cuba NC 1021: 2014, la cual establece los requisitos sanitarios de los sistemas de abastecimiento público de agua y se aplica a todos los sistemas con fines de producción de agua potable, así como en los proyectos de nuevas obras, remodelaciones y ampliaciones. En todos los casos la utilización de una fuente de abastecimiento de agua, esta será aprobada por las autoridades sanitarias hidro-económicas correspondientes.

#### **1.5. Características que determinan la calidad del agua**

La calidad del agua se define por su composición química, física y bacteriológica. Para consumo humano, el agua debe estar libre de color, gusto, olor, materia suspendida visible, sustancias orgánicas o inorgánicas que puedan producir efectos fisiológicos perjudiciales y de organismos capaces de provocar enfermedades (*Richter y Azevedo Netto, 2003*).

##### **1.5.1. Características organolépticas y físicas**

Las características organolépticas y físicas son mediciones indirectas de componentes presentes en el agua que pueden o no ser tóxicos. Dentro de ellas se encuentran las

relacionadas con la calidad estética que garantizan que el agua sea agradable a los consumidores y no cree desconfianza ni perjuicios (Comisión Nacional del Agua, 2007).

- Color: Según *Abi-faiçal* (2010) el agua pura no posee color. Lo que confiere color al agua son las sustancias disueltas o en suspensión. El color puede clasificarse como color aparente, que es el producido por la materia suspendida y disuelta y el color verdadero, que es el color que queda en el agua una vez eliminados los sólidos en suspensión, siendo este último el que se mide en esta determinación.
- Turbiedad: La turbiedad incrementa el color aparente del agua y se debe a la presencia de materia suspendida orgánica e inorgánica. Lo que se mide como turbiedad es la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas (Comisión Nacional del Agua, 2007).
- Sabor y Olor: El sabor y el olor están en general íntimamente relacionados. Ellos pueden tener como causa las impurezas disueltas, normalmente de naturaleza orgánica. En el agua se pueden considerar cuatro sabores básicos: ácido, salado, dulce y amargo.
  - Sólidos: Se denomina así a los residuos que se obtienen como materia remanente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada (Barrenechea, 2004). Los sólidos totales se clasifican en sólidos filtrables (coloidales y disueltos) y sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables). Todos ellos pueden clasificarse en fijos y volátiles (Díaz, 2006).
- Temperatura: Es muy importante dado que puede influenciar algunas propiedades, como: la velocidad de las reacciones químicas; el aumento o disminución de la sensación de sabor y olor; la solubilidad de los gases; las reacciones de hidrólisis del coagulante; el comportamiento de las unidades de mezcla rápida, de floculación, de decantación y de filtración; la eficiencia de la desinfección; y otras (*Abi-faiçal*, 2010).
- Conductividad eléctrica: Es la capacidad de un cuerpo para permitir el paso de la corriente eléctrica. El agua pura es mala conductora de la corriente eléctrica, mientras que las soluciones acuosas son buenas conductoras, producto de las sales iónicas disueltas. (López)

### **1.5.2. Características químicas**

Las características químicas se deben a sustancias químicas disueltas en el agua y permiten escoger el tratamiento y las sustancias requeridas para tratarla.

- pH: Medida de la concentración de iones hidrógeno. El químico danés *Sorensen* (1909) lo definió como  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ . El pH óptimo de las aguas es entre 6,5 y 8,5. El pH influye en fenómenos como la corrosión y las incrustaciones en redes de distribución.

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

- Alcalinidad: Capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. La alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, por lo que se toma como indicador de dichas especies iónicas. Otras sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad ([www.uprm.edu](http://www.uprm.edu)).
- Dureza: Representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presentes en el agua. Es causada principalmente por las sales de Ca y Mg y en menor grado por Al, Fe, Mn, Sr y Zn. Por la variedad de compuestos que intervienen, la dureza se expresa como una cantidad equivalente de CaCO<sub>3</sub>. La dureza se clasifica en carbonatada (temporal) y no carbonatada (permanente). La primera es sensible al calor, precipita a altas temperaturas y equivale a la alcalinidad (Comisión Nacional del Agua, 2007). Las aguas pueden clasificarse en función de la dureza.

Al proceso de eliminar la dureza se le denomina “ablandamiento” y se realiza por diferentes métodos. El más usado es la precipitación del Mg<sup>2+</sup> y del Ca<sup>2+</sup> con cal y carbonato de sodio para producir hidróxidos y carbonatos. Por medio del intercambio iónico se logra un ablandamiento total y con el calentamiento se elimina la dureza temporal (Comisión Nacional del Agua, 2007).

- Metales Pesados: Son elementos químicos que poseen un peso atómico entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg), y que presentan un peso específico superior a 4 g cm<sup>-3</sup>. Son tóxicos, en general, no por sus características esenciales, sino por las concentraciones en que pueden presentarse y el tipo de especie que forman en un determinado medio. Los seres vivos “necesitan” pequeñas concentraciones de muchos de éstos elementos para funcionar adecuadamente. El hierro es vital para la formación de hemoglobina (<http://www.uclm.es>).
- Cloruros: Son compuestos de cloro con otro elemento o radical, presentes en casi todas las aguas naturales y en un amplio intervalo de concentraciones. Su presencia puede dar sabor salino a las aguas, interferir en la coagulación y en cantidades elevadas, indican alguna forma de contaminación que puede perjudicar las personas con problemas cardíacos o renales (*Abi-faiçal*, 2010).
- Sulfatos: Se encuentran en las aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones. Las normas para agua potable establecen límite máximo de 250 mg/L, pues valores superiores tienen una acción "purgante" (<http://arturobola.tripod.com>).
- Nitratos y Nitritos: Son compuestos de nitrógeno relacionados que se encuentran en el suelo, el agua, las plantas y los alimentos de forma natural. Se forman cuando los microorganismos del entorno descomponen materiales orgánicos. Los nitratos también

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

se utilizan en los fertilizantes químicos. El mayor problema de la exposición elevada de nitratos / nitritos en el agua es la metahemoglobina, que se produce en niños pequeños que consumen aguas con más de 50 mg/L de ion nitrato.

- Fluoruros: El flúor es uno de los elementos más comunes de la corteza terrestre. Su presencia en el agua se debe principalmente a la infiltración y disolución de este elemento del suelo y rocas que lo contienen. Ésta situación se presenta con mayor frecuencia en las aguas subterráneas, donde la composición geológica del suelo y las condiciones son favorables para su disolución. La ingestión de flúor a bajas concentraciones ( $\leq 1$  mg/L) se considera benéfica por su capacidad de prevenir las caries dentales. Pero, el consumo prolongado de agua con altos contenidos de flúor puede producir la fluorosis de dientes y huesos y si la concentración es muy alta, puede originar daños a la salud, tales como fragilidad de los huesos, e incluso rigidez total y deformación ósea (Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2002).
- ✓ Índice de Langelier: Es un índice para calcular el carácter incrustante o agresivo del agua y tiene que ver con los diversos equilibrios en el agua del anhídrido carbónico, bicarbonato-carbonatos, el pH, la temperatura, la concentración de calcio y la salinidad total. Es importante para poder controlar la incrustación o la corrosión en las redes de distribución del agua y para las instalaciones interiores domésticas. El Índice de Langelier se usa para determinar el equilibrio del agua: si el índice es cero; el agua está perfectamente equilibrada, si es negativo; indica que el agua es corrosiva y si es positivo; indica que el agua es incrustante.

Según el RD (Real Decreto) 140/2003, de aguas de consumo humano, el Índice de Langelier debe de estar comprendido entre -0,5 y 0,5 ([www.nordconsultors.es](http://www.nordconsultors.es)).

- Carbono Orgánico Total (COT): Es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico y se usa frecuentemente como un indicador no específico de calidad del agua. Se mide por la cantidad de dióxido de carbono que se genera al oxidar la materia orgánica en condiciones especiales.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua, mediante procesos biológicos aerobios. En general se refiere al oxígeno consumido en 5 días (DBO<sub>5</sub>) y se mide en mg/L. Las aguas subterráneas suelen contener menos de 1 mg O<sub>2</sub>/L. Un contenido superior es indicativo de contaminación ([www.unitek.com.ar](http://www.unitek.com.ar)).
- DQO: Mide la cantidad de materia orgánica total susceptible de oxidación química (bio y no biodegradable). En esta se utiliza un poderoso agente químico como el dicromato o el permanganato de potasio en medio ácido como oxidante. Sus unidades, son las mismas de la DBO (mg O<sub>2</sub>/L) (<http://www.navarra.es>).

- Oxígeno disuelto (OD): Es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua. Es un indicador de contaminación del agua. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. El oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno en el aire que se ha disuelto en el agua, por lo que están muy influidos por las turbulencias del río. Otros factores como la salinidad, o la altitud (debido a que cambia la presión) también afectan los niveles de OD. Además, la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua depende de la temperatura (<http://www.navarra.es>).

### **1.5.3. Características biológicas**

Las características biológicas del agua son debidas a la presencia de los organismos vivos. Algunos de estos organismos son patógenos, como ciertas bacterias, virus y protozoarios, que pueden perjudicar la salud e incluso ser la causa de epidemias. Otros organismos, como algunas algas, pueden conferir sabor y olor desagradables el agua, provocar problemas en filtros y en otras partes del sistema de abastecimiento. Se puede determinar las características biológicas del agua realizando pruebas bacteriológicas e hidrobiológicas (*Di Bernardo et al., 2002; Richter y Azevedo Netto, 2003*).

### **1.5.4. Características radiológicas o radioactivas del agua**

Hay tres tipos de radiaciones:  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta) y (gama). Los compuestos radioactivos pueden entrar al agua por causas naturales o por fuentes antropogénicas. Muchos arroyos y pozos recogen la radiactividad al contacto con los minerales que la contienen y después percolan a las aguas subterráneas. Ellos pueden causar cáncer, efectos mutagénicos, somáticos y teratogénicos (Comisión Nacional del Agua, 2007; *Di Bernardo, 1993*).

Son pocos los casos de niveles alarmantes de radiactividad en el agua de consumo. Las fuentes con problemas radiactivos son poco usuales y no se usan en el suministro para agua potable (Comisión Nacional del Agua, 2007).

## **1.6. El agua y su papel en la salud humana**

Según la Organización Mundial de la Salud (2004), un suministro y acceso adecuado al agua potable o salubre previene enfermedades tales como: anemia, arsenicosis, ascariasis, cólera, dengue, diarrea, disentería, fluorosis, hepatitis, malaria, fiebres tifoideas, etc. Aunque, igualmente afirma que el 80% de la enfermedades más comunes en las regiones en desarrollo (diarreas, fiebres, dengue, malaria, etc...) están relacionadas con la calidad del agua. Dichas enfermedades son la causa de muerte de un niño cada ocho segundos.

### **1.6.1. Posibles efectos perjudiciales del agua sobre la salud**

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

Los efectos adversos en la salud humana ocasionados por el agua pueden dividirse en cuatro categorías:

- Enfermedades transmitidas por el agua: Son causadas por el agua contaminada por desechos humanos, animales o químicos. Las enfermedades relacionadas producidas por agentes biológico-infecciosos (microorganismos) se manifiestan en forma rápida y las producidas por agentes químicos, tardan en manifestarse.
- ✓ Los principales elementos químicos transmitidos por el agua potable que tienen efectos severos en la salud, se presentan a continuación (OMS, 2004):
  - Arsénico: Es un contaminante importante del agua, ya que es una de las pocas sustancias que causan cáncer a los humanos a través de su consumo en el agua para beber, también es la causa de arsenicosis.
  - Fluoruro: Los fluoruros producen efectos en los tejidos óseos. Concentraciones bajas de fluoruros protegen contra caries dentales, especialmente en niños. Sin embargo, los fluoruros también pueden tener un efecto adverso en el esmalte de los dientes y puede conducir a fluorosis dental. La ingestión elevada de fluoruros puede tener efectos más severos en los tejidos óseos.
  - Plomo - Los niños pequeños absorben 4 o 5 veces más plomo que los adultos, y la vida media de eliminación puede ser considerablemente más larga en niños que en adultos. El plomo es una sustancia tóxica que se acumula en el esqueleto, es tóxico al sistema nervioso central y periférico, induciendo efectos neurológicos.
  - Nitratos y nitritos - La principal preocupación de salud pública es la formación de metahemoglobina o “síndrome del bebé azul” como se explicó anteriormente. La metahemoglobina, causa cianosis y, a elevadas concentraciones, asfixia.
- ✓ Enfermedades de origen biológico-infecciosos - Los microorganismos causantes de las denominadas “enfermedades hídricas” provienen principalmente de las heces humanas o animales. La presencia de estos microorganismos en el agua tiene diversas causas entre las que se encuentran la falta de protección de las fuentes de abastecimiento, la contaminación biológica por infiltración de aguas negras al sistema de distribución, escurrimientos de agua contaminada hacia los mantos freáticos, las deficiencias en el acondicionamiento del agua, o bien, la falta de higiene de los usuarios, entre otras.

Algunas de las enfermedades comunes transportadas en el agua y los patógenos que lo provocan se presentan a continuación:

- ✓ Cólera: Es una enfermedad infecciosa producida por una bacteria llamada *Vibrio cholerae* que se asienta en el intestino del afectado.
- ✓ Tifoidea: La enfermedad es causada por *Salmonella typhi*, una bacteria patógena en el tracto intestinal y el torrente sanguíneo de la víctima..

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

- ✓ Meningitis: Una enfermedad, caracterizada por la inflamación de las meninges, las membranas de tejido conectivo que cubren todo el sistema nervioso central. Es una enfermedad muy grave. Los responsables de ella son los virus o bacterias.
- ✓ Gastroenteritis: La enfermedad es caracterizada por la inflamación del tracto gastrointestinal que está compuesto por el estómago y el intestino delgado. Los virus y las bacterias de las especies *Escherichia coli* y *Campylobacter* son las causas principales de la gastroenteritis.
- Enfermedades con base en el agua: Son causadas por organismos acuáticos que pasan una parte de su ciclo vital en el agua y otra parte como parásitos de animales. Estos organismos pueden prosperar tanto en aguas contaminadas como no contaminadas. Aunque estas enfermedades no suelen ser mortales, impiden a las personas llevar una vida normal y merman su capacidad para trabajar.
  - ✓ Enfermedades de origen vectorial relacionadas con el agua: Son las transmitidas por vectores, como los mosquitos y las moscas negras, que se crían y viven cerca de aguas contaminadas y no contaminadas. Entre las enfermedades de origen vectorial se incluyen las siguientes: fiebre amarilla, malaria y dengue.
  - ✓ Enfermedades vinculadas a la escasez de agua: Son enfermedades que se propagan por causa de la inadecuada disponibilidad del agua potable y saneamiento deficiente. Entre las enfermedades típicas vinculadas a la escasez de agua se incluye la sarna.

### **1.6.2. Prevención de los posibles efectos perjudiciales del agua sobre la salud**

Los dos primeros tipos de enfermedades pueden ser reducidas o prevenidas por alguna forma de tratamiento que eliminaría o inactivaría los contaminantes orgánicos o inorgánicos del agua. Las enfermedades por escasez de agua pueden ser controladas a través de la higiene, por lo cual es imprescindible disponer de suministros adecuados de agua potable. Las enfermedades de origen vectorial relacionadas con el agua, aunque no están directamente ligadas con el agua potable, pueden ser disminuidas por la protección y el mejoramiento de las fuentes del agua superficial.

En resumen, las enfermedades que están relacionadas con el agua se desglosan en cuatro categorías que pueden tener efecto crónico o agudo. Igualmente hay diferentes métodos que pueden ser aplicados en su prevención, reducción o control.

### **1.7. Potabilización**

La planta potabilizadora es la responsable por el tratamiento del agua. En otras palabras, la potabilización es un proceso que transforma el agua para que sea apropiada para el consumo humano, es el agua que contiene un valor equilibrado de minerales que no son

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

perjudiciales para la salud (agua potable). El tratamiento del agua es una aplicación de varios procesos de eliminación de una serie de sustancias y microorganismos transformándola en agua de elevada calidad.

El tratamiento del agua depende de nivel microorganismos denominados bacterias del tipo coliformes encontrados en la misma, que son de importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y alimentos. La concentración de estas bacterias, posterior al tratamiento físico químico, debe ser menor de 2.2/100 cm<sup>3</sup> para el agua potable. Para las aguas en fuente se establecen cuatro grupos con sus respectivas recomendaciones. Estos grupos se clasifican en dependencia de los valores de NMP; que no es más que un método de recuento de colonias conocido como el número más probable de presuntos coliformes (Díaz, 2006; Osorio, 2008). Los índices NMP están dados para 100 ml de agua.

Los tratamientos para potabilizar el agua, atendiendo a los componentes o impurezas a eliminar, se pueden clasificar de la forma en que se muestra en la Tabla II:

➤ Tabla II. Operaciones y procesos para el tratamiento de agua

<b>Tipo de contaminante</b>	<b>Operación y/o proceso unitario</b>
Sólidos gruesos	Desbaste
Partículas coloidales	Coagulación + Floculación + Decantación
Sólidos en suspensión	Filtración
Materia Orgánica	Afino con Carbón Activo
Amoniaco	Cloración al <i>Breakpoint</i> *
Gérmenes Patógenos	Desinfección
Metales no deseados (Fe, Mn)	Precipitación por Oxidación
Sólidos disueltos (Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> )	Ósmosis Inversa

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

\*Cloración al *breakpoint* es una forma de preoxidación

En la Tabla III (Anexo III) se observa que, atendiendo al grado de tratamiento requerido para alcanzar los parámetros de calidad del agua, se pueden implementar diferentes procesos en las plantas potabilizadoras (AWWA, 2007)..

Se le llama tratamiento convencional al que usualmente se aplica y que consta de las siguientes etapas:

### ➤ **Preoxidación**

Consiste en la adición de un oxidante en el punto inicial y tiene dos funciones, la desinfección y la oxidación. Con estas dos propiedades se logra eliminar materia orgánica

(algas y otros microorganismos) e inorgánica (hierro, manganeso, sulfuros, amoníaco y otras sustancias reductoras). Para conseguir la preoxidación se utilizan diversos tipos de agentes oxidantes como cloro en varias formas y técnicas tales el uso de la radiación por luz ultravioleta.

➤ **Coagulación–Floculación**

La coagulación y floculación conjuntamente es un proceso que causa un incremento de tamaño del floculo, disminuyendo así el tiempo de sedimentación de las partículas. Para este proceso se añaden coagulantes tales como sales de aluminio o sales de hierro, disminuyendo así las cargas eléctricas entre los iones.

Independientemente, la coagulación es un proceso por el cual las partículas coloidales pierdan su fuerza repulsiva eléctrica. Existen dos tipos de coagulación: por adsorción (cuando la concentración de partículas coloidales en el agua es muy alta con alta turbiedad que provoca formación instantánea de los flóculos al añadir los coagulantes) y por barrido (cuando el agua presenta baja turbiedad y baja concentración de las partículas coloidales y las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación del coagulante).

Entre las variables a atender para optimizar el proceso de coagulación se encuentran: pH, turbiedad, sales disueltas, temperatura del agua, tipo de coagulante utilizado, condiciones de mezclado, sistemas de aplicación de los coagulantes, color y dosis del coagulante.

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto, casi instantáneo. La floculación es el proceso que sigue a la coagulación y se logra con una lenta agitación de las partículas coaguladas para permitir la aglomeración de los flóculos a fin de aumentar su tamaño y peso para facilitar su posterior sedimentación. Es aconsejable no agitarlo de forma intensa, ya que se provocaría un rompimiento transformándose en partículas de menor tamaño y raras veces se puede volver a su estado inicial. Hay dos tipos de floculación:

- ✓ Floculación Pericinética (producida por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano).
- ✓ Floculación Ortocinética (se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, es inducida por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico).

Los parámetros que se caracterizan la floculación son los siguientes:

- ✓ Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada: mecánica o hidráulica).
- ✓ Gradiente de Velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
- ✓ Número de colisiones (choque entre microfloculos).
- ✓ Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).
- ✓ Densidad y tamaño de los floculos.
- ✓ Volumen de lodos (los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).
- ✓ En conclusión, el proceso de coagulación-floculación es simplemente el proceso donde se adiciona un coagulante al agua, se mezcla rápidamente en un corto tiempo provocando la neutralización de las partículas coloidales, disminuye la fuerza repulsiva eléctrica entre las partículas y seguidamente, con la aparición de los floculos se empieza a mezclar de forma más lenta, permitiendo la aglomeración de los mismos a un tamaño y peso mayor que facilitan la sedimentación.

➤ **Sedimentación**

La sedimentación es una operación unitaria de separación sólido fluido por la cual las partículas con un peso mayor que el fluido se depositan en el fondo debido a la acción de gravedad. La operación se lleva a cabo en equipos llamados sedimentadores usados en la potabilización del agua. La sedimentación puede ser aplicada en etapas de pre-sedimentación, pos- floculación, o pos- ablandamiento.

Según su estado de agregación y la cantidad de partículas que contiene una suspensión la sedimentación se puede presentar en cuatro tipos:

- ✓ Tipo 1 – Diluido, no floculento, asentamiento libre
- ✓ Tipo 2 – Diluido, floculento
- ✓ Tipo 3 – Suspensiones Concentradas.
- ✓ Tipo 4 – Suspensiones Concentradas, Compresión.

Utilizar o no sedimentación primaria depende del contenido de sólidos suspendidos sedimentables y responde a una decisión que resulte económica (Díaz, 2006).

