

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE AGRONOMIA

DEPARTAMENTO DE BOTANICA



Evaluación de Metales Pesados en Plantas de Acelga (*Beta vulgaris* L. Var. Lyon) Regadas con Agua Residual Tratada

Por

IRENE GARCIA PEÑA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Evaluación de Metales Pesados en Plantas de Acelga (*beta vulgaris* L. Var. Lyon)
Regadas con Agua Residual Tratada

Por:

IRENE GARCIA PEÑA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada

M.C. Leticia Escobedo Bocardo
Asesor Principal

Dr. Emilio Rascón Alvarado
Coasesor

Dr. Ricardo Requejo López
Coasesor

P.A.
Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Coordinación
División de Agronomía

Junio, 2012

Resumen

Se evaluó la presencia de metales pesados en el tejido vegetal de un cultivo de acelga (*Beta vulgaris* L. Var. Lyon) regadas con agua residual tratada con hidróxido de calcio, hidróxido de sodio, ozono, filtrada con arena sílica y agua corriente como testigo, con el objetivo de disminuir la acumulación de metales en el tejido vegetal. En un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, se estableció el cultivo con un diseño completamente al azar con 6 tratamientos y 4 repeticiones. Las plantas fueron regadas con el AR tratada durante la etapa de desarrollo. Las variables evaluadas fueron: Área foliar total, área foliar comercial, número de hojas, número de hojas comerciales, peso fresco, peso seco, presencia de metales pesados y de importancia agrícola en el tejido vegetal, tales como Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Zn, Ca, Mg, Na y K, en donde únicamente se detectaron mediante espectrofotometría los metales pesados como el Zn y Fe; la cantidad máxima de Zn que se encontró fue de 66.25 ppm excediéndose en un 89.28% de los niveles normales de Zn en el tejido vegetal manejados por Reuter y Robinson (1986). Para los elementos de importancia agrícola se encontraron niveles máximos de Mg en la cantidad de 12,750 ppm excediéndose en un 59.3% de los niveles normales en el tejido de la planta. De los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que el agua residual experimental es apta para el uso en el riego agrícola para la producción del cultivo de acelga sin necesidad de ser tratada con los acondicionantes evaluados.

Palabras clave: Agua residual, Metales pesados, hidróxido de calcio, hidróxido de sodio, ozono y arena sílica.

CONTENIDO

Índice de Cuadros.....	IV
Índice de Figuras	VI
Dedicatorias.....	IX
Agradecimientos	XI
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo.....	3
Hipótesis	3
II.- REVISIÓN DE LITERATURA	4
Aguas Residuales.....	4
Definición.....	4
Características de las aguas residuales.	5
Reutilización agrícola de aguas residuales (AR)	6
Aprovechamiento de AR en agricultura y sus limitaciones	7
Metales en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo..	9
Efectos tóxicos de los metales pesados en las plantas	12
La acelga como fitoextractora de metales pesados	14
Tratamiento de aguas residuales.....	15
<u>Tratamiento preliminar</u>	16
<u>Tratamiento primario</u>	16
<u>Tratamiento secundario</u>	16
<u>Tratamiento terciario</u>	17
<u>Desinfección</u>	17
Acondicionamiento de agua residual para producción agrícola.....	18

Arena sílica	18
Precipitación química de metales pesados. Hidróxido de calcio e hidróxido de sodio	19
Hidróxido de calcio	20
Hidróxido de sodio	20
Recuperación de cromo (Cr) trivalente descargado en las aguas residuales mediante agentes precipitadores.	21
Ozono (O ₃)	22
El uso del ozono en el tratamiento de agua	22
Los usos del ozono	23
Caracterización física del ozono	24
III.- MATERIALES Y METODOS.....	26
Descripción del sitio donde se llevó a cabo el experimento	26
Materiales	27
Colecta del suelo experimental	27
Obtención del agua residual experimental.	28
Germinación de la semilla	29
Métodos	29
Caracterización del agua residual	30
Análisis químicos del suelo experimental	30
Acondicionamiento del agua de riego	31
Formulación de la solución nutritiva ideal 100%	32
Cálculos para la determinación de la cantidad de precipitadores químicos (Ca(OH) ₂ e Na (OH)) a aplicar al AR con 100% de solución nutritiva.	34
Llenado de macetas	37
Trasplante	38
Diseño del experimento	39

Manejo del cultivo	40
Cosecha	40
VARIABLES AGRONÓMICAS	41
Variables evaluadas al final del cultivo.	41
<u>Variables agronómicas.</u>	42
IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
Correlación con metales pesados.....	47
Correlación con elementos de importancia agrícola	47
Análisis de varianza de las variables evaluadas.....	50
VARIABLES AGRONÓMICAS	51
Área foliar total.....	51
Área foliar comercial	52
Peso fresco	53
Peso seco	54
Elementos encontrados en el tejido vegetal del cultivo de acelgas.	55
Correlación de elementos presentes en planta, suelo y agua..	56
Metales pesados en planta	57
Zinc.....	57
Hierro	59
Elementos de importancia agrícola en planta	61
Calcio.....	61
Magnesio	63
Sodio.....	65
Potasio.....	67
V.- CONCLUSIÓN	69
VI.- PERSPECTIVAS	70
VII.- LITERATURA CITADA	71

