



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencias Ambientales

Tratamiento de Agua Residual Municipal para la Producción de Hortalizas  
Bajo Condiciones de Invernadero

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias Ambientales**

Presenta:

**Adriana Uribe Ibarra**

Dirigida por:

**Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos**

**SINODALES**

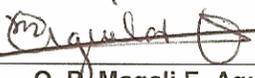
Dr. Eusebio Jr Ventura Ramos  
Presidente

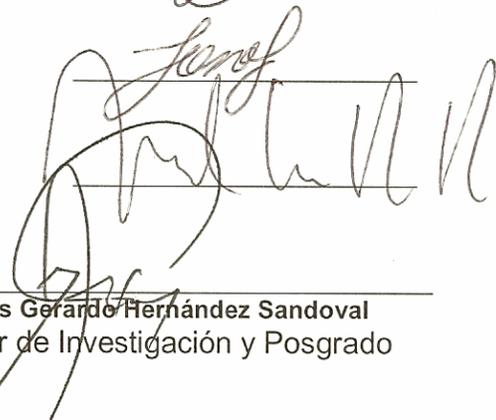
Dr. José Antonio Barrios Pérez  
Secretario

Dr. Guillermo Cabrera López  
Vocal

Dra. Lucero Robles Dávila  
Suplente

M. en C. Miguel Ángel Rico Rodríguez  
Suplente

  
Q. B. Magali E. Aguilar Ortiz  
Director de la Facultad de Química

  
Dr. Luís Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Qro.  
Abril, 2008  
México

## RESUMEN

La generación de aguas residuales es producto inevitable de la actividad humana. Por otro lado, la presión ejercida por la demanda de agua para el consumo de las ciudades y para el riego de cultivos ha hecho que las aguas residuales domésticas sean un recurso valioso. Para su reúso adecuado, sin embargo, requieren un tratamiento para producir la calidad suficiente de tal manera que no causen daños a la salud. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del uso del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como coagulante alternativo en el tratamiento de aguas residuales municipales y un postratamiento térmico basado en radiación solar y así generar agua de calidad para la producción de hortalizas bajo invernadero. Metodológicamente, se utilizaron pruebas de jarras para evaluar comparativamente tres coagulantes:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ , analizando pH, turbidez y color a diferentes concentraciones. Las dosis que mostraron valores por debajo de la NOM-001-ECOL-1996 fueron 4, 5 y 2 g/L para  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ , respectivamente. Adicionalmente, se determinó el contenido de grasas y aceites,  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$ , mostrando una diferencia no significativa entre los tres coagulantes a un nivel de confianza del 95%. El agua tratada con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fue sometida a un postratamiento con radiación solar, para lo cual se diseñó un calentador con tubería de cobre con diámetro de 19 mm, pintado de negro para mayor absorción solar. Con respecto al tratamiento térmico, la máxima temperatura del agua tratada después de las 12:00 pm fue de  $92^\circ\text{C}$ , manteniéndose similarmente hasta las 5:00 pm, aproximadamente. Con esta temperatura, es necesario un tiempo de residencia de 30 minutos para la reducción de coliformes fecales y totales a valores  $<3$  NMP/mL. Finalmente, se concluye que la combinación del tratamiento primario con sulfato de calcio dihidratado y un postratamiento térmico con radiación solar, permite generar agua con calidad conforme a la normatividad mexicana y utilizarla confiablemente en la producción de hortalizas a escala invernadero.

Palabras clave: agua residual, coagulación, sulfato de calcio dihidratado, desinfección solar.

## SUMMARY

Wastewater generation is an unavoidable product of human activities. On the other hand, the pressure on water demand by cities and agriculture has converted domestic wastewater into a valuable resource. However, for its adequate re-use, they require to be treated in order to produce the necessary water quality so that it does not affect human health. The objective of this study was to evaluate the use of calcium sulfate di-hydrated ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) as an alternative coagulant in municipal wastewater treatment in combination with a thermal post-treatment, based on solar radiation, so water of quality for vegetable production under greenhouses can be obtained. Methodologically, Jar Tests were used to evaluate comparatively three coagulants:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaO}$  by analyzing pH, turbidity, and color, at different concentrations. The rates of 4, 5 and 2 g/L produced values below the permissible limits indicated by the norm NOM-001-ECOL-1996, for  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ , respectively. In addition, fat and oil content, as well as  $\text{BOD}_5$  and QDO, were also determined, showing no significant differences at a 95% confidence level, among the three coagulants. Wastewater treated with  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was submitted to a radiation post-treatment. For this purpose, a solar heater was constructed using 19-mm copper pipes tubes painted black for greater radiation absorbance. In regards to the thermal treatment, maximum temperature of  $92^\circ\text{C}$  was reached right after 12:00 pm, and remained the same until approximately 5:00 pm. A residence time of 30 minutes, at that temperature, is required to reduce total and fecal coliformes to values  $<3$  MPN/ml. Finally, it is concluded that the combination of a primary treatment with calcium sulfate di-hydrated, and a thermal post-treatment with solar radiation, allows the production of water quality sufficient to be used in vegetable production under greenhouses, according to Mexican norms.

Key words: wastewater, coagulation, calcium sulfate di-hydrated, solar disinfection.

## DEDICATORIA

Con todo mi amor y cariño a mis padres.

A ti mamá por tus consejos, tu apoyo, tu amor incondicional. Gracias por confiar tanto en mí, ya que tu confianza es lo que me hace fuerte y me motiva a salir adelante sin mirar hacia atrás.

A ti papá por ayudarme a lograr mis metas con el gran ejemplo de responsabilidad que siempre me has mostrado. Ahora entiendo muchas cosas y te agradezco infinitamente el padre que has sido conmigo y del que estoy muy orgullosa.

Sin duda me tocaron los mejores padres, los amo.

A mis hermanos.

Especialmente a Jorge, porque nunca voy a olvidar que tu eres uno de los pilares más importantes de mi vida, aunque las cosas hayan cambiado yo te quiero igual, gracias hermano.

Chely  
Carmen  
Karo  
Luís  
Dany

Por la paciencia y amor que siempre me han mostrado, aunque en estos años que estuve en la maestría pasamos momentos difíciles como hermanos, quiero que sepan que ustedes y mis padres son lo más valioso que tengo en la vida y gracias a ustedes me di cuenta que con todo esfuerzo se obtiene una recompensa, los quiero mucho.

## AGRADECIMIENTOS

- A mis padres y hermanos por su confianza, ejemplo y apoyo incondicional que me brindaron durante mis estudios.
- A la Universidad Autónoma de Querétaro por permitirme realizar la maestría y poder cumplir una de mis metas.
- A la Facultad de Ingeniería por el apoyo para realizar mi trabajo.
- Especialmente al Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos por sus enseñanzas, por darme la oportunidad de trabajar con usted y sobre todo por confiar en mi.
- Dr. José Antonio Barrios Pérez por su apoyo, orientación y asesoría para culminar mi trabajo de tesis.
- Dra. Lucero Robles Dávila por su paciencia, empeño y dedicación en la revisión de mi trabajo.
- Dr. Guillermo Cabrera por sus consejos y su tiempo dedicado a mi proyecto.
- M. en C. Miguel Ángel Rico por su apoyo en la realización de esta tesis.
- En general a mis profesores que con sus innumerables enseñanzas me impulsaron a seguir adelante.
- A mis amigos Martha y Paco por brindarme su amistad, su compañía y a los que considero como parte de mi familia.

## INDICE

	Página
RESUMEN .....	i
SUMMARY .....	ii
Dedicatorias .....	iii
Agradecimientos .....	iv
INDICE .....	v
INDICE DE CUADROS .....	vii
INDICE DE FIGURAS .....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Justificación .....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	8
2.1. Situación de los recursos hídricos en México .....	8
2.2. Contaminación del agua .....	9
2.2.1. Fuentes de contaminación .....	10
2.3. Tratamiento de agua .....	11
2.3.1. Pre-tratamiento .....	11
2.3.2. Tratamiento primario .....	12
2.3.3. Tratamiento biológico o secundario .....	12
2.3.4. Tratamiento terciario .....	13
2.4. Coagulación y Floculación .....	15
2.4.1. Generalidades .....	15
2.4.2. Modelos teóricos del proceso de coagulación-floculación .....	16
2.4.2.1. Modelo físico (doble capa difusa) .....	16
2.4.3. Coagulantes .....	20
2.4.3.1. Coagulación con sales de aluminio .....	20
2.4.3.2. Toxicidad del aluminio .....	22
2.4.3.3. Generalidades del calcio .....	23
2.4.3.3.1. Óxido de calcio .....	24
2.4.3.3.2. Sulfato de calcio dihidratado .....	25
2.4.3.3.3. Reacciones del sulfato de calcio .....	25
2.5. Desinfección del agua tratada .....	26
2.6. Uso de las aguas residuales en la agricultura .....	28
2.7. Agua tratada para la agricultura .....	30
2.8. El cultivo de la lechuga .....	31
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DEL TRABAJO .....	33
3.1. Objetivo general .....	33
3.2. Objetivos particulares .....	33
3.3. Hipótesis del trabajo .....	33

IV. METODOLOGÍA .....	34
4.1. Selección de la planta de tratamiento .....	34
4.2. Toma de muestras y análisis para la caracterización del agua .....	35
4.3. Análisis de las muestras .....	36
4.3.1. Medición de la turbidez .....	36
4.3.2. Medición del color .....	37
4.3.3. Medición del potencial de hidrógeno, pH .....	37
4.3.4. Medición de la conductividad eléctrica .....	38
4.3.5. Medición de la temperatura .....	38
4.3.6. Cuantificación de la DBO <sub>5</sub> .....	39
4.3.7. Cuantificación de la DQO .....	39
4.3.8. Análisis de metales .....	39
4.3.9. Cuantificación de organismos coliformes .....	40
4.3.10. Determinación de sólidos sedimentables .....	40
4.3.11. Determinación de sólidos suspendidos .....	41
4.3.12. Determinación de grasas y aceites .....	41
4.3.13. Cuantificación de huevos de helminto .....	41
4.4. Prueba de jarras .....	42
4.4.1. Selección de la concentración óptima .....	42
4.5. Postratamiento con radiación solar .....	43
4.5.1. Prototipo de calentador solar .....	43
4.6. Evaluación de aguas Residuales tratadas en la producción de lechuga bajo Invernadero .....	46
V. RESULTADOS .....	48
5.1. Caracterización de aguas crudas .....	48
5.2. Resultados de la prueba de jarras .....	49
5.2.1. Turbidez .....	49
5.2.2. Color .....	53
5.2.3. pH .....	56
5.3. Caracterización de aguas tratadas .....	60
5.4. Evaluación preliminar del efecto de las aguas tratadas en el crecimiento y desarrollo de la lechuga .....	65
5.5. Efecto de las aguas tratadas en el suelo .....	68
5.6. Postratamiento con radiación solar .....	70
5.6.1. Selección de la tubería para la construcción del prototipo .....	70
5.6.2. Temperaturas del agua en el prototipo .....	71
5.6.3. Calentador solar .....	72
5.6.4. Evaluación del agua postratada en la producción de lechuga....	75
VI. CONCLUSIONES .....	77
VII. LITERATURA CITADA .....	79
LISTA DE SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS .....	84

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Título del cuadro</b>	<b>Página</b>
<b>1.1</b>	Calidad de agua tratada y su uso/reúso.	<b>5</b>
<b>2.1</b>	Reúso de aguas residuales a nivel mundial.	<b>28</b>
<b>2.2</b>	Incremento en la productividad debido al uso del agua residual.	<b>30</b>
<b>2.3</b>	Principales países productores de lechuga.	<b>32</b>
<b>4.1</b>	Requerimientos para la toma de muestra.	<b>36</b>
<b>5.1</b>	Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de agua cruda municipal.	<b>48</b>
<b>5.2</b>	Parámetros fisicoquímicos del agua tratada con los diferentes coagulantes.	<b>60</b>
<b>5.3</b>	Parámetros microbiológicos del agua tratada con los diferentes coagulantes.	<b>61</b>
<b>5.4</b>	Comparación de medias de los parámetros medidos	<b>61</b>
<b>5.5</b>	Porcentaje de remoción de los tres diferentes tratamientos con respecto al agua cruda.	<b>62</b>
<b>5.6</b>	Contenido de bases y metales en el suelo, antes y después del riego.	<b>69</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura	Titulo de la Figura	Página
2.1	Distribución nacional de agua	8
2.2	Planta de tratamiento de aguas residuales convencional mostrando los procesos involucrados	14
2.3	Estructura de la doble capa y los correspondientes potenciales	17
2.4	Estabilidad de los coloides.	19
2.5	Desestabilización de las partículas coloidales.	19
2.6	Adición del polímero electrolito.	20
4.1	Fotografía de la planta centro de la Cd. de Querétaro (CEA).	34
4.2	Fotografía del sitio de la toma de muestra en la CEA.	35
4.3	Pruebas de temperaturas con tubos de diferente diámetro.	44
4.4	Prototipo del calentador solar.	44
4.5	Construcción del calentador solar.	45
5.1	Variación de la turbidez con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.	51
5.2	Porcentaje de remoción de la turbidez con respecto a la concentración para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.	52
5.3	Variación de color con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.	54
5.4	Porcentaje de remoción del color con respecto a la concentración con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.	55
5.5	Variación del pH con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes durante la Prueba de Jarras en aguas residuales municipales de Querétaro.	58
5.6	Variación del pH con respecto a la concentración para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro, comparados con la NOM-001-ECOL-1996	59
5.7	Disminución de: <b>a) DBO<sub>5</sub></b> , <b>b) SST</b> y <b>c) grasas</b> con respecto a los tres coagulantes a las concentraciones seleccionadas comparados con la NOM-001-ECOL-1996.	63
5.8	Lechugas regadas con agua potable y agua tratada con <b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O y CaO</b>	66
5.9	Peso fresco de las plantas regadas con los coagulantes <b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, CaO y el control.</b>	67
5.10	Contenido de clorofila para las plantas regadas con los tres tratamientos y el control.	68
5.11	Variación de la temperatura del agua en monitoreo de temperaturas de tubos de cobre de distintos diámetros.	71
5.12	Monitoreo de temperatura en el prototipo	72
5.13	Calentador solar para el postratamiento de aguas residuales	73

	después del tratamiento primario.	
<b>5.14</b>	Variación de la temperatura ambiental del aire, en la cámara del calentador solar y del agua dentro de la tubería para un periodo de 7 am a 7 pm.	<b>74</b>
<b>5.15</b>	Plantas de lechuga regadas con agua postratada.	<b>75</b>

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y es esencial para la vida sobre el planeta. Este compuesto es requerido para los procesos relacionados con las actividades humanas, como son los usos doméstico e industrial. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son una herramienta indispensable para tener un control de la contaminación del agua en el medio ambiente. A través del tratamiento de aguas residuales se eleva la calidad del agua con un efecto benéfico tanto en la ecología como en la salud pública, de tal manera que el reúso potencial de este líquido ha sido muy favorable (Jiménez *et al.*, 2001a). El reúso de efluentes tratados se ha incrementado en la agricultura con el objeto de promover la agricultura sostenible, preservar las escasas fuentes de agua y mantener la calidad ambiental. Para el caso de México, este tipo de alternativa parece ser atractiva debido a la unión de dos factores: extensas regiones áridas donde la producción agrícola depende del riego y, el bajo costo asociado al tratamiento de aguas residuales (Álvarez *et al.*, 2002). Es importante considerar que la agricultura es el usuario mayoritario y el agua usada para este propósito es casi siempre irrecuperable, ya que se pierde mediante procesos de evaporación e infiltración o percolación profunda (Antón y Díaz, 2000).

La superficie del suelo destinado a la agricultura ha aumentado en un 12% desde los años sesenta, hasta abarcar casi 1 500 millones de hectáreas. Se estima que la cantidad de agua extraída en el mundo para riego está entre 2 000 y 2 555 km<sup>3</sup> al año (UNESCO, 2003). Dada la gran demanda de agua por el sector primario y la presión por el uso de este recurso en zonas urbanas e industriales, el uso de aguas residuales para el riego de cultivos es cada vez más común, debido a que el rendimiento de los cultivos es superior por el alto contenido de nutrientes para el desarrollo de las plantas (Jiménez *et al.*, 2001b). Sin embargo, normalmente estas aguas no son tratadas y se usan directamente, por lo que existe un alto riesgo de transmisión de enfermedades relacionadas con nemátodos intestinales y bacterias fecales en consumidores y agricultores (Ayres y Duncan, 1996).

Análisis realizados actualmente concluyen que uno de los mecanismos de mayor impacto en la protección de los recursos hídricos es la selección de tecnologías

adecuadas para el tratamiento de aguas residuales municipales (CVIA, 2005). Un proceso muy importante en el tratamiento de aguas es la coagulación-floculación, cuyo propósito es la remoción de la turbidez y color, así como la eliminación de organismos patógenos. Para este propósito comúnmente se utiliza el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  que es muy eficiente pero, presenta la desventaja que en México no hay yacimientos de bauxita, la cual es la materia prima de este compuesto. En contraste con el ión aluminio  $\text{Al}^{3+}$ , el ión calcio  $\text{Ca}^{2+}$  es un catión que puede promover la floculación. Encontrar una fuente adecuada de calcio puede ser una alternativa al uso del aluminio en el proceso de coagulación-floculación del tratamiento de aguas residuales sin provocar cambios significativos en las características físicas y químicas de aguas y lodos residuales (Camacho, 2007).

Cada etapa del proceso de tratamiento debe ser evaluada individualmente y determinar los puntos de riesgo para poder controlarlos y eliminar su peligro inherente, en este contexto, la desinfección representa la última etapa del tratamiento. En los países desarrollados, esta etapa del tratamiento siempre se ha tenido como eje de la calidad microbiológica del agua que se entrega, ellos se enfocan en dos puntos: i) desde el punto de vista técnico y en profundidad, pretenden alcanzar las mejores capacidades, las mayores eficiencias y los menores costos, ii) desde el punto vista sanitario y toxicológico, ahondan las características y las relaciones que tienen los desinfectantes y los productos de la desinfección con la salud. Sin embargo, en los países en desarrollo ocurre lo contrario, los tratamientos son imprecisos, la mala operación y el escaso mantenimiento están extendidos. Es así que los procesos de desinfección son pobres y no se respeta el papel que cumplen como protección de la salud pública (Solsona y Méndez, 2002).

Por lo mencionado anteriormente, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto combinado del uso del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  como coagulante en el tratamiento de aguas residuales municipales y de un post-tratamiento térmico, con base en radiación solar, para la generación de agua de calidad para la producción de hortalizas bajo invernadero.

## 1.1. Antecedentes

El uso consuntivo industrial y doméstico cambia las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua convirtiéndolas en aguas residuales (De Vargas, 2004). Estas aguas son responsables del 80% de la morbilidad en los países en vías de desarrollo y la situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en alcantarillado, inadecuado tratamiento, y disposición final de las aguas residuales. Dichas aguas pueden ser reutilizadas si se someten a tratamientos específicos de acuerdo a normas establecidas. Normalmente, las aguas tratadas no son aptas para consumo humano y solo son vertidas a cuerpos de agua o en el mejor de los casos para el riego de áreas verdes (Terence, 1999).

El uso de las aguas residuales por parte de los agricultores revela una tensión entre la economía y la salud, donde los costos generalmente se transfieren al área rural. Este tema, aunado al problema que existe con respecto al suministro de agua potable en las ciudades, requiere especial atención, ya que éste desabasto urbano se toma bajo el enfoque de “escasez”, y generalmente se hace responsable a la agricultura no tecnificada de los altos consumos improductivos del líquido. Sin embargo, se encubre el hecho de que las ciudades desalojan grandes cantidades de agua residual sobre las parcelas que, por no estar debidamente tratadas, tienen que ser reutilizadas en condiciones de riesgo sanitario, ambiental y económico (Peña, 2002). En Colombia, por ejemplo la infraestructura disponible en materia de tratamiento de aguas residuales domésticas tiene un cubrimiento efectivo del 8% de la población, siendo la mayor parte de las aguas residuales vertidas sin tratamiento alguno o reutilizadas para riego (Soto *et al.*, 2004).

Los beneficios sanitarios asociados al consumo regular de frutas y hortalizas frescas han sido claramente demostrados y fomentados por las autoridades sanitarias y nutricionales nacionales e internacionales. Recientes brotes de enfermedades transmitidas por los alimentos en los Estados Unidos implicaban la presencia de *E. coli*, serotipo O157:H7<sup>1</sup> en lechugas, y de *Salmonella* en melones cantaloupe. Los aspectos de salud pública que están relacionados con el uso del agua residual involucran la

supervivencia de bacterias patógenas y virus en las pequeñas gotas de aerosol pulverizadas sobre y en el interior del suelo (Lineback, 2002).

La OMS establece que para el riego sobre cualquier tipo de cultivo el agua no debe tener más de 100 coliformes fecales/100 ml. En California y Arizona las aguas residuales tratadas para el riego de cultivos que se consumen crudos no pueden tener una media geométrica superior a 2.2 coliformes fecales/100 ml, y ninguna muestra puede tener más de 23-25 coliformes fecales/100 ml. En Israel, las aguas para regar cultivos que después se van a consumir crudos deben tener menos de 12 coliformes fecales/100 ml a lo más en 80% de las muestras, y menos de 2.2 coliformes fecales/100 ml a lo más en 50% de las muestras. Además, deben tomarse precauciones por la posible conexión entre patógenos y la contracción de enfermedades por animales o seres humanos (Álvarez *et al.*, 2002).

Las opciones de reúso han sido tema de diversas investigaciones: irrigación de cultivos y bosques, en usos industriales, domésticos y municipales (Cuadro 1.1).

Existen numerosos estudios sobre los riesgos asociados a la salud debido al uso de aguas sin un adecuado tratamiento o aguas residuales empleadas directamente en la irrigación cultivos, como es en el caso de Pakistán, Colombia, Argentina, México y China, entre muchos otros países en desarrollo. El utilizar estas aguas con altos contenidos de huevos de helminto y coliformes fecales pone en riesgo la salud de los agricultores, sus familias y los consumidores de las hortalizas (Feenstra *et al.*, 2002).

Por estas razones, es indispensable buscar alternativas de tratamiento de aguas residuales con costos accesibles, ya que el propósito principal del tratamiento es la remoción de bacterias patógenas del agua cruda, lo que se lleva a cabo con una sedimentación o flotación química y una desinfección.

<sup>1</sup>El serotipo O157:H7 causa una enfermedad transmitida por los alimentos, y está mayormente asociada a alimentos cármicos. La misma produce una toxina potente la que puede causar una tóxico-infección, que resulta en una enfermedad grave para los humanos.

**Cuadro 1.1.** Calidad de agua tratada y su uso/reúso

<b>Tipo de uso</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Calidad del agua</b>
Urbana, irrigación de cultivos que se ingieren crudos, áreas verdes	Secundario, filtración y desinfección	pH = 6-9; ≤10mg/L DBO; ≤ 2 NTU Coliformes fecales /100 ml ND ≥1 mg/L Cl <sub>2</sub> residual
Irrigación de áreas de acceso restringido, construcción, re-uso ambiental	Secundario y desinfección	pH 6-9; ≤ 30mg/L DBO; ≤30 mg/L SST; ≤ 200 col. Fec. /100ml ≥1 mg/L Cl <sub>2</sub> residual
Recarga de acuífero no potable por rocío	Depende del sitio y del uso, tratamiento Primario mínimo	Depende del sitio y del uso
Recarga de acuífero no potable por inyección	Depende del sitio y del uso, tratamiento secundario mínimo	Depende del sitio y del uso
Recarga de acuífero potable por rocío	Depende del sitio y del uso, tratamiento secundario y desinfección mínimo	Depende del sitio y de los estándares para agua potable después de la percolación por la zona vadosa
Recarga de acuífero potable por inyección, ampliación de superficies	Secundario, filtración, desinfección, tratamiento avanzado	pH = 6.5- 8.5; ≤2 NTU; ND Coli. Fec./100ml; ≥1 mg/L Cl <sub>2</sub> Residual Conociendo los estándares para Agua potable

Fuente: Álvarez, *et al.* (2002).