En la potabilización del agua, el proceso de sedimentación está gobernado por la Ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuanto mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuanto menor es la viscosidad del mismo. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, por el proceso de coagulación - floculación. El tiempo de retención del agua en el sedimentador depende de la velocidad de sedimentación.

Ley de Stokes:

$$U = \frac{g(\rho_s - \rho_a)d^2}{18\eta}$$

Donde:

$U$ : Velocidad de sedimentación (cm/s) ,  $g$ : Aceleración de la gravedad (cm/s),  $\rho_s$ : Densidad de partícula (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_a$ : Densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>),  $d$ : Diámetro de partícula (cm),  $\eta$ : Viscosidad del agua (g/cm \*s)

Siguiendo la ley de Stokes para la sedimentación, se demuestra que el tiempo necesario para la sedimentación de diferentes tipos de partículas como coloides y bacterias sería muy alto, de ahí la necesidad de la agregación de las partículas de forma que aumente el tamaño y la velocidad de sedimentación, que es lo que se consigue con la coagulación-floculación ([www.elaguapotable.com](http://www.elaguapotable.com)).

La sedimentación es un proceso muy necesario. Las partículas que se encuentran en el agua pueden ser perjudiciales en los sistemas o procesos de tratamiento ya que elevadas turbiedades inhiben los procesos biológicos y se depositan en el medio filtrante causando elevadas pérdidas de carga y deterioro de la calidad del agua efluente de los filtros.

En resumen se puede decir que la sedimentación es una operación de separación sólido líquido que consiste en la remoción de las partículas suspendidas más densas que el agua, mediante la fuerza gravitacional o con el auxilio de la coagulación – floculación, facilitando procesos posteriores.

### ➤ **Filtración**

En la potabilización del agua se denomina filtración al proceso unitario donde se separan las impurezas (las partículas y los microorganismos) que no pudieron ser eliminados del líquido en los procesos anteriores, mediante su paso a través de un medio filtrante. Aunque existe otra materia como la antracita, el medio filtrante más utilizado es la arena sobre un lecho de grava como soporte. Las plantas de potabilización pueden clasificarse en:

- ✓ Plantas de filtración rápida.
- ✓ Plantas de filtración lenta.

La eficiencia de la filtración se verifica a través de las características de la suspensión, del medio filtrante y de la hidráulica de la filtración. Como ejemplo, el resultado que se tiene al filtrar el agua cruda en filtros lentos de arena, y el de agua coagulada en filtros rápidos de arena. Las interacciones en estas dos operaciones son completamente diferentes en lo que concierne a los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas. En otras palabras,

un factor importante en la filtración lenta, en la mayoría de los casos resulta ser un factor no relevante en el proceso de filtración rápida.

Factores que influyen en eficiencia de la filtración:

- Características de la suspensión (tipo, tamaño, densidad y dureza de las partículas suspendidas):  
Temperatura del agua a filtrar; concentración de partículas suspendidas en el afluente; potencial zeta de la suspensión; pH del afluente.
- Características del medio filtrante:  
Tipo del medio filtrante; características granulométricas del material filtrante; peso específico del material filtrante; espesor de la capa filtrante.
- Características hidráulicas:  
Tasa de filtración y carga hidráulica disponible

Las plantas de filtración rápida están fundamentalmente compuestas por las unidades de mezcla rápida, floculadores, sedimentadores y filtros. Se les atribuye este nombre por los filtros que operan a velocidades altas entre 9,35 y 285,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Esos valores dependen de las características del agua, del medio filtrante y de los recursos disponibles para operar y mantener estas instalaciones. Por lo general, el efluente de un filtro rápido necesita un mayor grado de desinfección o cloración, porque en este proceso la habilidad para la eliminación de bacterias es relativamente baja en comparación a la de un filtro lento.

Habitualmente la limpieza de este tipo de filtro es frecuente y mayor ya que presentan velocidades bastante mayores. Tiene como características: su tamaño pequeño, la acumulación de las impurezas en todos los niveles y se usa del 1 al 6% de agua filtrada para su limpieza. El tamaño de lecho equivale 400 m<sup>2</sup> (máximo) y su profundidad a 45 cm de grava y 75 cm de arena. El tamaño de la arena es de 0,45 mm y mayores y su distribución es estratificada con los granos más ligeros arriba. El ciclo de limpieza dura de 12 a 75 horas y la penetración de la materia suspendida es profunda. Puede estar construido de varios materiales como la madera, el concreto o el acero.

El sistema de filtración rápida puede ser clasificado basando en el sentido de flujo que puede ser ascendente, descendente o ascendente-descendiente y en la carga sobre el lecho que se subdivide en gravedad y presión.

En el caso de la filtración rápida realizada por gravedad, usualmente se emplea en las plantas de tratamiento para fines de abastecimiento público, estas unidades son del flujo descendente. Los filtros pueden estar contruidos de concreto, acero o madera y generalmente su forma geométrica es rectangular.

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

Siempre que las características operacionales y las del medio filtrante y de la suspensión sean semejantes, la filtración rápida bajo presión poco difiere de la realizada por gravedad. La filtración rápida bajo presión se realiza en tanques de lámina de acero y puede ser de flujo ascendente, descendente con medios filtrantes constituidos por una o más capas y ascendente-descendente. Los filtros rápidos bajo presión pueden estar en la posición vertical u horizontal.

El filtro lento no se utiliza mucho actualmente, debido a que los filtros rápidos de arena son más adaptables y eficaces pero en verdad pueden eliminar hasta 99 % de las bacterias peligrosas para la salud. Después del uso repetido, la arena se vuelve portadora de una multitud de bacterias, algas, protozoos, rotíferos, copépodos, y gusanos acuáticos. Estos microorganismos ayudan al proceso de filtración mediante la eliminación de contaminantes, se dice que la arena que alberga estos organismos está “madura”, y ésta es preferible a la arena limpia o nueva. Puede ser necesario que transcurran varias semanas o meses para madurar la arena, dependiendo del contenido y la temperatura del agua.

Una planta de filtración lenta puede estar constituida solo por filtros lentos, pero dependiendo de la calidad del agua, puede comprender los procesos de desarenado, presedimentación, sedimentación, filtración gruesa o filtración en grava y filtración lenta. La planta de filtros lentos de arena consiste en un estanque de concreto. En él, se colocan líneas de tubos para drenaje, de juntas abiertas distanciadas y conectadas a un colector principal. Las líneas de tubos están cubiertas de gravas, poniendo los tamaños más gruesos en el fondo y cubriéndolos gradualmente con los de menor. Contiene una capa de arena de 100 cm encima de una capa de grava de 30 cm. El tamaño efectivo de la arena debe estar entre 0.25 y 0.35 mm y su distribución es no estratificado. Su limpieza se realiza por raspado y lavado de su superficie, se usa de 0,2 a 0,6% de agua filtrada para su limpieza. El ciclo de limpieza dura de 20 a 60 días y la penetración de la materia suspendida es superficial. Tiene como tamaño máximo de lecho 2000 m<sup>2</sup> y la arena suele estar sumergida 120 o 150 cm de agua. El agua pasa por el filtro a razón de 0.935 a 9,35 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.

Normalmente los filtros lentos son aplicados para partículas en suspensión, sólidos en suspensión, y materia orgánica y organismos patógenos presentes en el agua cruda. Además, funciona de manera eficaz solamente con agua de fuentes que tienen bajos niveles de turbiedad, algas y sin contaminación de color. No pueden manejar alta turbidez de forma continua porque se obstruye prematuramente. (Díaz, 2004), (CEPIS, 2004)

### ➤ **Desinfección**

La desinfección del agua significa la disminución, extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. Si no es así, el agua no es potable

y es susceptible de causar enfermedades. Los desinfectantes no solo deben matar a los microorganismos sino que deben tener un efecto residual, es decir, mantenerse como agentes activos en el agua para prevenir el crecimiento de los microorganismos en las tuberías provocando la recontaminación del agua.

La desinfección puede dividirse en natural y artificial. La primera se refiere a la muerte o eliminación progresiva de microorganismos patógenos, producida por agentes naturales como luz solar, sedimentación, a filtración, o estabilización de la materia orgánica (Romero, 1999). La desinfección artificial puede realizarse mediante agentes físicos y/o químicos.

Existen varios métodos de desinfección física como la desinfección por calor, solar, y por radiación ultravioleta. Estos procesos, por la naturaleza física de funcionamiento no requieren de la adición de productos químicos al agua y por tanto se evita la producción de ciertos compuestos no deseados y alteración de características organolépticas. Tienen como desventaja que no pueden aportar un carácter residual al agua para evitar la contaminación microbiológica dentro del sistema de distribución (Rojas, 2008).

- Desinfección por calor: Si se eleva la temperatura del agua hasta su punto de ebullición se producirá la desinfección debido a que ninguna de las enfermedades hídricas peligrosas es causada por bacterias formadoras de esporas o por otros organismos resistentes al calor (<http://www.elaguapotable.com>)
- Desinfección por radiación ultravioleta: Es un proceso germicida que logra erradicar la contaminación microbiológica. Con una tecnología simple (sin adición de químicos ni cambios en la química general del agua). Cuando los microorganismos tienen contacto con la radiación UV son automáticamente destruidos, logrando una exterminación de 99.99%. La destrucción de los microorganismos se debe a la absorción de radiación ultravioleta (UV) de alta energía. Con la desinfección UV no se puede lograr una eficacia de protección en la red de tuberías. Para asegurar la desinfección, el agua debe de encontrarse libre de sustancias que absorban la luz, por ejemplo, los compuestos fenólicos y aromáticos.
- Desinfección solar: La desinfección por radiación solar utiliza los rayos ultravioleta del sol para eliminar los patógenos. Un envase de plástico o de vidrio conteniendo agua sin tratar se coloca sobre un techo o sobre una superficie de hierro corrugado. Con el tiempo y luz solar suficientes, la luz ultravioleta en combinación con las altas temperaturas eliminará la mayoría de virus, bacterias y protozoos. (<http://www.drinking-water.org>). El tiempo de exposición variará en función de las condiciones climáticas. ([www.elaguapotable.com](http://www.elaguapotable.com)).

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

Hay otros métodos físicos que son menos utilizados por ser más caros o menos efectivos, dentro de estos se encuentran; fotocátalisis, radiación electrónica, hidrólisis, diferentes formas radiaciones ionizantes (los rayos X y los rayos gamma) y sónica. La tecnología de membranas puede ser considerada como un método físico de desinfección.

- Métodos Químicos de Desinfección.

La exposición del agua a productos químicos oxidantes, durante un tiempo suficiente y en concentraciones adecuadas, dará como resultado la desinfección. Estos productos químicos comprenden los halógenos aplicados en sus formas adecuadas, el ozono y otros oxidantes como el permanganato de potasio, el peróxido de hidrogeno, entre otros (*Fair et. al., 1994*).

Los desinfectantes químicos no solo deben matar o inactivar a los microorganismos sino que deben además cumplir ciertas condiciones para su posible utilización durante esta operación. En concentraciones adecuadas no deben ser tóxicos para el hombre y no aportar sabor, color u olor al agua tratada. Deben ser de fácil manejo, transporte, almacenamiento y además su concentración en el agua debe ser determinable con facilidad y rapidez. Deben realizar la labor de desinfección a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado y en lo posible debe persistir en el agua desinfectada con la concentración suficiente para proporcionar un efecto residual razonable (*Fair, 1994, Arboleda, 2000*). El mecanismo de desinfección de los agentes químicos, está basado en que éstos reaccionan con las enzimas esenciales para los procesos metabólicos de las células vivientes (patógenos) destruyéndolas o inactivándolas. En la desinfección química, la eliminación de microorganismos patógenos, objeto del tratamiento, depende entre otros factores, de:

- La naturaleza, concentración y tipo de los microorganismos.
- Características y concentración del agente desinfectante utilizado.
- Características del agua a tratar, composición, pH, temperatura etc.
- Tiempo de contacto.

Los métodos químicos utilizados para la desinfección del agua son:

- Cloración - El procedimiento más utilizado para desinfectar el agua es la cloración donde se añade al agua el cloro o alguno de sus derivados. Para que la cloración resulte eficaz es necesaria una distribución homogénea del cloro durante un cierto tiempo en el agua y que la dosis sea adecuada, para obtener un agua tratada inocua. Hay varios agentes químicos empleados en la cloración tales como:
  - a) El cloro en forma gaseosa o líquida.
  - b) El hipoclorito de sodio: este derivado del cloro es el más frecuentemente empleado en la desinfección del agua de pequeños abastecimientos.

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

- c) Dióxido de cloro: es un agente oxidante muy activo, amarillo rojizo, de olor desagradable y picante, como desinfectante reemplaza al cloro cada vez en más aplicaciones, debido a sus ventajas de proporcionar al agua mejores propiedades organolépticas, su efecto es más fuerte y sobre todo independiente del valor de pH del agua.

Hay otros compuestos del cloro como el hipoclorito de calcio, cloroaminas que también tienen propiedades desinfectantes.

- Ozonización: El Ozono se utiliza para la desinfección de agua ya que descompone agresivamente a los organismos vivos sin dejar residuos químicos que puedan afectar la salud, el color, el olor o el sabor del agua, es más eficaz que la cloración contra las bacterias y otros gérmenes. El Ozono se genera a partir del aire u oxígeno aplicando una descarga de alto voltaje para convertir parte del oxígeno ( $O_2$ ) a Ozono ( $O_3$ ). El gas "ozonizado" se mezcla con el agua, la desinfección más eficiente se logra con un mínimo de 0.4 mg/l sostenido por 4 minutos. El ozono en el agua no debe sobrepasar 0,4 ppm lo que es, el límite máximo permitido de ozono en el agua.
- Aplicación de permanganato de potasio: Este se utiliza como desinfectante en la potabilización ya que oxida y elimina muchas sustancias del agua que afectaría a la salud humana. Para que sea efectiva se requiere un largo tiempo de contacto.
- Aplicación de Halógenos ( $Br_2$ ,  $I_2$ ): El yodo es un agente germicida usado bajo forma de solución alcohólica o como yodoformo.
- Aplicación de iones metálicos ( $Cu^{2+}$ ,  $Ag^+$ ): Actúan por inhibición de enzimas uniéndose a grupos sulfhidrilos:
  - a)  $Cu^{2+}$ : es un excelente alguicida y se usa frecuentemente cuando hay infección de algas en cursos de agua que van a ser usados para potabilización.
  - b)  $Ag^+$ : la dosificación de iones plata para desinfectar el agua se realiza en una concentración de 0,05 a 0,1 mg/l. Los iones de plata tienen buen efecto germicida, pero las circunstancias concretas no se conocen. El tiempo de actuación obligatorio comprende varias horas. Su aplicación actual es para la desinfección de agua potable en barcos o para suministros de urgencia en casos catastróficos.

Existen otros métodos químicos que se aplican con menor frecuencia tales como: el peróxido de hidrógeno y sales de amonio.

La selección de un desinfectante y los pasos a seguir, antes de su elección dependen de una serie de condiciones propias de cada sistema de abastecimiento, pero siempre habrá que buscar tres finalidades:

- ✓ Proporcionar agua libre de patógenos.
- ✓ Mantener una calidad bacteriológica en la red de abastecimiento, evitando los recrecimientos bacterianos.
- ✓ Evitar la producción de subproductos de la desinfección.

En dependencia de las características que tiene el agua se hace necesario el empleo de otras operaciones más específicas. Entre ellos se encuentran:

➤ **Ablandamiento del agua**

El ablandamiento del agua es una técnica que sirve para eliminar los iones que hacen que el agua sea dura, en la mayoría de los casos iones de calcio y magnesio. En algunos casos iones de hierro también causan dureza del agua. Este permite prevenir la formación de incrustaciones en las tuberías aumentando su vida útil.

➤ **Filtración con carbón activado**

El carbón activado es un sólido que tiene dos propiedades que lo han hecho muy útil en el tratamiento de aguas: que atrapa todo tipo de contaminantes orgánicos en sus paredes, con una avidéz tal que puede dejar un agua prácticamente libre de estos compuestos y que elimina concentraciones residuales de agentes oxidantes como cloro y ozono, y de los derivados cancerígenos, trihalometanos, originados en estos tratamientos. El carbón activo actúa adsorbiendo estos productos o catalizando su paso a formas reducidas inofensivas (<http://www.aquapedia.net/>)

Generalmente la filtración con carbón activado se emplea para la mejora de las propiedades organolépticas en el agua potable. El tratamiento puede realizarse con carbón activado en polvo o carbón activado granular.

➤ **Ajuste de pH**

Al agua se pueden añadir ácidos o bases para ajustar el pH a un valor óptimo. (Comisión Nacional del Agua, 2007). Aguas con pH ácido tienden a ser corrosivas a ciertos metales y paredes de hormigón y con pH básico tienden a formar incrustaciones, además de no cumplir con los requerimientos del agua potable (Abi-faiçal, 2010).

➤ **Fluorización**

Según OMS (*World Health Organization. Geneva, 2002*), el flúor tiene efectos tanto beneficiosos como perjudiciales para la salud humana. La fluorización o fluoración del agua

potable consiste en la acción controlada de añadir un compuesto fluorado en el, con el fin de elevar sus niveles de flúor hasta una concentración óptima para prevenir las caries dentales. Se considera la concentración óptima de flúor aquella que reduce los niveles de caries, sin que provoque una saturación en los tejidos expuestos (fluorosis dental). La fluorización del agua presenta controversias por los posibles efectos no deseados sobre la salud, por lo que algunos países han prohibido esa práctica (es.wikipedia.org).

Sintetizando, la potabilización es un conjunto de procesos de influencia muy significativa en la calidad del agua. La selección del método a aplicar depende de los resultados del análisis técnico-económico y particularmente de las características de agua a tratar.

### **1.7.1 Tecnología de membranas aplicada a la potabilización**

La producción de agua potable de alta calidad usando tecnologías de membranas es una alternativa para las técnicas convencionales de potabilización. Una membrana es una película delgada de origen orgánico o inorgánico que permite el paso selectivo de sustancias a su través mientras otras se quedan atrapadas en ella. La filtración con membrana se trata de una técnica cuyas ventajas son:

- ✓ No aporta ningún tipo de sustancia química al agua;
- ✓ Equipos compactos, de fácil adaptación y su proceso es de fácil automatización;
- ✓ Puede eliminar precursores de los subproductos de desinfección;
- ✓ Bajos requerimientos de energía y costes;
- ✓ Posibilidad de afrontar procesos con temperaturas más bajas;
- ✓ Diseños de procesos más simples;
- ✓ Se lleva a cabo de forma continua;
- ✓ Fácil diseño a gran escala;
- ✓ Se puede producir sistemas muy específicos;
- ✓ Facilidad de montaje, desmontaje y operación.

Tiene las siguientes desventajas:

- ✓ Polarización de la concentración y ensuciamiento
- ✓ Baja vida de las membranas
- ✓ Las membranas son caras

Las operaciones de membrana que se aplican en el tratamiento de aguas y en las que la fuerza actuante es una diferencia de presión son la ósmosis inversa, la nanofiltración, la ultrafiltración y la microfiltración.

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

- ✓ **Microfiltración:** Es eficaz en la separación de todos los tipos de sólidos en suspensión, grandes bacterias y partículas coloidales. El mecanismo básico de separación es la filtración, aunque en una baja proporción las membranas de microfiltración también funcionan por adsorción y difusión rechazando una pequeña cantidad de sales. Los poros de estas membranas varían entre 0,01 – 10 micras.
- ✓ **Ultrafiltración:** las membranas de ultrafiltración son eficaces separando moléculas orgánicas de alto peso molecular, bacterias y virus. El mecanismo de funcionamiento básico sigue siendo la filtración (con poros de diámetro entre 0,001-01 micras) pero las tasas de separación de iones divalentes y monovalentes son mayores por el mayor papel que juega la difusión.
- ✓ **Nanofiltración:** es eficaz para la separación de iones divalentes, como por ejemplo el Calcio y el Magnesio, grandes iones monovalentes, como el Sulfato, moléculas orgánicas de alto peso molecular, y turbidez, por el pequeño tamaño de los poros de sus membranas (0,0007-0,01 micras) y el predominio de la difusión. Las membranas de nanofiltración aportan un rechazo significativo de la dureza causada por los iones de calcio y magnesio.
- ✓ **Ósmosis Inversa:** las membranas de ósmosis inversa se han desarrollado a lo largo de los últimos 35 años. Las membranas de ósmosis inversa son eficaces para la separación de todas las sustancias rechazadas por las anteriores membranas, incluyendo los constituyentes más pequeños, como los iones monovalentes de sodio y cloro. El mecanismo prácticamente exclusivo es la difusión. El tamaño de los poros de las membranas es de 0,00005 micras. En el proceso de la ósmosis inversa, el agua es forzada a cruzar la membrana, dejando las impurezas detrás. La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña, que prácticamente todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y virus son separados del agua. La membrana es la parte más importante en el proceso de Ósmosis Inversa. Básicamente está compuesta por Acetato de Celulosa (CA) y Poliamida (PA), (<http://www.econovedades.eu>).

El tratamiento de osmosis inversa es un proceso de purificación de agua, en el cual se combinan factores como presión y permeabilización con el fin de separar partículas indeseadas del agua, y obtener agua potable, pura y ultra pura, según sea la necesidad. Este proceso tiene grandes aplicaciones industriales y comerciales, entre las más comunes esta la desalinización de agua de mar para convertirla en agua potable, la reducción de sólidos disueltos para la alimentación a calderas o sistemas de vapor, la separación y eliminación de virus para las industrias farmacéuticas, entre muchas aplicaciones más.

Generalmente el proceso de osmosis inversa va acompañado de un pre- tratamiento que tiene como objetivo filtrar el solvente antes de entrar al proceso de osmosis inversa como tal, esto se hace con el fin de obtener los mejores resultados y garantizar el óptimo funcionamiento de las membranas semi permeables y su larga vida útil (Moreno, 2011).

Leiva (2011) propone una planta potabilizadora para la UCLV que incluye una etapa de Osmosis Inversa para el agua de consumo humano directo, lo cual permitiría garantizar agua de abasto con la calidad requerida para la población universitaria. Atendiendo a las exigencias del proceso, la planta requiere de las etapas de pretratamiento establecidas en el proceso convencional más el proceso de ósmosis inversa seguido de los procesos de remineralización y desinfección. Los resultados del análisis económico muestran que esta variante de tratamiento presenta un costo de inversión superior al de tecnología tradicional en \$ 421329,54, además, para los precios del momento, los indicadores de rentabilidad muestran valores desfavorables, dado fundamentalmente por un periodo de recuperación de la inversión de 15 años, que demuestra que se logra disminuir con un aumento considerable del precio del agua. Es criterio del autor de este trabajo, que otras variantes dentro de los tratamientos convencionales pueden resultar más atractivas desde el punto de vista económico en las condiciones actuales del país y proporcionar agua con la calidad requerida según la NC 827:2012.

En resumen, la tecnología avanzada de membranas ofrece una buena alternativa para la potabilización del agua, ya que mejora la remoción de todos los tipos de microorganismos, reduce los precursores de los subproductos de la desinfección y reduce la cantidad de desinfectante necesario, entre otros. Sin embargo, tiene inconvenientes como alto costo de inversión, baja vida útil y problemas de ensuciamiento, entre otros.

### **1.8. Impactos ambientales de la potabilización del agua**

Los principales impactos negativos asociados al funcionamiento de la estación de potabilización del agua están relacionados con la gestión de residuos (Consejería de Medio Ambiente, 2011).

Ramírez (2008) plantea que en las estaciones de tratamiento de agua potable se generan una serie de lodos cuyo vertido a los cauces no es aceptable por su negativa influencia medioambiental y deben tratarse en instalaciones adecuadas.

La realidad es que la adecuada disposición final de lodos es costosa en todas las plantas, incluso en las pequeñas, donde no se dispone de alternativas. En general, los lodos se terminan desechando en el suelo o en las corrientes naturales de agua, con la consecuente contaminación.

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

La descarga de residuos de la estación de tratamiento de agua potable (ETAP) en las corrientes naturales de agua llega a plantear problemas importantes, ya que, si bien estos residuos son principalmente inorgánicos, van formando depósitos o «bancos de fangos» en los tramos lentos del cauce, a la vez que aumentan la turbiedad y el color de las aguas receptoras, más aún si se está empleando carbón, disminuyendo la actividad fotosintética de las plantas acuáticas. Se provocan problemas medioambientales que hay que considerar, y por tanto, extraer los residuos sólidos antes de verterlos a los cauces (Ramírez, 2008).

### ✓ Características de los lodos procedentes de una ETAP

Los lodos procedentes de las estaciones de tratamiento de agua potable están compuestos fundamentalmente por las materias presentes en el agua bruta y que por oxidación, coagulación y precipitación han sido retenidos en los decantadores y filtros, así como por sustancias (óxidos e hidróxidos) procedentes del coagulante y otros reactivos como cal, permanganato, carbón, que se han empleado en el tratamiento.

Las sustancias contenidas en el agua bruta son generalmente inertes, como arcillas, arenas, etc., y otras, tanto en suspensión como disueltas, inorgánicas y orgánicas como el plancton y otros microorganismos, etc. Las características de los fangos varían en función de la calidad del agua bruta, del tratamiento de potabilización aplicado a ésta, la cantidad de coagulante empleado, y del resto de los compuestos químicos utilizados (Ramírez, 2008).

El manejo, tratamiento y disposición de dichos lodos es un problema importante que en muchos países aún no ha sido resuelto. La principal dificultad que se presenta en el manejo de estos residuos es su alto contenido de agua (99%) y su pobre capacidad de deshidratación, particularmente la de los lodos producidos por sulfato de aluminio (Yoval, 1998)

Hasta el 98 % del lodo puede ser de agua. El 95 % de lodos son producidos en los procesos de coagulación y ablandamiento Davis (2010).

La caracterización de lodos de procesos de coagulación con sulfato de aluminio se puede observar en la tabla IV del Anexo IV y los de ablandamiento en la Tabla V. Anexo V

### ✓ Gestión de residuos

Según Davis (2010), el programa más lógico para la gestión de residuos de la potabilización de agua intenta utilizar el siguiente método en la disposición del lodo:

- Minimización de los residuos generados: En la potabilización casi todas las plantas tienen un potencial de optimización de las cantidades y calidades de los lodos

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

generados. Por la diversidad y la estructura particular de cada una de ellas, la optimización requiere de un análisis individual. La minimización en generación de lodos, se puede lograr tomando medidas regulatorias que incentiven a las plantas a modificar sus procesos de producción que minimicen la generación de estos lodos.

- Recuperación de productos químicos utilizados en el tratamiento: La cal puede ser recuperada de lodos provenientes del ablandamiento mediante recalcinación. La recuperación del aluminio es un proceso reciente y que tiene grandes posibilidades de aplicación. Existen procesos patentados aún poco conocidos en la práctica.
- Tratamiento del lodo para reducir su volumen: La reducción del volumen de los lodos es el objetivo principal del tratamiento de los mismos, ya que facilita las operaciones de transporte y de disposición final de los lodos. Las operaciones a las que se someten los lodos en los procesos de potabilización son las siguientes (Comisión Nacional del Agua. México, 2007):
  - a) Homogenización: Los lodos se recogen a través de las purgas de los decantadores, donde generalmente precipitan por gravedad o en el lavado de los filtros. Dado que estos lodos se extraen de forma intermitente y las concentraciones son bastante diferentes, es aconsejable enviarlos a un depósito de mezcla y almacenamiento, donde se homogeneice la concentración y a la vez se disponga de un volumen tal que permita el funcionamiento continuado de la planta de lodos (Pérez, 2011, Ramírez, 2008).
  - b) Espesamiento: Consiste en la remoción de exceso de agua de los lodos mediante la decantación y concentración de los lodos por sedimentación. El agua decantada se envía a la unidad de tratamiento de agua de recirculación y los lodos espesados a disposición o a otros procesos de secado. El espesamiento de los lodos se puede lograr en tanques equipados para ese propósito o en lagunas (Comisión Nacional del Agua. México, 2007).
  - c) Deshidratación: El fango espesado contiene un porcentaje pequeño de materia seca (4 - 5%), lo que hace necesario su concentración, disminuyendo la humedad. La deshidratación se puede lograr en filtro prensa, equipos de centrifugación y en lechos de secado (Pérez, 2011, Ramírez, 2008).

Se efectúa un acondicionamiento del lodo con la finalidad de facilitar su deshidratación, mediante la adición de reactivos químicos que provoquen la desestabilización de los sólidos dispersos presentes en el mismo (Acondicionamiento químico), (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).

- Disposición final en una manera ambientalmente segura: El agua clarificada de todo el proceso de tratamiento de fangos puede ser recuperada y enviada otra vez a la cabecera del tratamiento. En cuanto a los lodos, el mayor coste en su gestión es la retirada y el vertido. El destino habitual suele ser un vertedero controlado (en función de las características del fango resultante del proceso) o bien su uso como relleno de terrenos y canteras ya explotadas en determinadas zonas. En cualquier caso, estos fangos no están caracterizados como residuo tóxico o peligroso, por lo que generalmente pueden considerarse como vertido inerte de cara a su destino final en los vertederos controlados (Pérez, 2011).

➤ Subproductos de la desinfección

Durante los años setenta, los científicos descubrieron la existencia de subproductos de la desinfección (SPD) mediante técnicas de cromatografía. Los subproductos de la desinfección pueden dañar la salud del hombre. Después de este descubrimiento, se llevó a cabo gran cantidad de investigación sobre los subproductos de la desinfección, efectos para la salud y procedimiento para evitar su formación durante los procesos de desinfección.

Los subproductos de la desinfección química son sustancias orgánicas e inorgánicas que se forman durante la reacción de un agente desinfectante con materia orgánica natural presente en el agua. Cada uno de los desinfectantes más empleados, como el cloro, dióxido de cloro, cloraminas y ozono, producen sus propios subproductos, en el agua potable. La Tabla VI (Anexo VI) muestra los subproductos de la desinfección mediante diferentes desinfectantes ([www.lenntech.es](http://www.lenntech.es)).

Múltiples factores afectan la formación de los subproductos de la desinfección, como se muestra en la Tabla VII (Anexo VII) La materia orgánica natural (MON) es considerada como el mayor precursor en la formación de subproductos de la desinfección ([www.elaguapotable.com](http://www.elaguapotable.com)).

➤ Control de los subproductos de la desinfección

Al seleccionar el desinfectante para que el agua sea microbiológicamente segura, es importante ser conscientes de los subproductos de la desinfección y sus consecuencias para la salud. Para esto será necesario saber qué subproductos se forman bajo qué condiciones, cuáles serían los riesgos para la salud u otros efectos adversos, y cómo éstos pueden reducirse al mínimo. Como estos subproductos, son difíciles de eliminar una vez formados, debe evitarse su formación durante las etapas de tratamiento del agua o al menos reducirlos al mínimo.

En función de las características del agua se podrán adoptar medidas preventivas como:

## Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

- La reducción de los precursores mediante el mejoramiento del tratamiento antes de la desinfección, teniendo en cuenta que la prevención de formación de SPD es más económica y eficaz que la extracción.
- Eliminar el proceso de preoxidación, como etapa inicial de los tratamientos.
- La protección y el control de las fuentes de abastecimiento de agua para disminuir o eliminar los precursores, de esta forma las aguas subterráneas son preferibles a las superficiales.
- Filtración del agua sobre carbón activo antes de la desinfección, con objeto de eliminar los precursores, este procedimiento es muy eficaz pero tiene como inconveniente su elevado costo.
- La reducción de la dosificación de desinfectante y/o el tiempo de contacto al mínimo necesario para la destrucción de agentes patógenos.
- La utilización de los desinfectantes alternativos.
- La remoción de los subproductos ya formados.

La operación y el control más cuidadoso de la floculación, sedimentación y de los procesos de filtración a menudo pueden mejorar la remoción de precursores y simultáneamente reducir el uso de las sustancias químicas para la desinfección.

### ➤ Efectos de los subproductos de la desinfección para la salud

Los riesgos de los subproductos de la desinfección para la salud son pequeños comparados con los riesgos asociados con las enfermedades propagadas por el agua no desinfectada.

La exposición a estos contaminantes a través del agua clorada durante largos periodos de tiempo, da lugar a efectos adversos para la salud. Se debe tener en cuenta que la exposición a dichos agentes no ocurre sólo por la ingestión de agua, sino también por la inhalación y la absorción dérmica.

Las preocupaciones que existen sobre los subproductos de la desinfección incluye:

- Daño en las funciones reproductoras (disminución de la fertilidad, riesgo de aborto espontáneo, etc.).
- Daños en el desarrollo fetal dentro del útero (defectos del tubo neural, bajo peso al nacer, crecimiento intrauterino retardado, etc.).
- Desarrollo de cáncer, sobre todo en el de vejiga urinaria.

Se puede concluir que el manejo, tratamiento y disposición de los lodos es un factor importante en la potabilización de agua y que los subproductos que se generan debido al uso de desinfectantes químicos en el proceso de potabilización del agua tienen amplios efectos negativos en la salud del hombre y del medioambiente. Esto puede ser mejorado

con una gestión adecuada de los lodos y control de los subproductos de la desinfección, que incluye la optimización de su generación, recuperación de productos químicos que contiene, tratamiento y su disposición final ambientalmente segura.

Existen métodos físicos que son considerados inofensivos para la salud humana. Sin embargo son menos usados que los químicos, debido a que los últimos son más económicos y efectivos en la desinfección.

#### Conclusiones Parciales

1. El agua potable debe estar certificada por las normas establecidas en cada país, que en Cuba se corresponde con la NC 827:2012.
2. En Cuba, ya en el año 2011, el 92,3 % de la población tiene acceso al agua potable y el mayor porcentaje con conexión domiciliaria. Se destaca Villa Clara por altos porcentajes de cobertura y específicamente, en la Universidad Central de Las Villas existe una planta potabilizadora para satisfacer sus propias necesidades, aunque con problemas asociados a la obsolescencia del equipamiento.
3. En la actualidad están identificadas numerosas enfermedades que están relacionadas con el agua e igualmente se han desarrollado diferentes métodos que pueden ser aplicados en su prevención, reducción o control.
4. La potabilización del agua juega un papel fundamental en la actualidad dada la situación de escasez y contaminación y para la misma se pueden implementar diferentes sistemas de tratamiento con buena eficiencia, dependiendo la selección del método a aplicar, de los resultados del análisis técnico-económico y particularmente de las características del agua a tratar.
5. La tecnología de membranas ofrece una buena alternativa para la potabilización del agua, ya que mejora la remoción de todos los tipos de microorganismos, reduce los precursores de subproductos de la desinfección y la cantidad de desinfectante necesario, sin embargo, tiene inconvenientes como alto costo de inversión, baja vida útil y problemas de ensuciamiento, que desde el punto de vista económico, la hacen menos atractiva que los tratamientos convencionales.
6. El manejo, tratamiento y disposición de los lodos es un factor importante en la potabilización de agua y los subproductos que se generan por el uso de desinfectantes químicos en el proceso de potabilización tienen efectos negativos en la salud del hombre y del medioambiente, lo cual puede ser mejorado con adecuada gestión de los lodos y control de los subproductos de la desinfección.

## **Capítulo 2: Diagnóstico de la planta potabilizadora de agua de la UCLV**

En este capítulo se realiza un diagnóstico de la planta potabilizadora de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Se analiza el estado técnico de la infraestructura instalada y se evalúa la eficiencia de remoción de contaminantes en los diferentes procesos.

### **2.1 Descripción del sistema actual para la potabilización del agua en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.**

El abastecimiento del agua cruda a la planta potabilizadora de la UCLV se realiza desde la presa Minerva. Como se observa en el diagrama de la figura 3, (Anexo IX) inicialmente el agua se alimenta a un floculador con un flujo de 55 L/s. Posteriormente, pasa al sedimentador sin recibir ningún tipo de coagulante (no se realiza el proceso de coagulación-floculación). Una vez sedimentada, la mitad del agua pasa a dos filtros lentos, mientras la otra mitad es succionada e impulsada hacia dos filtros rápidos.

En los filtros lentos se aplica el hipoclorito de sodio como desinfectante y después el agua es conducida a una cisterna desde donde es succionada e impulsada, una parte hacia el comedor central y otra hacia el tanque de almacenamiento y distribución.

El agua proveniente de los filtros rápidos es conducida fuera de la planta sin ningún tratamiento químico y entra en contacto con el agua clorada de los filtros lentos mediante una conexión Y, para ser transportada hacia el tanque de almacenamiento y distribución.

#### **2.1.1 Diagnóstico de la infraestructura instalada para la potabilización del agua en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

Del análisis de la información disponible en la UCLV se pudo conocer que la planta potabilizadora se encuentra en funcionamiento desde la década del 50 y que fue construida para el tratamiento de agua proveniente del río Ochoa con un flujo tecnológico de 16 L/s. Durante la revisión de la instalación se pudo observar que debido al paso del tiempo y a los problemas de mantenimiento, los equipos que conforman el flujo tecnológico han sufrido deterioro y adaptaciones que de una forma u otra atentan contra la eficiencia del proceso de tratamiento. El flujo de alimentación a la planta (55 L/s) es tres veces superior al flujo de diseño (16 L/s), lo que provoca una disminución en la efectividad de los equipos. Además, en la actualidad la planta trata las aguas provenientes de la presa Minerva con características de calidad y variabilidad entre estaciones diferentes a las aguas para las cuales había sido diseñada.

Al realizar el diagnóstico se notó irregularidades en el sistema, tanto en los equipos como en el proceso. En estos momentos, algunas partes de la planta están siendo reparadas.

A continuación se describen las características, la forma geométrica, las funciones, ubicación, el estado, la capacidad y los problemas de los componentes de la planta potabilizadora.

#### Floculador

El floculador es un depósito rectangular de hormigón armado que está situado en la parte de atrás de la planta y está dividido por una serie de tabiques que provoca cambios en el sentido del flujo. Actualmente en la planta, el floculador no realiza su función principal que es la floculación ya que no se adiciona ningún tipo de coagulante que permita la formación de flóculos. El mismo solamente está homogenizando el agua que entra en la planta. En general, el floculador presenta un mal estado técnico. El floculador tiene como dimensiones 5 m de largo, 3,7 m de ancho y 2,3 m de profundidad. El conducto de alimentación del agua ha sido modificado por problemas de deterioro del original.

#### Sedimentador

El sedimentador que existe en la planta, a continuación del floculador, es de hormigón y tiene forma rectangular. El mismo presenta deterioro y su función de remoción de sólidos tiene una eficiencia baja debido a que en la planta no se añade ningún coagulante al agua que entra para permitir el proceso de coagulación-floculación. Actualmente no funciona el sistema de extracción de lodos, ya que las válvulas no pueden purgar los lodos generados por estar en un mal estado. La acumulación de lodos en el sedimentador hace que los niveles de lodos aumenten fuera del rango previsto, arrastrándose así los lodos fuera del equipo. La succión del agua que se bombea a los filtros rápidos se realiza del propio sedimentador.

No existe datos referentes a las condiciones internas en las que se encuentra la estructura del sedimentador ya que el mismo se encuentra tapado, enterrado y en funcionamiento, por lo que no se pudo apreciar si existen fisuras o grietas en sus paredes.

El sedimentador tiene como dimensiones 20 m de largo, 8 m de ancho y 6,5 m de profundidad.

#### Filtros rápidos

En la planta existen dos unidades de filtración rápida a presión. Su forma geométrica es cilíndrica, el medio filtrante está compuesto por arena (0,65 m) y grava (0,45m). El agua proveniente del sedimentador se suministra por medio de una bomba. Estos filtros son usados para la filtración directa del agua que sale del sedimentador y son limpiados diariamente. Este proceso se recomienda solo para aguas poco cargadas y de bajo color una vez que su capacidad de remoción es limitada.

Su diseño contempla un sistema de operación semiautomático que cuenta con un cabezal de limpieza y varias válvulas de cierre. El cabezal funciona y algunas de las válvulas no, se encuentran en mal estado técnico. Ninguno de los cinco manómetros existentes funciona. La estructura exterior de los filtros se encuentra oxidada y corroída mientras que en el interior no se conoce el estado en que se encuentra el lecho de arena ni el sistema de entrada y drenaje.

El agua que sale del filtro rápido no recibe tratamiento de desinfección y se une, fuera de la planta con el agua del filtro lento a través de una conexión Y. Tiene capacidad de 30 L/ s, diámetro de 2 m y 3,5 m de altura. Está compuesto por acero con aleación de cromo manganeso y se ubica en la parte lateral superior del sedimentador.

#### Filtros Lentos

La planta contiene dos filtros lentos de 10,0 m de largo por 10,0 m de ancho y 8 m de profundidad y tiene la forma geométrica cuadrada. La capacidad máxima de tratamiento es de 1400 m<sup>3</sup>/día. Si se excede la velocidad máxima de filtración puede empeorar la calidad del agua. El medio filtrante está compuesto por arena (100cm) y grava (30cm) y está hecho de hormigón armado.

No se pudo observar si en la estructura de los filtros lentos existen dificultades, pero debido al tiempo de uso del medio filtrante sin su regeneración, se considera que la capacidad de filtración no es buena.

Se ubica en la parte frontal del sedimentador y tiene como función filtrar el agua proveniente del sedimentador.

La desinfección del agua se realiza en este equipo mediante de la dosificación de hipoclorito de sodio de forma volumétrica, vertiendo cubos de (250 – 300) litros del desinfectante diariamente. No hay control de los volúmenes de cloro a dosificar en cada momento.

#### Cisterna

Este depósito está ubicado en la parte frontal de los filtros lentos, su forma geométrica es rectangular y mide 18,0 m de largo por 9,0 m de ancho. No se pudo inspeccionar sobre si existen fisuras o grietas en sus paredes.

#### Tanques de almacenamiento del hipoclorito de sodio

Es el recipiente donde se almacena el hipoclorito de sodio. Existen seis tanques en la planta, tres de plástico con capacidad para 2100 L y tres de fibra con capacidad de 2000 L. El estado técnico de los seis es bueno, aunque solamente dos de los de fibra y tres de los plásticos están en uso. Se encuentran en un área debidamente techada.

### Parte mecánica de la planta

Se verifica que los elementos metálicos de la planta se encuentran con un elevado grado de deterioro por corrosión, roturas en válvulas, los manómetros que se encuentran conectados a los filtros rápidos no funcionan. Existen tres bombas centrifugas con sus motores respectivamente. En este momento solamente dos de las tres está funcionando y una de ellas en muy malas condiciones por lo que falla con frecuencia

De forma general, se puede plantear que la parte mecánica de la planta requiere ser reparada o sustituida en la mayoría de los casos, ya que presentan alto grado de deterioro.

### Parte eléctrica de la planta

En la planta se encuentra instalado un banco de transformadores de (2 x 15 KV.A+1 x 25KV.A.) que tienen como función dar servicio eléctrico a toda la planta. Se considera que la capacidad no es suficiente debido a la potencia de los equipos instalados en la planta. Hay algunos cables eléctricos que se encuentran dañados.