NTU = Unidades nefelométricas de la turbidez<sup>2</sup>, DBO = Demanda bioquímica de oxígeno, SST = Sólidos suspendidos totales, ND = No detectable

<sup>2</sup>La turbidez se mide en NTU: unidades nefelométricas de turbidez. El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

En estos tratamientos, los coagulantes que destacan por su frecuente uso son el de sulfato de aluminio, cloruro de aluminio (policloruro de aluminio), aluminato de sodio, cloruro de hierro, sulfatos de hierro y mezclas orgánicas e inorgánicas. Actualmente no existen estudios en la literatura donde se considere la utilización del

**CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** como alternativa en la fase de coagulación-floculación durante el tratamiento de aguas residuales.

## 1.2. Justificación

El uso agrícola de las aguas urbanas de desecho es un fenómeno social muy complejo. Se trata del aprovechamiento de aguas residuales cuya concentración y forma de desalojo es producto del sistema hidráulico de las ciudades modernas, pero que no se restringe a ellas. Hoy en día, muchas pequeñas localidades rurales tienen algún tipo de desalojo de aguas residuales que con diferente grado de contaminación van a dar a ríos, lagunas y canales de riego. Son residuos que se generan entre muchos involucrados, aunque no todos tengan la misma responsabilidad (Jiménez, 2006). Enseguida se listan algunos de los hechos considerados como justificación para la realización de esta tesis:

En relación con la sustitución del **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>** por el **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**:

- En México no existen yacimientos de bauxita, lo que eleva el costo del **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**. Además de que se requieren grandes cantidades de bauxita para producir este compuesto.
- Existen estudios en donde asocian cantidades excesivas de aluminio con la formación de las placas de amiloide en la enfermedad de Alzheimer. Además, el aluminio puede acumularse en las plantas y causar problemas de salud a los animales o humanos que las consumen (Rubia, 2001).
- En México existen yacimientos de yeso de alta calidad, con un 95% de pureza en cuanto al contenido de **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**
- El calcio está dentro de las bases y componentes del complejo de intercambio catiónico, importantes en los aspectos físicos y químicos de suelo, por lo que las características de las aguas serán de beneficio para el crecimiento de plantas y animales.
- Una característica importante del **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** es que mantiene el pH cerca de la neutralidad, lo que ayuda a la disponibilidad de los micro y

macronutrientes del suelo, como son: Cl, Cu, Fe, Mn, Zn, P y N; los cuales se encuentran disponibles en un intervalo de pH de 4 a 8.5.

En relación con el tratamiento del agua residual para su reutilización en el riego de hortalizas

- El uso de aguas negras sin tratar en el cultivo de granos y hortalizas es bastante frecuente en América Latina
- La asociación del consumo de frutas y hortalizas frescas al aumento en la proporción de brotes notificados de enfermedades transmitidas por los alimentos cuyo origen puede rastrearse hasta los productos agrícolas frescos.
- La implementación del método de desinfección solar como parte del sistema de tratamiento de aguas residuales puede potencialmente reducir los costos de operación.

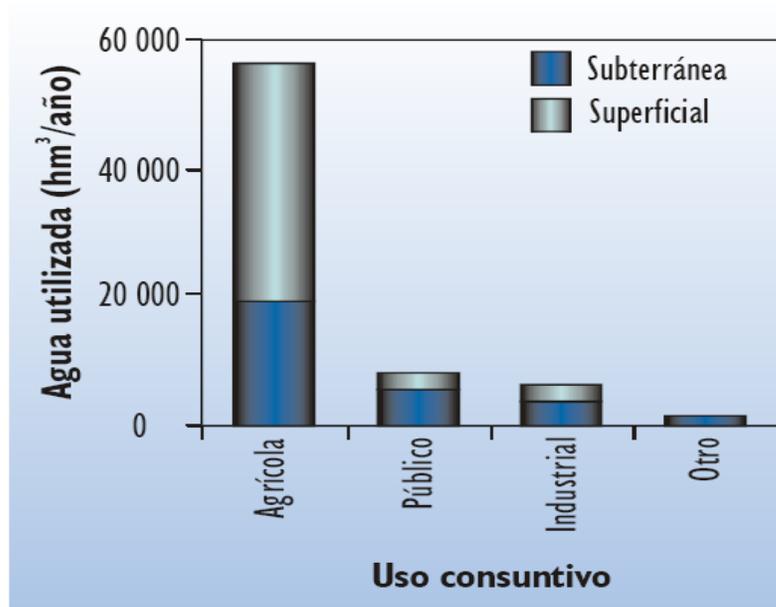
El uso de aguas residuales tratadas para la producción de hortalizas es un reto, pero a la vez una necesidad ante el incremento de la población y la necesidad de producir alimentos y el problema de la escasez del agua, principalmente a pequeña escala.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Situación de los recursos hídricos en México

La población mundial actual es de 6.2 billones y está aumentando a una velocidad de aproximadamente 1.2% por año, con las proporciones más altas de crecimiento en las áreas urbanas. Esta urbanización creciente ha ocasionado una distribución desigual del agua. En una escala global, se usan aproximadamente 3 800 km<sup>3</sup> de agua por año para satisfacer las necesidades sociales. Durante el siglo XX, el tratamiento del agua residual se enfatizó a la disminución de contaminación, protección de salud pública, y prevención de degradación medioambiental a través de la eliminación de material biodegradable, nutrientes, y patógenos (Levine y Takashi, 2004).

La sociedad humana requiere el agua para beber, higiene, limpieza, producción de comida y energía, etc. En la Figura 2.1 se observa la distribución del agua en los diferentes sectores a nivel nacional. El abastecimiento de agua para uso agrícola proviene principalmente de la superficie (65.8%), en contraste con el agua que se destina al uso público e industrial que proviene en su mayor parte de las fuentes subterráneas (64 y 68%, respectivamente) (CNA, 2002).



**Figura 2.1.** Distribución nacional de agua (Fuente: CNA, 2002).

El uso del agua en México se distribuye de la siguiente manera: La agricultura y ganadería usan el 78%, seguidas del uso urbano y público, que consume el 11.5% y la industria, que consume un 8.5%. Finalmente, los usos pecuarios y acuícola usan un 2%.

En México, como en el mundo, el sector que más agua desperdicia es el sector que más la consume. En el sector agropecuario (agricultura y ganadería), las estimaciones de la CNA mencionan que el 57% del agua que consumen se pierde por evaporación, pero sobre todo por infraestructura de riego ineficiente, en mal estado u obsoleta (Jiménez y Marín, 2004). Ante este panorama, es importante buscar alternativas de reúso de las aguas residuales mediante tratamientos que no pongan en riesgo los ecosistemas ni la salud de las personas.

## **2.2. Contaminación del agua**

La contaminación de los cuerpos de agua es producto de las descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola, pecuario o minero. Según la CNA, a finales del año 2001, más del 70% de los cuerpos de agua del país presentaban algún indicio de contaminación. Las cuencas que destacan por sus altos índices de contaminación son la Lerma-Santiago, Balsas, y Valle de México y el sistema Cutzamala (Castillo, 2003).

Si bien la industria autoabastecida sólo consume 10% del agua total (7.3 km<sup>3</sup> anuales), la contaminación que genera en demanda bioquímica de oxígeno es tres veces mayor que la que producen 100 millones de habitantes. En el 2002, los giros industriales con mayores descargas contaminantes sumaban un volumen total de 170.3 m<sup>3</sup>/s. La actividad con mayor volumen de descarga era la acuicultura, con 67.6 m<sup>3</sup>/s (39.6%), seguida por la industria azucarera 45.9 m<sup>3</sup>/s (27%), la petrolera 11.4 m<sup>3</sup>/s (6.6%), los servicios 10.3 m<sup>3</sup>/s (6%) y la química 6.9m<sup>3</sup>/s (4%). A su vez, la industria azucarera es la que produce la mayor materia orgánica contaminante.

La petrolera y química las que producen los contaminantes de mayor impacto ambiental. El sector industrial compite por el uso del agua con otros sectores

productivos, particularmente con el agrícola (Carabias y Landa, 2005). Las aguas residuales recicladas y tratadas constituyen la fuente de agua más viable para la agricultura urbana y peri urbana. La FAO ha estimado que los efluentes de aguas residuales de origen doméstico, sometidos a un tratamiento adecuado con miras a su reutilización agrícola, podrían aportar todo el nitrógeno y gran parte del fósforo y el potasio normalmente necesarios para la producción agrícola. El principal peligro de la utilización de aguas residuales es la contaminación de los alimentos con microorganismos patógenos y la aparición de enfermedades transmitidas por el agua. El uso de aguas negras no tratadas o tratadas de modo inadecuado con fines de riego lleva asociado un alto riesgo de infección con helmintos y un riesgo entre medio y bajo de infección con bacterias entéricas y virus (Jiménez *et al.*, 2001c).

### **2.2.1. Fuentes de contaminación**

El impacto más grande de la contaminación del agua sobre la salud pública se da a través del agua de bebida, cuya fuente puede ser degradada por la contaminación puntual y no puntual, incluyendo las aguas residuales municipales, la escorrentía pluvial, el agua de retorno del riego agrícola y los desperdicios del procesamiento de alimentos. Los desechos de origen urbano y animal también contribuyen, con diversos agentes patógenos de transmisión hídrica, a contaminar las fuentes de agua.

La contaminación de los mantos de aguas superficiales puede ocurrir por fuentes no puntuales y por fuentes puntuales. La principal fuente no puntual de contaminación del agua es la agricultura. Los agricultores pueden hacer que las aguas superficiales no sean vertederos de fertilizantes y disminuir su infiltración a los mantos acuíferos, no utilizando cantidades excesivas de fertilizantes en tierras planas y evitar usarlos en las laderas (Geldreich y Craun, 1996).

Las aguas negras y los desechos industriales en lugar de ser tratados son descargados a las corrientes de agua más cercanas o en lagunas de desechos donde el aire, la luz solar y los microorganismos degradan a los desechos, matan a algunas bacterias patógenas (causantes de enfermedades) y permiten que los sólidos se sedimenten. En las lagunas o estanques permanece el agua por lo menos 30 días.

Después el agua es tratada con cloro y bombeada para su reuso en la ciudad o en granjas (Romero, 2005).

En la mayoría de los países desarrollados, la mayor parte de los desechos de las fuentes puntuales se depuran, aunque en diferentes niveles de control. En áreas rurales y suburbanas con suelos adecuados, las aguas negras de las casas son descargadas, generalmente, en una fosa séptica (Encarta, 2006). En las áreas urbanas de países desarrollados, la mayoría de los desechos transportados por el agua desde las casas, fábricas, empresas, y el escurrimiento de las lluvias, fluyen a través de una red de conductos de alcantarillado, y son depurados en plantas de tratamientos de aguas residuales.

### **2.3. Tratamiento de agua**

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso complejo que exige un importante esfuerzo para la evaluación de las necesidades de tratamiento con base en su caracterización. Esto último se logra a partir de diversas mediciones físicas, químicas y biológicas, entre las cuales se incluyen la determinación del contenido en sólidos, la demanda bioquímica y química de oxígeno y el pH, entre otras (Romero, 2005).

El tratamiento de aguas normalmente consta de tres fases: primaria, secundaria y terciaria, y tiene como producto principal: el agua tratada que se incorpora a los cauces. Esto también conlleva la producción de gran cantidad de subproductos, especialmente los lodos ricos en materia orgánica que se producen en el tratamiento biológico y en las sucesivas decantaciones (CNA, 2002).

#### **2.3.1. Pre-tratamiento**

Las aguas residuales son conducidas por la red de alcantarillado hasta la estación depuradora de aguas residuales. En este momento comienza el pre-tratamiento, que consta de varias etapas (CNA, 2002):

*Desbaste.* Elimina los sólidos más gruesos, como troncos, piedras, plásticos, papeles, etc., comúnmente mediante la retención de los sólidos en rejillas.

*Desarenado.* Las arenas se depositan en el fondo por la acción de la gravedad.

*Desengrase.* Concentra en la superficie del agua las partículas en suspensión de baja densidad, especialmente aceites y grasas.

### **2.3.2. Tratamiento primario**

El objetivo del tratamiento primario es la reducción del contenido de sólidos en suspensión del agua residual. En este proceso se puede distinguir varias operaciones:

*Decantación.* Las partículas de mayor densidad se depositan en el fondo de los decantadores primarios, por la acción de la gravedad.

*Coagulación y floculación.* Las suspensiones coloidales son muy estables, debido a su pequeña dimensión y a la existencia de cargas negativas repartidas a lo largo de la superficie. Para romper la suspensión y provocar la aglomeración de partículas, se realiza la coagulación y la floculación, que permitirá su decantación.

*Neutralización.* Un pH demasiado alto o demasiado bajo de las aguas residuales puede obstaculizar la acción depuradora de los microorganismos, ya que la actividad biológica óptima tiene lugar en un intervalo de pH comprendido entre 5.0 y 8.5 (Tebbutt, 1990).

### **2.3.3. Tratamiento biológico o secundario**

El agua decantada y homogeneizada en el tratamiento primario pasa a la acción de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos), que se alimentan de las sustancias orgánicas que quedan en disolución en el agua residual. En este proceso, los compuestos orgánicos complejos son convertidos en compuestos simples, y la demanda de oxígeno disminuye, al mismo tiempo que aumenta paulatinamente su concentración.

El desarrollo de este proceso de tratamiento está influenciado por dos factores principales: i) la magnitud de la superficie de contacto entre el agua residual y los

microorganismos debe ser lo más extensa posible, y ii) la aportación de oxígeno, con el fin de favorecer el desarrollo de los microorganismos que digieren la materia orgánica.

Independientemente del método utilizado, a medida que se desarrolla el tratamiento biológico, crece la masa de microorganismos, formando masas de lodos que deberán ser separadas del agua tratada. Para ello, el agua es conducida a otro decantador, esta vez secundario, donde los restos de materia orgánica en suspensión se depositan en el fondo. El agua superficial, más clarificada y tratada, se vierte por el borde exterior del decantador. Ésta contiene sólo entre el 5 y el 10% de la materia orgánica con la que entró originalmente (Tebbutt, 1990).

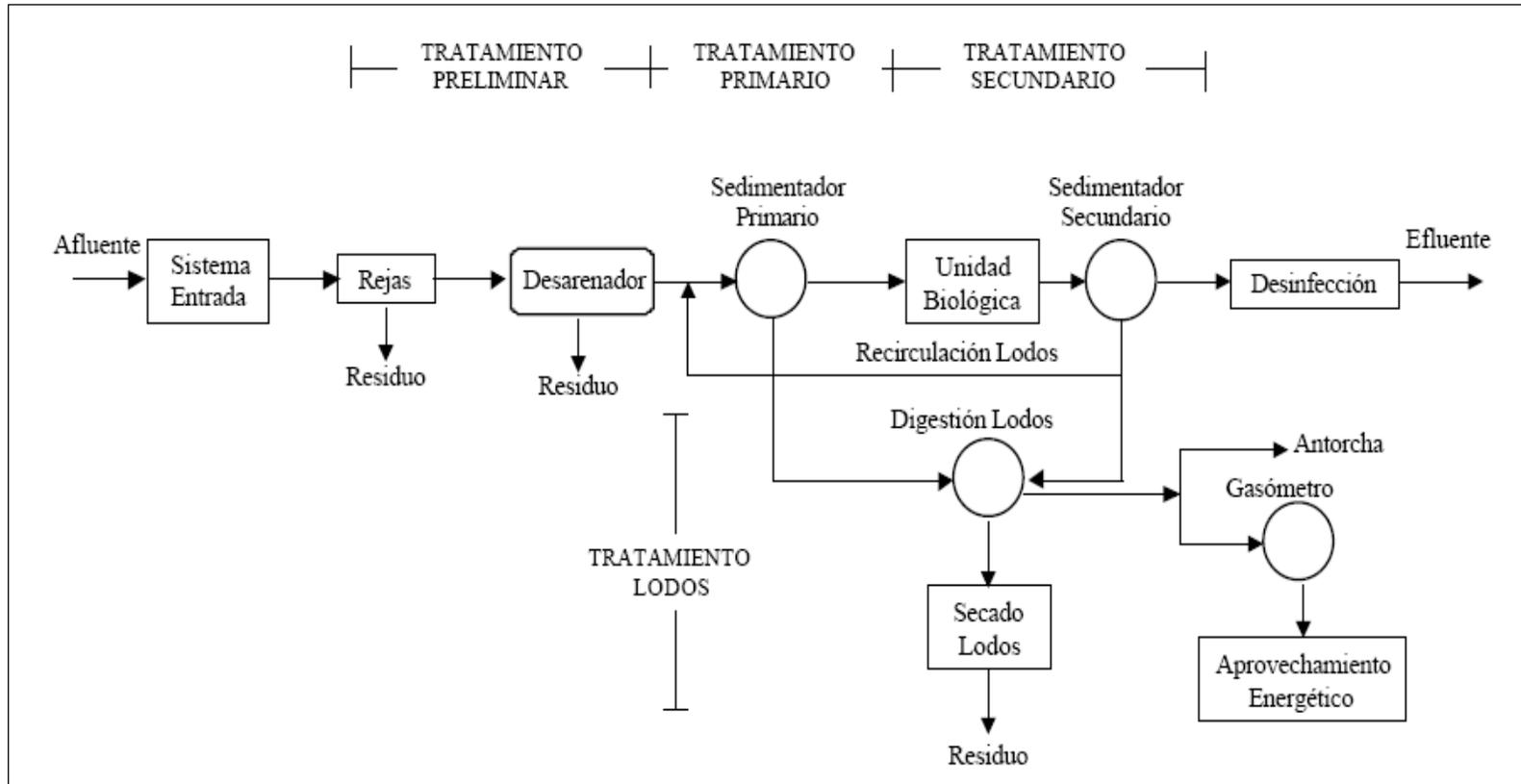
#### **2.3.4. Tratamiento terciario**

Finalizada la decantación secundaria, en muchos casos, el agua residual se considera ya lo suficientemente libre de carga contaminante como para ser vertida a los cauces de los ríos; no obstante, en algunos casos es conveniente afinar más el tratamiento, por lo que es sometida a un tratamiento terciario o desinfección.

Uno de los tipos más comunes de desinfección es la cloración. Aunque los requerimientos varían considerablemente dependiendo de la calidad y tipos de microorganismos presentes. Para la remoción de coliformes fecales, las dosis típicas varían en el rango de 5 a 20 mg/L y tiempos de contacto de 30 a 60 minutos. El agua que entra en este último proceso no sirve para el consumo humano, pero sí para riegos (Jiménez *et al.*, 2001a).

En el tratamiento terciario a veces es necesario eliminar selectivamente ciertos componentes, como el fósforo, para evitar la eutrofización del cauce donde irán las aguas. Esto se consigue mediante la combinación de reactivos químicos y el paso de las aguas a través de filtros de arena, o incluso de carbón activo (Tebbutt, 1990).

El esquema de los principales procesos de tratamiento de aguas residuales de acuerdo a una planta convencional se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Planta de tratamiento de aguas residuales convencional mostrando los procesos involucrados. (Fuente: Zárate R., 2004).

## **2.4. Coagulación y floculación**

Como parte de los procesos físico-químicos, la coagulación-floculación es muy importante ya que durante este proceso se adicionan sustancias para desestabilizar los coloides y esto cambia potencialmente las características del agua y de los lodos. Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamados floculos con peso específico superior al del agua. Este proceso es utilizado para: i) remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente, ii) remoción de color verdadero y aparente, iii) eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación, iv) destrucción de algas y plancton en general, y v) eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos en otros.

Existen dos aspectos fundamentales en la coagulación-floculación de agua: 1) la desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas (Coagulación) y 2) el transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre si y formando una malla tridimensional de coágulos porosos (Floculación) (Muñoz *et al.*, 2005).

### **2.4.1. Generalidades**

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente una fracción de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. Dos modelos explican el primer aspecto: el de la doble capa, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, y el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides.

## **2.4.2. Modelos teóricos del proceso de coagulación-floculación**

### **2.4.2.1. Modelo físico (doble capa difusa)**

Este modelo explica la coagulación del agua y toma en cuenta las fuerzas electrostáticas existentes en las partículas, considerándolas rodeadas de una doble capa eléctrica que interacciona con la fase acuosa (Figura 2.3).

Para explicar la doble capa difusa se utilizan tres teorías complementadas en forma sucesiva:

- a) La primera supone que la superficie del coloide atrae tantos iones positivos (contraiones) del medio dispersante cuantos sean necesarios para neutralizar su carga, de tal manera que se formará una capa adherida alrededor del coloide, en la que caerá todo el potencial  $q$ .
- b) Gouy en 1910 y Chapman en 1913 demostraron que la teoría de Helmholtz-Nerst no era adecuada, pues la agitación térmica del líquido tiende a separar los contraiones de la superficie del coloide y a formar una capa difusa alrededor de ella, en la que el potencial cae lentamente prolongándose hasta una distancia  $\delta$  dentro del líquido que lo rodea (Arboleda, 2000).
- c) En 1924, Stern mostró que era necesario aceptar la posibilidad de la coexistencia de las teorías de Helmholtz y las de Gouy, considerando la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide. El potencial  $q$  cae rápidamente en la capa adherida y lentamente en la capa difusa (Arboleda, 2000).