### Motores eléctricos

De los tres motores existentes, dos son eléctricos y solamente uno de ellos funciona adecuadamente. De forma general están en un estado de corrosión.

### Paneles eléctricos e interruptores

En la planta existen varios paneles eléctricos e interruptores. Debido al paso de tiempo y falta de mantenimiento, algunos de ellos ya no funcionan.

### Control

En la planta no existen instrumentos de medición de caudal, no se controla el nivel en la cisterna, la dosificación de cloro no se realiza de la forma idónea, aunque se mide cloro residual a la salida de los filtros lentos mediante el método de la ortotolidina.

### Estación de bombeo

La estación no está dentro de la planta pero es imprescindible adicionar su análisis, ya que es una parte importante del sistema. La estación de bombeo que distribuye el agua a todas las áreas de la universidad está dividida en dos compartimentos, un tanque cuadrado de 20 m de lado y 6 m de altura que tiene como función el almacenamiento del agua y una casita donde se encuentran las bombas. La estación está diseñada para tres bombas y de las tres, solamente dos se encuentran funcionando, bombeando directamente a la red.

### **2.1.2 Análisis de los resultados del diagnóstico en la planta**

De forma general, los principales problemas detectados en la planta son los siguientes:

- La planta fue diseñada para el tratamiento de un flujo de agua de 16 L/s pero actualmente la planta está trabajando con un flujo de 55 L/s, por lo que todos los equipos trabajan a una capacidad superior a la de diseño, por lo que se requiere aumentar la capacidad de la planta para garantizar un funcionamiento adecuado de la misma.
- La inexistencia de un flujómetro para cuantificar el agua afluente a la planta evidencia la necesidad de instalación del mismo.
- No se añade coagulante en el proceso, por lo que no se realiza la coagulación-floculación que facilitarían la sedimentación.
- Hay cinco manómetros conectados a los dos filtros rápidos de las cuales no funcionan ninguno y requieren reparación.
- La no existencia de un sistema para la dosificación adecuada del desinfectante.
- El estado de las tuberías y accesorios, así como otras estructuras metálicas y parcialmente metálicas, es de alto nivel de deterioro por corrosión y roturas, en algunos casos imposible de reparar.
- De las tres bombas en la planta, una no funciona y las otras dos funcionan a tiempo completo, para bombear el agua del sedimentador hasta el filtro rápido y el agua proveniente de la cisterna de agua tratada hacia el comedor central y a la estación de bombeo central, por lo que se requiere de bombas de repuesto, ya que si se presenta algún problema se paraliza parcial o totalmente la planta.
- El agua tratada en los filtros rápidos no contiene desinfectante. La desinfección se garantiza por la unión con el efluente de los filtros lentos. Esta estrategia debe ser cambiada, ya que en caso de presentarse dificultades en los filtros lentos, habría que usar el agua de los filtros rápidos sin desinfección.
- La inexistencia de un plan de mantenimiento de los equipos en la planta, atenta contra el funcionamiento de la misma de forma general, ya que aunque los filtros rápidos se limpian diariamente, en el resto de la instalación no se realiza sistemáticamente. Específicamente, la falta de mantenimiento en la estación de bombeo tiene gran influencia en la situación de la planta
- Se requiere realizar un plan de capacitación general a los operadores de la planta, que incluya temas relacionados con la operación y control de la planta, así como las normas de higiene y protección en el trabajo.

- Se requiere de un laboratorio en la planta para realizar los análisis para el control de la operación.
- Se requiere de un tanque intermedio a la salida del sedimentador, para la alimentación a los filtros rápidos, ya que actualmente la bomba succiona el agua del sedimentador, lo que interfiere en el funcionamiento adecuado del mismo.

### **2.1.3 Evaluación del comportamiento de los principales parámetros que afectan la calidad del agua en la planta**

Para que el agua sea potable debe estar libre de microorganismos patógenos y de sustancias orgánicas o inorgánicas que perjudiquen la salud. Como se planteó en el Capítulo 1 de este trabajo, en Cuba estos requisitos sanitarios para que el agua sea potable se establecen en la NC.827:2012 y sus principales parámetros de la misma se muestran en la tabla VIII. Por otra parte, las exigencias de calidad del agua de las fuentes de abasto están establecidas en la NC 1021:2014. Atendiendo a estos documentos y conociendo las funciones de cada proceso existente en la planta, se realiza una evaluación de los principales indicadores de contaminación en cada etapa.

**Tabla VIII** Características físicas y componentes químicos que pueden afectar la calidad organoléptica del agua potable según la NC.827:2012.

Tipo	Característica	LMA
Físicas	Olor y sabor	Inodora y sabor agradable característico
	Turbiedad	5 UNT
	Color Real	15 UC
Químicas	Ph	6,5-8,5
	Sólidos totales disueltos	1000 mg/L
	Dureza total (como carbonato de calcio)	400 mg/L
	Cloruros	250 mg/L
	Sustancias activas al azul de metileno	0,5 mg/L
	Compuestos fenólicos (referidos al fenol)	0,002 mg/L
	Aluminio	0,2 mg/L
	Cobre	2,0 mg/L
	Hierro	0,3 mg/L

	Sodio	200 mg/L
	Sulfatos	400 mg/L
	Zinc	5 mg/L

**Tabla IX** Requisitos microbiológicos de la calidad sanitaria del agua potable de acuerdo con las técnicas empleadas para su determinación

Parámetro	Técnica		
	Tubos múltiples de fermentación	Filtración por membrana	Ausencia/Presencia
Escherichia coli	< 2 NMP / 100 mL	0 UFC / 100 mL	Ausencia / 100 mL
Coliformes termotolerantes	< 2 NMP / 100 mL	0 UFC / 100 mL	Ausencia / 100 mL

El LMA para el fluoruro se permitirá cuando el agua lo contenga en forma natural. Cuando se requiera la adición de fluoruro en sistemas de abastecimiento público, la concentración media diaria en el agua tratada ha de ser  $(0,7 \pm 0,1)$  mg/L.

Las muestras para los análisis del agua fueron tomadas con una frecuencia de 7 días, durante 3 semanas. Los resultados de los análisis físico- químicos fueron emitidos por el laboratorio del CEQA de la UCLV y los de los análisis microbiológicos por el Laboratorio del Centro Nacional de Inspección de la Calidad (CNICA) Territorial Villa Clara. En todos los casos se utilizaron las técnicas del *Standard Methods* (APHA, AWWA y WEF, 1998)

Se ubicaron los puntos de muestreo de forma que garantizó la caracterización del agua en el afluente y efluente, así como a la salida de cada equipo (sedimentador, filtros rápidos y lentos) con el objetivo de conocer la efectividad de funcionamiento de los mismos. Además, se tomó muestra en el comedor central con el objetivo de determinar la concentración de cloro residual.

En la Tabla X se muestran los resultados de los análisis a la muestra del primer día de caracterización (Muestra 1)

Tabla X Resultados de caracterización de la Muestra 1 (correspondiente al 20 de mayo 2014)

Parámetros	Unidad	Entrada	Sedimentador	Filtro rápido	Filtro Lento	Tanque elevado	Comedor Central
Sólidos totales	(mg/L)	242	286	274	296	-	-
Sólidos totales disueltos	(mg/L)	149	158	142	162	-	-
Sólidos sedimentables	(mg/L)	0	0	0	0	-	-
Sólidos totales Fijos	(mg/L)	126	178	120	128	-	-
Sólidos totales volátiles	(mg/L)	116	108	154	168	-	-
Sólidos suspendidos totales	(mg/L)	64	28	20	22	-	-
Sólidos suspendidos fijos	(mg/L)	62	8	18	18	-	-
Sólidos suspendidos volátiles	(mg/L)	2	20	2	4	-	-
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	1.75	-	0.25	0.2	-	-
DQO	(mg/L)	12	21.6	24	21.6	-	-
Ph		7.62	7.9	7.94	7.96	-	-
Conductividad	(μS/cm)	298	-	284	323	-	-
Alcalinidad	(mg/L)	154	-	158	159	-	-
Cloruros	(mg/L)	9.67	-	10.13	11.52	-	-
Dureza Total	(mg/L)	147	-	161	129	-	-
Dureza Ca <sup>2+</sup>	(mg/L)	100	-	161	71	-	-
Dureza Mg <sup>2+</sup>	(mg/L)	11.9	-	22.59	14.09	-	-
Nitrógeno Total	(mg/L)	<5	-	<5	<5	-	-
Nitrógeno amoniacal	(mg/L)	<5	-	<5	<5	-	-
Color	(mg Pt/L)	0	0	0	0	-	-
Cloro Residual	(mg/L)	-	-	-	-	1.81	3.18
Coliformes totales	(NMP)	> 23		> 23	< 1,1	< 1,1	-
Coliformes fecales	(NMP)	> 23		> 23	< 1,1	< 1,1	-
Coliformes termotolerantes	(NMP)	> 23		> 23	< 1,1	< 1,1	-

Tabla XI Resultados de caracterización de la Muestra 2 (correspondiente al 28 de mayo 2014)

Parámetros	Unidad	Entrada	Sedimentador	Filtro rápido	Filtro Lento	Tanque elevado	Comedor Central
Sólidos totales	(mg/L)	400	346	262	262	254	-
Sólidos totales disueltos	(mg/L)	140	155	141	160	150	-
Sólidos sedimentables	(mg/L)	0	0	0	0	0	-
Sólidos totales fijos	(mg/L)	296	248	170	178	192	-
Sólidos totales volátiles	(mg/L)	104	92	92	84	62	-
Sólidos suspendidos totales	(mg/L)	22	30	52	44	54	-
Sólidos suspendidos fijos	(mg/L)	18	18	38	40	48	-
Sólidos suspendidos volátiles	(mg/L)	4	12	14	4	6	-
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	2,4	-	1,6	1,5	-	-
DQO	(mg/L)	22,1	25,12	22,84	34,25	29,68	-
Ph		7,7	7,65	7,87	7,93	7,92	-
Conductividad	(μS/cm)	282	-	283	320	-	-
Alcalinidad	(mg/L)	163	-	161	161	-	-
Cloruros	(mg/L)	11,29	-	11,285	21,65	-	-
Dureza Total	(mg/L)	149	-	141	163	-	-
Dureza Ca <sup>2+</sup>	(mg/L)	42	-	51	40	-	-
Dureza Mg <sup>2+</sup>	(mg/L)	24,54	-	21,87	29,88	-	-
Nitrógeno Total	(mg/L)	<5	-	<5	<5	-	-
Nitrógeno amoniacal	(mg/L)	<5	-	<5	<5	-	-
Color	(mg Pt/L)	0	0	0	0	0	-
Cloro Residual	(mg/L)	-	-	-	-	1,063	1,86
Coliformes totales	(NMP)	> 23		> 23	< 1,1	< 1,1	-
Coliformes fecales	(NMP)	> 23		> 23	< 1,1	< 1,1	-
Coliformes termotolerantes	(NMP)	> 23		> 23	< 1,1	< 1,1	-

Tabla XII Resultados de caracterización de la Muestra 3 (correspondiente al 3 de junio 2014)

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Entrada</b>	<b>Tanque elevado</b>
Sólidos totales	(mg/L)	350	346
Sólidos totales Disueltos	(mg/L)	141	156
Sólidos Sedimentables	(mg/L)	0	0
Sólidos totales Fijos	(mg/L)	140	136
Sólidos totales volátiles	(mg/L)	210	210
Sólidos Suspendidos totales	(mg/L)	52	46
Sólidos Suspendidos Fijos	(mg/L)	42	36
Sólidos Suspendidos volátiles	(mg/L)	10	10
DQO	(mg/L)	4,48	0
Ph		8,01	8,23
Alcalinidad	(mg/L)	161	153
Cloruros	(mg/L)	16,59	22,12
Dureza Total	(mg/L)	169	171
Dureza Ca <sup>2+</sup>	(mg/L)	45	48
Dureza Mg <sup>2+</sup>	(mg/L)	30,10	29,88
Color	(mg Pt/L)	7,5	2,5

### **2.1.3.1. Discusión de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio**

De los resultados obtenidos en las experiencias de laboratorio se puede apreciar, en primer lugar que en el punto ubicado en el tanque elevado, que constituye el punto donde se inicia la distribución del agua para las distintas áreas de la universidad, todos los parámetros evaluados están dentro de los límites establecidos por la NC.827:2012: Agua Potable — Requisitos Sanitarios.

Por otra parte, del análisis de las características del agua a la entrada de la planta, se observa que en todos los análisis realizados se cumple con los valores establecidos por la NC 1021:2014: Higiene comunal — Fuentes de abastecimiento de agua — Calidad y protección sanitaria. Incluso, los resultados de los análisis físicos y químicos muestran valores que se encuentran dentro de los límites establecidos por la NC.827:2012. No ocurre así con los resultados de los análisis microbiológicos, que en las muestras analizadas a la entrada de la planta se obtienen resultados de NMP > 23, tanto para los coliformes totales como para los coliformes fecales y coliformes termotolerantes, aunque enfatizamos que estos valores sí cumplen con los requisitos de la NC 1021:2014.

Estos resultados, corroboran que el abastecimiento de agua a la universidad se realiza de una fuente de abasto de muy buena calidad, la presa Minerva, que en las condiciones actuales basta con un proceso de desinfección para obtener un agua apta para el consumo

humano. No obstante, del análisis de los resultados de la muestra de los diferentes días se observa que los valores de los parámetros tienen fluctuaciones, lo que es característico de las fuentes de abasto superficiales. Por experiencia en el manejo de estas aguas se conoce que dichas fluctuaciones se pueden agudizar en otras épocas del año, por lo que es necesario que esta evaluación se repita en otros momentos. Además, atendiendo a esta situación, se considera que es necesario recuperar las instalaciones requeridas para realizar el proceso de coagulación floculación, en los momentos que se requiera por las características del agua de abasto y por tanto, establecer las condiciones de operación para esos casos.

De los resultados de los análisis físicos y químicos a la salida del sedimentador, filtros lentos y filtros rápidos se observa que las remociones de dichos parámetros en estos procesos son muy bajas, en los casos que se logra, porque en diferentes muestras se puede apreciar que los valores de los indicadores se incrementan al pasar el agua por dichos equipos.

Por ejemplo:

- Los Sólidos Totales, para la Muestra1, se incrementan en el sedimentador, en los filtros rápidos y en los filtros lentos, mientras que para la Muestra 2, se obtienen remociones de 13,5 %; 24,2 % y 24,2 % respectivamente.
- Los Sólidos Suspendidos Totales, para la Muestra 1, muestran porcentos de remoción de 56 % en el sedimentador, 28,5 % en los filtros rápidos y 21,4 % en los filtros lentos; mientras que para la Muestra 2, se incrementan en todos los casos.
- Los Sólidos Disueltos, para las dos muestras, se incrementan en todos los casos excepto para la Muestra 1 en los filtros rápidos que se obtiene un 10 % de remoción.
- La dureza, de forma general, se incrementa en los tres equipos.
- La DQO, para las dos muestras, se incrementa en los tres equipos.

El análisis anterior evidencia que las instalaciones destinadas al tratamiento físico-químico en dicha planta no están cumpliendo la función requerida, esto puede ser debido al grado de suciedad en los equipos por la falta de mantenimiento, a que el medio poroso en los filtros se encuentre obstruido y que todos los equipos están trabajando a una capacidad superior a la de diseño.

Los análisis microbiológicos, de forma general, a la entrada de la planta muestran un valor de NMP mayor que 23 tanto para los coliformes totales, como para los coliformes fecales y coliformes termotolerantes. Estos valores se mantienen a la salida del filtro rápido lo que responde al hecho de que en ese punto no se ha realizado aún el proceso de desinfección y

se ratifica que en el filtro rápido no se logra remoción de microorganismos, como se plantea en la literatura.

Por otra parte, se aprecia que a la salida del filtro lento se logra un valor de NMP menor que 1,1 tanto para coliformes totales, como para coliformes fecales y coliformes termotolerantes; lo cual es resultado de la cloración que se realiza en este equipo.

Actualmente, la estrategia en la planta consiste en adicionar una cantidad elevada de hipoclorito de sodio en los filtros lentos, en función de que cuando se unan los efluentes de dichos filtros (clorado) y los de los filtros rápidos (no clorado) se pueda satisfacer la demanda de cloro y por otra parte atendiendo a la gran distancia que recorre el agua desde el punto de desinfección hasta el tanque de distribución y los diferentes lugares de consumo, lo cual se agrava por las condiciones de deterioro de las tuberías.

Los resultados anteriores evidencian que los equipos instalados en la planta no realizan las funciones relacionadas con la remoción de los contaminantes presentes en el agua, en algunos casos dichos contaminantes se incrementan, solo se puede apreciar el efecto de la cloración. Este análisis, unido al del diagnóstico de la infraestructura, muestra la necesidad de remodelar la planta instalada actualmente.

Se demuestra además, la necesidad de cambiar la estrategia para la desinfección y de instalar dosificadores para el hipoclorito de sodio.

En este sentido, en el presente trabajo se realiza la determinación experimental de la demanda de cloro del agua y además, se evalúa el cloro residual libre en diferentes puntos de la red de distribución en la UCLV.

#### **2.1.3.2. Monitoreo de cloro residual en la red de distribución de agua en la UCLV**

Para el monitoreo del cloro residual se seleccionan cinco puntos en la red de distribución del agua en la UCLV, como se muestra en la figura 4

En la Figura 4, el punto P1 corresponde al tanque de almacenamiento y distribución, P2 al comedor central, P3 a la facultad de Economía, P4 al edificio 900 y P5 al comedor de los Camilitos.



Fig. 4. Ubicación de los puntos de muestreo: P1, P2, P3, P4. Y P5

Tabla XIII Resultados del monitoreo de cloro residual

Parámetro	Unidad	Tanque Elevado (P1)	Comedor Central (P2)	Fac. Economía (P3)	Edificio 900 (P4)	Comedor Camilitos (P5)
Cloro residual	(mg/L)	1,9	6,96	0	0	0,12

En la Tabla X se observa que el cloro residual para la Muestra 1 en el tanque elevado y en el comedor central alcanza valores de 1,81 mg/L y 3,81 mg/L respectivamente; mientras que para la muestra 2 dicho parámetro en el tanque elevado y en el comedor central alcanza valores de 1,063 mg/L y 1,86 mg/L respectivamente.

En la Tabla XIII se aprecia que el cloro residual en el tanque elevado tiene un valor de 1,9 mg/L, en el comedor central 6,96; en la facultad de Economía y edificio 900, no existe cloro residual. En el comedor de los Camilitos se obtiene un valor de 0,12 mg/L, resultado aparentemente contradictorio por la distancia del tanque de distribución a los Camilitos, pero se pudo constatar que en la cisterna de dicho comedor se realiza reclusión del agua.

Los valores de cloro residual en el tanque elevado se encuentran en los valores planteados por la literatura, no obstante, se observa que al llegar a otros puntos ya dicha agua no contiene cloro, lo que indica que este es consumido antes de llegar a dichos puntos y por tanto existe la posibilidad que el agua sea recontaminada.

En el comedor central se obtienen valores superiores a los demás, que si bien no son alarmantes, están por encima de lo recomendado. Esto evidencia que se está adicionando una dosis superior a la requerida, y es producto de que el bombeo para este punto se realiza directamente desde la salida de los filtros lentos de la planta potabilizadora.

Estos resultados confirman la necesidad de implementar un sistema de desinfección que pueda satisfacer las necesidades reales de la UCLV, ya que por una parte, la deficiencia de cloro en el agua en algunos puntos es un peligro de recontaminación del agua con los riesgos para la salud asociados a la contaminación de las aguas. Por otra parte, el exceso de cloro en el agua de consumo puede provocar diferentes problemas de salud, no solo por los efectos del cloro directamente, sino porque también pueden formarse otros compuestos orgánicos clorados que pueden ser sustancias cancerígenas o tener otros efectos dañinos.

Aunque diferentes investigaciones muestran que el riesgo de las enfermedades microbianas es mayor que el riesgo químico por subproductos de la desinfección, ambos deben ser considerados cuidadosamente por lo que se propone cambiar la estrategia de cloración en la planta, teniendo en cuenta la demanda de cloro del agua (Muñoz, 2007).

## **2.2 Determinación de la demanda de cloro.**

Se realizó la determinación de la demanda de cloro al agua que entra a los filtros, ya que es el punto donde se realiza la cloración en la planta en las condiciones actuales.

El Hipoclorito de sodio que se utilizó en los experimentos realizados a escala de laboratorio, proviene de la Electroquímica de Sagua la Grande y fue suministrado por el operador de la planta potabilizadora; al mismo se le determinó el cloro activo obteniéndose un valor de 109.22 g Cl<sub>2</sub> (útil) /L, el cual se utilizó en cálculos posteriores.

### **2.2.1 Procedimiento desarrollado para la determinación de la Demanda de Cloro.**

Para realizar esta técnica a escala de laboratorio se siguieron los siguientes pasos, teniendo en cuenta las normas correspondientes:

- Se determinó el Cloro Activo del Hipoclorito de Sodio que se utilizó en la cloración del agua.
- Se tomaron 8 frascos con el agua a tratar y se adicionaron concentraciones ascendentes de hipoclorito de sodio, dejándose herméticamente cerrados, en reposo de 10 a 15 minutos.
- Después del período de contacto se determina en cada porción de ensayo el cloro residual o libre.
- Se representaron gráficamente los valores de dosis de cloro vs cloro residual.

Curva estándar de la demanda de cloro.

En la figura 5, se muestra como ejemplo la curva para la Muestra 1 se observa que para el caso de estudio de la Planta Potabilizadora de la UCLV no se distingue con facilidad la Etapa A (destrucción del cloro por compuestos reductores), debido en parte a la escala utilizada, además podemos decir que la misma se manifiesta casi de forma instantánea, sin embargo las etapas siguientes si se aprecian con facilidad, observándose la Etapa B hasta una dosis de cloro aproximada de 0.8 mg/L, en esta etapa se produce la formación de compuestos organoclorados y cloraminas, posteriormente se manifiesta la Etapa C hasta una dosis de 1mg/L, donde ocurre la destrucción de estos compuestos, evidenciándose el *breakpoint*, que es el punto a partir del cual, si se aumenta la dosis de cloro la dosis de cloro residual aumenta linealmente, afirmándose la acción del Cloro libre (Etapa D).

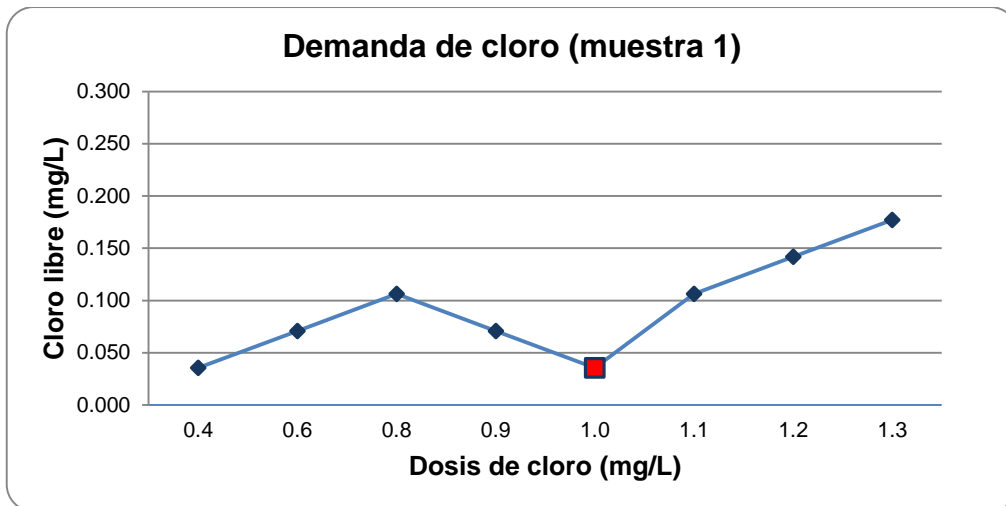


Fig. 5. Curva estándar de Demanda de Cloro para el agua de la Planta Potabilizadora de la UCLV (Muestra 1).

En el ANEXO VIII se muestran los los resultados experimentales correspondientes a las tres muestras estudiadas.

En la Tabla XIV se muestran los resultados promedios obtenidos en la determinación de la demanda de cloro realizada a las diferentes muestras.

Tabla XIV. Resultados experimentales promedios obtenidos de la demanda de cloro realizada.

Muestreos	Dosis de Cloro (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)	Demanda de Cloro (mg/L)
1	1.0	0.035	0.96
2	0.9	0.026	0.87
3	1.1	0.036	1.06
Media	1.0	0.03	0.96
Varianza	1.05E-02	3.16E-05	9.61E-03
Desviación estándar	1.02E-01	5.62E-03	9.80E-02

Demanda de cloro= dosis de cloro – cloro residual

Demanda de cloro= 1mg/L – 0.035mg/L

Demanda de cloro=0.965 mg/L

La Demanda de Cloro determinada es de 0.965 mgCl<sub>2</sub>/L ≈ 1mgCl<sub>2</sub>/L de agua a tratar, más un exceso de 1 mgCl<sub>2</sub> /L, para una concentración de cloro activo de 109.22 g/L. Estos resultados son similares a los obtenidos por (Busto 2007) para agua de la misma fuente de abasto (Presa Minerva). Otros autores como (Muñoz 2007) también obtuvieron similares resultados en aguas de abasto a plantas potabilizadoras de Colombia, municipio Pereira-Risaralta.

### **Conclusiones Parciales**

1. La infraestructura de la planta potabilizadora de la UCLV presenta un alto grado de deterioro y los equipos están trabajando a una capacidad superior a la de diseño
2. Las instalaciones destinadas al tratamiento físico-químico en dicha planta no están cumpliendo la función requerida, lo que puede ser debido al grado de suciedad en los equipos por la falta de mantenimiento, a que el medio poroso en los filtros se encuentre obstruido y que todos los equipos están trabajando a una capacidad superior a la de diseño.
3. La situación concreta de la planta evidencia la necesidad de su remodelación en función del aumento de capacidad y por la obsolescencia de los equipos instalados.
4. Es necesario cambiar la estrategia para la desinfección, instalar dosificadores para el hipoclorito de sodio y aplicar la dosis idónea, determinada de acuerdo a la demanda de cloro.

### **Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.**

Como respuesta a la necesidad de remodelación de la planta, identificada en el diagnóstico, en este capítulo se proponen dos alternativas para la potabilización del agua en la Universidad 'Marta Abreu' de Las Villas y se analizan desde el punto de vista técnico y económico. Dichas alternativas están compuestas por operaciones y procesos unitarios que se desglosan en tratamientos físicos, físico-químicos y químicos, que condicionan la calidad del agua. La primera tiene básicamente la estructura de la instalación actual, con las mejoras identificadas en el diagnóstico realizado y con la capacidad requerida para satisfacer la demanda de agua potable actual. La segunda alternativa se estructura a partir de primera, cambiando el esquema de filtración de la misma por cuatro filtros rápidos a presión operando en paralelo.

#### **3.1. Análisis de la alternativa I para la potabilización del agua en la UCLV.**

##### **3.1.1. Descripción del sistema de tratamiento de la alternativa I**

El sistema de tratamiento para la alternativa I se muestra en la figura 8 (Anexo IX), está formado por un floculador al que se alimenta un flujo de 55 L/s de agua y se adiciona un coagulante (alúmina) para facilitar el proceso de coagulación-floculación. El agua, una vez coagulada y floculada pasa al sedimentador, donde se sedimentan las partículas más densas que el agua por la acción de gravedad. La mitad del volumen de agua sedimentada pasa a un tanque intermedio desde donde es bombeada e impulsada hasta dos filtros rápidos a presión operando en paralelo y la otra mitad pasa a dos filtros lentos a través de una canaleta periférica. Después del proceso en ambos sistemas de filtración, el agua es transportada a una cisterna donde será dosificado el hipoclorito de sodio. Los lodos del proceso son evacuados mediante un canal para su posterior tratamiento y/o disposición.

##### **3.1.2. Dimensionamiento de los equipos para la alternativa I**

Se deben considerar las mejoras propuestas en el capítulo 2. En primer lugar se plantea la necesidad de dimensionar el equipamiento de la planta para el gasto actual (55 L/s), dimensionar un sistema para dosificación de coagulantes, un sistema para dosificar el hipoclorito de sodio y un tanque para la alimentación del agua a los filtros rápidos.

##### **Mezclador Hidráulico**

La operación de coagulación puede ser efectuada tanto en un mezclador hidráulico como en un mezclador mecánico. Generalmente, los mezcladores mecánicos son más efectivos que los hidráulicos pero la desventaja es que son más costosos y requieren energía para

su operación. Hay varios tipos de mezcladores hidráulicos. El mezclador dimensionado es un estrechamiento brusco seguido de ensanchamiento brusco en la tubería, donde se inyecta el coagulante al flujo del agua que entra en la planta. Para este tipo de mezclador no es necesario agitador o la construcción de otros equipos lo que significa hay ahorro de energía y dinero.

Tabla XVII. Mezclador hidráulico

Ecuaciones	Datos	Resultados
$hf = k * \frac{v^2}{2 * g}$ $k = [1 - (\frac{D_2}{D_3})^2]^2 + 0,5 * [1 - (\frac{D_2}{D_1})^2]$ $v = \frac{Q}{A}$ $A = \frac{\pi * d^2}{4}$ $P = \gamma * Q * hf$ $G = \sqrt{\frac{P}{\mu * v}}$	D1=259 mm D2 = 76 mm D3=178 mm $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$ $g = 9,81\text{m/s}^2$ $\mu = 1,01 * 10^{-3} \text{ N * s/m}^2$ Q=0,055m <sup>3</sup> /s	k =1,13 v = 1,04 m/s hf = 0,062 m P = 33,5 N*m/s G = 178, 5 s <sup>-1</sup> A = 0,053 m <sup>2</sup>

Fuentes: (González, 2001) y (CEPIS, 2004).

Leyenda:

Gradiente de velocidad (G); potencia (P); coeficiente de resistencia locales (k); pérdidas por fricción (hf); velocidad (v); aceleración de la gravedad (g); peso Especificó ( $\gamma$ ); viscosidad dinámica ( $\mu$ ); flujo volumétrico (Q); Diámetros nominales (D1, D2, D<sub>3</sub>).

Floculador horizontal

El floculador, al igual que los mezcladores puede ser hidráulico o mecánico. El floculador de tabiques dimensionado es del tipo hidráulico y se observa en la tabla siguiente.

Tabla XVIII. Floculador horizontal

Ecuaciones	Datos	Resultados
$L = v \cdot tr$	$v=0,1\text{m/s}$ (0,1- 0,6 m/s)	$L = 90\text{ m}$
$V = Q \cdot tr$	$tr=900\text{s}$ (15-30 min)	$V = 49,5\text{ m}^3$
$A = \frac{Q}{L}$	$Q=0,055\text{m}^3/\text{s}$	$A= 0,55\text{ m}^2$
$a = \frac{A}{h}$	$s= 0,15\text{ m}$	$a = 0,45\text{ m}$
$d = 1.5 \cdot a$	$\mu=10^{-3}\text{Ns/m}^2$	$d = 0,675\text{ m}$
$B = b + d$	$\gamma = 9810\text{ N/m}^3$	$B = 6\text{ m}$
$\# \text{ Can} = \frac{L}{B}$	$K = 3$ (1,5 – 3)	$\# \text{ Can} = 15$
$L_f = \# \text{ Can} \cdot a + (\# \text{ Can} - e)$	$g = 9,81\text{ m/s}^2$	$L_f = 8,85\text{ m}$
$H_1 = \left[ \frac{n \cdot v}{r^{2/3}} \right]^2 \cdot L$	$n = 0,013$	$A_m = 0,54\text{ m}^2$
$H_2 = K \cdot N_t \cdot \frac{v^2}{2g}$	$h = 1,2\text{ m}$	$P_m = 2,85\text{ m}$
$N_t = \# \text{ Can} - 1$	$b = 5,325\text{ m}$	$r = 0,19\text{ m}$
$r = \frac{A_m}{P_m}$	$\mu = 1,01 \cdot 10^{-3}\text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	$N_t = 14$
$A_m = a \cdot h$	$hf = 1,5\text{ m}$ (0,9 - 3)	$H_1 = 0,0014\text{ m}$
$P_m = a + 2 \cdot h$		$H_2 = 0,021\text{ m}$
$H_T = H_2 + H_1$		$H_T = 0,023\text{ m}$
$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{H_T}{tr}}$		$G = 15,76\text{s}^{-1}$

Fuentes: (González, 2001) y (CEPIS, 2004).

Leyenda:

Longitud de canales del tramo (L); área de los canales (A); ancho de canal (a); espesor de los tabiques (s); ancho del floculador (B); altura del agua (h); longitud del floculador (L<sub>f</sub>); pérdidas en cambio de dirección (H<sub>1</sub>); pérdidas por recorrido (H<sub>2</sub>); radio hidráulico del canal (r); área mojada (A<sub>m</sub>); perímetro mojado (P<sub>m</sub>); coeficiente de pérdida de carga de Manning (n); coeficiente de pérdida de carga en las vueltas (K); gradiente de velocidad.(G); número de canales (# Can); ancho de vueltas del tramo (d); ancho útil del tabique (b); cantidad de tabiques (N<sub>t</sub>); pérdidas totales de carga (H<sub>T</sub>); peso específico (γ); viscosidad dinámica (μ); velocidad (v); tiempo de retención (tr); aceleración de la gravedad (g); Flujo volumétrico (Q); altura del Equipo (hf).

Sedimentador horizontal

En la tabla siguiente se puede observar el dimensionamiento de un sedimentador horizontal.

Tabla XIX. Sedimentador horizontal

<b>Ecuaciones</b>	<b>Datos</b>	<b>Resultados</b>
$V = \frac{Q}{A}$ $Vol = Q * tr$ $A = l * a$ $H = \frac{tr * Q}{A}$ $H_e = H + \left(\frac{l}{2}\right) * s$ $H_s = H - \left(\frac{l}{2}\right) * s$	Q = 55 L/s = 198 m <sup>3</sup> /h tr = 2,5 h (2- 4 h) V = 35 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d Relación a:l; 1:4 s = 0,05 (1 – 5) %	Vol = 495 m <sup>3</sup> A= 135,7 m <sup>2</sup> a = 5,825 m l = 23,3 m H = 3,65 m He = 4,23 m Hs = 3,07 m

Fuentes: (González, 2001) y (Díaz, 2006).

Leyenda:

Carga superficial (V); área superficial del sedimentador (A); flujo volumétrico (Q); profundidad (H); largo (l); ancho (a); volumen (Vol); tiempo de retención (tr); altura en la entrada (He); altura a la salida (Hs); inclinación del fondo (s).

Tanque Intermedio

Tabla XX. Tanque Intermedio

<b>Ecuaciones</b>	<b>Datos</b>	<b>Resultados</b>
$V = A * h$ $A = a * l$	V = 495 m <sup>3</sup> h = 3,65 m relación a:l; 1:1	A = 135,7 m <sup>2</sup> a=l = 11,65 m

Leyenda:

Volumen (V); longitud del tanque (l); ancho del tanque (a); profundidad del tanque (h); flujo volumétrico (Q); área (A).

Filtros Lentos

Se dimensionaron dos filtros lentos para filtrar la mitad del agua que entra en la misma. En la Tabla XXI se puede apreciar el dimensionamiento de uno de ellos.

Tabla XXI. Filtros Lentos

Ecuaciones	Datos	Resultados (1 filtro)
$A = \frac{Q}{V_f}$ $A = a \cdot l$ $h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$	$Q = 99 \text{ m}^3/\text{h} = 2376 \text{ m}^3/\text{d}$ $V_f = 9,35 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$ $h_1 = 0,2 \text{ m} (0,2-0,4) \text{ m}$ $h_3 = 1,0 \text{ m}$ $h_4 = 0,3 \text{ m}$ $h_5 = 0,2 \text{ m}$ relación a:l; 1:1	$A = 254/2 = 127 \text{ m}^2$ $a:l = 11,27 \text{ m}$ $h_2 = 9,35 \text{ m}$ $h_T = 11,25 \text{ m}$

Fuentes: (Díaz, 2006).

Leyenda:

Flujo volumétrico (Q); área (A); velocidad de filtración (Vf); Borde libre (h<sub>1</sub>); Altura del agua (h<sub>2</sub>); Altura de Arena (h<sub>3</sub>). ; Altura de grava (h<sub>4</sub>); Drenaje (h<sub>5</sub>); Profundidad del filtro (h<sub>T</sub>); largo (l); ancho(a).

Filtros Rápidos

Se dimensionaron dos filtros rápidos a presión para filtrar la mitad del agua que entra en el mismo. En la Tabla XX se puede apreciar el dimensionamiento de uno de ellos.

Tabla XXII. Filtros Rápidos

Ecuaciones	Datos	Resultados(1 filtro)
$A = \frac{Q}{V}$ $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	$Q = 99 \text{ m}^3/\text{h} = 2376 \text{ m}^3/\text{d}$ $V = 280,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$ $h_{mf} = 1,2 \text{ m}$ 0,75 m de arena fina 0,45 m de grava $h_a = 2,3 \text{ m}$ $h_f = h_a + h_{mf}$	$A = 7,0/2 = 4,2 \text{ m}^2$ $d = 2,3 \text{ m}$ $h = 3,5 \text{ m}$

Fuentes: (Díaz, 2006) y (CEPIS, 2004).

Leyenda:

Flujo volumétrico (Q); profundidad del filtro (hf); área del filtro (A); velocidad de filtración (V); profundidad del medio filtrante (hmf); altura del agua (ha), diámetro del filtro (d).

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Dosificador de hipoclorito de sodio

Para un litro de agua se recomienda 2 mg de Cl<sub>2</sub> (de acuerdo a los resultados obtenidos en la determinación de demanda de cloro realizada), por lo que para 4752 m<sup>3</sup> de agua en un día se necesita 9504 g de Cl<sub>2</sub>. Conociendo el contenido de cloro activo del hipoclorito de sodio (109 g Cl<sub>2</sub> en 1 L), para que el agua reciba 9504 g de Cl<sub>2</sub> se necesita dosificar 87,2 L de hipoclorito de sodio. El dosificador requerido debe bombear 90 L/d.

Dosificador de sulfato de aluminio

Para un litro de agua se recomienda 40 mg de sulfato de aluminio (según la prueba de jarras hecha en la textilera Desembarco del Granma de Villa Clara, para la misma fuente de abasto “La Presa Minerva”), por lo que para 4752 m<sup>3</sup> de agua en un día es necesario dosificar 190,08 kg de sulfato de aluminio. Para que la coagulación sea más efectiva es necesario dosificar el coagulante como una disolución, 190,08 kg de sulfato de aluminio sólido en 289.62 L. El dosificador requerido debe bombear 290 L/d.

Tanque de almacenamiento (cisterna)

La capacidad del tanque de distribución debe ser calculada en base a los datos de consumo de la población y su distribución horaria. Se recomienda que el volumen del tanque sea 1/3 del caudal máximo diario ya que distribuye el agua 3 veces al día.

Tabla XXIII. Tanque de almacenamiento

Ecuaciones	Datos	Resultados
$V_{\text{TANQUE}} = A * h$ $V_{\text{TANQUE}} = V/3$ $V = Q * t$ $A = a * l$	$Q = 4752 \text{ m}^3/\text{d}$ $V = 4752 \text{ m}^3$ $t = 1 \text{ d}$ $h = 11 \text{ m}$	$V_{\text{TANQUE}} = 1584 \text{ m}^3$ $a=l = 12 \text{ m}$

Leyenda:

Volumen del tanque ( $V_{\text{TANQUE}}$ ); longitud del tanque (l); ancho del tanque (a); profundidad del tanque (h); flujo volumétrico (Q); volumen del agua (V); área (A).

Tubería

Para enviar el agua al filtro rápido se necesita la tubería ilustrada en la tabla siguiente.

Tabla XXIV. Tubería

Ecuaciones	Datos	Resultados
$v = \frac{Q}{A}$ $d = \sqrt{\frac{Q * 4}{\pi * v}}$	Tubería a la bomba Q = 0,0275 m <sup>3</sup> /s v = 1 m/s L = 3 m	d <sub>calc</sub> = 0,187 m DI = 0,203 m DN = 0,203 m DE = 0,219 m
	Tubería al Filtro rápido Q = 0,0275 m <sup>3</sup> /s v = 2 m/s L = 9 m	d <sub>calc</sub> = 0,132 m DI = 0,154 m DN = 0,1524 m DE = 0,168 m
	Tubería a la cisterna Q = 0,0275 m <sup>3</sup> /s v = 1 m/s L = 16 m	d <sub>calc</sub> = 0,187 m DI = 0,203 m DN = 0,203 m DE = 0,219 m

Fuentes: (Rosabal, 2006), (Pávlov, 1986) y (Peter, 2003).

Leyenda:

Velocidad (v); diámetro calculado (d<sub>calc</sub>); diámetro nominal (DN); diámetro interior (DI); diámetro externo (DE); flujo volumétrico (Q); longitud de la tubería (L).

Bomba

Se requiere de una bomba centrífuga con las características dimensionadas en la siguiente tabla para succionar el agua desde el sedimentador e impulsarlo hacia el filtro rápido.

Tabla XXV. Bomba

Ecuaciones	Datos	Resultados
$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta(\alpha v^2)}{2g} + hp_T$ $hp_T = hp_{tub-asc} + hp_{filtro}$ $hp_{tub-asc} = \left( f * \frac{L}{D} + \sum K \right) * \frac{v^2}{2g}$ $hp_{filtro} = \frac{(-\Delta P)_{filtro}}{\rho g} = \frac{\sum F}{g}$ $\frac{\sum F}{g} = f * \frac{3(1-\epsilon)}{2\epsilon^3 \varphi} * \frac{1}{D_p} * \frac{v_o^2}{2g}$	ΔZ = 3 m L = 28 m DI = 0,154 m e = 0,2 mm μ = 0,0008 kg/m*s ρ = 995,7 Kg/m <sup>3</sup> η = 90 % Q = 0,0275 m/s d <sub>lec</sub> = 2,3 m ε = 0,4	A = 0,0186 m <sup>2</sup> ΣK = 33,55 $\frac{e}{D} = 0,0013$ Re = 2,9*10 <sup>5</sup> f = 0,023 hp <sub>tub-asc</sub> = 4,32 m Q <sub>f</sub> = 0,01375 m <sup>3</sup> /s v <sub>o</sub> = 0,0033 m/s Rε = 1,6 f = 85,5

$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$ $N = \frac{H\rho gQ}{\eta * 1000}$ $v = \frac{Q}{A}$ $v_o = \frac{Q_f}{A_{lec}}$ $Q_f = \frac{Q}{n}$ $f = \frac{133,3}{Re} + 2,33$ $R_\varepsilon = \frac{2\varphi}{3(1-\varepsilon)} + \frac{Dpv_o\rho}{\mu}$	$\varphi = 0,75$ $Dp = 0,00045 \text{ m}$ $l = 1,2 \text{ m}$ $n = 2$ $A_{lec} = 4,2 \text{ m}^2$ $v = 1,5 \text{ m/s}$	$hp_{filtro} = 2,4 \text{ m}$ $H = 9,72 \text{ m}$ $N = 2,9 \text{ kW}$
--	--	---

Fuentes: (Rosabal, 2006), (Pavlov, 1986) y (Peters, 2003).