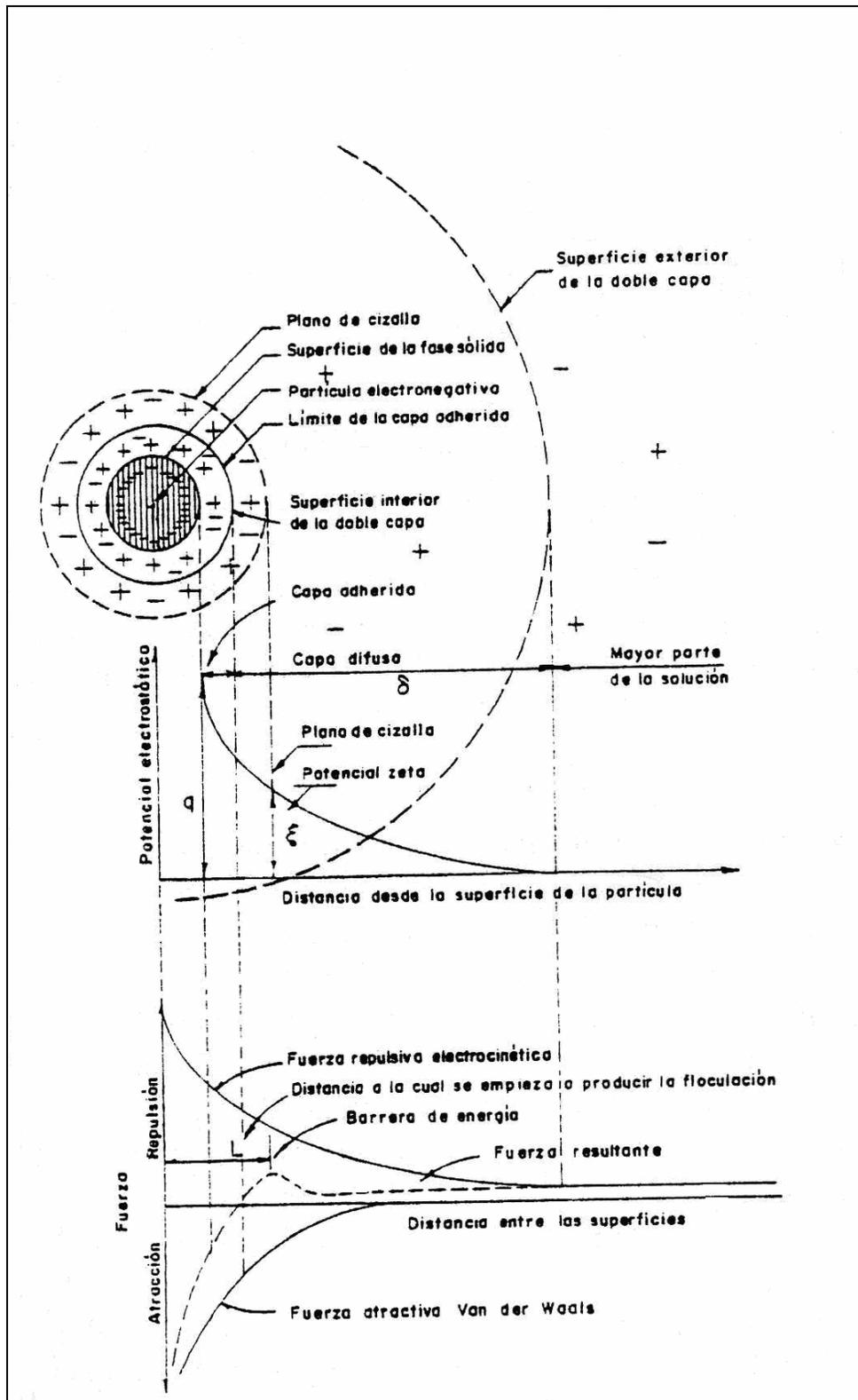
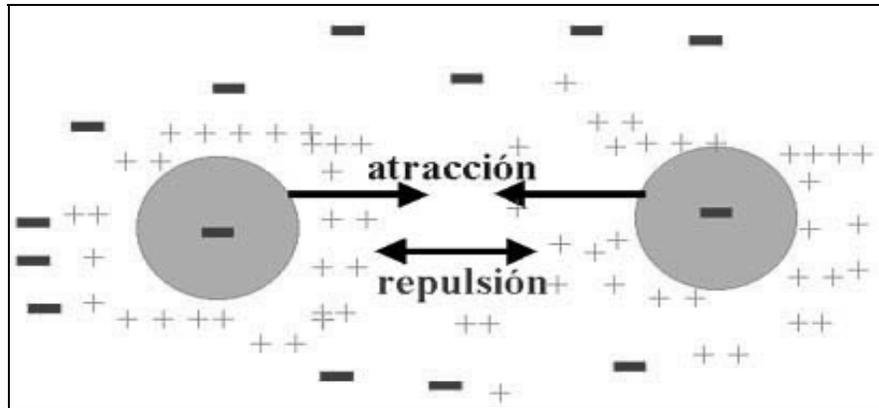


Figura 2.3. Estructura de la doble capa y los correspondientes potenciales. (Fuente: Pérez, 2002).

La distancia  $\delta$ , o espesor de la doble capa difusa está relacionada inversamente en forma proporcional con la valencia del ión en solución y la concentración del mismo de acuerdo a la siguiente ecuación:

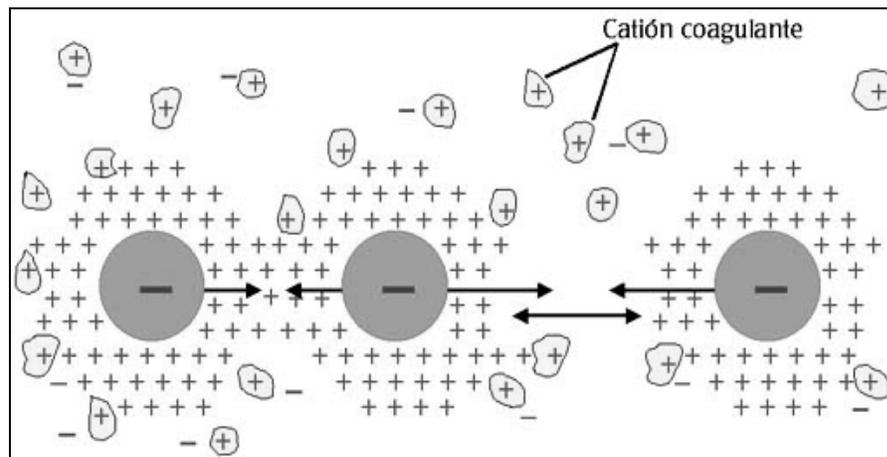
$$z = (1/e\nu)[(\epsilon kT)/(8\pi\eta_0)]^{0.5} \quad (2.1)$$

Aquí,  $\delta$  es equivalente a  $z$  y de acuerdo con esta ecuación bajo el concepto de la doble capa difusa de Gouy-Chapman (Van Olphen, 1977), la superficie negativa de las arcillas atrae a los cationes que se acomodan en posiciones más o menos fijas formando una capa densa conocida como capa de Stern. A partir de esa capa, la fuerza de atracción disminuye y hay una difusión de cationes que disminuye su concentración conforme aumenta la distancia de la superficie de la partícula. Esta capa se conoce como la capa difusa. En conjunto, estas dos capas forman lo que se conoce como la doble capa difusa. De acuerdo con la teoría de Gouy-Chapman, en la cual se asume que las cargas negativas en la superficie de la arcilla son constantes y distribuidas uniformemente, la fuerza de la carga superficial es proporcional a la densidad de carga. De acuerdo con la ecuación anterior, el espesor de la doble capa ( $z$ ) se comprime conforme la valencia ( $\nu$ ) y la concentración de los iones ( $\eta_0$ ) en solución aumenta. Una disminución del espesor de la doble capa promueve la coagulación, mientras que un aumento del espesor de la doble capa promueve la dispersión. La Ecuación 2.1 indica la forma en que estas dos condiciones se pueden lograr. La Figura 2.4 muestra el estado de estabilidad que se puede lograr en una suspensión coloidal por efectos de las cargas y concentración de las mismas (Van Olphen, 1977).



**Figura 2.4.** Estabilidad de los coloides (Fuente: Arboleda, 2000).

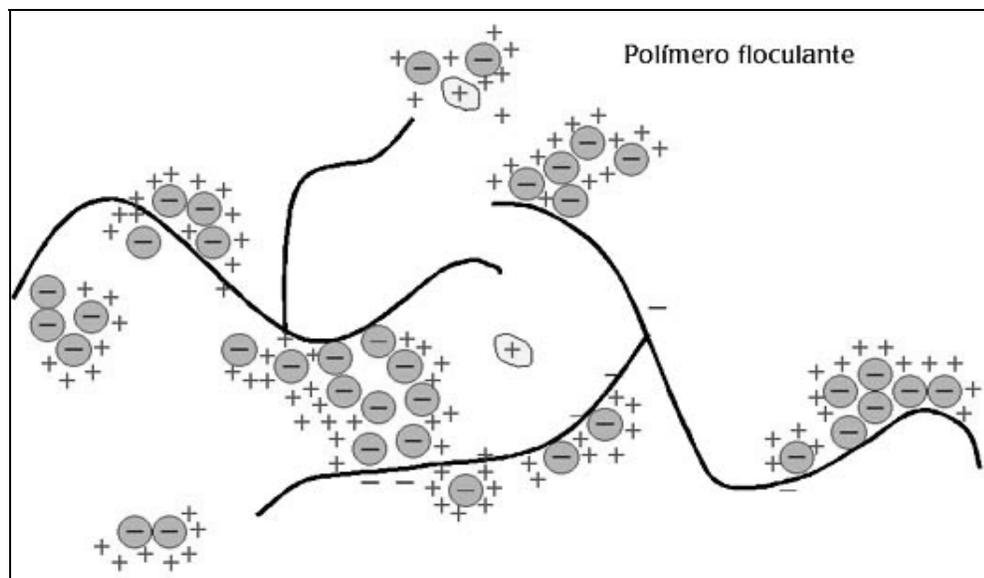
Coagular las aguas residuales para su depuración implica tres etapas: adición de coagulante (un compuesto de valencia grande que aumente la concentración de electrolitos en la solución), desestabilización de la partícula coloidal y formación de flóculos. La adición de sales coagulantes como las de **sulfato de aluminio**, sulfato férrico o cloruro férrico, produce cationes poliméricos tales como  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$  y  $[Fe_3(OH)_4]^{5+}$  cuyas cargas positivas neutralizan las cargas negativas de los coloides, permitiendo que las partículas se unan formando aglomerados pequeños denominados flóculos (Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Desestabilización de las partículas coloidales (Fuente: Arboleda, 2000).

La reunión de estos flóculos pequeños en conglomerados mayores (Floculación) se realiza con ayuda de polímeros poli-electrolíticos, que permiten la decantación a velocidades altas de sedimentación. Debido a que la

coagulación y la inmediata etapa de floculación ocurren muy rápidamente, en la práctica poco se distinguen. Los poli-electrolitos se clasifican de acuerdo a su carga como aniónicos y catiónicos, según los grupos ionizables que posean sean negativos o positivos, también pueden ser no iónicos, cuando no poseen grupos ionizables. Los poli-electrolitos más usados son la sílica activada y la poliácridamida, que típicamente es un polímero aniónico (Muñoz *et al.*, 2005). La ventaja de los poli-electrolitos radica en que cuando las partículas no pueden aproximarse por las fuerzas de repulsión creadas por la doble capa, la gran longitud de las cadenas poliméricas (Figura 2.6), permite el unir los coloides entre sí por energía química en condiciones en las cuales no hubiera habido normalmente coagulación. Una de sus desventajas es su elevado costo, sin embargo rara vez se usan solos, generalmente se combinan con coagulantes metálicos como los mencionados anteriormente (Arboleda, 2000).



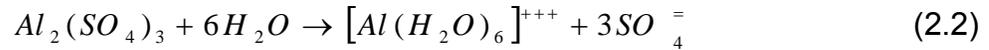
**Figura 2.6.** Adición del polímero electrofloculante (Fuente: Arboleda, 2000).

### **2.4.3. Coagulantes**

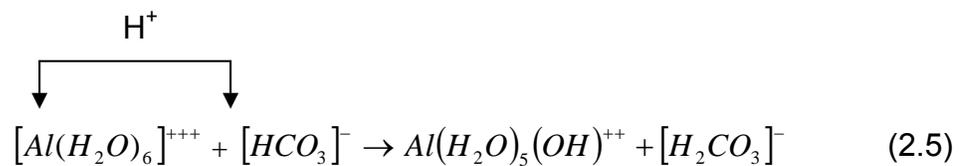
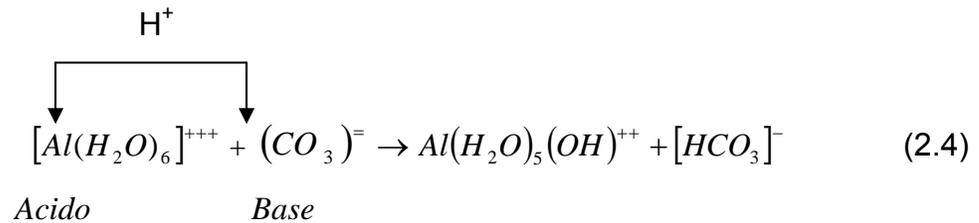
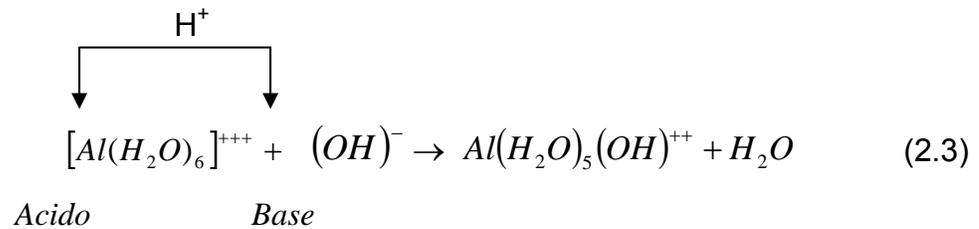
#### **2.4.3.1. Coagulación con sales de aluminio**

Los coagulantes metálicos han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes y floculantes a la vez. Añadidos al agua forman especies cargadas positivamente en el intervalo de pH típico para la clarificación que va entre 6 y 7. Entre los coagulantes, el más usado es el **sulfato de**

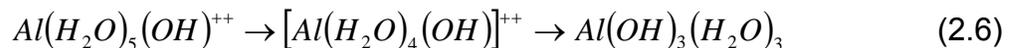
**aluminio** (o alumbre). En solución se encuentra hidrolizado, esto es asociado con el agua, de acuerdo a la siguiente ecuación química:



Los iones de aluminio hidratados  $[Al(H_2O)_6]^{+++}$  actúan como un ácido en el sentido Bronsted y reaccionan por tanto con las bases que se encuentran en el agua generando un descenso del pH de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



El  $Al(H_2O)_5(OH)^{++}$  es un compuesto inestable y transitorio que se hidroliza rápidamente, reemplazando un  $H_2O$  por un  $OH^-$ . Como sigue:



El producto final es un hidróxido de aluminio insoluble que precipita a ciertos pH y que puede no tener carga o tenerla negativa  $Al(OH)_4$  (Arboleda, 2000).

### **2.4.3.2. Toxicidad del aluminio**

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Generalmente se encuentra en forma de aluminosilicatos y, conforme el pH del suelo disminuye se solubiliza. La fuente más importante de la obtención del metal es la bauxita, que contiene el 50% de óxido de aluminio. La toxicidad del aluminio ha sido reconocida como el factor limitante más importante para la producción agrícola en suelos ácidos.

El síntoma principal de la toxicidad por aluminio es la inhibición del crecimiento de las raíces. Esta toxicidad también ha sido asociada a una reducción de la absorción de varios nutrientes de las plantas. Se ha señalado que produce precipitación de los fosfatos en el interior de la pared celular; ha sido observado que un exceso de aluminio interfiere la división celular en las raíces, así como el proceso de absorción y utilización de algunos iones, en especial el Ca, Mg y P (Olivares, 2000).

Un pH neutro o poco ácido, entre 5 y 7, favorecerá la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes. Los valores altos harán menos disponible algunos nutrientes, entre ellos el fósforo. Un pH muy bajo puede insolubilizar algunos nutrientes y movilizar al aluminio ( $Al^{3+}$ ). En general en suelos fuertemente ácidos, con toxicidad de aluminio, la plántula se desarrolla muy lentamente (enanismo). La toxicidad por aluminio reduce la profundidad de las raíces, aumenta la susceptibilidad a la sequía y decrece la utilización de los nutrientes del subsuelo.

El aluminio interfiere con la absorción, transporte y uso de varios elementos esenciales incluyendo Cu, Zn, Ca, Mg, Mn, K, P y Fe. Cuando el pH está por debajo de 5,5 un antagonismo entre Ca y Al es probablemente el factor más importante que afecta la absorción de Ca por las plantas. El aluminio causa también daños morfológicos a órganos vegetales. Así mismo, afecta la fotosíntesis disminuyendo la concentración de clorofila, reduciendo el flujo de electrones. La toxicidad del aluminio en suelos ácidos es de especial importancia, debido a la destrucción de componentes del ecosistema forestal. Se reduce el rendimiento de biomasa, el crecimiento de los árboles y la

actividad de la microflora que degrada la hojarasca del suelo, convirtiéndola en humus (Hernández, 2002).

Por otra parte, algunos de los efectos sobre el ser humano, cuando el aluminio aumenta agudamente en los tejidos como el cerebro, tiene el potencial para causar los efectos neurológicos adversos serios. La encefalopatía de la diálisis es una forma de neurotoxicidad de aluminio caracterizada por la dificultad al hablar, demencia y convulsiones. La principal área en relación a la toxicidad de aluminio se da alrededor del posible papel de este en la enfermedad de Alzheimer debido a que en algunos estudios han encontrado que gente con esta enfermedad tiene más aluminio que lo normal en el cerebro (Rubia, 2001).

En contraste, personas que se exponen a altos niveles de aluminio en polvo en el aire puede sufrir trastornos respiratorios como tos y asma. Estudios sobre esta sustancia han mostrado que niños y adultos que recibieron altas dosis de aluminio como tratamiento para ciertos problemas de salud, contrajeron enfermedades en los huesos, lo que sugiere que el aluminio puede causar problemas al esqueleto (ATSDR, 1999).

#### **2.4.3.3. Generalidades del calcio**

El calcio es un ión de carga positiva ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Aunque de menor valencia que el aluminio o el fierro<sup>3+</sup>, este catión puede utilizarse como floculante si se utiliza en la fuente y dosis adecuadas.

Contrario al aluminio, el calcio es el elemento metálico más abundante en el cuerpo humano y el quinto elemento en orden de abundancia en la corteza terrestre. El calcio libre no se encuentra en forma natural, sino formando compuestos que constituyen el 3.63% de las rocas ígneas y 3.22% de la corteza terrestre. Se encuentra como calcita  $\text{CaCO}_3$  en la piedra caliza, tiza, conchas de ostras y corales. El calcio que es más utilizable por la nutrición de la planta incluye las fracciones solubles en agua e intercambiables.

El calcio  $\text{Ca}^{2+}$  es acumulado por las plantas, especialmente en las hojas donde se deposita irreversiblemente, es un elemento esencial para el crecimiento de meristemas y particularmente para el crecimiento y funcionamiento apropiado de los ápices radicales. El calcio es un componente de la lámina media, donde cumple una función cementante como pectato cálcico (Hernández, 2002).

El  $\text{Ca}^{2+}$  tiene la función de impedir daños a la membrana celular, evitando el escape de sustancias intracelulares, cumpliendo un papel estructural al mantener la integridad de la membrana. Se piensa que el calcio actúa como un regulador de la división y extensión celular, a través de la activación de una proteína modulada por  $\text{Ca}^{2+}$ . El calcio parece actuar modulando la acción de todas las hormonas vegetales, regulando la germinación, el crecimiento y senescencia. Retarda la senescencia y abscisión de hojas y frutos. La deficiencia de calcio está generalmente asociada a efectos de acidez del suelo y muchas veces es difícil diferenciar una de la otra.

El calcio se absorbe como el catión divalente  $\text{Ca}^{2+}$  y es casi inmóvil y es por esto que las deficiencias se observan primeramente en los tejidos jóvenes. Las deficiencias de calcio parecen tener dos efectos en la planta: causan una atrofia del sistema radical y le dan una apariencia característica a la hoja. Las hojas se muestran cloróticas, enrolladas y rizadas. Se presentan raíces pobremente desarrolladas, carentes de fibras y pueden tener apariencia gelatinosa. La carencia de calcio también inhibe la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico (Hernández, 2002).

Todas estas razones hacen del calcio un catión con potencial para el tratamiento de agua y su uso posterior en la producción de cultivos.

#### **2.4.3.3.1. Óxido de calcio (CaO)**

Esta fuente de calcio se obtiene calcinando la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del **óxido de calcio**. En ese estado se denomina cal viva (**CaO**) y si se apaga sometiéndola al tratamiento de agua presenta como principal desventaja la elevación del pH del agua. Debido a su causticidad es necesario tener precauciones en su almacenamiento, pero tiene la ventaja de que su costo es bajo. Por

otra parte, se reconoce la cal apagada (CaOH), la cual es usada en el tratamiento de aguas en forma de polvo resultante de la hidratación de la cal viva. Este material se compone esencialmente de hidróxido cálcico, hidróxido de magnesio e impurezas. El **CaO** tiene una gran aplicación en: construcción, metalurgia, medio ambiente (tratamiento de agua, tratamiento de aguas de desecho, tratamiento de desechos industriales, neutralizador de tierras ácidas), productos químicos, cerámica, recubrimientos y alimentos (FISQ, 1994a).

#### **2.4.3.3.2. Sulfato de calcio dihidratado (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)**

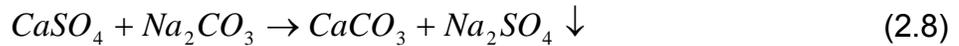
Conocido como yeso natural, se presenta en cristales tabulares exfoliables en láminas, generalmente incoloros, este mejora la estructura o condiciones físicas del suelo. El yeso sin calcinar es un mineral constituido principalmente por **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**, tal como se encuentra en los yacimientos. Es en: construcción, agroquímicos (en la fabricación de fertilizantes y de fosfoyesos que se aplican en agricultura), química, tratamiento de aguas (para mejorar la calidad de las aguas). En la agricultura se emplea para neutralizar los suelos alcalinos, salinos y mejora la permeabilidad de los materiales argiláceos; proporciona azufre y soporte catalítico para la utilización máxima de fertilizantes y para mejorar la productividad en las leguminosas, mejora la estructura del suelo; ayuda a remover boro en suelos sódicos y a recuperar este tipo de suelos, ayuda a las plantas a absorber nutrientes; corrige la acidez del subsuelo, incrementa la estabilidad de la materia orgánica del suelo; hace más eficiente el agua de irrigación de baja calidad y disminuye la toxicidad de metales pesados (FISQ, 1994b).

#### **2.4.3.3.3. Reacciones del sulfato de calcio**

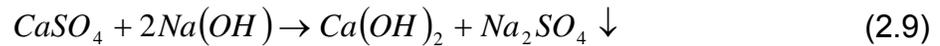
El **CaSO<sub>4</sub>** reacciona con agua de acuerdo a la siguiente reacción



El **CaSO<sub>4</sub>** en el agua forma parte de la dureza permanente por tanto este reaccionará con el carbonato de sodio presente en el agua de la siguiente manera:



Cuando se tiene un pH alto, el **CaSO<sub>4</sub>** reacciona con la alcalinidad a los OH de acuerdo a la siguiente reacción:



El uso del **CaSO<sub>4</sub>** en aguas residuales no implica un cambio en el pH, pero si una aportación de calcio, como nutriente, para su uso posterior por las plantas (Camacho, 2007).

## 2.5. Desinfección del agua tratada

La desinfección es un proceso clave en cualquier sistema de tratamiento de agua. Al diseñar un sistema de tratamiento de agua, en especial en el área rural, debe tomarse a la desinfección no como un elemento más, sino como un componente vital del sistema. Una buena desinfección no debe reemplazar a otras providencias y acciones que tiendan a mejorar la calidad del agua durante su recorrido (Solsona y Méndez, 2002).

Existen métodos químicos de desinfección de agua como cloración, ozonación y plata coloidal y físicos como son la ebullición, luz ultravioleta y desinfección solar. La cloración es eficiente y fácil de aplicar, pero es corrosivo y puede formar subproductos que pueden ser dañinos para la salud. Por su parte el ozono es un poderoso desinfectante que reacciona rápidamente con la mayoría de los compuestos orgánicos, pero se descarta su utilización por su alto costo, el cual es debido a las elevadas dosis requeridas (Jiménez, 2007). En lo referente a la plata coloidal, esta no es tóxica para los humanos, es utilizada en países europeos especialmente en plantas de purificación para usos industriales.

Con respecto a los métodos físicos, elevar la temperatura del agua a su punto de ebullición le proporcionará la desinfección, aunque este proceso es más aplicable para desinfección doméstica. El método de la luz ultravioleta no es popular en el tercer

mundo, aunque recientemente se ha incrementado su uso para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y ha vuelto a recibir atención como desinfectante de pequeños sistemas de agua, debido a su capacidad de desinfectar sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada (Solsona y Méndez, 2002).

Uno de los métodos de desinfección más simples y menos costosos para suministrar agua de calidad aceptable para su reúso en la agricultura es la radiación solar. Este método es ideal cuando las condiciones económicas y socioculturales de la comunidad ponen en riesgo la sostenibilidad de otras alternativas de tratamiento y desinfección, como la filtración o el uso de cloro, aún cuando éstas también sean reconocidas como simples y económicas.

El proceso de desinfección solar es un proceso térmico que consiste en elevar la temperatura del agua por un espacio suficiente de tiempo en contenedores acondicionados para lograr la absorción del calor proveniente de la radiación solar. Estos contenedores pueden ser de diversos materiales conductores del calor; en todos los casos se busca que sean de color negro porque absorben mejor el calor en oposición a los colores claros. El color oscuro permite un aumento acelerado de la temperatura del agua y la conservación del calor por más tiempo.