Leyenda:

Viscosidad del agua ( $\mu$ ); altura ( $\Delta Z$ ); diámetro interior del tubo (DI); longitud del tubo (L); aceleración de la gravedad (g); rugosidad (e); velocidad (v); pérdidas en las tuberías y accesorios ( $hp_{tub-asc}$ ); pérdidas en el filtro ( $hp_{filtro}$ ); número de Reynolds (Re); carga (H); potencia (N); flujo volumétrico (Q); pérdidas total ( $hp_T$ ); eficiencia( $\eta$ ); factor de fricción para tubería (f); coeficiente de resistencia en los accesorios ( $\sum K$ ); porosidad ( $\varepsilon$ ); esfericidad ( $\varphi$ ), número de filtros (n); densidad ( $\rho$ ); diámetro de partículas (Dp), área del tubo (A); área de flujo aparente del lecho ( $A_{lec}$ ); diámetro del filtro ( $d_{lec}$ ); flujo que pasa por el filtro (Qf); velocidad aparente del filtro ( $v_o$ ); factor de fricción del filtro (f); número de Reynolds para el filtro ( $R_\varepsilon$ ).

### 3.1.3. Análisis económico de la alternativa I

Costo total de inversión

Una vez dimensionados los equipos fundamentales de la planta y la tubería, se efectuó el análisis económico de la misma, sobre la base del cálculo del costo total de inversión, el costo total de producción y los indicadores económicos.

El estimado de los indicadores se obtuvo aplicando la metodología planteada por *Peters, M.*, (2003).

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

La estimación del costo total de inversión se realizó utilizando los factores de proporción y las ecuaciones planteadas por *Peters, M.*, (2003) y adaptándolas a las características de la inversión.

Costo Total de Inversión (CTI) = Costo Fijo de Inversión (CFI) + Inversión de Trabajo (IT)

CTI = CFI + IT

CFI = Costos directos+ Costos indirectos

IT = 15 % CTI

$$\text{Costo}_{\text{actual}} = \text{Costo}_{\text{original}} * \frac{\text{Indice}_{\text{actual}}}{\text{indice}_{\text{original}}}$$

Índice actual.....567.3 Fuente: Chemical Engineering. April, 2014.

Índice original.....402, 0 año 2003 Fuente: Chemical Engineering. November, 2007.

Tabla XXVI. Costo de las tuberías:

<b>Diámetros</b>	<b>Longitud</b>	<b>Precio por m (\$/m)</b>	<b>Costo Original (\$)</b>	<b>Costo Actual (\$)</b>
0,203 m	3 m	50	150	211,68
0,154 m	9 m	40	360	508,03
0,203 m	16 m	50	800	1128,96
<b>Total</b>				<b>1848,67</b>

Fuente: (Peters, 2003)

Costo de los equipos:

Filtro Rápido - 101850 Fuente: (Leiva, 2011)

Dosificador de Hipoclorito de sodio - 2973,26 Fuente: (Leiva, 2011)

Dosificador de Sulfato de aluminio 1653,8 Fuente: (Leiva, 2011)

Tabla XXVII. Costo de bomba

<b>Equipos</b>	<b>Costo original (\$)</b>	<b>Costo actual (\$)</b>
Bomba	2220	3132,85
Motor	580	818,49
<b>Total</b>	<b>2800</b>	<b>3951,34</b>

Fuentes: (Rosabal, 2006) y (Peters, 2003).

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Costo de la obra técnica

Costo de la obra técnica: Es un costo que se determina por medio de un índice técnico económico calculado por el PRECONS II (Sistema de Precios de la Construcción), aprobado por la Resolución No 199-2005 del Ministerio de Finanzas y Precios, para los precios actualizados por dicho ministerio, multiplicado por el volumen de material necesario para construir el equipo. El índice técnico económico actualizado es 360,48 (\$\m³). Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

Calculo del volumen de material (Vm) necesario para la construcción de los equipos:

El espesor del fondo(s) es de  $s_1 = 0,2$  m; los tabiques es de  $s_2 = 0,15$  m y las paredes es de,  $s_3 = 0,25$  m.

Tabla XXVIII. Volumen necesario para la construcción de los equipos

Equipo	Ecuaciones	Datos	Resultados
Floculador	$V_m = 2(V_l) + 2(V_a) + N_T \cdot (V_t) + V_f$ $V_l = l \cdot h_f \cdot s_3$ $V_a = B \cdot h_f \cdot s_3$ $V_f = l \cdot B \cdot s_1$ $V_t = b \cdot h \cdot s_2$	$NT = 14$ m $b = 5,325$ m $B = 6$ m $l = 8,85$ m $h = 1,2$ m $h_f = 1,5$ m	$V_l = 3,32$ m <sup>3</sup> $V_a = 2,25$ m <sup>3</sup> $V_f = 10,62$ m <sup>3</sup> $V_t = 0,96$ m <sup>3</sup> $V_m = 35,2$ m <sup>3</sup>
Sedimentador	$V_m = 2(V_l) + 2(V_a) + V_f$ $V_l = l \cdot H \cdot s_3$ $V_a = a \cdot H \cdot s_3$ $V_f = l \cdot a \cdot s_1$	$a = 5,825$ m $l = 23,3$ m $H = 3,65$ m	$V_l = 21,26$ m <sup>3</sup> $V_a = 5,32$ m <sup>3</sup> $V_f = 27,14$ m <sup>3</sup> $V_m = 80,31$ m <sup>3</sup>
Tanque Intermedio	$V_m = 4(V_a) + V_f$ $V_a = a \cdot h \cdot s_3$ $V_f = a^2 \cdot s_1$	$a = 11,65$ m $h = 3,65$ m	$V_a = 10,63$ m <sup>3</sup> $V_f = 27,14$ m <sup>3</sup> $V_m = 69,66$ m <sup>3</sup>
2 Filtros Lentos	$V_m = 4(V_a) + V_f$ $V_a = a \cdot h_T \cdot s_3$ $V_f = a^2 \cdot s_1$	$a = 11,27$ m $h_T = 11,25$ m	$V_a = 31,7$ m <sup>3</sup> $V_f = 25,4$ m <sup>3</sup> $V_m = 152,2$ m <sup>3</sup> $2 V_m = 304,4$ m <sup>3</sup>
Cisterna	$V_m = 4(V_a) + V_f$ $V_a = a \cdot h \cdot s_3$ $V_f = a^2 \cdot s_1$	$a = l = 12$ m $h = 11$ m	$V_a = 33$ m <sup>3</sup> $V_f = 28,8$ m <sup>3</sup> $V_m = 160,8$ m <sup>3</sup>

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Tabla XXIX. Costo de la obra técnica

<b>Equipos</b>	<b>Volumen (m³)</b>	<b>I.T.E(\$\text{m}^3)</b>	<b>Costo de Obra Técnica (\$)</b>
Floculador	35,2	360,48	12688,9
Sedimentador	80,31	360,48	28950,15
Tanque Intermedio	69,66	360,48	25111,04
2 filtros lentos	304,4	360,48	109730,1
Cisterna	160,8	360,48	57965,18
<b>Total</b>			<b>234445,4</b>

Tabla XXX. Costo del equipamiento

<b>Equipo</b>	<b>Nº equipos</b>	<b>Costo Actual(\$)</b>
Filtros Rápidos	2	203700
Dosificador de Hipoclorito de sodio	1	2973,26
Dosificador de Sulfato de aluminio	1	1653,8
Bomba	1	3951,34
Floculador	1	12688,9
Sedimentador	1	28950,15
Tanque Intermedio	1	25111,04
Filtros lentos	2	109730,1
Cisterna	1	57965,18
<b>Total</b>		<b>446723,77</b>

Tabla XXXI. Estimación del costo total de inversión

<b>Estimación de los Costos Directos</b>		
<b>Componentes</b>	<b>% E</b>	<b>Costo (\$)</b>
Costo del equipamiento (E)		446723,77
Instalación	47	209960,17
Tuberías		1848,67
Instalaciones eléctricas	11	49139,61
CD		707672,2
<b>Estimación de los Costos Indirectos</b>		
<b>Componentes</b>	<b>% E</b>	<b>Costo</b>
Ingeniería y supervisión	33	147418,8
Precio de Contratista	1,5 % CFI	

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Contingencia	5% CFI	
CFI = 855091,07+ 6,5 CFI		
<b>CFI</b>		<b>914535,90</b>
<b>Costo Total de Inversión(CTI)</b>		<b>1075924,59</b>

Fuente: (Peters, 2003)

Costo total de producción

CTP = Costo de fabricación (CF) + Gastos Generales (GG)

CTP = CF+ GG

CF = Costos directos (CD) + Cargos Fijos (Cf) + Costos Indirectos (CI)

CF= CD + Cf + CI

GG = Distribución y venta + Administrativa + Inversión y Desarrollo

Tabla XXXII. Costo de la materia prima:

<b>Materia Prima</b>	<b>Costo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Anual (\$/año)</b>
Agua Cruda	0.25 \$/m <sup>3</sup>	1734480 m <sup>3</sup> /año	433620
<b>Total</b>			<b>433620</b>

Fuente Listado de precios INRH

$$Depreciación = \frac{CFI - VR}{Vd}$$

VR: valor residual, asumimos VR=0

Vd: vida útil igual a 15 años.

Tabla XXXIII. Estimación del Costo Total de Producción.

Estimación de los Costos Directos		
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Costo (\$)</b>
Materia prima		433620
Mano de obra	10 %CTP	
Supervisión	10 % Mano de obra	
Mantenimiento y reparación	2 %CFI	18290,72
Requerimientos	10 %CTP	
Suministro	0,5 % CFI	4572,68
CD = 456483,5 + 0,21 CTP		

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Estimación de Cargos Fijos		
Componentes	%	Costo (\$)
Depreciación		60969,06
Impuestos	1 %CFI	9145,36
Seguros	0.4 % CFI	3658,14
Cf = 73772,56		
Estimación de los Costos Indirectos		
Costos indirectos	5% CTP	
CI = 0.05 CTP		
Gastos Generales		
Componentes	%	Costo (\$)
Administrativos	2 % CTP	
Distribución y ventas	2 % CTP	
Investigación y desarrollo	5 % CTP	
GG = 0.09 CTP		

Fuente: (Peter, 2003)

$$CTP = CF + GG$$

$$CTP = 530255,96 + 0.35 CTP$$

$$0.65 CTP = 530255,96$$

$$CTP = 815778,4 \text{ \$/año}$$

#### Indicadores Económicos

Se realizó un análisis económico para un período de 15 años donde se calculó el valor actual neto (VAN), la tasa de rendimiento interno (TIR) y el plazo de recuperación al descontado (PRD), utilizando el valor del costo total de inversión calculado anteriormente. Se utilizó una tasa de interés de 10% y se asume que los valores de los ingresos están relacionados con el costo de tratamiento de agua en una instalación fuera de la universidad y transportada hasta la misma y por las externalidades, es decir, el ahorro por concepto de los efectos que pudiera ocasionar el consumo de aguas contaminadas.

Se obtiene como resultado los siguientes valores:

$$VAN: \$ 628573,02$$

$$TIR: 22 \%$$

$$PRD: 5,9 \text{ años}$$

### 3.2. Evaluación de la alternativa II para la potabilización del agua en la UCLV.

#### 3.2. 1 Descripción del sistema de tratamiento de la alternativa II

El sistema de tratamiento para la alternativa II se muestra en la figura 9 (Anexo IX). El mismo es similar al de la alternativa I, la diferencia radica en que el agua sedimentada del tanque intermedio es bombeada e impulsada hasta cuatro filtros rápidos a presión operando en paralelo.

#### 3.2.2. Dimensionamiento de los equipos para la alternativa II

Los equipos dimensionados en la Alternativa I son los mismos para la Alternativa II con la excepción de la bomba que fue cambiada por una de mayor capacidad y no hay filtro lento. Los resultados de dimensionamiento de la bomba aparecen en la Tabla XXXV

Los filtros rápidos tienen las mismas dimensiones que en la alternativa I, pero la cantidad aumenta de dos unidades a cuatro. En el caso de la Alternativa II, las dimensiones de la tubería también cambian.

Tubería

Los cálculos para la tubería necesita para enviar el agua a los filtros rápidos se muestran en la tabla siguiente:

Tabla XXXIV. Tubería

Ecuaciones	Datos	Resultados
$v = \frac{Q}{A}$ $d = \sqrt{\frac{Q * 4}{\pi * v}}$	Tubería a la bomba Q = 0,055 m <sup>3</sup> /s v = 1 m/s L = 3 m	d <sub>calc</sub> = 0,264 m DI = 0,305 m DN = 0,305 m DE = 0,325 m
	Tubería al Filtro rápido Q = 0,055 m <sup>3</sup> /s v = 2 m/s L = 15 m	d <sub>calc</sub> = 0,187 m DI = 0,203 m DN = 0,203 m DE = 0,219 m
	Tubería a la cisterna Q = 0,055 m <sup>3</sup> /s v = 1 m/s L = 8 m	d <sub>calc</sub> = 0,264 m DI = 0,305 m DN = 0,305 m DE = 0,325 m

Fuentes: (Rosaba, 2006), (Pávlov, 1986) y (Peters, 2003).

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Leyenda:

Velocidad (v); diámetro calculado ( $d_{calc}$ ); diámetro interior (DI); diámetro nominal (DN); diámetro externo (DE); flujo volumétrico (Q); longitud de la tubería (L).

Bomba

Se requiere de una bomba centrífuga con las características dimensionadas en la siguiente tabla:

Tabla XXXV. Bomba

Ecuaciones	Datos	Resultados
$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta(\alpha v^2)}{2g} + hp_T$	$\Delta Z = 3 \text{ m}$	$A = 0,032 \text{ m}^2$
$hp_T = hp_{tub-asc} + hp_{filtro}$	$L = 26 \text{ m}$	$\sum K = 47,43$
$hp_{tub-asc} = \left( f * \frac{L}{D} + \sum K \right) * \frac{v^2}{2g}$	$DI = 0,203 \text{ m}$	$\frac{e}{D} = 0,001$
$hp_{filtro} = \frac{(-\Delta P)_{filtro}}{\rho g} = \frac{\sum F}{g}$	$e = 0,2 \text{ mm}$	$Re = 4,3 * 10^5$
$\frac{\sum F}{g} = f * \frac{3(1-\epsilon)}{2\epsilon^3 \varphi} * \frac{1}{D_p} * \frac{v_o^2}{2g}$	$\mu = 0,0008 \text{ kg/m*s}$	$f = 0,021$
$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$	$\rho = 995,7 \text{ Kg/m}^3$	$hp_{tub-asc} = 7,4 \text{ m}$
$N = \frac{H\rho g Q}{\eta * 1000}$	$\eta = 90 \%$	$Q_f = 0,01375 \text{ m}^3/\text{s}$
$v = \frac{Q}{A}$	$Q = 0,055 \text{ m/s}$	$v_o = 0,0034 \text{ m/s}$
$v_o = \frac{Q_f}{A_{lec}}$	$d_{lec} = 2,3 \text{ m}$	$R\epsilon = 1,6$
$Q_f = \frac{Q}{n}$	$\epsilon = 0,4$	$f = 85,5$
$f = \frac{133,3}{R\epsilon} + 2,33$	$\varphi = 0,75$	$hp_{filtro} = 2,4 \text{ m}$
$R\epsilon = \frac{2\varphi}{3(1-\epsilon)} + \frac{D_p v_o \rho}{\mu}$	$D_p = 0,00045 \text{ m}$	$H = 12,8 \text{ m}$
	$l = 1,2 \text{ m}$	$N = 7,5 \text{ kW}$
	$n = 4$	
	$A_{lec} = 4,2 \text{ m}^2$	
	$v = 1,7 \text{ m/s}$	

Fuentes: (Rosabal, 2006), (Pavlov, 1986) y (Peters, 2003).

Leyenda:

Viscosidad del agua ( $\mu$ ); altura ( $\Delta Z$ ); diámetro interior del tubo (DI); longitud del tubo (L); aceleración de la gravedad (g); rugosidad (e); velocidad (v); pérdidas en las tuberías y accesorios ( $h_{p_{tub-asc}}$ ); pérdidas en el filtro ( $h_{p_{filtro}}$ ); número de Reynolds (Re); carga (H); potencia (N); flujo volumétrico (Q); pérdidas totales ( $h_{pT}$ ); eficiencia( $\eta$ ); factor de fricción para tubería ( $f$ ); coeficiente de resistencia en los accesorios ( $\sum K$ ); porosidad ( $\varepsilon$ ); esfericidad ( $\varphi$ ), número de filtros (n); densidad ( $\rho$ ); diámetro de partículas (Dp), área del tubo (A); área de flujo aparente del lecho ( $A_{lec}$ ); diámetro del filtro ( $d_{lec}$ ); flujo que pasa por el filtro (Qf); velocidad aparente del filtro ( $v_o$ ); factor de fricción del filtro (f); número de Reynolds para el filtro ( $Re$ ).

### 3.2.3. Análisis económico de la alternativa II

Costo total de inversión

Tabla XXXVI. Costo de las tuberías:

Diámetros	Longitud	Precio por m (\$/m)	Costo Original (\$)	Costo Actual (\$)
0,305 m	3 m	80	240	338.69
0,203 m	15 m	50	750	1058.4
0,305 m	8 m	80	640	903.16
<b>Total</b>				<b>2300,25</b>

Fuente: (Peters, 2003)

Tabla XXXVII. Costo de la bomba

Equipos	Costo original (\$)	Costo actual (\$)
Bomba	2420	3415,09
Motor	1000	1411,19
<b>Total</b>	<b>3420</b>	<b>4826,28</b>

Fuentes: (Rosabal, 2006) y (Peters, 2003).

Cálculo del volumen de material ( $V_m$ ) necesario para la construcción de los equipos:

El espesor (s) del fondo es de  $s_1 = 0,2$  m, de los tabiques es de  $s_2 = 0,15$  m y de las paredes es de,  $s_3 = 0,25$  m.

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Tabla XXXVIII. Volumen necesario para la construcción de los equipos:

Equipo	Ecuaciones	Datos	Resultados
Floculador	$V_m = 2(VI) + 2(Va) + N_T \cdot (Vt) + V_f$ $VI = l \cdot hf \cdot s_3$ $Va = B \cdot hf \cdot s_3$ $Vf = l \cdot B \cdot s_1$ $Vt = b \cdot h \cdot s_2$	NT = 14 m b = 5,325 m B = 6 m l = 8,85 m h = 1,2 m hf = 1,5 m	$VI = 3,32 \text{ m}^3$ $Va = 2,25 \text{ m}^3$ $Vf = 10,62 \text{ m}^3$ $Vt = 0,96 \text{ m}^3$ $V_m = 35,2 \text{ m}^3$
Sedimentador	$V_m = 2(VI) + 2(Va) + V_f$ $VI = l \cdot H \cdot s_3$ $Va = a \cdot H \cdot s_3$ $Vf = l \cdot a \cdot s_1$	a = 5,825 m l = 23,3 m H = 3,65 m	$VI = 21,26 \text{ m}^3$ $Va = 5,32 \text{ m}^3$ $Vf = 27,14 \text{ m}^3$ $V_m = 80,31 \text{ m}^3$
Tanque Intermedio	$V_m = 4(Va) + V_f$ $Va = a \cdot h \cdot s_3$ $Vf = a^2 \cdot s_1$	a = 11,65 m h = 3,65 m	$Va = 10,63 \text{ m}^3$ $Vf = 27,14 \text{ m}^3$ $V_m = 69,66 \text{ m}^3$
Cisterna	$V_m = 4(Va) + V_f$ $Va = a \cdot h \cdot s_3$ $Vf = a^2 \cdot s_1$	a = l = 12 m h = 11 m	$Va = 33 \text{ m}^3$ $Vf = 28,8 \text{ m}^3$ $V_m = 160,8 \text{ m}^3$

Costo de la obra técnica = I.T.E \* Volumen de cada equipo

Tabla XXXIX. Costo de la obra técnica

Equipos	Volumen (m <sup>3</sup> )	I.T.E(\$/m <sup>3</sup> )	Costo de Obra Técnica (\$)
Floculador	35,2	360,48	12688,9
Sedimentador	80,31	360,48	28950,15
Tanque Intermedio	69,66	360,48	25111,04
Cisterna	160,8	360,48	57965,18
<b>Total</b>			<b>124715.3</b>

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Tabla XL. Costo del equipamiento

<b>Equipo</b>	<b>Nº equipos</b>	<b>Costo Actual(\$)</b>
Filtros Rápido	4	407400
Dosificador de Hipoclorito de sodio	1	2973,26
Dosificador de sulfato de aluminio	1	1653,8
Bomba	1	4826,28
Floculador	1	12688,9
Sedimentador	1	28950,15
Tanque Intermedio	1	25111,04
Cisterna	1	57965,18
<b>Total</b>		<b>541568,61</b>

Tabla XLI. Estimación del costo total de inversión

Estimación de los Costos Directos		
<b>Componentes</b>	<b>% E</b>	<b>Costo (\$)</b>
Costo del equipamiento (E)		541568,61
Instalación	47	254537,25
Tuberías		2300,25
Instalaciones eléctricas	11	59572,55
CD		857978,65
Estimación de los Costos Indirectos		
<b>Componentes</b>	<b>% E</b>	<b>Costo</b>
Ingeniería y supervisión	33	178717,64
Precio de Contratista	1,5 % CFI	
Contingencia	5% CFI	
CFI = 1036696,3+ 6,5 CFI		
<b>CFI</b>		<b>1108766,1</b>
<b>Costo Total de Inversión(CTI)</b>		<b>1304430,7</b>

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Costo total de producción

Tabla XLII. Estimación del Costo Total de Producción.