Las altas temperaturas tienen un marcado efecto sobre todos los microorganismos; las células vegetativas mueren debido a la desnaturalización de las proteínas y la hidrólisis de otros componentes. En el agua, si bien hay algunas bacterias con capacidad de esporular, lo que las hace particularmente resistentes al calor, en general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100° C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60° C (Solsona y Méndez, 2002).

El calentador solar comercial que se utiliza para desinfectar agua no difiere de los calentadores que se ven en muchos techos de viviendas y que se usan para calentar agua para la cocina o la ducha. Está compuesto por un colector que es una caja con marco de aluminio y cubierta de vidrio.

## 2.6. Uso de aguas residuales en la agricultura

La reutilización de las aguas residuales no tratadas, provenientes de los centros urbanos próximos a los campos de cultivo es una práctica que existe en México desde 1886. En 1999 era común que los campos agrícolas cercanos a las ciudades que tienen sistemas de drenaje sanitario, emplearan las aguas "negras" generadas para regar. El mayor reciclaje de desechos humanos en México se realiza en el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. A nivel mundial, después de la República Popular de China, México es el segundo país que más agua residual emplea en actividades agrícolas (Cuadro 2.1). En América Latina, México es la nación que más hectáreas riega con aguas servidas no tratadas (Garza *et al.* 2001).

**Cuadro 2.1.** Reúso de aguas residuales a nivel mundial

<b>LUGAR</b>	<b>SUPERFICIE IRRIGADA (Has)</b>
Arabia Saudita, Riad	2 850
Argentina, Mendoza	3 700
Australia, Melbourne	10 000
Chile, Santiago	16 000
China (diversas ciudades)	1 330 000
Estados Unidos (diversas ciudades)	11 875
India (diversas ciudades)	85 500
Israel (diversas ciudades)	8 800
Perú, Lima	6 800
Sudáfrica, Johannesburgo	18 000
Sudán, Khartoum	2 800
Túnez, Túnez	4 450
<b>MEXICO (diversas ciudades)</b>	<b>350 000</b>
Valle del Mezquital	130 000
Valle de Juárez	26 000

Fuente: (Garza *et al.*, 2001)

A principios de los 90's, el Instituto Nacional de Ecología (INE) estimaba que alrededor del 44.3% de las aguas residuales generadas por la población de México, por lo común aguas no tratadas, eran utilizadas en la agricultura (SEDESOL/INE, 1993).

La CNA de México estima que en el país se están regando alrededor de 350,000 has con un volumen de 160 m<sup>3</sup>/s de aguas de origen municipal, algunas mezcladas con aguas residuales industriales o con aguas superficiales o de pozo (CNA, 1993). Tan solo en el Valle del Mezquital se irriga un área aproximada de 85, 000 hectáreas, lo cual es considerado como uno de los más grandes proyectos de irrigación con agua residual cruda en el mundo. La productividad de esta área es más alta que la nacional promedio, sin embargo, existe un eminente problema de salud relacionada con enfermedades gastrointestinales que frecuentemente atacan a la población de entre 5 y 14 años, causadas por *Áscaris lumbricoides* (16%), *Entamoeba histolytica* (16.4%) y *Giardia lamblia* (9.6%) (Jiménez y Chávez, 1997).

Actualmente, en México existen más de 30 grandes escenarios donde la irrigación agrícola depende de las aguas negras generadas por igual número de poblaciones. En numerosos lugares de México no hay vigilancia ni control sanitario alguno para el re-uso de este recurso. Entre las ciudades generadoras de aguas negras para la agricultura se pueden mencionar: Aguascalientes, Chihuahua, Cd. Juárez, Durango, Guadalajara, La Laguna, Monterrey, Valle de Mezquital, Morelia, Obregón, Puebla y Querétaro. El Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, es el mayor campo agrícola del mundo regado con las aguas negras provenientes de la Ciudad de México (Cifuentes *et al.*, 1993).

Considerando que el principal problema que restringe la reutilización del agua residual en la agricultura es la concentración de microorganismos, estudios realizados al agua proveniente del Valle de México muestran que esta contiene una concentración promedio de huevos de helminto de 24.8 huevos/L, con valores que van de 6 a 96 huevos/L y una concentración de coniformes promedio de  $6.5 \times 10^8$  NMP/100ml, con valores que van de  $4.1 \times 10^7$  a  $5.5 \times 10^9$  NMP/100ml, además de las altas concentraciones de diversos patógenos como son Salmonella, Pseudomonas entre otros (Jiménez *et al.*, 2001a).

## 2.7. Agua tratada para la agricultura

La superficie dedicada a la agricultura en México es de aproximadamente 21 millones de hectáreas (10.5% del territorio nacional) y en promedio, durante el periodo 2000-2004 la superficie cosechada aproximada fue de 19.6 millones de hectáreas por año. De la superficie cosechada, 6.5 millones de hectáreas son de riego y 14.5 de temporal. Los cultivos que se siembran en superficies de riego reciben agua extraída de fuentes de abastecimiento superficiales o subterráneas, y es conducida a través de diversos canales a los sitios de cultivo. En lo que corresponde a las áreas de temporal, éstas se benefician básicamente con la lluvia que cae directamente en las parcelas.

La productividad de las áreas de riego es, en promedio, 3.7 veces mayor que las de temporal y a pesar de su superficie sustancialmente menor, la agricultura de riego genera más de la mitad de la producción agrícola nacional (CNA, 2006).

En la actualidad, la reutilización de las aguas residuales es una práctica mundialmente extendida. Esta tendencia puede deberse a una necesidad causada por la escasez o la falta de agua para la sobre vivencia o el desarrollo y al aumento en la productividad de los cultivos, teniendo en cuenta que a pesar de contener una alta carga de contaminantes contienen materiales orgánicos como el fósforo y el nitrógeno, que son los que incrementan la productividad de los suelos (Cuadro 2.2)

**Cuadro 2.2.** Incremento en la productividad debido al uso del agua residual.

Cultivo	Rendimiento (Ton/Ha)		%
	Agua residual	Agua potable	
Maíz	5	2	150
Cebada	4	2	100
Tomate	35	18	94
Chile	12	7	71
Alfalfa	120	70	71
Trigo	3	1.8	67

Fuente: (Jiménez y Chávez, 2002).

## 2.8. El cultivo de la lechuga

El consumo de verduras frescas ha aumentado en la última década, sin embargo, existe la preocupación por la seguridad microbiana ya que contienen altos niveles de microorganismos. Varios desinfectantes han sido usados en las líneas del proceso comerciales, como el cloro, pero es limitado su efecto en las poblaciones microbianas. La lechuga es una planta anual y autógama, perteneciente a la familia *Compositae* y cuyo nombre botánico es *Lactuca sativa* Longifolia, también conocida como lechuga romana (Fan *et al.*, 2003).

Este cultivo requiere climas templados y húmedos. Las altas temperaturas son desfavorables para el acogollado y provocan una floración prematura, prefiere suelos ricos de textura franca, bien drenados, que no tengan una humedad elevada, resiste una salinidad débil y es sensible a la acidez del suelo. El pH óptimo del suelo es de de 6.7 – 7.4 (Biblioteca de Agricultura, 1998).

La lechuga es el cultivo de mayor importancia entre las hortalizas de hoja. La mayor parte de la producción de lechuga se realiza en campo aunque, durante los últimos años, este cultivo ha ganado cada vez más espacio en los invernaderos. La incorporación de técnicas intensivas de producción responde a la necesidad de obtener un producto de mayor calidad, incrementando su precio en el mercado. El nitrógeno es el macro nutriente de mayor influencia en la producción de biomasa por el cultivo, esto es reflejado en varios estudios realizados al cultivo de la lechuga bajo condiciones de invernadero, donde las curvas de absorción de nitrógeno indican que el 70 % del total es absorbido durante las últimas tres semanas previas a su cosecha. Por esta razón, es importante el re-uso de un agua adecuadamente tratada en la agricultura, logrando un tratamiento en el cual se reduzca al mínimo la remoción de los macronutrientes como son el fósforo y el nitrógeno (De Grazia *et al.*, 2001).

La importancia del cultivo de la lechuga ha ido incrementándose en los últimos años. México es un productor de lechuga (Cuadro 2.3), por lo que su producción en ambientes controlados con aguas residuales tratadas será una contribución a la dinámica de esta producción, aun que la escala de aplicación sea de magnitud limitada.

**Cuadro 2.3.** Principales países productores de lechuga.

<b>PAÍSES</b>	<b>PRODUCCIÓN LECHUGAS AÑO 2001 (toneladas)</b>	<b>PRODUCCIÓN LECHUGAS AÑO 2002 (toneladas)</b>
China	7.605.000	8.005.000
Estados Unidos	4.472.120	4.352.740
España	972.600	914.900
Italia	965.593	845.593
India	790.000	790.000
Japón	553.800	560.000
Francia	490.936	433.400
<b>México</b>	<b>212.719</b>	<b>234.452</b>
Egipto	179.602	179.602

(Fuente: FAO, 2004).

### III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DEL TRABAJO

#### 3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto combinado del uso del **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** en el tratamiento de aguas residuales municipales y de un postratamiento térmico, con base en radiación solar, en la generación de agua de calidad para la producción de hortalizas bajo invernadero.

#### 3.2. Objetivos particulares

- a) Caracterizar las aguas residuales municipales de una planta de tratamiento del municipio de Querétaro.
- b) Realizar experimentos en laboratorio para evaluar el efecto del uso del **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** en las propiedades físico-químicas y biológicas del agua, en comparación con el tratamiento con **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, **CaO** y un tratamiento biológico.
- c) Diseñar e implementar un sistema de postratamiento de radiación solar a las aguas tratadas para su desinfección y uso en el riego de hortalizas bajo invernadero.
- d) Evaluar la inocuidad y calidad de la hortaliza producida bajo condiciones de invernadero con las aguas tratadas.

#### 3.3. Hipótesis del trabajo

El tratamiento de aguas residuales municipales con **sulfato de calcio dihidratado (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)** seguido de un post-tratamiento con radiación solar, permite generar agua de calidad en la producción de hortalizas bajo invernadero para el consumo humano.

#### IV. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos mencionados anteriormente se estableció una metodología para caracterizar las muestras de agua tanto cruda como tratada. En general, mediante pruebas de tratabilidad, se evaluó la eficiencia en la remoción con **sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )**, **sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )** y **óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )**, utilizando el análisis de parámetros fisicoquímicos.

##### 4.1. Selección de la planta de tratamiento

Las muestras de agua utilizadas en este trabajo se colectaron de la planta de tratamiento de aguas residuales centro ubicada en las instalaciones de la Comisión Estatal de Aguas, en las coordenadas 352457 E y 2277397 N a una elevación aproximada sobre el nivel medio del mar de 1807 m. Esta planta es representativa respecto al tratamiento que reciben las aguas municipales, tanto en la Ciudad de Querétaro como en otros municipios (Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Fotografía de la planta centro de la Ciudad de Querétaro (CEA).

#### 4.2. Toma de muestras y análisis para la caracterización del agua

La recolección del agua residual se realizó mediante un muestreo puntual de acuerdo a la norma NMX-AA-003-1980, que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas. El punto de toma de muestras en la planta de tratamiento se muestra en la Figura 4.2 y corresponde a la entrada del agua en la planta de tratamiento donde el flujo turbulento permitió la toma de muestras homogenizadas.



**Figura 4.2.** Fotografía del sitio de la toma de muestra en la CEA.

En el Cuadro 4.1 se reporta el tipo de recipiente, volumen y preservación utilizado para la toma de las muestras, las cuales fueron inmediatamente transportadas en una hielera a 4°C al laboratorio.

**Cuadro 4.1.** Requerimientos para la toma de muestra.

<b>Parámetro</b>	<b>Volumen</b>	<b>Recipiente</b>	<b>Preservación</b>
<b>pH</b>	-	Plástico	Inmediatamente
<b>O. D.</b>	-	-	Inmediatamente
<b>C. E.</b>	500 mL	Plástico	Refrigerar
<b>Materia Flotante</b>	-	Plástico	Inmediatamente
<b>Sólidos</b>	500 mL	Plástico	4 °C
<b>DQO</b>	300 mL	Vidrio	pH < 2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	300 mL	Vidrio	4 °C
<b>Coliformes Totales y Fecales</b>	200 mL	Vidrio Estéril	Refrigerar
<b>Color</b>	100 mL	Vidrio	4 °C
<b>Turbidez</b>	100 mL	Vidrio	4 °C
<b>Metales</b>	500 mL	Vidrio	pH < 2 HNO <sub>3</sub>

### **4.3. Análisis de las muestras**

Los análisis mencionados a continuación se realizaron en las muestras, tanto de agua cruda así como en de agua tratada, con la finalidad de conocer sus características químicas, físicas y microbiológicas.

#### **4.3.1. Medición de la turbidez**

Este parámetro es uno de los más importantes, se debe a la presencia de partículas que están en suspensión y comunican al agua la capacidad de diseminar un rayo de luz. Como la diseminación es proporcional al tamaño de las partículas, se dice que la turbidez es una forma indirecta de medir la concentración de partículas coloidales y suspendidas en el agua. Además, los valores de turbiedad sirven para determinar el tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, así como para conocer efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, tiene un significado sanitario muy importante (Romero, 2005). Por tal razón es considerado un buen indicador de la calidad del agua y su eliminación es esencial ya que las partículas

suspendidas también ayudan a la adhesión de metales pesados y muchos otros compuestos orgánicos tóxicos y pesticidas (Pérez, 2002). La medición de la turbidez se hizo por comparación entre la intensidad de la luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones. Se emplearon suspensiones de formacina como patrones primarios de referencia. Los resultados de las mediciones de turbiedad se dan en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU). La medición se llevó a cabo con el turbidímetro portátil marca Hach modelo 2100p. Se siguieron las instrucciones del fabricante. Las mediciones se hicieron por triplicado.

#### **4.3.2. Medición de color**

El color se debe a la presencia de sustancias químicas, la mayoría de las veces proveniente de la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas con las cuales el agua entra en contacto. Este parámetro incide sobre el aspecto estético del agua, quitándole transparencia. Se reconocen dos tipos de colores: el color verdadero, es decir, el que presenta el agua después de remover turbiedad y que es el resultado de presencia de sustancias orgánicas; y el color aparente, debido a la materia suspendida. Cabe mencionar que no existe ninguna correlación entre el Color y la contaminación. La prueba de color en este trabajo se realizó con el medidor de color portátil marca Hach modelo DR/890. En una celda perfectamente limpia libre de polvo y pelusa que se llenó con agua destilada, se tapó y se utilizó como blanco para realizar el ajuste a cero. En otra celda limpia se colocó la muestra. Una vez realizado el ajuste a cero se retiró esta celda y se introdujo la celda con la muestra. El color de la muestra se determinó comparando el de la muestra y el color producido por soluciones de diferente concentración de cloroplatinato de potasio ( $K_2PtCl_6$ ). La unidad de color se obtiene agregando 1.0 mg de platino como cloroplatino de potasio a 1 L de agua destilada (Pérez, 2002).

#### **4.3.3. Medición del potencial de hidrógeno, pH**

Con respecto al potencial de hidrogeno su valor juega un papel crucial en la etapa de coagulación en el tratamiento de aguas. Este parámetro debe ser adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida

biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6.5 a 8.5. En este estudio las mediciones se hicieron con un medidor marca Oriba, verificando la calibración del equipo y en base a la norma NMX-008-SCFI-2000. Una vez calibrado, se procedió a tomar lecturas de las muestras desconocidas sumergiendo el electrodo en la muestra y cuidando que no tocará las paredes del recipiente y el fondo. Se registró el valor de pH tomando la lectura una vez que se estabilizó. Se realizaron 3 mediciones por muestra.

#### **4.3.4. Medición de la conductividad eléctrica**

En este estudio la conductividad eléctrica se midió con un conductímetro portátil marca Oriba con corrección automática para la temperatura. Se verificó la calibración de acuerdo al manual del proveedor utilizando una solución de KCl de 0.1 M con una conductividad de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Una vez verificada la calibración se procedió a leer las muestras. El electrodo se introduce en la muestra de tal manera que los orificios de venteo estén sumergidos. La cámara de venteo no debe tener aire atrapado. La medición se hizo por triplicado.

#### **4.3.5. Medición de la temperatura**

El factor temperatura es importante porque actúa como elemento que retarda o acelera la actividad biológica, la absorción de oxígeno y el bióxido de carbono de la atmósfera por el agua, e influye en la proliferación de algas y en la precipitación de compuestos. Además, afecta los procesos de tratamiento como la desinfección con cloro, y por tener influencia sobre la viscosidad del agua incide también indirectamente en los procesos de mezcla rápida, floculación sedimentación y filtración. Esta prueba se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-007-SCFI-2000, la cual determina la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas y se midió extrayendo una muestra de agua de un volumen de 1 L como mínimo para inmersión parcial en un envase de polietileno o de vidrio limpio y 500 mL para termopar u otro instrumento. Se determinó la temperatura de inmediato en el lugar de muestreo y una vez tratada el agua.

#### **4.3.6. Cuantificación de la DBO<sub>5</sub>**

Es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales, y en general residual. Su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Los datos de la prueba de la DBO<sub>5</sub> se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales. Para el análisis de este parámetro, se colocó una pequeña cantidad de la muestra en una botella Winkler. La botella se completó al volumen usando agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para crecimiento biológico. Se prepararon dos botellas por dilución. Una serie de éstas se introdujo a la incubadora a 20 °C por cinco días y, a las botellas restantes, se les determinó el oxígeno disuelto de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Después de los cinco días, se midió nuevamente el oxígeno. La DBO<sub>5</sub> de la muestra es la diferencia entre los valores de la concentración de oxígeno disuelto expresado en mg/L, dividido por la fracción decimal del volumen de muestra usada.

#### **4.3.7. Cuantificación de la DQO**

La determinación se realizó de acuerdo con la norma Mexicana NMX-AA -030-2000, la cual determina la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. La muestra se conservó en refrigeración a 4 °C. Adicionalmente, se le agregó ácido sulfúrico hasta lograr un pH < 2. Se calibró la balanza analítica y se obtuvo la curva de calibración del espectrofotómetro, para la cual se utilizaron cinco soluciones de biftalato de potasio con DQO equivalentes de 20 mgO<sub>2</sub>/L a 900 mg O<sub>2</sub>/L. El método utilizado fue el espectrofotométrico.

#### **4.3.8. Análisis de metales**

El análisis se hizo en base a la Norma Mexicana NMXX-AA-051-SCFI-2001, la cual determina los metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Se utilizó un volumen de muestra de 50 ml. Para realizar el tratamiento de la muestra (digestión) se adicionaron 3 ml de ácido nítrico

concentrado y 2 ml de ácido clorhídrico, de modo que el volumen final fuera de 55 ml. Después de la digestión, se filtraron las muestras para evitar que los silicatos y materiales insolubles obstruyeran el atomizador. Los metales a evaluar de la muestra final de agua post-tratada con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fueron: plomo, cromo y zinc.

#### **4.3.9. Cuantificación de organismos coliformes**

El análisis se realizó con base a la norma mexicana NMX-AA-042-SCFI-2005. Calidad del agua - Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales y fecales. Antes de comenzar con el análisis se agitó vigorosamente la muestra para lograr una distribución uniforme de microorganismos, el volumen utilizado fue de 33.3 ml. Se emplearon series de 3 diluciones de 3 tubos cada una. La primera con un volumen de 10 ml, la segunda dilución con 1 ml y la tercera con 0.1 ml de muestra. Posteriormente se incubaron a 35°C durante 48 h en un caldo lactosado, después de transcurrido ese periodo de tiempo se procedió al análisis de los tubos, se hicieron las pruebas confirmativas, la prueba de oxidasa y se obtuvo el código de números que se comparó con la norma antes mencionada. Finalmente se hicieron los cálculos pertinentes.

#### **4.3.10. Determinación de sólidos sedimentables**

La medición de este parámetro se llevó a cabo en base a la norma NMX-AA-004-SCFI-2000, la cual determina los sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Se colectó un volumen de muestra superior a 1 L, la cual fue mezclada a fin de asegurar una distribución homogénea de sólidos suspendidos a través de todo el cuerpo del líquido. Posteriormente se colocó la muestra en un cono Imhoff hasta la marca de 1 L, luego se dejó sedimentar 45 minutos, una vez transcurrido este tiempo se agitó suavemente a los lados del cono con un agitador o mediante rotación, se mantuvo en reposo 15 minutos más y se registró el volumen de sólidos sedimentables del cono como ml/L.

#### **4.3.11. Determinación de sólidos suspendidos**

Este análisis se hizo siguiendo el procedimiento indicado por la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, que determina los sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Las cápsulas de porcelana fueron introducidas en la mufla a una temperatura de 550 °C durante 20 minutos, después se transfirieron a la estufa a 103 °C por 20 min., se dejaron enfriar y secar. Una vez secas las muestras se pesaron hasta que no hubo variación. Se prepararon los crisoles Gooch de la misma manera agregando un filtro de fibra de vidrio. Posteriormente, la determinación de las sales disueltas totales se hizo por diferencia entre los sólidos totales menos los sólidos suspendidos totales.

#### **4.3.12. Determinación de grasas y aceites**

La presencia de grasas y aceites en el agua genera problemas de olor y sabor, deteriora la calidad estética de la misma y puede ser un riesgo potencial para la salud, por estas razones, las grasas y aceites deben estar ausentes del agua. De tal manera que, para la determinación de este parámetro se mide un grupo de sustancias con las mismas características fisicoquímicas para lo cual, se prepararon los matraces de extracción introduciéndolos a la estufa a una temperatura determinada, se enfriaron en desecador y se pesaron, el procedimiento se repitió hasta obtener el peso constante de cada uno de los matraces. Se preparó el material filtrante al cual se le adicionó una suspensión de tierra de diatomeas-sílice sobre el filtro y se aplicó vacío. Posteriormente se transfirió el total de la muestra acidificada a un embudo, transfiriendo el material filtrante a un cartucho de extracción y una vez que ésta terminó se evaporó el disolvente. El matraz de extracción se colocó en el desecador hasta que alcanzó la temperatura ambiente y determinó la concentración de grasas y aceites recuperables. Este procedimiento se siguió en base a la norma NMX-AA-005-SCFI-2000.

#### **4.3.13. Cuantificación de huevos de helminto**

La recuperación de los huevos de helminto de la muestra se realizó primero dejando reposar la muestra 3 h, luego se recuperó por aplicación de vacío, y se filtró el sedimento en un tamiz. Posteriormente se lavó el tamiz donde se recuperó el agua de

lavado junto con el sedimento filtrado. Enseguida se colocó el filtrado y el agua de enjuague en un garrafón de 8 L donde originalmente se encontraba la muestra, se dejó reposar la muestra toda la noche. Este procedimiento se llevo a cabo en base a la norma NMX-AA-113-SCFI-1999. Para la cuantificación de los huevos, se repartió la muestra en dos volúmenes diferentes para facilitar la lectura y se distribuyó cada uno en una celda de Sedgwich-Rafter.

#### **4.4. Prueba de jarras**

La prueba de jarras permitió determinar los parámetros de diseño y control bajo condiciones estandarizadas, de las diferentes combinaciones de dosis de coagulante, concentración, pH, tiempo de mezcla rápida, gradiente de velocidad así como el tiempo de sedimentación, después de las cuales se mide la turbiedad del sobrenadante (agua clarificada) que es el parámetro que permite determinar las mejores condiciones que se obtienen de las pruebas. Con este ensayo se modifica: la turbiedad, el color, el pH, bacterias, algas y otros compuestos en estado coloidal. Esta prueba consiste en poner varias muestras del agua cruda en jarras y agitarlas simulando los procesos de la planta. A estas jarras se le agregan diferentes concentraciones de los materiales químicos utilizados como coagulantes. Se deja un apropiado tiempo de mezcla rápida para la formación del Floc y luego un tiempo de sedimentación adecuado. En este trabajo, para realizar la prueba de jarras se emplearon las siguientes sustancias como coagulantes de prueba:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  al 57% de pureza con respecto al contenido de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ .  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  al 90% de pureza con respecto al contenido de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ , agua destilada (pH=6.82 y CE= 5.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Las dosis evaluadas varían de 0.5 a 5 g/L.

##### **4.4.1. Selección de la concentración óptima**

Los pasos que se aplicaron para realizar la prueba de jarras fueron tomados del manual del CEPIS (1981). Se pesó la cantidad en gramos del reactivo a utilizar, y se colocó en cada vaso de precipitados un volumen de 1000 ml de agua cruda medidos con probeta. Posteriormente se colocaron los vasos de precipitados debajo de cada propela. La primera jarra se utilizó como control usando agua cruda sin adición de

reactivo. Posteriormente se adicionó el coagulante a cada jarra en la dosis respectiva dejando un tiempo de 20 segundos entre jarra y jarra. El coagulante se adicionó cerca del eje de la propela para ayudar a un mejor mezclado. Se dejó la agitación por espacio de 60 segundos a una velocidad de 100 rpm, luego se disminuyó la velocidad de agitación a 40 rpm, una vez que alcanzó esta velocidad, se dejó reposar por 15 minutos. Pasado este tiempo, se detuvo la agitación y se anotó el tiempo en el que inicio la sedimentación hasta el momento en que finalizó. El agua tratada obtenida de las pruebas de jarras se analizó para los mismos parámetros realizados al agua cruda. Cabe mencionar que se repitió el mismo procedimiento para los tres coagulantes de prueba. De esta manera se logró evaluar la efectividad de los coagulantes y la caracterización aguas tratadas para las dosis evaluadas.

#### **4.5. Postratamiento con radiación solar**

Para el postratamiento con radiación solar de la muestra tratada con el coagulante seleccionado se construyó el prototipo que se describe a continuación.

##### **4.5.1. Prototipo de calentador solar**

Para tubos de cobre de diferente diámetro: 3/4", 1/2", 3/8", y un tubo de 3/8" pintado de color negro se realizaron pruebas de calentamiento de agua (Figura 4.3). Los tubos se llenaron de agua y fueron colocados sobre un techo de lámina galvanizada a una altura de 2 m con exposición directa al sol. La temperatura del agua se monitoreó en forma continua.

El tubo seleccionado fue en el que se lograron las temperaturas más altas, y con este diámetro se procedió a construir el prototipo de calentador solar. Para su construcción se utilizó triplay formando una caja forrada con lámina galvanizada acanalada en la cual se fijó la tubería de cobre pintada de negro. La caja se cubrió con acrílico transparente para permitir que la radiación llegue directamente a la tubería, a fin de lograr la mayor elevación de la temperatura del agua en el tubo (Figura 4.4).



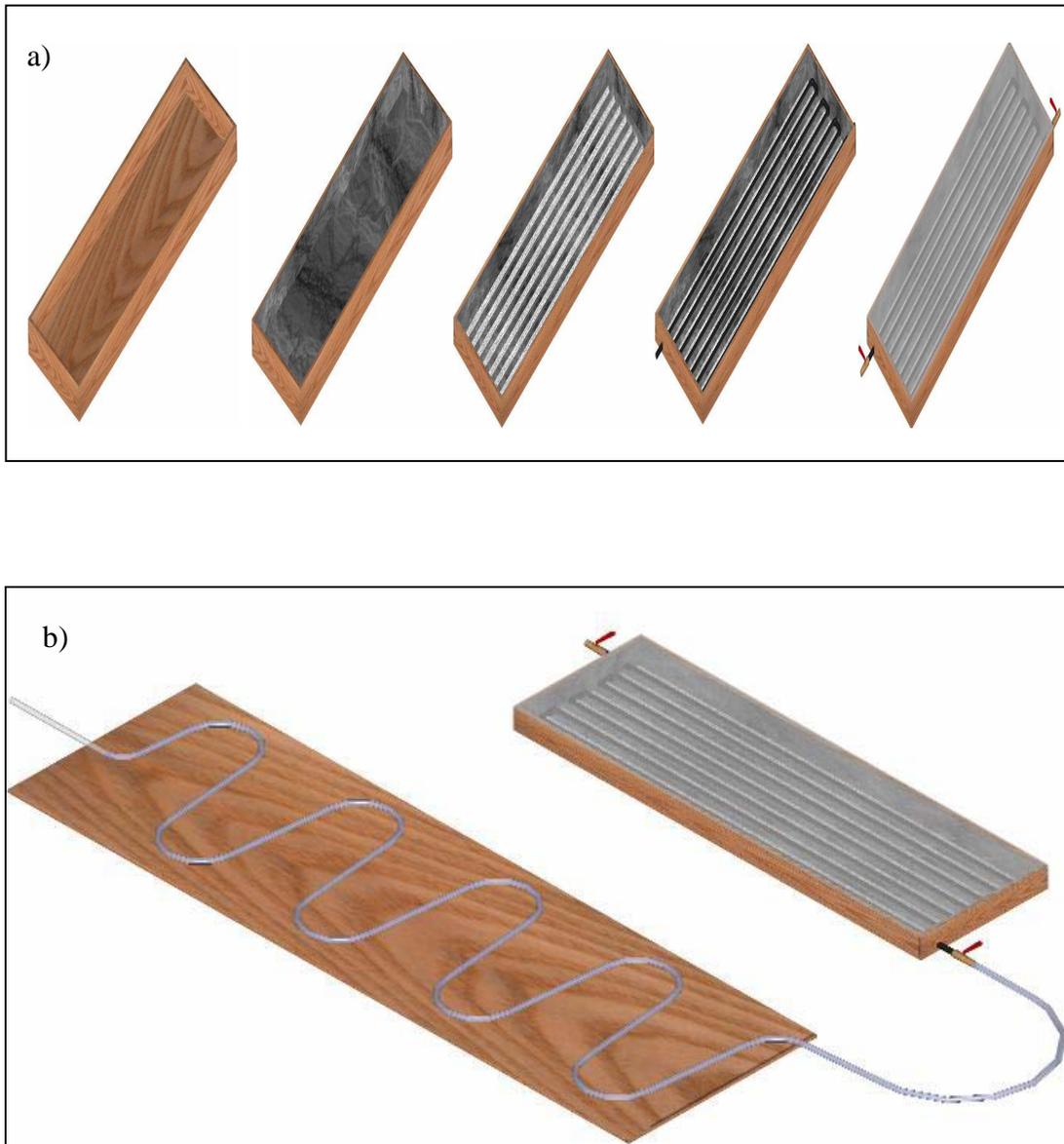
**Figura 4.3.** Pruebas de temperaturas con tubos de diferente diámetro

Este prototipo se diseñó para obtener 285 mL de agua post-tratada con la finalidad de conocer si la máxima temperatura alcanzada era suficiente para eliminar los microorganismos patógenos y, de esta manera, obtener el agua de la calidad deseada. Una vez comprobada la eficiencia del prototipo para el calentamiento del agua, se procedió a la construcción del calentador solar a mayor escala con las mismas características para obtener 7 L de agua post-tratada por hora; cantidad suficiente para el riego de las plantas en estudio (Figura 4.5a).



**Figura 4.4.** Prototipo del calentador solar

Para construir el calentador solar se diseñó un sistema de conducción de agua mediante una manguera de plástico transparente acomodada en forma paralela para lograr un precalentamiento del agua antes de entrar al equipo. Posteriormente y como parte del mismo mecanismo circulatorio se procedió al calentamiento del agua haciéndola pasar por la tubería de cobre que fue conectada a la manguera de plástico transparente (Figura 4.5b).



**Figura 4.5.** Construcción del calentador solar.

a) Construcción del calentador solar, b) Sistema completo para la eliminación de coliformes.

El tiempo de exposición programado se evaluó en función de los resultados obtenidos por la acción de la luz solar. El agua postratada se colectó en un recipiente libre de agentes patógenos para su posterior uso en el riego de las plantas.

El sistema se alimentó con las aguas tratadas con el **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**, en consideración a su efectividad para el tratamiento del agua residual y a las propiedades químicas del agua tratada. Para este propósito se usó una bomba sumergible con una potencia de 25 W y flujo máximo de 900 L/h a una altura de 2.40 m. Este equipo se colocó en un lugar de exposición directa al sol para lograr un mayor calentamiento. El agua post-tratada fue analizada para coliformes tanto totales como fecales y así comprobar la eficiencia del equipo. La temperatura del agua fue medida dentro de la tubería. Al mismo tiempo se midió la temperatura dentro de la cámara del calentador y la temperatura ambiente, para hacer una comparación de las tres temperaturas alcanzadas y observar la dependencia del calentador solar con respecto a la temperatura ambiente.

#### **4.6. Evaluación de aguas residuales tratadas en la producción de lechuga bajo invernadero**

Para medir el efecto de los diferentes tipos de agua utilizados en este estudio, y cumplir con el objetivo principal, se estableció un cultivo de lechuga bajo invernadero utilizando como agua de riego las aguas referidas. Inicialmente, se establecieron plantas pre-germinadas (3-5 hojas) en macetas con capacidad para 2 kg de suelo. Las aguas utilizadas en este experimento para el riego de la hortaliza fueron las siguientes:

1. Agua potable (control)
2. Agua Tratada con **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**
3. Agua Tratada con **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**
4. Agua Tratada con **CaO**
5. Agua post-tratada (**CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**) con radiación solar

Los tratamientos fueron arreglados en un diseño en bloques al azar con tres repeticiones en el invernadero de la Facultad de Química de la UAQ.

El suelo utilizado fue caracterizado física y químicamente, principalmente en lo referente al contenido de arena, limo, arcilla, materia orgánica y propiedades químicas tales como el pH, conductividad eléctrica, y contenido de bases como Ca, Mg, Na y K.

Durante el periodo de desarrollo de la lechuga se estimó el contenido de clorofila con un medidor SPAD-502. El valor reportado es un Índice relativo de Contenido de clorofila. Es a la medición fue no destructiva y se realizó en tres hojas escogidas aleatoriamente en la planta. Adicionalmente, se llevo un registro fotográfico del desarrollo y crecimiento de las plantas.

Como prueba final, a las plantas regadas con agua post-tratada se les realizaron pruebas de inocuidad para evaluar la calidad de la hortaliza producida bajo condiciones de invernadero, y determinar su aptitud para el consumo humano. Una vez realizada la cosecha se obtuvieron muestras del suelo de las macetas y se enviaron al laboratorio para el análisis de las propiedades inicialmente evaluadas.

## V. RESULTADOS

Los resultados de la caracterización de agua cruda, así como de las aguas residuales tratadas con diferentes coagulantes, y el posterior tratamiento térmico de desinfección para el agua tratada con **sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )** se presentan a continuación.

### 5.1. Caracterización de aguas crudas

Los resultados de las mediciones de parámetros fisicoquímicos obtenidos en el análisis de las muestras de agua cruda de origen municipal se muestran en el Cuadro 5.1. Como era de esperarse, la turbidez y el color presentan valores muy elevados. La conductividad eléctrica también es alta comparándola con el valor del agua potable, que se encuentra en el rango de 0.005 a 0.05 S/m. Con respecto al pH del agua, tuvo un valor cercano a la neutralidad, lo que indica que estas aguas residuales no presentan descargas industriales de consideración que cambien este parámetro. En contraste, la materia orgánica encontrada en las muestras crudas de acuerdo a los resultados de las mediciones de la  $\text{DBO}_5$  es elevada en comparación con la NOM-001-ECOL-1996, lo mismo sucede con los SST y grasas lo cual corrobora que estas aguas son de tipo residual doméstico.

**Cuadro 5.1.** Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de agua cruda municipal.

<b>Parámetro</b>	<b>Agua Residual</b>	<b>NOM 001</b>
<b>Turbidez (NTU)</b>	101	-
<b>Color (Pt/Co)</b>	294	-
<b>pH</b>	7.41	5 a 10
<b>C. E. (S/m)</b>	116.0	-
<b><math>\text{DBO}_5</math> (mg/L)</b>	143.18	150
<b>DQO (mg/L)</b>	241.8	-
<b>SST (mg/L)</b>	152.0	125
<b>SS (mL/L)</b>	1.0	2
<b>Grasas (mg/L)</b>	55.42	25

## 5.2. Resultados de la prueba de jarras

Para la selección de la concentración óptima de los tres coagulantes utilizados ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ ), siguiendo la metodología de la prueba de jarras (sección 4.4), se tomó en cuenta el nivel de remoción de la turbidez y color a distintas concentraciones y tiempos de medición.

La temperatura es un parámetro importante que influye en la coagulación y sedimentación. En el caso del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  la variación de la temperatura estuvo en el rango de 24.2 a 25.1 °C. El rango respectivo para el tratamiento con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fue de 23.7 a 23.9°C, mientras que para el caso de las pruebas realizadas con  $\text{CaO}$  el rango de temperatura varió de 23.4 a 24.1 °C. Por su parte el **control** mantuvo una temperatura de 23.7 a 23.9 °C. En general se puede mencionar que no existió diferencia significativa entre la temperatura de los tratamientos evaluados, a un nivel de confianza del 95% por lo que este parámetro no tendría un efecto de sesgo en los resultados obtenidos.

### 5.2.1. Turbidez

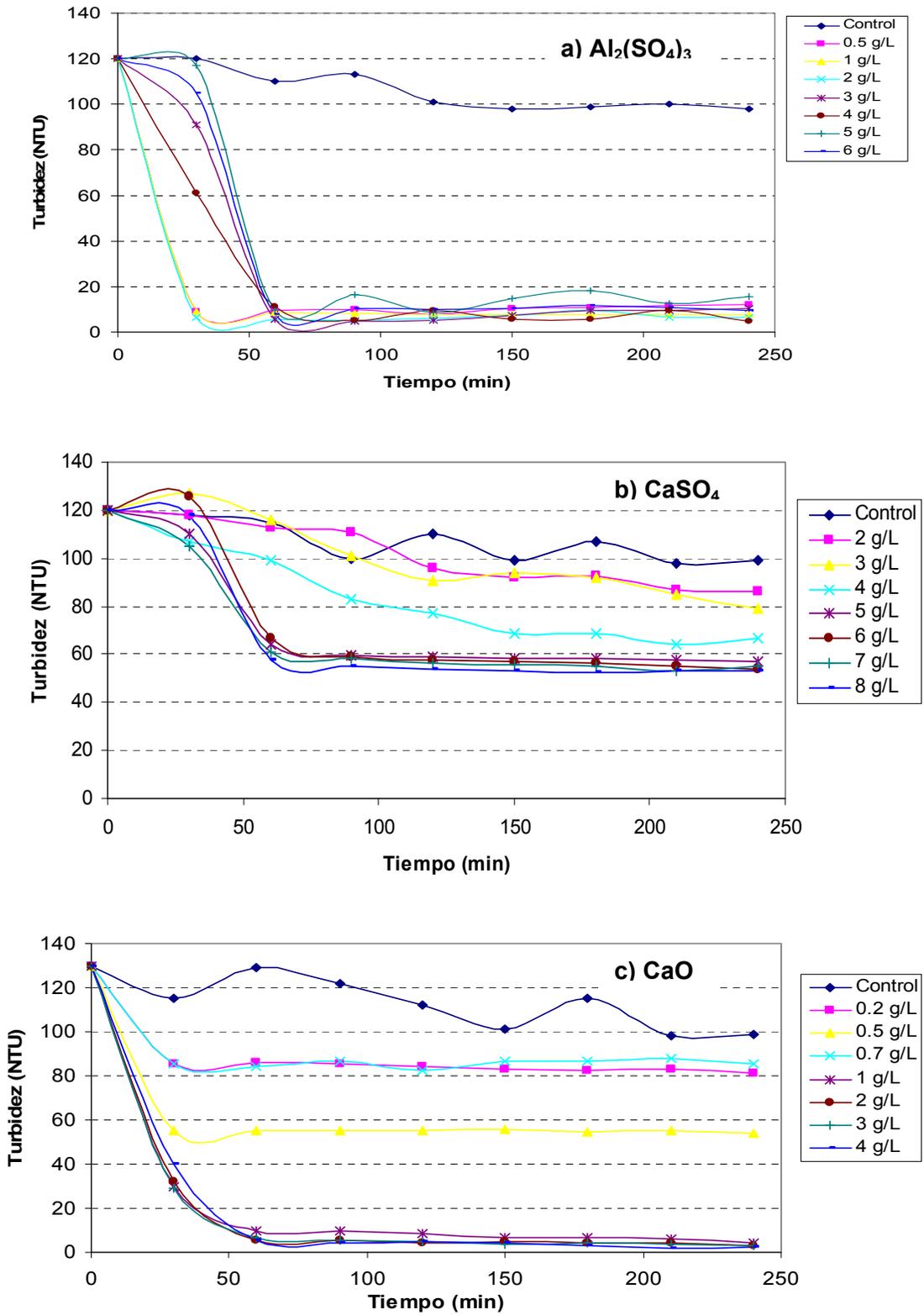
Uno de los parámetros para evaluar la eficiencia de los coagulantes es la remoción de la turbidez. De tal manera, que este parámetro disminuyó desde un valor de 120 NTU hasta valores de 12.5, 7.7, 6.3 y 4.6 NTU utilizando concentraciones de 0.5, 1, 2 y 4 g/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , respectivamente. Como puede observarse a una concentración de 4 g/L se produjo el valor más bajo de turbidez, aunque el tiempo requerido fue más prolongado que para las tres concentraciones mencionadas anteriormente. La remoción final aproximada a las 4 horas de iniciada la prueba, fue del 96% (Figura 5.2a) para esta concentración.

En el caso de las plantas de tratamiento que emplean al  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  como coagulante, regularmente utilizan una concentración por debajo de 0.5 g/L, cabe mencionar que para este trabajo se usó la concentración de 4 g/L para observar de una manera clara el comportamiento de la planta ante la presencia del aluminio, teniendo en cuenta que para fines económicos en el tratamiento del agua puede usarse

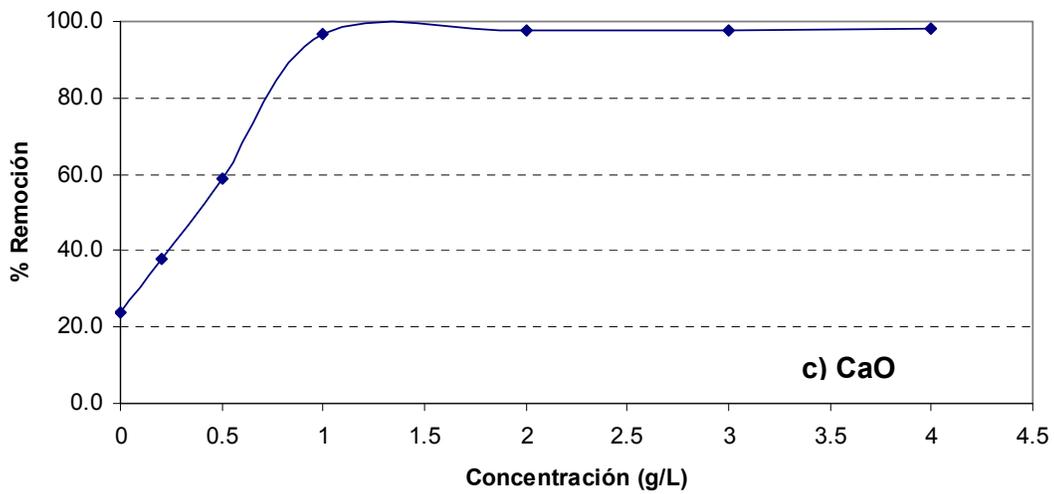
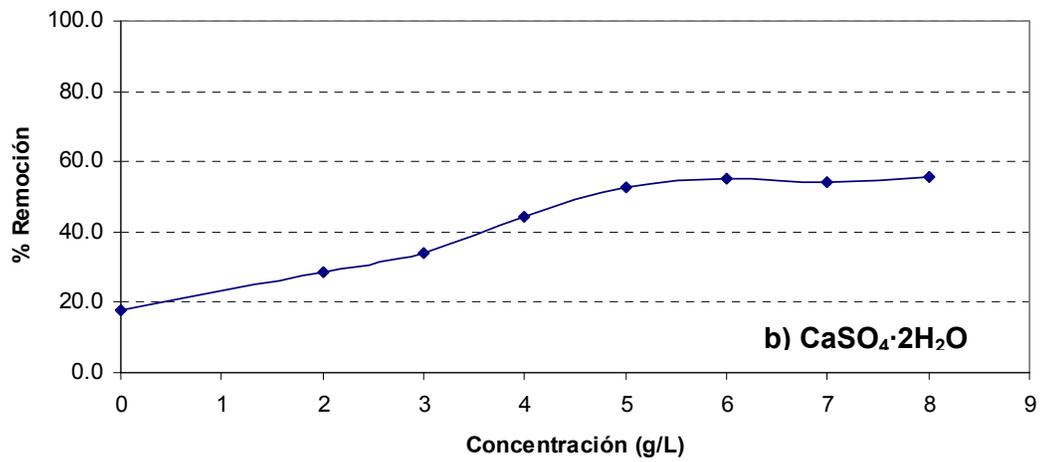
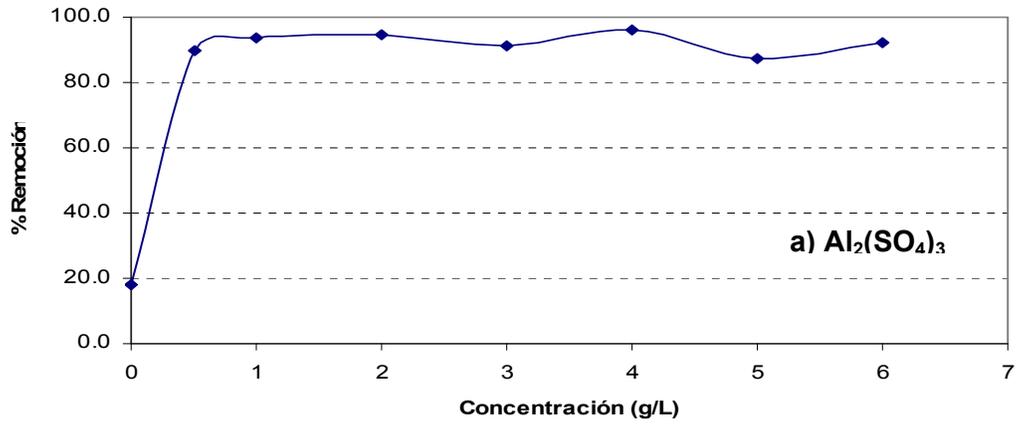
concentraciones menores que la seleccionada en este trabajo, ya que los resultados en la calidad del tratamiento son similares a concentraciones más bajas (Figura 5.1a).

La turbidez disminuyó de 120 NTU hasta 67, 57 y 54 NTU utilizando las concentraciones de 4, 5 y 6 g/L de **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O**, respectivamente. Para dosis menores, la turbidez fue mucho más elevada. De tal manera, que la dosis seleccionada para el tratamiento de agua con **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** fue de 5 g/L ya que a partir de esta concentración el comportamiento de la turbidez fue similar (Figura 5.1b), logrando un porcentaje de remoción del 52.5% (Figura 5.2b). Aunque esta reducción es significativamente menor que la del **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, en general no se debe a los sólidos suspendidos o disueltos del agua residual, sino a que el **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** no es completamente soluble en agua y le aporta un color blanco.

Con respecto al **CaO**, la turbidez mostró una disminución de 120 NTU a 2.95, 3.2 y 2.38 NTU a para las dosis de 2, 3 y 4 g/L respectivamente, de las cuales se seleccionó la de 2 g/L ya que los resultados obtenidos son similares a los de las concentraciones más altas y mejores que las concentraciones menores (Figura 5.1c). Se logró una remoción de 97.5% con la concentración de 2 g/L, tal como se observa en la Figura 5.2c.