Estimación de los Costos Directos		
Componentes	%	Costo (\$)
Materia prima		433620
Mano de obra	10 %CTP	
Supervisión	10 % Mano de obra	
Mantenimiento y reparación	2 %CFI	22175,32
Requerimientos	10 %CTP	
Suministro	0,5 % CFI	5543,83
CD = 461339,15+ 0,21 CTP		
Estimación de Cargos Fijos		
Componentes	%	Costo (\$)
Depreciación		73917,74
Impuestos	1 %CFI	11087,66
Seguros	0.4 % CFI	4435,06
Cf = 89440,46		
Estimación de los Costos Indirectos		
Costos indirectos	5% CTP	----
CI = 0.05 CTP		
Gastos Generales		
Componentes	%	Costo (\$)
Administrativos	2 % CTP	-----
Distribución y ventas	2 % CTP	-----
Investigación y desarrollo	5 % CTP	-----
GG = 0.09 CTP		

Fuente: (Peters, 2003)

$$CTP = CF + GG$$

$$CTP = 550779.61 + 0.35 CTP$$

$$0.65 CTP = 550779.61$$

$$CTP = 847353.25 \text{ \$/año}$$

Capítulo 3: Análisis de alternativas de tratamiento de agua para la potabilizadora de la UCLV.

Indicadores Económicos

Se realizó un análisis económico con las mismas consideraciones que en la alternativa I y se obtiene como resultado los siguientes valores:

VAN: \$381060,55

TIR: 17 %

PRD: 7,6 años

Se considera que los plazos de recuperación de la inversión son muy altos para ambas alternativas (mayores que 5 años), lo que se debe a las características de la instalación, ya que no se obtienen ganancias directamente. Analizando que para este tipo de instalación se pueden realizar algunas consideraciones, teniendo en cuenta que la planta es una instalación necesaria para la comunidad universitaria, ya que constituye una garantía para la salud de estudiantes y trabajadores al garantizar el abasto de agua con la calidad requerida, se decide hacer un análisis de sensibilidad de influencia de la tasa de interés. Para ello se calculan los indicadores para (3, 5 y 7) % de interés.

Los resultados del análisis de sensibilidad para la alternativa I aparecen en la tabla XLIII, para la alternativa II aparecen en la tabla XLIV y los gráficos correspondientes en el Anexo XI.

Tabla XLIII. Indicadores de rentabilidad para la alternativa I (Análisis de sensibilidad)

Alternativa	Tasa de interés (%)	Costo de inversión (\$)	Costo de producción (\$/año)	VAN (\$)	TIR (%)	PRD (Años)
1						
1 <sup>a</sup>	10	1075924,59	815778,4	628573,02	22	5,9
1B	7			628573,02	22	5,29
1C	3,5			628573,02	22	4,7

Tabla XLIV. Indicadores de rentabilidad para la alternativa II (Análisis de sensibilidad)

Alternativa	Tasa de interés (%)	Costo de inversión (\$)	Costo de producción (\$/año)	VAN (\$)	TIR (%)	PRD (Años)
2						
2 <sup>a</sup>	10	1304430,7	847353,25	381060,55	17	7,6
2B	7			381060,55	17	6,7
2C	3,5			381060,55	17	5,9

En los resultados anteriores se observa que la alternativa I, para el caso de estudio 1C presenta los mejores resultados, en la misma se logra reducir la recuperación de la inversión a 4,7 años. Aun cuando estos resultados no son muy alentadores, se recomienda acometer la inversión para la alternativa I, considerando la necesidad de la misma y las condiciones económicas actuales.

### **Conclusiones parciales**

1. Las alternativas propuestas para la remodelación de la planta potabilizadora incluyen las operaciones y procesos unitarios requeridos y dimensionados con las capacidades necesarias para realizar el tratamiento adecuado del agua para consumo humano en la UCLV.
2. El cálculo de los dosificadores de productos químicos y el tanque de alimentación de agua a los filtros rápidos permite garantizar una adecuada operación de la planta.
3. Las dos alternativas propuestas presentan altos valores de los indicadores económicos, destacándose los altos periodos de recuperación de la inversión, dados por las características de la instalación.
4. Como resultado de un análisis de sensibilidad de influencia de la tasa de interés se obtiene que para la alternativa I se pudiera reducir la recuperación de la inversión a 4,7 años, para una tasa de interés suficientemente baja.
5. Aunque los indicadores económicos no muestran valores atractivos se considera que en la UCLV se debe acometer la inversión para la alternativa I, considerando la necesidad de la misma

## **Conclusiones**

1. La infraestructura de la planta potabilizadora de la UCLV presenta un alto grado de deterioro, los equipos están trabajando a una capacidad superior a la de diseño y las instalaciones destinadas al tratamiento físico-químico en dicha planta no están cumpliendo la función requerida, lo que evidencia la necesidad de remodelación de la planta.
2. A pesar de la situación de la planta, durante el tiempo de realización de los análisis, los parámetros físicos, químicos y microbiológicos evaluados en el efluente están dentro del rango establecido por la NC 827:2012, lo que evidencia la calidad de la fuente de abasto de agua y la intensidad del proceso de desinfección que se realiza.
3. Es necesario cambiar la estrategia para la desinfección, instalar dosificadores para el hipoclorito de sodio y aplicar la dosis idónea, de acuerdo a la demanda de cloro determinada.
4. Las alternativas propuestas para la remodelación de la planta potabilizadora, basadas en el aumento de capacidad de la misma, así como la implementación adecuada de las operaciones de coagulación floculación y desinfección y cambio del esquema de filtración en uno de los casos, ofrecen soluciones que permiten garantizar una adecuada operación de la planta.
5. Las dos alternativas propuestas presentan altos valores de los indicadores económicos, aunque se verificó que para una tasa de interés suficiente baja, el plazo de recuperación para la Alternativa I se pudiera reducir considerablemente.
6. Atendiendo al análisis económico unido a la importancia y necesidad de esta instalación, en la UCLV se debe acometer la inversión para la alternativa I, que tiene básicamente la estructura de la instalación actual, con las mejoras identificadas en el diagnóstico realizado y con la capacidad requerida para satisfacer la demanda de agua potable actual

**Recomendaciones**

- Repetir los análisis para la evaluación de la operación de la planta en otras épocas del año.
- Extender el estudio de monitoreo de cloro residual a otros puntos de la red de distribución del agua y tomar las medidas necesarias.
- Valorar la posibilidad de construir un laboratorio en la planta que garantice el control adecuado en la misma.
- Elaborar un plan de capacitación para los operadores de la planta.
- Implementar las acciones necesarias para garantizar un manejo adecuado de los lodos residuales del proceso de tratamiento
- Acometer la inversión de la alternativa propuesta en el menor plazo posible, garantizando la instrumentación y facilidades requeridas para el control y mantenimiento de la planta respectivamente

**Bibliografía**

1. Abi-faiçal Castanheira, A P. (2010). Aplicación de membrana de nanofiltración para eliminar disruptores endocrinos en la potabilización del agua. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
2. Alarcón Herrera, M T; Martín Domínguez, A; Martín Domínguez, I R. (2002). Concentración de flúor en el agua potable: su relación con la fluorosis dental. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México.
3. American Water Works Association. (2002). Calidad y tratamiento del Agua. 1era Edición. Editorial McGraw-Hill. España.
4. APHA, AWWA y WEF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition.
5. Arboleda, J. (2000) Teoría de la desinfección del agua. In *Teoría y práctica de la purificación del agua*. A. Rendón (ed.). Bogota (Colombia), McGraw Hill.
6. Busto Yera, Y; Martínez Nodal, P; Monteagudo Serrano, M; Rosa Domínguez, E. (2007). "Análisis preliminar de los problemas existentes en la Planta Potabilizadora de Los Camilitos de la UCLV". Informe Técnico. Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA). Facultad Química Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV).
7. Catalán, J. (1988) Química del agua.
8. CEPIS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de Filtración rápida*. [Consultado el 23 de Febrero, 2014]. Disponible en: <http://www.ingenieriasanitaria.com>
9. Chemical Engineering, Volume 114, No 12, November (2007).
10. Chemical Engineering, Volume 121, No 4. April (2014)..
11. Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada. México
12. Davis, L M. (2010). Water and wastewater engineering. Michigan State University.
13. Di Bernardo, L. (1993). Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. Vol. 1, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil.
14. Di Bernardo, L.; Di Bernardo A. e Filho, P. L. C. (2002). Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água. RiMa Editora, São Carlos, Brasil.
15. Díaz Betancourt, R. (2006). Tratamiento de agua y aguas residuales. La Habana, Editorial Félix Varela.

## Bibliografía

16. Fair, G. M., Geyer, J. C., y Okun, D. A. (1994) Desinfección. In *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. G. Maskew (ed). México., Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores.
17. González, Díaz, O. 2001. Diseño Hidráulico de plantas Potabilizadoras. Instituto Superior Politécnico “José A Echeverría”: Centro de Investigaciones Hidráulicas.
18. <http://arturobola.tripod.com>
19. <http://es.wikipedia.org>
20. <http://www.drinking-water.org>
21. <http://www.econovedades.eu>
22. <http://www.elaguapotable.com>
23. <http://www.eumed.net>
24. <http://www.lenntech.es>
25. <http://www.navarra.es>
26. <http://www.nordconsultors.es>
27. <http://www.observatori.org>
28. <http://www.one.cu/>
29. <http://www.taringa.net>
30. <http://www.uclm.es>
31. <http://www.un.org>
32. <http://www.un.org>
33. <http://www.unesco.org>
34. <http://www.unitek.com.ar>
35. <http://www.uprm.edu>
36. Junta de Andalucía. (2011) Guía práctica de calificación ambiental: Proyectos de ingeniería hidráulica y de gestión del agua. [Consultado el 10 de marzo, 2014]. Disponible en: <http://gica.famp.es>
37. Leiva Mas, J. (2011) “Evaluación de soluciones tecnológicas en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas mediante un sistema local de indicadores de sostenibilidad ambiental”. Tesis Doctoral. UCLV.
38. López Sardi, E M; et al. Calidad del agua domiciliaria. experiencia de aprendizaje en el transcurso de un proyecto de investigación: aplicación del método científico. Universidad de Palermo.
39. Manual del carbón activo. [Consultado el 7 de marzo, 2014]. Disponible en: <http://www.aquapedia.net/>
40. Moreno Benavides, José Alberto. Diseño de planta de tratamiento de agua de osmosis inversa para la empresa Dober Osmotech de Colombia Ltda. Pasantía Institucional para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico. Universidad Autónoma

## Bibliografía

- de Occidente. Facultad de ingenierías. Departamento de Automática y Electrónica. Santiago de Cali. 2011
41. Muñoz Cordoba, J; Mafla Castaño L. (2007). Monitoreo y evaluación del cloro residual libre en el sistema de distribución del acueducto comunitario Cestillal El Diamante ACUSESDI, área rural del municipio Pereira – Risaralta. Tutor: Castro Eusse, F. “Trabajo de grado para optar por el título de Tecnólogo Químico. Universidad de Pereira, Facultad de tecnología, Escuela de Química. Colombia.
  42. Mynor García, R. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Boletín Electrónico No. 08. Universidad Rafael Landívar. [Consultado el 9 de marzo, 2014]. Disponible en: [www.tec.url.edu.gt](http://www.tec.url.edu.gt)
  43. NC 1021: 2014 Higiene Comunal — Fuentes de Abastecimiento de Agua — Calidad y Protección Sanitaria
  44. NC 827:2012 Agua Potable — Requisitos Sanitarios (Obligatoria)
  45. OMS (2004) Guías para la calidad del agua potable. 3ª (Ed.) Ginebra
  46. Osorio Valero, Y. (2007). Diagnóstico a la planta potabilizadora de la UCLV con vistas a mejorar la calidad del agua. Trabajo de Diploma. UCLV.
  47. Pavlov, K. F., Romankov, P. G. & Noskov, A. A. 1981. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química, Moscú.
  48. Pérez de la Cruz, J F; Urrea Mallebrera, A M. (2011). Abastecimiento de agua. . [Consultado el 14 de abril, 2014]. Disponible en: <http://www.aguapedia.net/>
  49. Perry, H.R. (1997). Perry’s Chemical Engineering’s Handbook. USA, 7 Ed, McGraw Hill.
  50. Peters, M. S. & Timmerhaus, K. D. 2003. Plant Design and economics for Chemical Engineers. In: GRAW-HILL, M. (ed.) Fifth Edition Professors of Chemical Engineering University of Colorado.
  51. *Pre-Treatment Field Guide: American Water Works Association, 2007.*
  52. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), Marzo de 2012).
  53. Ramírez Quirós, F. (2008). Lodos producidos en el tratamiento del agua potable
  54. Richter, C. A. e Azevedo Netto, J. M. (2003). Tratamiento de Agua – Tecnologia Atualizada. 5ª reimpresión. Editora Edgard Blücher Ltda, Brasil.
  55. Rojas Vargas, J C. (2008). potabilización de aguas superficiales mediante el proceso de ultrafiltración con membranas arrolladas en espiral. Tesis Doctoral. Universidad de Granada
  56. Romero, J. A. (1999) *Calidad de Agua*. Mexico, Alfaomega.

## Bibliografía

57. Rosabal Vega, M.J. Valle Matos, M. 2006. Hidrodinámica y separaciones mecánicas. La Habana, Editorial Félix Varela.
58. Ulrich, G. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1985.
59. Vega Otero, R E. (2006). Sistemas de captación de aguas subterráneas. Compañía General de Sondeos. [Consultado el 9 de Febrero, 2014]. Disponible en: [aula.aguapedia.org](http://aula.aguapedia.org)
60. WHO (2002) Environmental Health Criteria 227. Geneva
61. Yoval Luciano, S. et al. (1998). Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua. [Consultado el 10 de marzo, 2014]. Disponible en: [www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org)

## Anexos

### Anexo I

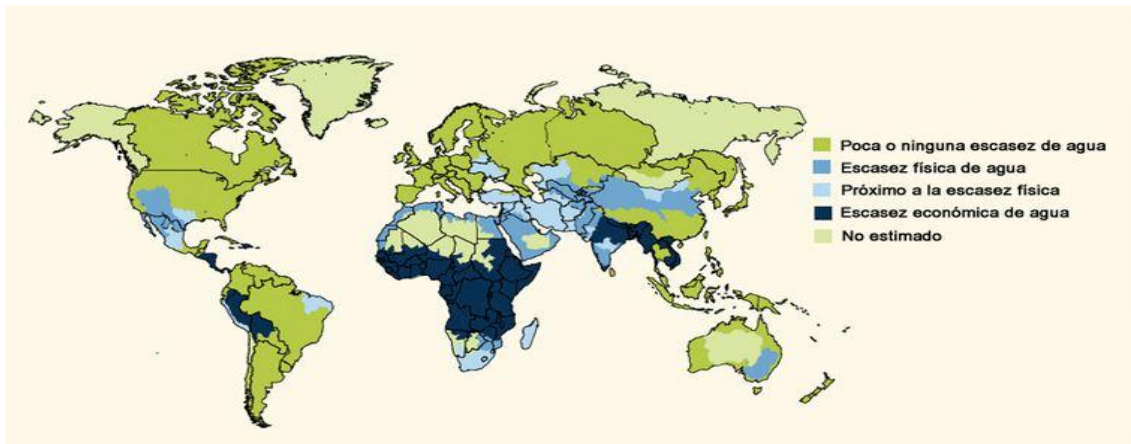


Fig. 1. Escasez física y/o económica de agua a nivel mundial

Fuente: Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo

### Anexo II

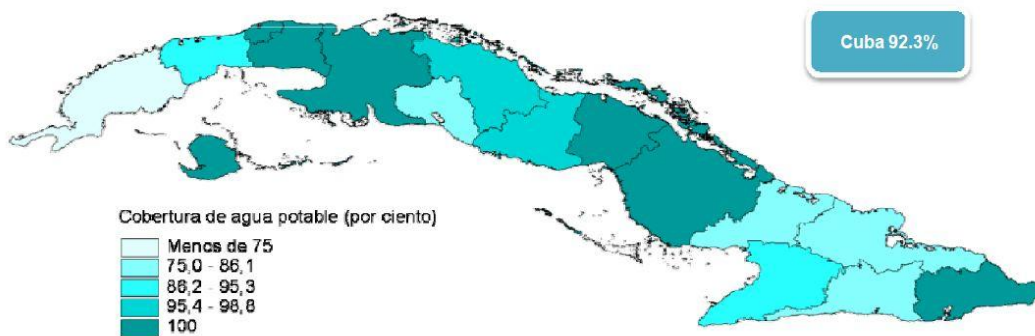


Fig. 2. Cobertura de agua potable por provincias, año 2011

Fuente: Oficina Nacional de Estadística e Información, a partir de la información del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

## Anexos

### Anexo III

Tabla III. Descripción de los procesos en plantas potabilizadoras

<b>Grado de tratamiento</b>	<b>Composición del tratamiento</b>	<b>Descripción</b>
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.*

### Anexo IV.

Tabla IV. Características de los lodos del proceso de coagulación floculación con sulfato de aluminio

<b>Características</b>	<b>Rango</b>
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l	30 a 300
Demanda química de oxígeno, mg/l	30 a 5,000
pH, unidades	6 a 8
Sólidos totales, %	0.1 a 4
Óxido de aluminio, %	15 a 40
Sílice e inertes, %	35 a 70
Materia orgánica, %	15 a 25
Aluminio disuelto, mg/l	0.024 a 0.450
Aluminio total, mg/l	808.3 a 2,567
Manganeso disuelto, mg/l	1.66 a 7.28
Manganeso total, mg/l	46.5 a 73.9
Fierro total, mg/l	100 a 222

## Anexos

Fierro disuelto, mg/l	3.5 a 6.47
Carbón orgánico total, mg/l	22.9 a 245
Giardia, quiste/l	52.84 a 67.1
Cryptosporidium, quiste/l	26.42 a 38.4

Fuente: Comisión Nacional del Agua. México, 2007.

### Anexo V.

Tabla V. Características de los lodos típicos de ablandamiento de agua

<b>Características</b>	<b>Rango</b>
Carbonato de calcio, %	85 a 93
Hidróxido de calcio, %	0 a 1
Hidróxido de magnesio, %	0.5 a 8
Sílice e inertes, %	2 a 5

Comisión Nacional del Agua. México, 2007.

### Anexo VI.

Tabla VI Subproductos de la desinfección por diferentes desinfectantes

<b>Desinfectante</b>	<b>Subproductos de la desinfección organohalogenicos</b>	<b>Subproductos de la desinfección inorgánicos</b>	<b>Subproductos de la desinfección no halogenicos</b>
cloro (Cl <sub>2</sub> ) ácido hipocloroso (HOCl)	trihalometanos, ácido acético halogenito, haloacetonnitrils, cloro hidratados, cloropicrin, clorofenoles, N-cloraminas, halofuranos, bromohydrins	clorato (particularmente en la aplicación de hipoclorito)	aldehídos, ácidos alcanicos, benceno, ácido carboxílico
Dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )		cloro, clorato	desconocido
cloraminas (NH <sub>3</sub> Cl etc.)	haloacetonnitrils, ciano cloro, cloraminas orgánicas, cloramino ácidos, cloro hidratantes,	nitrito, nitrato, clorato, hydrazine	aldehídos, ketones

## Anexos

	haloquetones		
ozono (O <sub>3</sub> )	bromoformo, monobromo ácido acético, ácido dibromo acetico, dibromo acetona, cyano bromo	clorato, iodato, bromato, peróxido de hidrogeno, ácido hipobromoso, ozonatos, epoxy	aldehídos, ketones, ketoacidos, acido carboxílicos

### Anexo VII

Tabla VII Factores que influye en la formación de Subproductos de la desinfección ([www.elaguapotable.com](http://www.elaguapotable.com)).

<b>Factor considerado</b>	<b>Impacto en la formación de subproductos de la desinfección</b>
Tipo de desinfectante	Depende de la reactividad del desinfectante.
Potencia del desinfectante	A mayor potencia del desinfectante, mayor es la cantidad de subproductos formados.
Dosis de desinfectante	En general el incremento en la dosis incrementa la tasa de formación de subproductos.
Tipo de organismo	Ninguno
Tiempo de contacto	El incremento del tiempo de contacto, para una dosis dada de desinfectante, incrementa la formación de subproductos de la desinfección.
Turbidez	El aumento de turbidez puede estar asociado con el aumento en la materia orgánica natural que a su vez supone un incremento de la cantidad de precursores y subproductos de la desinfección, cuando se aplica el desinfectante.
pH	El pH influye en gran medida en la formación de subproductos de la desinfección.
Materia Orgánica Disuelta (MOD)	El incremento de MOD supondrá una mayor cantidad de precursores para la formación de subproductos de la desinfección cuando se aplica el desinfectante.
Temperatura	El incremento de temperatura conlleva una más rápida reacción de oxidación, y por tanto un incremento en la formación de subproductos de la desinfección.