**Figura 5.1.** Variación de la turbidez con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.



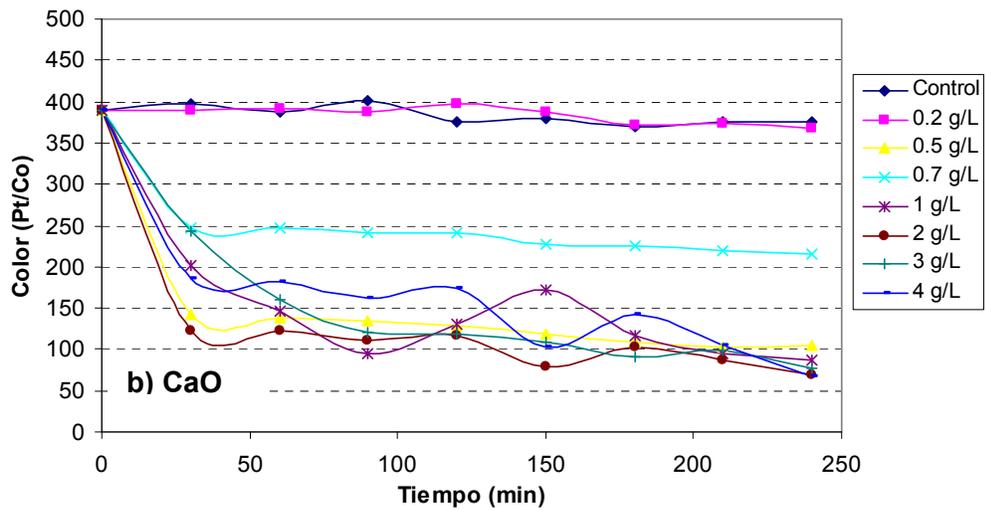
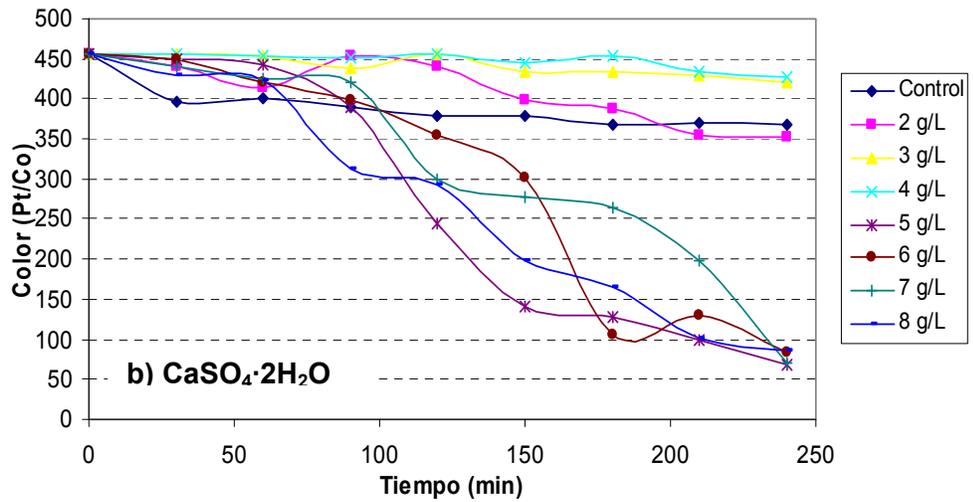
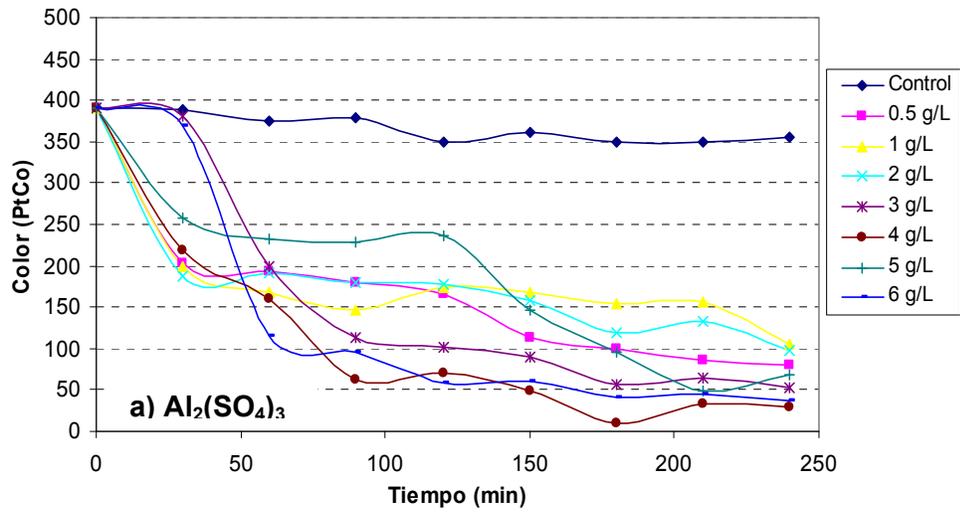
**Figura 5.2.** Porcentaje de remoción de la turbidez con respecto a la concentración para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.

Con respecto a la normatividad vigente en materia de agua para uso agrícola, la turbidez no se encuentra legislada dentro de la NOM-001-ECOL-1996. Aunque por los valores obtenidos podría decirse que los mejores coagulantes fueron el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y el  $\text{CaO}$ , es importante reconsiderar el hecho de que la turbidez remanente en el tratamiento con el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O}$  no es atribuible a sólidos suspendidos o disuelto del agua residual propiamente, sino a que este compuesto no es totalmente soluble en agua. Es vital considerar otras variables antes de concluir sobre los beneficios de un coagulante y otro, sobre todo en lo que respecta a pH y contenido de iones dañinos o benéficos para las plantas.

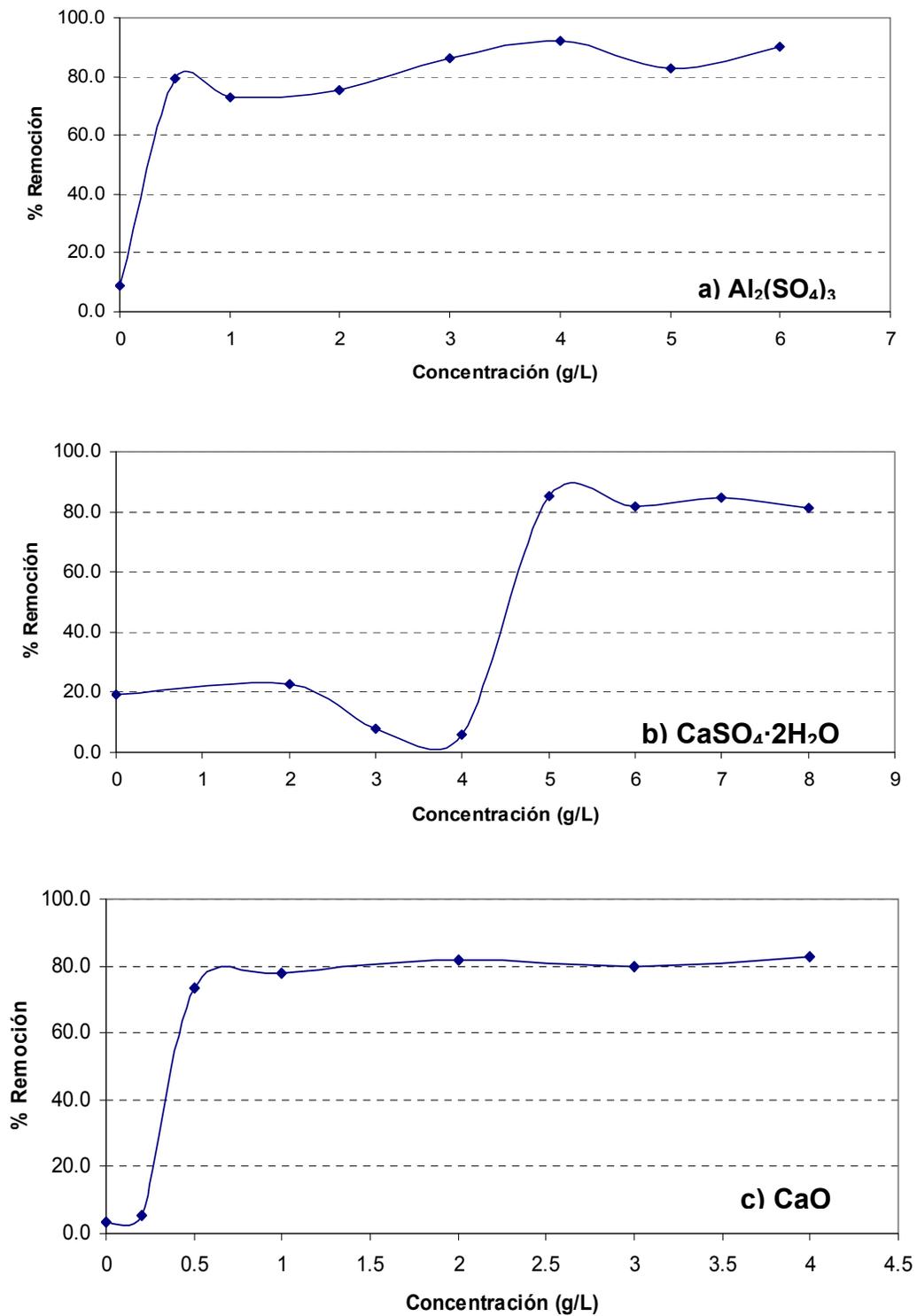
### 5.2.2. Color

Otro de los parámetros importantes analizados en la Prueba de Jarras es el color. En la Figura 5.3 se presenta la variación de color para las diferentes concentraciones y tiempos de medición con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ . El color disminuyó después de 4 horas de prueba de 390 a 80, 53, 30 y 38 unidades Pt/Co para las concentraciones de 0.5, 3, 4, 6 g/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , respectivamente (Figura 5.3a), siendo la más baja la correspondiente a la concentración de 4 g/L, representando así una remoción del 92%, considerando que la diferencia entre las demás es mínima (Figura 5.4a).

Con respecto al  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , las muestras a las 4 horas de sedimentación disminuyeron de 455 unidades Pt/Co a 68, 83, 70 y 86 unidades Pt/Co para las concentraciones de 5, 6, 7 y 8 g/L respectivamente (Figura 5.3b), mostrando el valor más bajo la concentración de 5 g/L, logrando un porcentaje de remoción de 85% del color (Figura 5.4b). Finalmente, el color disminuyó de 389 unidades Pt/Co a 87, 70, 78 y 67 unidades Pt/Co a las concentraciones de 1, 2, 3 y 4 g/L de  $\text{CaO}$  respectivamente, mostrando el menor valor la concentración de 4 g/L, por lo que la concentración seleccionada fue la de 2 g/L, considerando los valores de turbidez obtenidos (Figura 5.3c). De tal manera, que con la dosis seleccionada se logró una remoción del 82% tal como se muestra en la Figura 5.4c.



**Figura 5.3.** Variación de color con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.



**Figura 5.4.** Porcentaje de remoción del color con respecto a la concentración con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro.

Como resultado las pruebas realizadas anteriormente se eligió la concentración de 4 g/L para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 5 g/L para el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y 2 g/L para el  $\text{CaO}$ , ya que con estas concentraciones se observaron los mejores resultados en cuanto a turbidez y color. Estas concentraciones fueron las elegidas para realizar los tratamientos posteriores del agua cruda, obteniendo así, el agua tratada con los tres diferentes coagulantes utilizada para el riego de la hortaliza en estudio.

### 5.2.3. pH

El pH es un parámetro de gran importancia para el crecimiento de las plantas (Romero, 2005). En la Figura 5.5 se reporta la variación del pH para la Prueba de Jarras para los coagulantes estudiados. Se observa que el pH disminuyó de 7.0 a 5.4, 5.4, 4.2, 3.9 y 3.8 unidades para las concentraciones de 0.5, 1, 2, 3 y 4 g/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  respectivamente (Figura 5.5a). En estas determinaciones puede observarse que entre más se aumenta la concentración de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  el pH disminuye, de esta manera se comprueba el efecto el aluminio en el pH. Esto implica una reducción considerable de pH con respecto al pH del agua en el **control**, cuyo valor se mantuvo en un pH de 7.0. Realizando la comparación de los valores de pH obtenidos en la mediciones anteriores con los límites tanto máximo como mínimo que marca la NOM-001-ECOL-1996, puede observarse que conforme se aumenta la concentración de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  el pH disminuye hasta que alcanza un valor fuera de la norma, tal como lo muestra la Figura 5.6a.

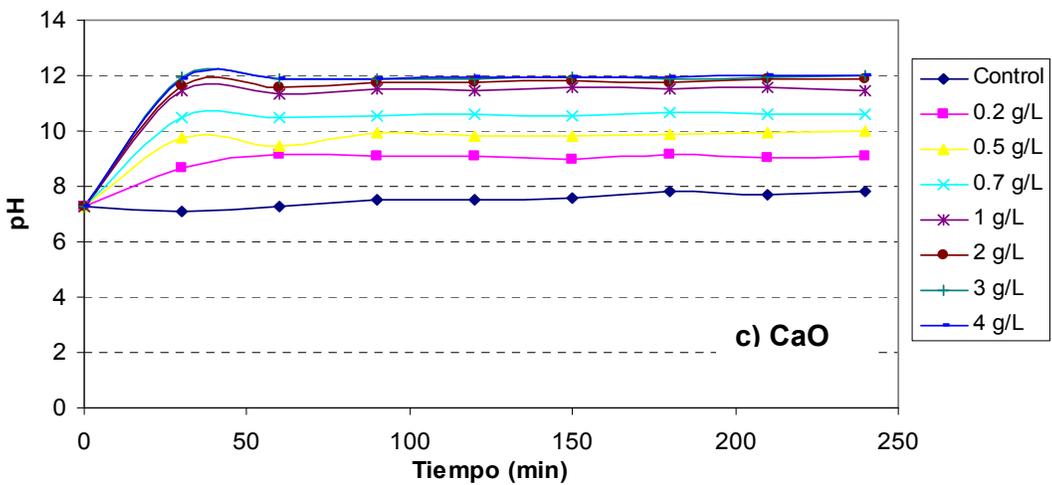
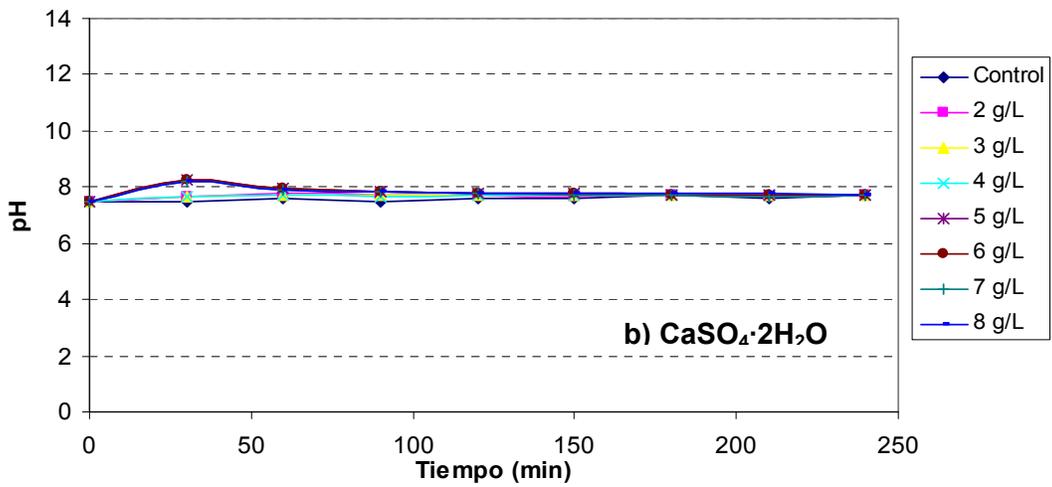
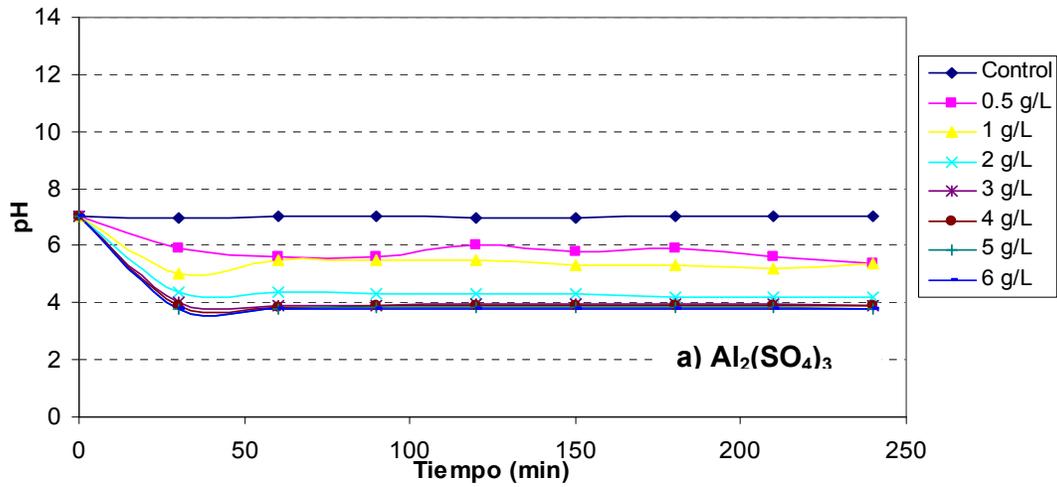
El pH del agua en la prueba de jarras con el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  inició con valores de 7.7 y disminuyó al valor de 7.5 unidades aproximadamente para las concentraciones de 2, 3, 4 y 5 g/L, mostrando que la variación del pH para este coagulante fue mínima, manteniendo los valores del **control** aproximadamente (Figura 5.5b). Los resultados obtenidos con el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  indican que aparte de ayudar a la eliminación de sólidos suspendidos, mantiene el pH del agua en el rango óptimo para el crecimiento de plantas y asimilación de nutrientes. Haciendo la comparación con la NOM-001-ECOL-1996, se observa que el agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se mantiene dentro de los límites, sin afectar la cantidad de coagulante agregado (Figura 5.6b).

En el caso del **CaO** sucedió lo contrario que el **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, es decir, el pH aumentó de un valor de 7.3 unidades a valores de 10.0, 10.6 11.5, 11.8 y 11.9 unidades para las concentraciones de 0.5, 0.7, 1, 2 y 3 g/L respectivamente, valores muy por encima del **control**, el cual se mantuvo en un rango de 7.1 a 7.8 (Figura 5.5c). Estos resultados muestran como al agregar mayor cantidad de **CaO** al agua, este incrementa el pH, indicando así la influencia de este material en el incremento del pH, y de esta manera sobrepasa el límite máximo permitido por la NOM-001-ECOL-1996, tal como se observa en la Figura 5.6c.

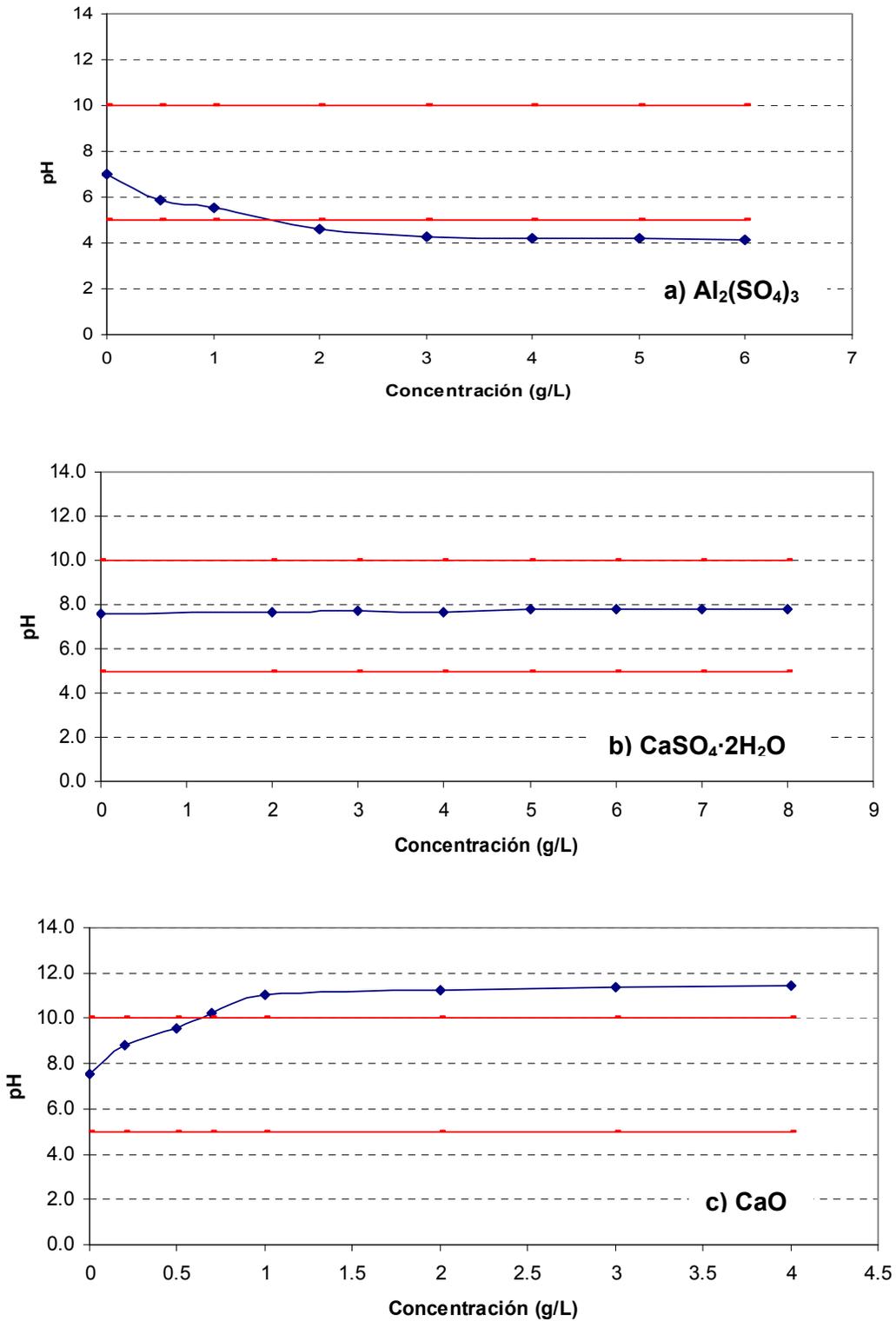
La disminución del pH a niveles ácidos considerables con el **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, y el aumento del pH con la aplicación de **CaO** a niveles fuertes de alcalinidad pueden tener efecto negativos en los sistemas acuáticos y en el crecimiento de las plantas (Hernández, 2002). En este sentido, el **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** es una alternativa viable para la etapa de coagulación-floculación en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Al presentar valores de pH cercanos a la neutralidad, resulta ventajoso el uso de este material, ya que favorecerá la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes para las plantas, entre ellos el fósforo y nitrógeno que son de los macronutrientes más importantes para su desarrollo.

En cuanto los máximos valores permisibles reportados en la NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, se indica que el pH del agua debe estar entre 5 y 10 unidades, para todos los títulos que legisla esta norma. De tal manera que algunas de las aguas tratadas a altas concentraciones de **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>** quedan por debajo del límite permisible por la norma y las aguas tratadas con **CaO** muestran valores por encima de los valores permitidos. El rango de pH obtenido con el **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** se considera permisible al presentar valores cercanos a la neutralidad.

Es importante mencionar que la temperatura y pH no mostraron diferencias significativas entre las diferentes concentraciones para los tratamientos de floculantes-coagulantes estudiados.



**Figura 5.5.** Variación del pH con respecto al tiempo para los tres coagulantes-floculantes durante la prueba de jarras en aguas residuales municipales de Querétaro.



**Figura 5.6.** Variación del pH con respecto a la concentración para los tres coagulantes-floculantes en aguas residuales municipales de Querétaro, comparados con la NOM-001-ECOL-1996

### 5.3. Caracterización de aguas tratadas

Las mediciones de parámetros fisicoquímicos obtenidos en el análisis de las muestras de agua tratada, una vez que se seleccionó la concentración óptima de cada coagulante, son mostradas en el Cuadro 5.2.

En este cuadro se observa que la temperatura se mantiene constante en los tres coagulantes utilizados, pero con respecto al pH, la variación entre los tres es muy diferente, el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  muestra un valor muy ácido a altas concentraciones, mientras que el  $\text{CaO}$  muestra un valor muy alto, el único que mantiene el pH en un valor adecuado para la disponibilidad de los nutrientes es el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ya que reporta un valor cercano a la neutralidad. En el caso de la turbidez, el material que presenta mejores resultados es el  $\text{CaO}$  con un valor de 2.9 NTU, seguido del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  con un valor de 4.6 NTU y finalmente del  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  con un valor de 57 NTU. En lo referente al color, con el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  se obtuvo un valor de 38 unidades Pt/Co, para el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  un valor de 68 unidades Pt/Co y con el  $\text{CaO}$  el valor fue de 70 unidades Pt/Co. Cabe mencionar que este último compuesto le proporciona un color amarillento al agua, lo que aumentó el valor del color con este material. Finalmente, la conductividad eléctrica es la misma en el agua tratada con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  con un valor de 1662  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor disminuye con el  $\text{CaO}$  a un valor de 698  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Cuadro 5.2.** Parámetros fisicoquímicos del agua tratada con los diferentes coagulantes

Tipo de agua	Concentración (g/L)	pH	Temperatura (°C)	Turbidez NTU	Color Pt/Co	C. E. $\mu\text{S}/\text{cm}$
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4	3.88	23.8	4.6	38	1662
$\text{CaSO}_4$	5	7.74	23.5	57	68	1662
$\text{CaO}$	2	11.86	22.6	2.9	70	698

Para el caso de los análisis microbiológicos, los resultados se encuentran reportados en el Cuadro 5.3 para los tres coagulantes. El cuadro 5.4 presenta el análisis estadístico de los datos obtenidos.

**Cuadro 5.3.** Parámetros microbiológicos del agua tratada con los diferentes coagulantes.

Parámetro	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaO	Nom-001
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	7,90	9,30	15,00	150
Demanda Química de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	55,54	45.25	67.88	-
Grasas y aceites (mg/L)	17.23	20.56	21.23	25
Sólidos Sedimentables (ml/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	2
Sólidos Suspendidos totales (mg/L)	3.60	9.20	2.40	125
Sólidos Disueltos (mg/L)	1550.60	1686.00	365.00	-
Huevos de Helminto (Huevos/L)	1*	0	0	1
Coliformes totales (NMP/ml)	120	>2400	1100	20
Coliformes Fecales (NMP/ml)	75	>2400	< 3	20

**Cuadro 5.4.** Comparación de medias de los parámetros medidos

Parámetro	Cruda	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaO
pH	7.44 <sup>a</sup>	3.98 <sup>b</sup>	7.50 <sup>a</sup>	11.97 <sup>c</sup>
Turbidez	103.33 <sup>a</sup>	3.83 <sup>b</sup>	52.76 <sup>c</sup>	2.036 <sup>b</sup>
Color	251.0 <sup>a</sup>	44.0 <sup>b</sup>	65.0 <sup>b</sup>	67.33 <sup>b</sup>
C. E.	1096.3 <sup>a</sup>	1993.3 <sup>b</sup>	1856.0 <sup>b</sup>	1457.3 <sup>a,b</sup>
DBO <sub>5</sub>	124.56 <sup>a</sup>	7.266 <sup>b</sup>	14.4 <sup>b</sup>	11.033 <sup>b</sup>
DQO	228.97 <sup>a</sup>	66.19 <sup>b</sup>	75.22 <sup>b</sup>	110.02 <sup>b</sup>
G y A	46.66 <sup>a</sup>	15.18 <sup>b</sup>	22.07 <sup>b</sup>	32.01 <sup>a,b</sup>
S. sedimentables	0.76 <sup>a</sup>	0.1 <sup>b</sup>	0.1 <sup>b</sup>	0.1 <sup>b</sup>
S. suspendidos	106.66 <sup>a</sup>	18.84 <sup>b</sup>	18.73 <sup>b</sup>	3.93 <sup>b</sup>
S. disueltos		1916.8 <sup>a</sup>	1679.7 <sup>a</sup>	411.05 <sup>b</sup>

Los valores seguidos por la misma letra evaluados para cada parámetro (filas) no son diferentes significativamente de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias a un nivel de confianza del 95%

Comparando estos análisis con los obtenidos del agua cruda reportados en el Cuadro 5.1 se determinó el porcentaje de remoción de los tratamientos, el cual es reportado en el Cuadro 5.5.

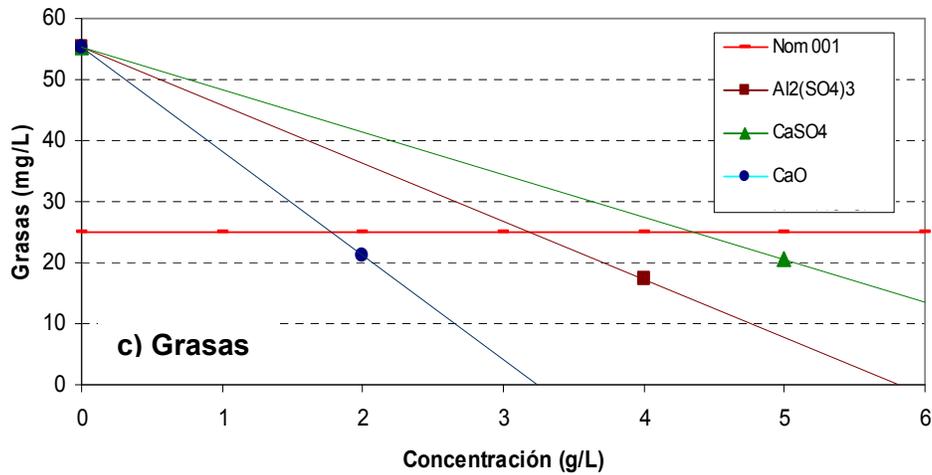
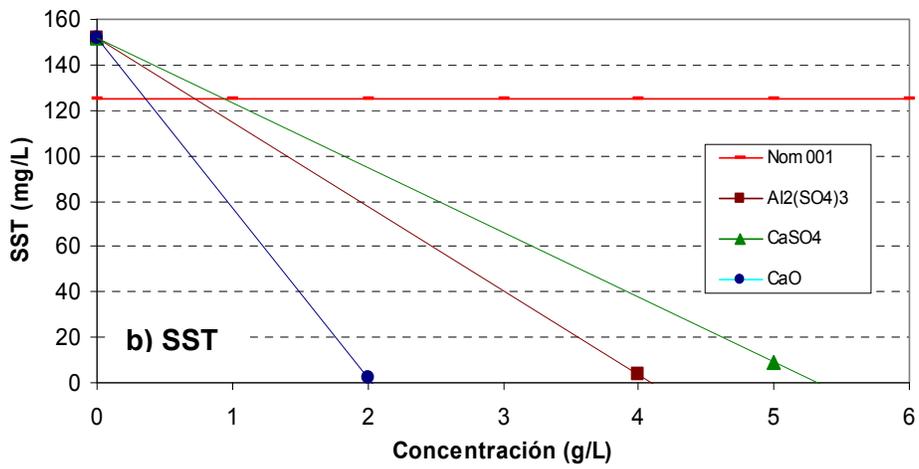
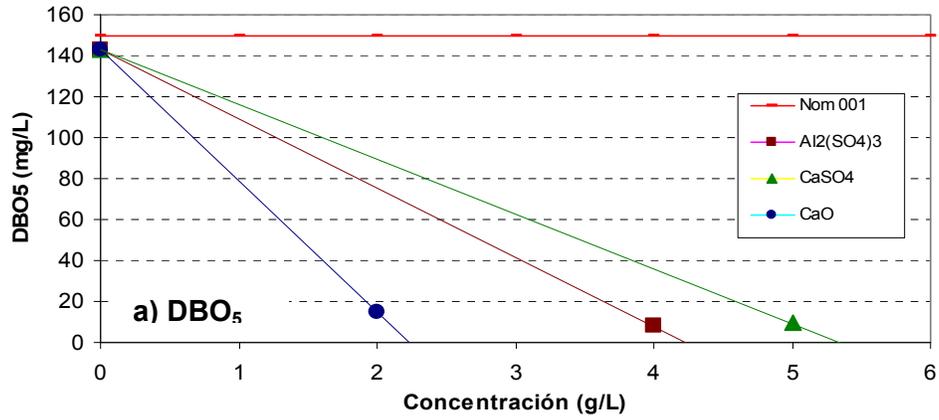
**Cuadro 5.5.** Porcentaje de remoción de los tres diferentes tratamientos con respecto al agua cruda.

<b>Parámetro</b>	<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (%)</b>	<b>CaSO<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CaO (%)</b>
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	94.5	93.5	89.5
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	77.1	81.3	71.9
G.A. mg/L	73.7	68.6	67.5
SST (mg/L)	97.6	93.9	98.4
Turbidez (NTU)	97.9	49.5	98.1
Color (Pt/Co)	82.9	74.5	76.9

En lo referente a la DBO<sub>5</sub> el **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>** presentó el mayor porcentaje de remoción con un valor aproximado de 95%, seguido del **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** con un 94% y finalmente el **CaO** con un 90% aproximadamente. La diferencia entre el **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, el **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** y **CaO** no fue estadísticamente significativa. En lo que respecta a la DQO, los mejores resultados se obtuvieron con el **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O**, que removi6 aproximadamente un 81%, seguido del **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>** con un 77%, y del **CaO** con un valor aproximado de 72%, dicho parámetro tampoco fue significativamente diferente entre los tres tratamientos. Al menos en consideración a estos dos parámetros, se puede decir que el **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** presentó los mejores resultados.

Uno de los parámetros más importantes para hacer una comparación es la DBO<sub>5</sub>, la NOM-001-ECOL-1996 marca límites máximos para los títulos de embalses naturales y artificiales, así como en ríos para el uso en riego agrícola de 75 a 150 mg/L y 150 a 200 mg/L, respectivamente, y el agua analizada reporta valores de 7.90 para el **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, 9.30 para **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** y 15.00 para **CaO**, los cuales están muy por debajo del límite máximo permitido por la norma (Figura 5.7a).

Haciendo la comparación con NOM-001-ECOL-1996 para las grasas y aceites en los títulos de embalses naturales y artificiales, suelo y ríos el límite máximo permisible es de 15 a 25 mg/L, por lo que las aguas tratadas con los tres coagulantes cumplen con la norma, obteniéndose valores menores al límite (17.23 – **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, 20.56 - **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** y 21.23 - **CaO**). Esto puede observarse gráficamente en la Figura 5.7c.



**Figura 5.7.** Disminución de: **a)** DBO<sub>5</sub>, **b)** SST y **c)** grasas con respecto a los tres coagulantes a las concentraciones seleccionadas comparados con la NOM-001-ECOL-1996.

Con respecto a los sólidos sedimentables la norma marca un límite máximo permisible de 1 a 2 ml/L y los resultados obtenidos de los análisis de las tres muestras se reportan por debajo de 0.1 ml/L. Para los sólidos suspendidos totales los tres tratamientos están por debajo de los límites máximos permitidos por la norma, la cual indica un máximo permitido para el título de ríos en el uso en riego agrícola de 150 a 200 mg/L y para embalses naturales y artificiales en el uso y riego agrícola de 75 a 125 mg/L, tal como lo muestra la Figura 5.7b.

Es claro por los resultados obtenidos en relación a los sólidos sedimentables totales, que con reducciones aproximadas del 98% para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{CaO}$  y del 94% para el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , los tres materiales son coagulantes efectivos en el tratamiento de aguas residuales domesticas.

Para la determinación de contaminación por patógenos se tomó como indicador la variable coliformes fecales. Al agua tratada con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  se le encontró el valor de 120 y 75 NMP/ml para coliformes totales y fecales respectivamente. Los valores para el  $\text{CaO}$  fueron de 1100 y <3 NMP/ml, mientras que el agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  presentó la mayor cantidad de coliformes tanto totales como fecales con un valor mayor a 2400 NMP/ml para los dos parámetros.

El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo para uso en riego agrícola es de 1,000 y 2,000 como número más probable de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente (NOM-001-ECOL-1996). Esto implicaría un alto riesgo para el agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Sin embargo, es importante mencionar que en esta etapa el agua no se encuentra todavía en condiciones de ser utilizada para el riego de hortalizas, y que será sometida a un postratamiento térmico con radiación solar para corregir este problema.

De inicio, se puede mencionar que el crecimiento alto de coliformes en el agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  puede ser un indicador de las condiciones adecuadas para el desarrollo de organismos resultado de un pH adecuado y del suministro de calcio al sistema. Bajo ninguna condición, sin embargo, esta agua debería utilizarse para el riego de hortalizas para el consumo humano si no se reducen a los límites permisibles estas variables.

#### **5.4. Evaluación preliminar del efecto de las aguas tratadas en el crecimiento y desarrollo de la lechuga**

Con el objetivo de evaluar preliminarmente el efecto de las aguas tratadas durante el proceso de coagulación-floculación con diferentes compuestos, en el crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga se estableció un ensayo en invernadero. La evaluación fue principalmente visual y solo se midió un parámetro cuantitativo indicador de la salud de las plantas, el contenido de clorofila.

El desarrollo alcanzado a los 60 días de plantadas las lechugas se observa en la Figura 5.8, donde se muestran las plantas representativas de cada tratamiento. Puede observarse que las aguas tratadas con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{CaO}$  mostraron un menor crecimiento de las plantas. La planta regada con el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  mostró un desarrollo de raíces ligeramente menor que las regadas con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y esto se observó en la pérdida de verticalidad o “acamado” de las plantas (Figura 5.8b). Se ha encontrado que el aluminio tiene un efecto negativo en el crecimiento de las raíces por efecto del bajo pH y la toxicidad del aluminio libre (Hernández, 2002). En el caso de las plantas regadas con  $\text{CaO}$ , las plantas presentaron un desarrollo limitado por el alto pH del agua (Figura 5.8d). Las plantas se observaron también más amarillentas, indicando una deficiencia de nitrógeno (Hernández, 2002).

Sin lugar a duda las plantas que mejor se desarrollaron fueron las regadas con agua potable y con agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Figura 5.8a y c). Las plantas se mostraron más saludables, de mayor crecimiento y desarrollo. Un parámetro considerado adicionalmente para determinar el grado de salud y desarrollo de las hortalizas fue el peso húmedo. Para el caso del peso húmedo, se tuvo que las plantas

regadas con el agua tratada con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  mostraron un peso ligeramente menor en comparación con las demás plantas. En contraste las que mostraron un mayor peso húmedo fueron las hortalizas regadas con el agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y finalmente, las plantas regadas con  $\text{CaO}$  tuvieron un peso similar al que presentó el control, esto puede observarse en las Figura 5.9. Esto quedó corroborado posteriormente con los análisis del contenido de clorofila evaluado en las hojas en diferentes etapas de desarrollo.



a) Lechugas regadas con agua potable



b) Lechugas regadas con agua tratada con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

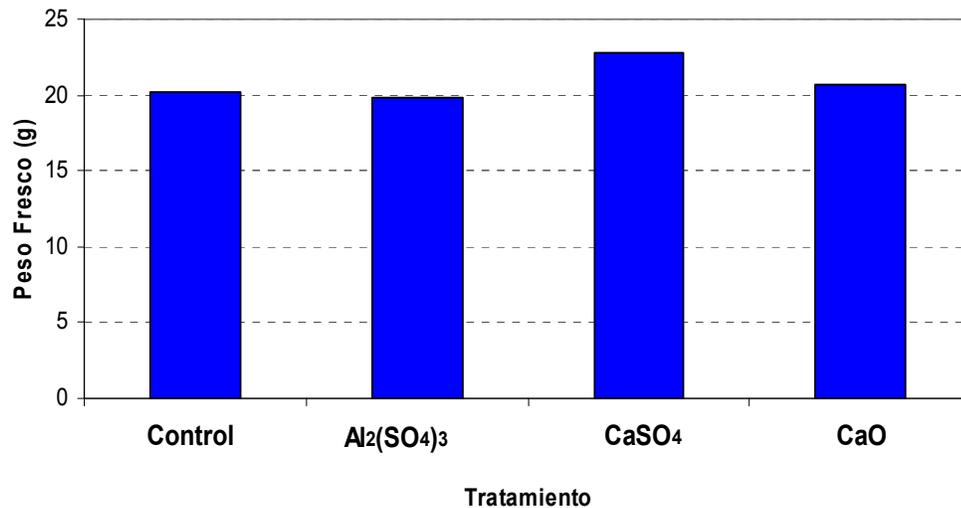


c) Lechugas regadas con agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$



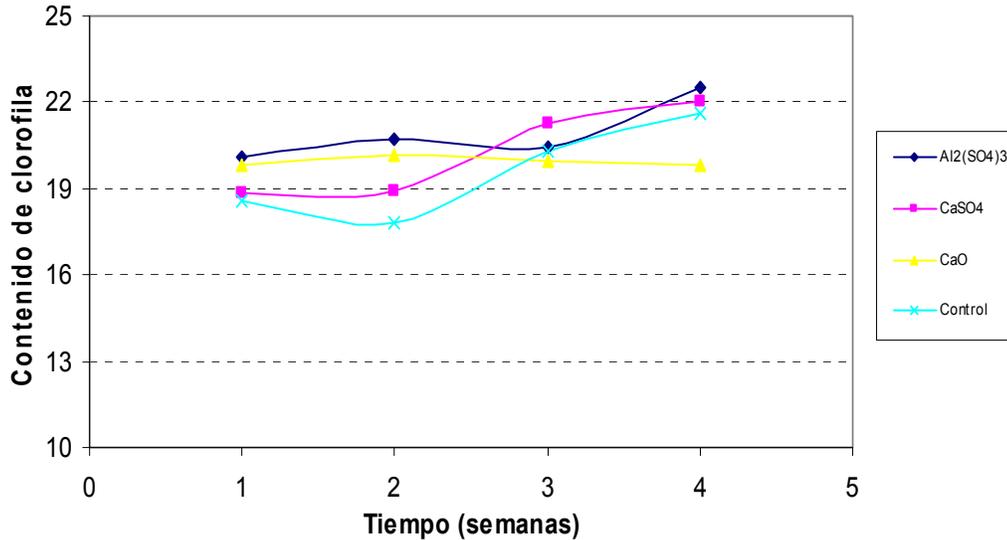
d) Lechugas regadas con agua tratada con  $\text{CaO}$

**Figura 5.8.** Lechugas regadas con agua potable y agua tratada con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}$ .



**Figura 5.9.** Peso fresco de las plantas regadas con los coagulantes  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  y el **control**.

Lo mencionado anteriormente se puede observar de una manera más clara en la Figura 5.10 en la cual se ilustra el contenido de clorofila de la plantas para un periodo de 4 semanas. Para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , el contenido de clorofila aumentó la primera semana, disminuyendo su valor a la tercera semana de regar la planta con el agua tratada. Sin embargo, logró una recuperación en la última semana alcanzando un valor de 22.5. En el caso del  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , el contenido de clorofila fue ligeramente menor que el del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , pero su recuperación es muy favorable conforme se desarrolla la planta al ser regada con el agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , logrando alcanzar un valor máximo de 22. Las plantas regadas con agua tratada con  $\text{CaO}$  comienzan con un valor mayor que las de  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y menor que las de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , sin embargo, su contenido en clorofila no logra una gran mejoría, logrando un valor máximo de 19.8. Finalmente, haciendo la comparación con las plantas regadas con el **control** (agua potable), puede observarse que el  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  presenta un contenido en clorofila mayor que el **control**, además de presentar un comportamiento similar, lo que es un indicativo que este coagulante le ofrece un mejor estado de salud a la planta. Independientemente del tratamiento utilizado los valores de clorofila obtenidos en las mediciones anteriores, están dentro de un rango aceptable, debido a que todos están por debajo del valor de referencia que es menor de 50.



**Figura 5.10.** Contenido de clorofila para las plantas regadas con los tres tratamientos y el control.

### 5.5. Efecto de las aguas tratadas en el suelo

Con el fin de evaluar el efecto de la aplicación de las diferentes aguas tratadas en el suelo, se realizó una caracterización del mismo antes de iniciado el ensayo preliminar descrito en la sección anterior, y posteriormente a la cosecha, una vez que se habían dado varios riegos con las aguas tratadas.

Los análisis mostraron que es el suelo es de textura Franca, con un contenido de arena de aproximadamente 42%, 20% de arcilla y 38% de limo. El pH original del suelo fue de 7.90, que es un valor adecuado para el desarrollo de las plantas en general, ya que esta muy cerca de la neutralidad y eso facilita la absorción de los nutrientes.

En lo referente al contenido de algunas bases (Ca, Mg, K y Na) y el contenido de metales pesados (Fe, Zn, Mn y Cu), los resultados antes y después de la aplicación de aguas tratadas fueron los mostrados en el Cuadro 5.6.

De acuerdo con estos resultados, se observa un aumento en el contenido de calcio en el suelo regado con los tres coagulantes. El que presenta el mayor contenido

de calcio, magnesio y sodio es el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , inclusive más alto que los coagulantes que contienen calcio, lo que puede atribuirse a la sensibilidad del equipo utilizado. Adicionalmente, presenta un incremento importante en el contenido de metales pesados como hierro (4.30 ppm) y el manganeso (33.6 ppm). Finalmente, al observar los resultados referentes al pH, queda claro como el regar el suelo con agua tratada con estos coagulantes si afecta su valor de pH, obteniendo como resultado para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , suelos más ácidos (pH = 6.2), para el  $\text{CaO}$  suelos más alcalinos (pH = 8.0), mientras que los suelos regados con el agua tratada con el  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (pH = 7.6), mantiene el pH del suelo adecuado para el crecimiento de las plantas (Hernández, 2002).

**Cuadro 5.6.** Contenido de bases y metales en el suelo, antes y después del riego

Metal (ppm)	Suelo Original	Suelo Regado con			
		Agua Potable	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{CaO}$	$\text{CaSO}_4$
<b>Ca</b>	5592	5828	6896	6015	6849
<b>Mg</b>	781	839	1019	733	840
<b>K</b>	824	781	759	735	723
<b>Na</b>	445	647	720	724	665
<b>Fe</b>	2.66	2.57	4.30	2.65	2.36
<b>Zn</b>	1.50	1.11	0.93	1.30	1.06
<b>Mn</b>	6.80	4.43	33.6	4.92	4.80
<b>Cu</b>	0.73	0.73	0.87	0.73	0.94
<b>pH</b>	7.90	7.75	6.20	8.00	7.60

Como se muestra en el Cuadro 5.6 un análisis general de los suelos regados con el agua tratada con los coagulantes de calcio mantienen las mismas características que el control, mientras que incrementan el contenido de calcio.

Por su parte, el suelo regado con agua tratada con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  modifica prácticamente la mayoría las características del suelo, incluso en el contenido de metales; además de reducir el valor de pH, lo cual altera la absorción de algunos nutrientes en las plantas.