## Anexos

### Anexo VIII

Tabla XIV Resultados experimentales de prueba de demanda de cloro. Muestra 1.

Frascos	Dosis cloro (mg)	Cloro libre (mg/L)
1	0.035	0.4
2	0.071	0.6
3	0.106	0.8
4	0.071	0.9
<b>5</b>	<b>0.035</b>	<b>1.0</b>
6	0.106	1.1
7	0.142	1.2
8	0.177	1.3

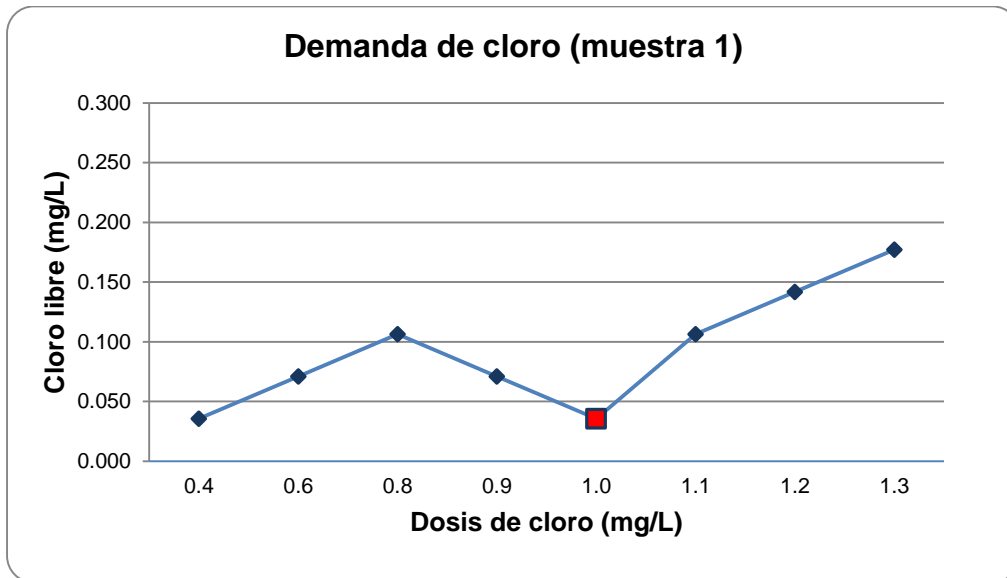


Figura 5 Curva de demanda de cloro. Muestra 1

## Anexos

Tabla XV Resultados experimentales de prueba de demanda de cloro. Muestra 2

Frascos	Dosis cloro (mg)	Cloro libre (mg/L)
1	0.036	0.4
2	0.069	0.6
3	0.089	0.8
<b>4</b>	<b>0.026</b>	<b>0.9</b>
5	0.069	1.0
6	0.099	1.1
7	0.124	1.2
8	0.157	1.3

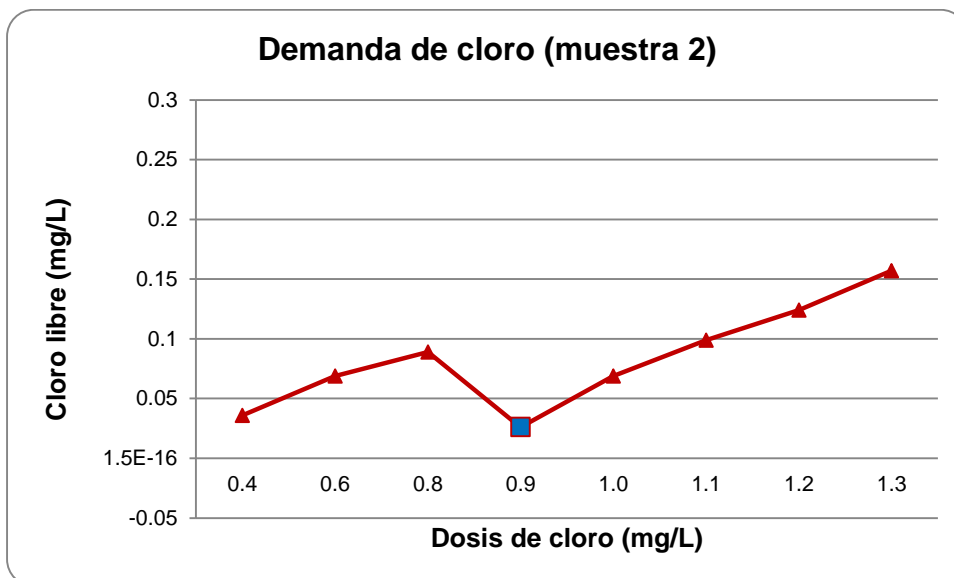


Figura 6 Curva de demanda de cloro. Muestra 2

Tabla XVI Resultados experimentales de prueba de demanda de cloro. Muestra 3.

Frascos	Dosis cloro (mg)	Cloro libre (mg/L)
1	0.033	0.4
2	0.059	0.6
3	0.081	0.8
4	0.061	0.9
5	0.049	1.0
<b>6</b>	<b>0.036</b>	<b>1.1</b>
7	0.09	1.2
8	0.13	1.3

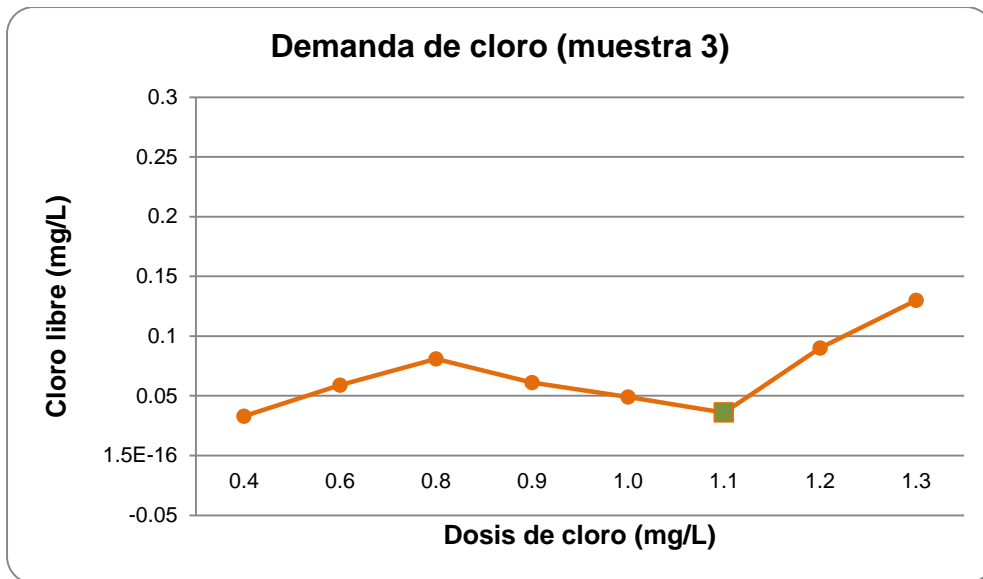


Figura 7 Curva de demanda de cloro. Muestra 3

Anexo IX

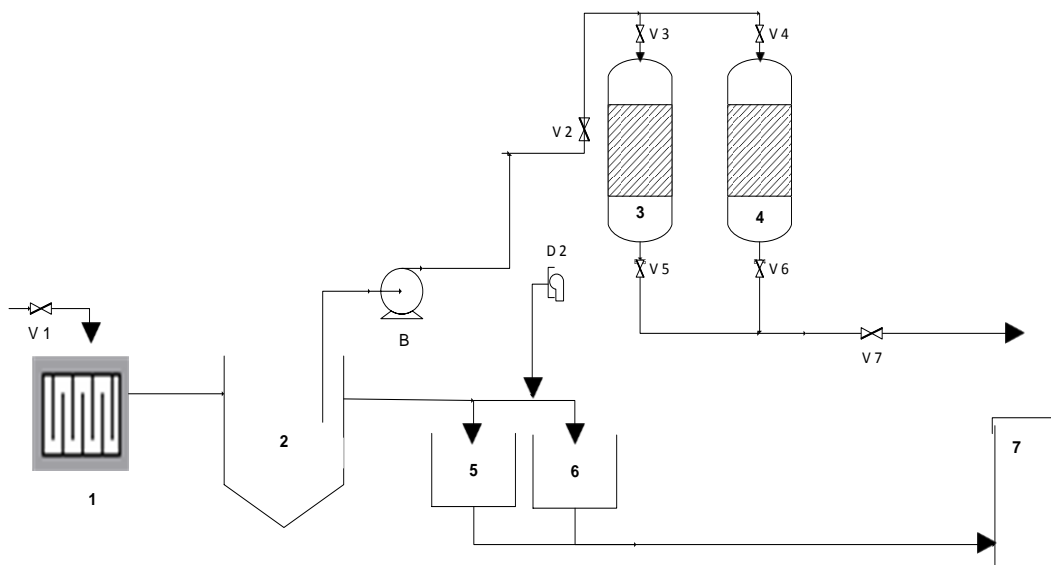


Figura 3 Diagrama de flujo del sistema actual de potabilización

V1, V2, V3, V4, V7 - Válvulas de Alimentación

V5, V6 - Válvulas de Descarga

1-Floculador

2-Sedimentador

3, 4 - Filtros Rápidos

## Anexos

5, 6 - Filtros Lentos

7 - Tanque de Almacenamiento

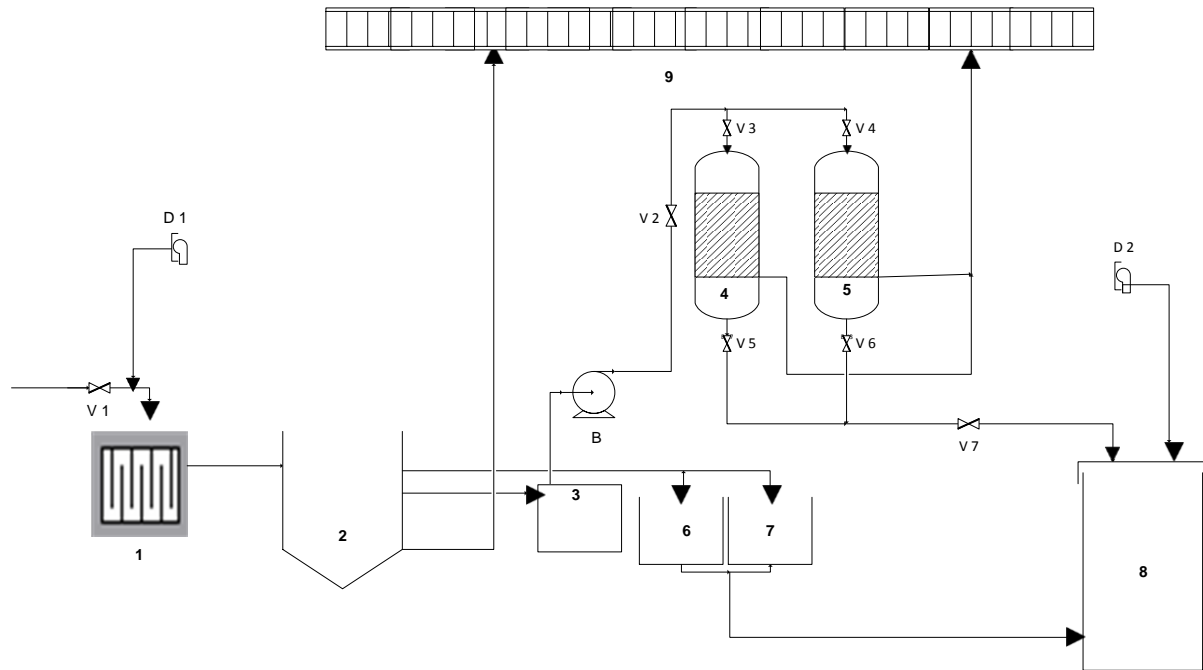


Figura 8 Diagrama de flujo de la alternativa 1

V1, V2, V3, V4, V7 - Válvulas de Alimentación

V5, V6 - Válvulas de Descarga

1-Floculador

2-Sedimentador

3- Tanque Intermedio

4, 5 -Filtros Rápidos

6, 7- Filtros Lentos

8-Tanque de Almacenamiento

9-Canal de Residuos

D1-Dosificador de Sulfato de Aluminio

D2-Dosificador de Hipoclorito de Sodio

## Anexos

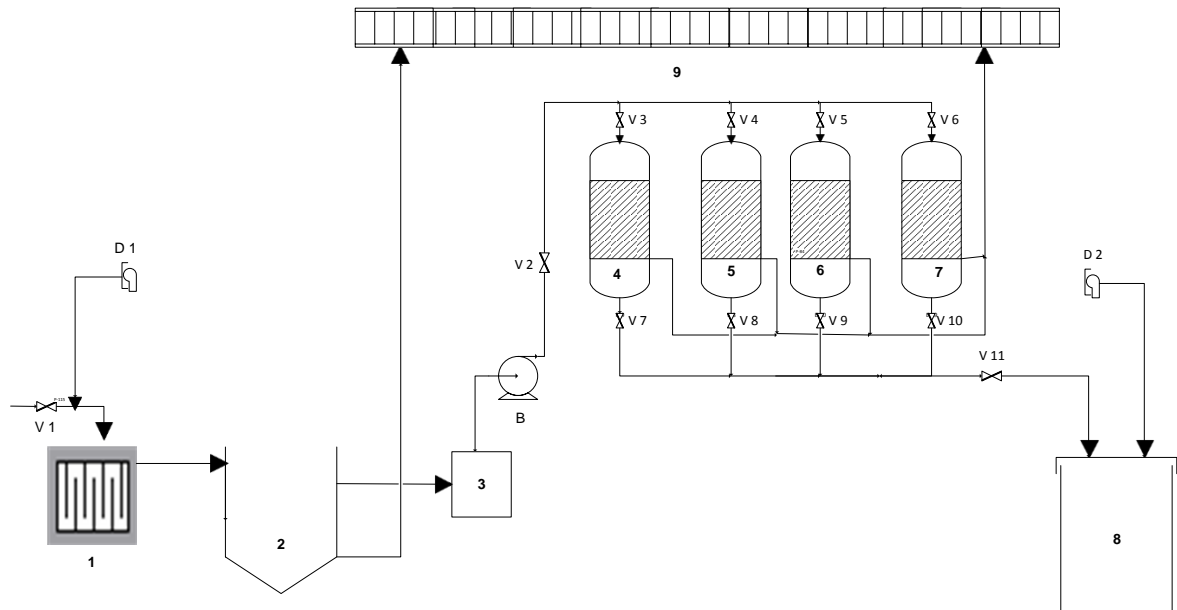


Figura 9 Diagrama de flujo de la alternativa 2

V1, V2, V3, V4, V5, V6, V11 - Válvulas de Alimentación

V7, V8, V9, V10 - Válvulas de Descarga

1- Floculador

2-Sedimentador

3- Tanque Intermedio

4, 5, 6, 7 - Filtros Rápidos

8-Tanque de Almacenamiento

9-Canal de Residuos

D1-Dosificador de Sulfato de Aluminio

D2-Dosificador de Hipoclorito de Sodio

Anexo X

Tabla XLV. Coeficientes de resistencias locales para flujo turbulento. Alternativa 1

Accesorios	K
Entrada	0,5
5 válvulas de compuerta abierta	$5 \cdot 0,17 = 0,85$

## Anexos

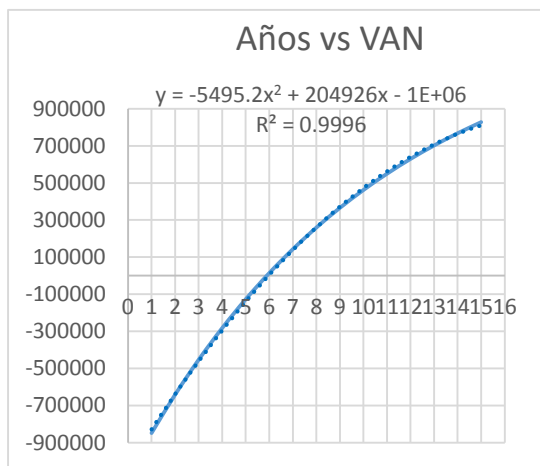
1 válvula de globo ½ abierta	9
26 codos de 90° estándar	$26 \cdot 0,75 = 19,5$
2 codos de 45° estándar	$2 \cdot 0,35 = 0,7$
4 Te estándar flujo hacia o desde una rama dividido	$2 \cdot 1 = 2$
Salida	1,0
$\Sigma k$	<b>33,55</b>

Tabla XLVI. Coeficientes de resistencias locales para flujo turbulento. Alternativa 2

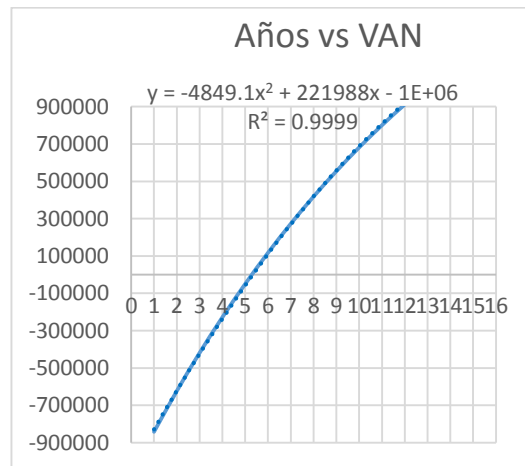
Accesorios	K
Entrada	0,5
9 válvulas de compuerta abierta	$9 \cdot 0,17 = 1,53$
1 válvula de globo ½ abierta	9
40 codos de 90° estándar	$40 \cdot 0,75 = 30$
4 codos de 45° estándar	$4 \cdot 0,35 = 1,4$
4 Te estándar flujo hacia o desde una rama dividido	$4 \cdot 1 = 4$
Salida	1,0
$\Sigma k$	<b>47,43</b>

### Anexo XI

#### Alternativa 1

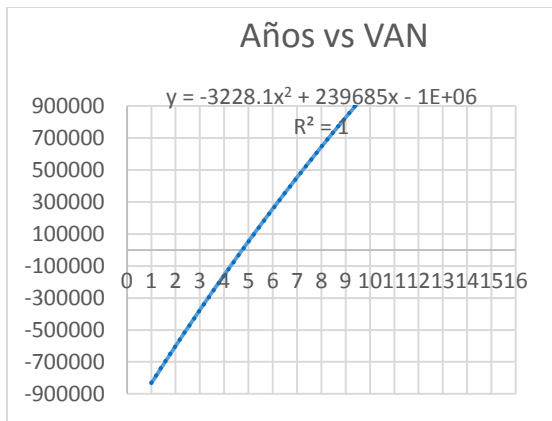


1 A



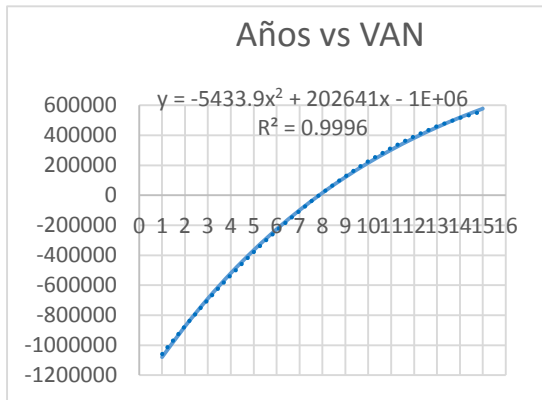
1 B

## Anexos

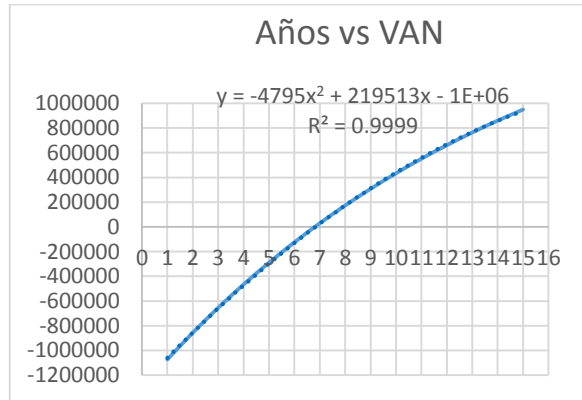


1 C

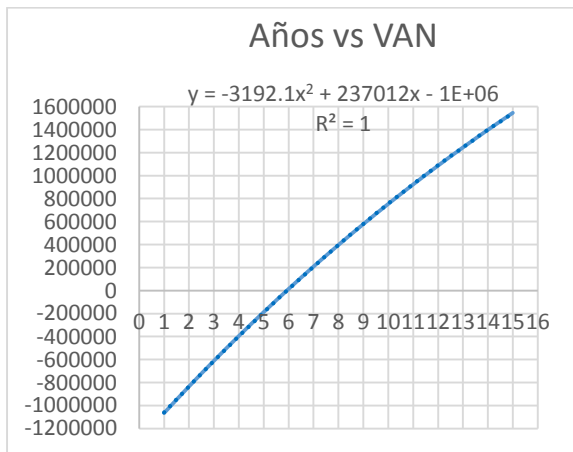
Alternativa 2



2 A



2 B



2C

**Figura 10** Perfil del VAN y cálculo del PRD para las 2 alternativas propuestas para potabilizar el agua en la UCLV