Adicionalmente, se hizo la determinación del contenido de metales pesados comúnmente encontrados en el agua de origen doméstico. Los metales analizados

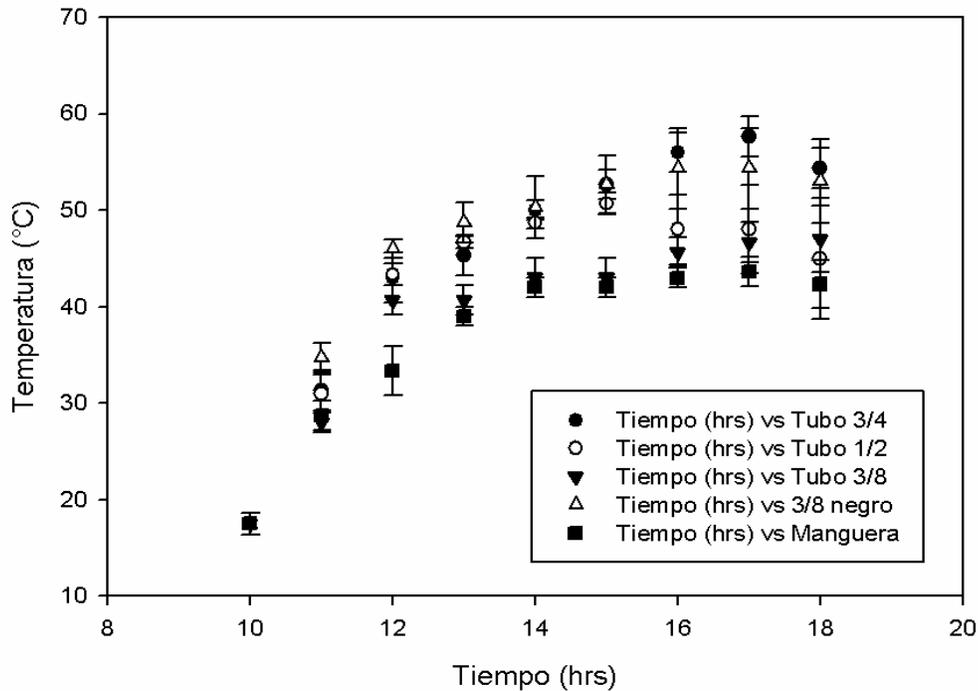
fueron cromo, zinc y plomo. El contenido de cromo fue de 0.135 mg/L, mientras que el correspondiente para zinc y plomo fue de 0.329 mg/L y 0.017 mg/L, respectivamente. Estos valores están por debajo de los límites permisibles para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, en el caso de aguas vertidas al suelo para uso en riego agrícola el promedio diario de cromo es de 1.0 mg/L y 0.5 para promedio mensual, con respecto al zinc, la norma establece un promedio mensual de 10 mg/L y 20 mg/L para promedio diario. Finalmente, en el caso del plomo, el promedio mensual es de 5 mg/L, mientras que el límite máximo permitido diariamente es de 10 mg/L (NOM-001-ECOL-1996).

## **5.6. Postratamiento con radiación solar**

### **5.6.1. Selección de la tubería para la construcción del prototipo**

El primer paso en la construcción del prototipo para el post-tratamiento con radiación solar fue la selección del material adecuado para el tubo de circulación del agua. Los resultados obtenidos del monitoreo de temperaturas del agua en secciones de tubos de cobre de diferente diámetro (3/4", 1/2", 3/8" y 3/8" pintado de color negro) y en una manguera de plástico transparente de 3/4" expuestos a la radiación directa del sol durante los días 7 y 8 del mes de mayo, se muestran en la Figura 5.11. Como puede observarse, durante las primeras dos horas, el calentamiento del agua es más rápido para la tubería de cobre de 3/8" pintado de negro, alcanzado un valor cercano a los 47 °C, aún cuando el valor final máximo alcanzado correspondió a la tubería de cobre de 3/4" con un valor alrededor de 57°C después de 7 horas de iniciado el calentamiento.

El objetivo es alcanzar la máxima temperatura en el menor tiempo posible, por lo que se seleccionó una combinación de la tubería de cobre de 3/4" con pintura negra para la construcción del prototipo.



**Figura 5.11.** Variación de la temperatura del agua en monitoreo de temperaturas de tubos de cobre de distintos diámetros.

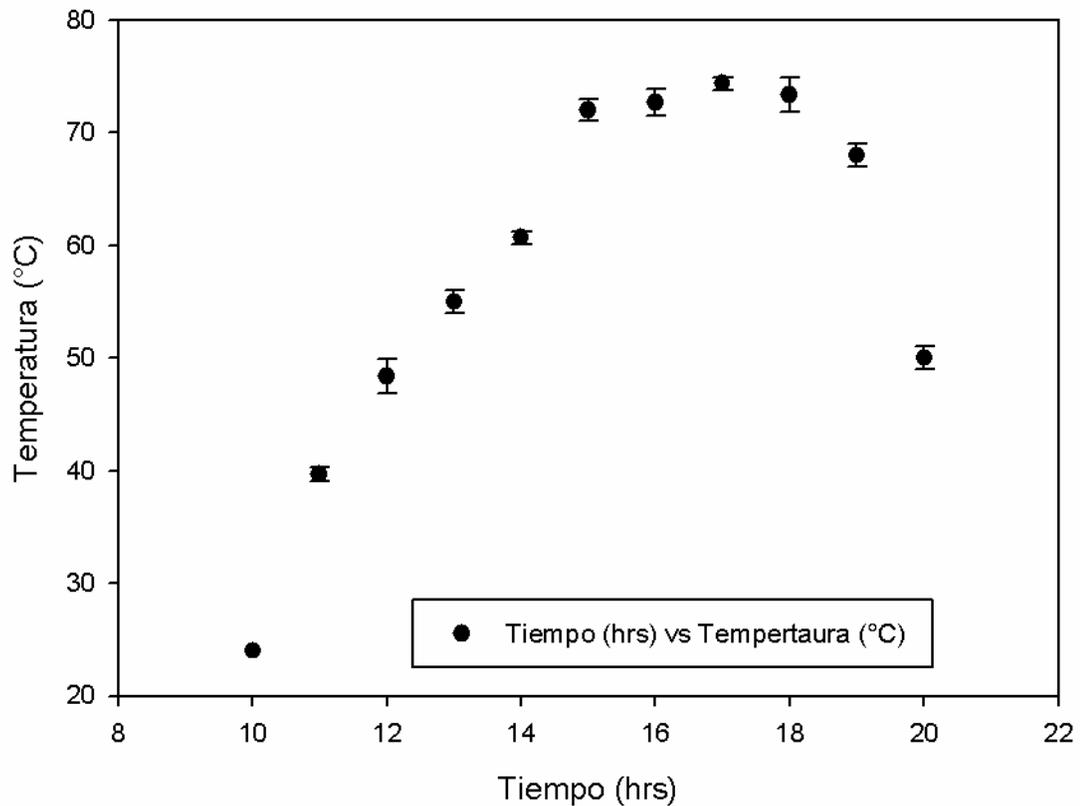
El propósito de evaluar la manguera transparente fue realizar un precalentamiento del agua con este material más económico y evaluar el potencial para aumentar la capacidad volumétrica y de flujo del calentador solar. La temperatura alcanzada por este material tres horas de iniciado el calentamiento fue de 40 °C.

### 5.6.2. Temperatura del agua en el prototipo

En el prototipo de calentador solar construido con tubería de cobre de 3/4" de diámetro pintado de negro, y con dimensiones de 8 cm de alto por 40 cm de largo y 30 cm de ancho, sellado con acrílico en la parte superior, se alcanzaron temperaturas de 60 °C en las primeras horas, y de hasta 74 °C como máxima, tal como se indica en el en la Figura 5.12.

Esta temperatura se considera adecuada para la eliminación de coliformes (Solsona y Méndez, 2002). En general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias

mueren entre los 40 °C y los 100 °C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 °C y los 60 °C.



**Figura 5.12.** Monitoreo de temperatura en el prototipo.

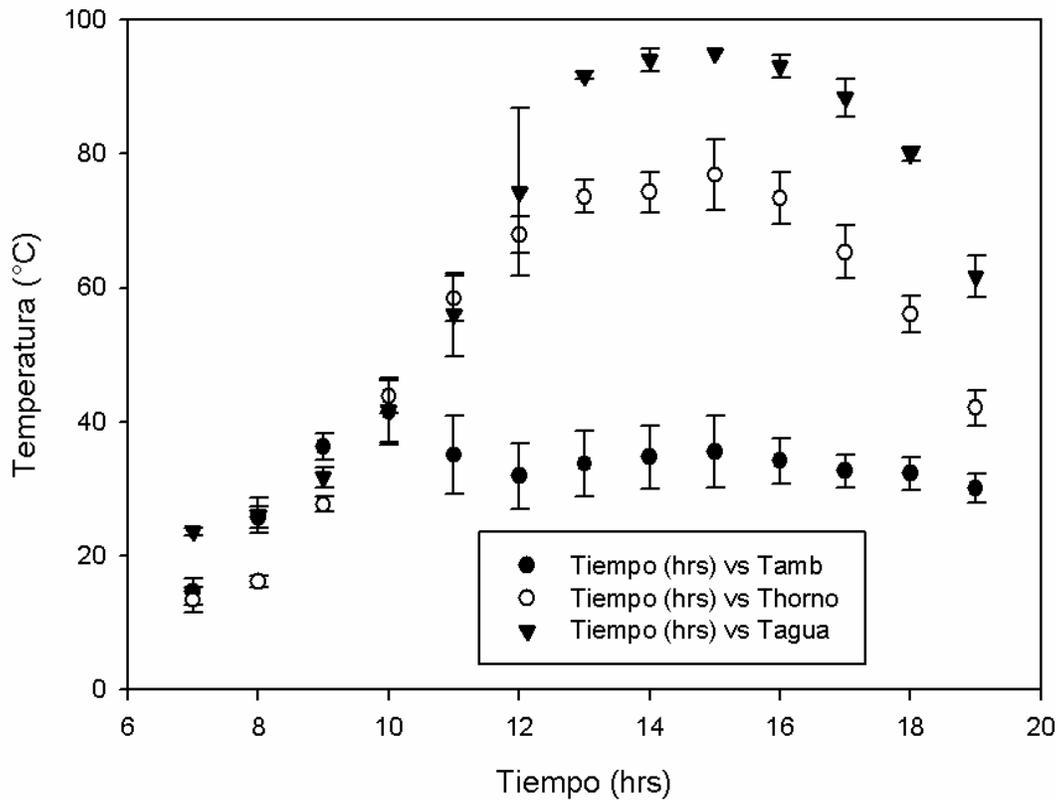
### 5.6.3. Calentador solar

Con base en los resultados anteriores se construyó el calentador solar real (Figura 5.13). Para su evaluación final se monitoreó la temperatura horaria del agua en los tubos, en el interior del compartimiento sellado del calentador y para su comparación, se midió también la temperatura ambiente. Las dimensiones de este equipo fueron 10 cm de alto por 160 cm de largo y 50 cm de ancho, sellado con acrílico en la parte superior.



**Figura 5.13.** Calentador solar para el postratamiento de aguas residuales después del tratamiento primario.

Para una temperatura ambiente promedio de 32 °C durante el periodo de las 9:00 am a las 7:00 pm, la temperatura máxima del aire al interior de la cámara del calentador fue de alrededor de 80 °C, obtenida alrededor de las 3:00 pm. Para la 1:00 pm, la temperatura del agua había alcanzado valores superiores a los 90 °C, tal como se observa en la Figura 5.14.



**Figura 5.14.** Variación de la temperatura ambiente, del aire en la cámara del calentador solar y del agua dentro de la tubería para un periodo de 7 am a 7 pm.

Conociendo el tiempo necesario para calentar el agua por encima de los 90 °C, se determinó que el tiempo de residencia del agua para lograr la eliminación completa de coliformes era de 30 minutos. De esta manera, se procedió al paso del agua tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el tratamiento primario y posteriormente se analizaron los coliformes.

El paso del agua postratada por el calentador solar logró la eliminación completa de los coliformes fecales y totales, presentando un valor por debajo de 3 NMP/ml, comprobando así la efectividad del postratamiento con radiación solar.

Se puede preliminarmente concluir que el agua previamente tratada con  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y sometida a un post-tratamiento térmico con radiación solar elimina los coliformes, tanto totales como fecales, así como de huevos de helmintos, por lo que puede utilizarse de manera confiable en el riego de las hortalizas para consumo humano.

#### 5.6.4. Evaluación del agua postratada en la producción de lechuga

Una vez comprobada la efectividad del tratamiento primario con  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  combinado con el post-tratamiento térmico a base de radiación solar, se evaluó la aplicación del agua post-tratada en plantas de lechuga. Para probar la salud de la planta se realizó la determinación del contenido de clorofila y en las plantas se evaluaron los coliformes fecales debido a que son los causantes de las enfermedades gastrointestinales más frecuentes (Jiménez *et al.*, 2001c).



Figura 5.15. Plantas de lechuga regadas con agua postratada.

Los resultados obtenidos de dicho análisis indican que se logró la eliminación completa de los coliformes fecales, presentando valores por debajo de 3 NMP/ml, comprobando así la efectividad del post-tratamiento con radiación solar en el agua para riego de hortalizas. El agua postratada tuvo un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Su vigor puede observarse en la Figura 5.16.

Se observa una uniformidad en el tamaño de las plantas de lechuga, con sus hojas muy verdes y saludables y un follaje muy abundante. Esto es un reflejo de la calidad del agua aplicada, la cual tiene cantidades significativas de calcio y un pH que ayuda a mejorar la disponibilidad de los micro nutrientes como son el boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc; los cuales tienen una máxima disponibilidad a un pH en un intervalo de 5 a 8 (Hernández, 2002).

## V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo de tesis se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

1. El **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** es un coagulante eficiente y los resultados obtenidos pueden compararse con los del **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, y **CaO** con una remoción del 53% en la turbidez, un 82% en el color y con un pH de 7.7 para la concentración de 5 g/L. Aunque la reducción en turbidez es significativamente menor que la del **Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**, no se debe a los sólidos suspendidos o disueltos del agua residual, sino a que el **Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O** no se disuelve completamente en agua y le imparte a la misma un color blanco.
2. La ventaja del uso de **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** radica en la disminución de los efectos nocivos que causa el Al tanto en la salud de los seres humanos como en las plantas y suelos, especialmente en lo referente a la cantidad de aluminio libre en el agua y al pH ácido.
3. El uso del **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** como coagulante en el tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales es una opción viable, a la vez que el agua obtenida presenta propiedades físico-químicas adecuadas para el riego de hortalizas.
4. El equipo de postratamiento (calentador solar) diseñado y construido como parte de este trabajo logró temperaturas en el agua superiores a los 90 °C, con lo que garantiza la eliminación de los microorganismos patógenos presentes en el agua tratada con **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** en un tiempo de residencia promedio de 30 minutos con exposición directa a la radiación solar.
5. Los resultados de coliformes realizados al agua postratada con **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** mostraron la eliminación completa de los coliformes fecales y totales, presentando un valor por debajo de 3 NMP/ml, mientras que los huevos de helminto fueron removidos desde el proceso de sedimentación.

6. El calentador solar diseñado es una opción para la desinfección del agua residual tratada, aunque tiene la desventaja de que la magnitud de los flujos es reducida (alrededor de 8 L/h).
  
7. Por último, la presente investigación demuestra que el uso de agua tratada con **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** en combinación de un postratamiento térmico basado en radiación solar directa genera agua de calidad suficiente para el riego de hortalizas para consumo humano, tanto física, como química y biológicamente. Estos procedimientos son prácticos y económicamente viables.

## LITERATURA CITADA

Agency for toxic substances and disease registry (ATSDR). 1999. División de toxicología ToxFAQs, Aluminio.

Álvarez B. D., S. M. Contreras y H. M. Poggi. 2002. Sistemas de tratamiento de aguas residuales por aplicación de suelos. Avance y perspectiva, Vol. 21

Antón D. y D. C. Díaz, 2000. Sequía en un mundo de agua, Piriguazú Ediciones, pp. 227, 228

Arboleda V. J. 2000. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua, (3ª Edición) Mc Graw-Hill Interamericana, S.A. tomo I.

Ayres M. R. and D. M. Duncan, 1996. Analysis of Wastewater for Use in Agriculture - A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques, Department of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, England, World Health Organization, Geneva.

Biblioteca de la Agricultura (B. A.), 1999 "Horticultura, cultivo en invernadero", 2ª edición, editorial idea books.

Camacho O. R. 2007. Evaluación del sulfato de calcio dihidratado como alternativa al uso tradicional del sulfato de aluminio en el proceso de floculación del tratamiento de aguas residuales. Tesis Maestría.

Carabias J. y R. Landa, 2005. Agua, Medio Ambiente y Sociedad, hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en México, UNAM, COLMEX, FGRA, pp. 33

Castillo E. I., 2003. Pruebas de calidad de agua en México, Instituto Nacional de Ecología (INE).

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1981. Serie técnica trece. 2a reimpresión.

Centro Virtual de Información del Agua (CVIA). 2005 (agua.org.mx)

Cifuentes E. H., G. P. Ruiz, S. Bennett, M. Quigle, A. Peasey and H. A. Romero, 1993. Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México. Rev. Salud Pública México; Vol. 35, No 6: 614-619

Comisión Nacional de Aguas 1993. Aprovechamiento de aguas residuales en la agricultura: Situación actual en México. Cuernavaca: Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional de Agua, 2002. Compendio básico del agua en México.

Comisión Nacional del Agua. 2006. El agua: un recurso estratégico y de seguridad nacional,

De Grazia J., P.A. Tiftonell y A. Chiesa. 2001. Efecto de la época de siembra, radiación y nutrición nitrogenada sobre el patrón de crecimiento y el rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg. Vol. 16, No 3

De Vargas L., 2004. Tratamiento de agua para consumo humano, Manual I: *Plantas de filtración rápida*, Tomo I Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima Perú.

Enciclopedia Microsoft Encarta Online. 2006. "Contaminación del agua" <http://mx.encarta.msn.com> © 1997-2006 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos

Fan X., M. A. Toivonen, T. K. Rajkowski and J. B. Sokorai, 2003. Warm Water Treatment in Combination with Modified Atmosphere Packaging Reduces Undesirable Effects of Irradiation on the Quality of Fresh-Cut Iceberg Lettuce, Eastern Regional Research Center, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Journal of Agricultural and Food Chemistry, Vol. 51, No. 5: 1231-1236

Feenstra S., R. Hussain and W. Van der Hoek. 2002. Health risks of irrigation with untreated urban wastewater in the southern Punjab, Pakistan. Institute of Public Health, Lahore

Fichas internacionales de seguridad química (FISQ), 1994a. "Óxido de calcio" Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, España

Fichas internacionales de seguridad química (FISQ), 1994b. "Sulfato de calcio" Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, España

Garza A. V., S. I. Fernández, M. Badii, S. A. Flores, M. L. Hauad y R. L. Villarreal. 2001. Evaluación de Riesgo a la Salud en la Comunidad de Loma Blanca (distrito de riego 009) Valle de Juárez (México), por Exposición a aguas residuales no tratadas, Centro de Estudios del Medio Ambiente, Universidad Autónoma de Cd. Juárez, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, *Revista de Salud Pública y Nutrición*, Vol. 2, No. 3.

Geldreich E. E. y G. F. Craun. 1996. "Barreras múltiples para la protección y el tratamiento del abastecimiento de agua potable: un método probado de prevención de la propagación de las enfermedades transmitidas por el agua, Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, La calidad del agua potable en América Latina, Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química", ILSI Press – Washington, DC., pp 1 – 6

Hernández G. R., 2002. Libro Botánica “Nutrición Mineral de las Plantas”, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Jiménez B. and A. Chávez. 1997. Treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes. *Environmental Technology*. Vol. 18: 721-730

Jiménez B., A. Chávez, C. Maya and L. Jardines. 2001a. Renoval of microorganisms in different stages of wastewater treatment for Mexico City. *Water Science and Technology* Vol. 43 No. 10:155 -162.

Jiménez B., C. Maya C. and G. Salgado. 2001b. The elimination of helminth ova, faecal coliforms, Salmonella and protozoan cysts by various psysicochemical processes in wastewater and sludge. *Water Science and Technology* Vol. 43 No. 12:179 -182

Jimenez B., C. Maya and G. Salgado. 2001c. The elimination of helmint ova, faecal coliforms, Salmonella and protozoan cysts by various physicochemical processes in wastewater and sludge. *Water Science and Technology*, Vol. 43 No 12:179 -182

Jimenez B. and A. Chavez. 2002. Low cost technology for reliable use of Mexico city's wastewater for agricultural irrigation. *Water Science and Technology*, Vol. 9: 95-108

Jiménez B. y L. Marín, 2004. “El agua en México vista desde la academia”, Academia Mexicana de Ciencias, pp 11-12

Jimenez B. 2006. Irrigation en Developing Countries Using Wastewater. *International Reviewof Environmental Strategies*. Vol. 6, No 2: 229-250

Jiménez B. 2007. Helminth ova removal from wastewater for agriculture and aquaculture reuse. *Water Science and technology*. Vol. 55. No. 1-2:485-493

Levine A. D. and O. Takashi. 2004. Recovering Sustainable Water from Wastewater, *Environmental science & technology*, pp. 201-208

Lineback D., 2002. Manual de Formación para Instructores, Mejorando la Seguridad y Calidad de Frutas y Hortalizas Frescas; University of Arkansas and Joint Institute of Food Safety and Applied Nutrition (JIFSAN) / University of Maryland.

Muñoz H. M., J. R. Ochoa y C. Fernández. 2005. Formación de microemulsiones inversas de acrilamida. *Tecnología y desarrollo*. Vol. 3.

NMX-AA-003-1980. Que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales

NMX-AA-042-SCFI-2005. Calidad del agua - Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales y fecales.

NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales

NMX-AA-113-SCFI-1999. Determinación de Huevos de Helminto

NMX-AA-004-SCFI-2000. Determinación de los sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-005-SCFI-2000. Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-007-SCFI-2000. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-008-SCFI-2000. Determinación del pH. Método potenciométrico.

NMX-AA-030-SCFI-2000. Determina de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-028-SCFI-2001. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas.

NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMXX-AA-051-SCFI-2001 Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

Olivares E., 2000. Nutrientes y Metales en *Tithonia diversifolia* (Hemsl.), Gray (Asteraceae), Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Caracas. Venezuela.

Peña F., 2002. Las aguas residuales en la agricultura mexicana: medio ambiente, salud y política, El colegio de San Luis, México, Barcelona, España.

Pérez P. J. 2002. Manual de potabilización del agua. Facultad de Minas (4 edición). Medellín, Colombia

Romero R. A. 2005. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.

Rubia C. J. M., 2001. Determinación de aluminio en líquidos concentrados de hemodiálisis por espectrofotometría de absorción atómica. Tesis de grado de doctor, Madrid, España.

SEDESOL/INE, 1993. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente: 1991-1992. México

Solsona F. y J. P. Méndez. 2002. Desinfección del Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.

Soto R. E., T. L. Ramírez, M. B. Castillo y M. A. Rodríguez. Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. Ingenierías, Vol. VII, No. 23

Tebbutt T. H. Y., 1990. "Fundamentos de control de la calidad del agua", Departamento de Ingeniería Civil, Universaza de Birmingham Noriega editores, Editorial Limusa, pag. 220-227.

Terence J. McGhee, 1999. Abastecimiento de agua y alcantarillado, Ingeniería Ambiental, sexta edición, editorial McGraw Hill, Aguas subterráneas pag. 93, 94

UNESCO, 2003. Hechos y cifras: Usos del agua, año internacional del agua dulce

VanOlphen, 1977. "Introduction to clay colloid chemistry: for clay technologists, geologists, and soil scientists". Editorial J. Wiley, 2. ed

Zarate, R. 2004. Apuntes de la Materia de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro.

## LISTA DE SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados	mg	miligramos
CEA	Comisión Estatal de Aguas	min.	minuto
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno	ml	mililitro
DQO	Demanda química de oxígeno	N	Norte
cm	centímetro	NMP	Número más probable
E	Este	NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
Floc.	floculo	Pt/Co	unidades platino cobalto
g	gramo	ppm	partículas por millón
h	hora	rmp	Revoluciones por minuto
has	hectáreas	s	segundos
km	kilómetros	S	Siemens
L	Litro	SS	Sólidos sedimentables
m	metro	SST	Sólidos suspendidos totales
M	Molar	µS	microsiemens