Índice de Cuadros

Cuadro 2.1. Ejemplos de procesos para la eliminación de metales en las aguas.....	22
Cuadro 3.1. Características generales del Agua Residual.....	30
Cuadro 3.2. Análisis químicos del suelo experimental evaluados en la caracterización inicial del experimento.....	31
Cuadro 3.3 Formulación de la solución nutritiva para el cultivo de Acelga	33
Cuadro 3.4. Valores de micro elementos empleados en la solución nutritiva para acelga	33
Cuadro 3.5. Diseño de la solución nutritiva en aniones y cationes para acelga	33
Cuadro 3.6. Cantidad de fertilizantes (macro-mesoelementos) empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga.....	34
Cuadro 3.7. Cantidad de fertilizantes para los microelementos empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga	34
Cuadro 3.8. Metales pesados provenientes del AR.....	35

Cuadro 3.9. Cantidad de fertilizantes (macro y meso elementos) empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga mas el precipitador químico hidróxido de calcio Ca(OH)_2	36
Cuadro 3.10. Cantidad de fertilizantes (macro y meso elementos) empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga mas el precipitador hidróxido de sodio Na(OH)	37
Cuadro 3.11. Lista de tratamientos aplicados al agua residual utilizados en el riego del cultivo de acelgas.....	39
Cuadro 3.12. Metales a evaluar en tejido vegetal, agua y suelo.....	41
Cuadro 4.1. Matriz de correlación de las variables evaluadas	48
Cuadro 4.2. Cuadrados medios y significancias para las variables evaluadas en el análisis de varianza en plantas de acelga (<i>Beta vulgaris</i> var. Lyon) regada con agua residual.....	50
Cuadro 4.3. Cuadrados medios y significancias para elementos encontrados en el tejido de acelga, regada con AR tratada	55
Cuadro 4.4. Correlación de elementos presentes en planta, suelo y agua.....	56

Índice de Figuras

Figura 3.1 Ubicación del sitio experimental	26
Figura 3.2 Riego con aguas residuales en el ejido de Caxuxí Mpio. de San Salvador, Hgo, terreno de donde se extrajo el suelo experimental.....	28
Figura 3.3 Suministro del Agua Residual.....	28
Figura 3.4 Planta tratadora “SECFOR”	28
Figura 3.5 Producción de plántula de acelga en el invernadero.	29
Figura 3.6. Proceso de ozonización del agua residual.....	31
Figura 3.7 Proceso de filtración de agua residual a través de filtro de arena sílica.....	32
Figura 3.8. Llenado de macetas.....	38
Figura 3.9. Trasplante de plántula a macetas y aplicación del primer riego y tratamiento.	39
Figura 4.1 Efecto de los tratamientos y comportamiento del área foliar total. ...	51

Figura 4.2. Efecto de los tratamientos y comportamiento del área foliar comercial	52
Figura 4.3. efecto de los tratamientos y comportamiento del peso fresco en el cultivo de acelga.	53
Figura 4.4. Efecto de los tratamientos aplicados en el cultivo de acelga en cuanto a la variable peso seco.....	54
Figura 4.5. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento Zn en el tejido vegetal del cultivo de acelga.	57
Figura 4.6. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento Fe en el tejido vegetal del cultivo de acelga.	60
Figura 4.7. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento Ca en el tejido vegetal del cultivo de acelga.	62
Figura 4.8 Efecto de los tratamientos y presencia del elemento Mg en el tejido vegetal del cultivo de acelga.	64
Figura 4.9. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento Na en el tejido vegetal del cultivo de acelga.	65

Figura 4.10. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento **K** en el tejido vegetal del cultivo de acelga.....67

DEDICATORIAS

A Dios, mi padre eterno que siempre ha estado en cada respiro de mi existencia pues es mi fortaleza para realizar cada uno de mis sueños y objetivos de la hermosa vida que me otorgó.

A mis padres: Sr. Cliserio García Azpeitia y Sra. Rosa Peña Hernández por que son guerreros incansables para dar lo mejor de su existencia y hacer de todos sus hijos buenos ciudadanos y mejores personas, los amo.

A mis hermanos y hermanas; Isabel, Jezabel, Judith, Cliserio, Juan, Cecilia, Vicente, Margarita y Rosa María que están siempre en mi mente y en mi corazón. Gracias por su cariño y apoyo, pues son la fuente de inspiración para ser mejor persona y seguir luchando, mi cariño, respeto y admiración para cada uno de ustedes.

A mi hermano Víctor Manuel (†) por ser un excelente ejemplo a seguir con su manera de luchar por la vida, por su personalidad honesta y muy trabajadora, mil gracias por haber compartido una pequeña parte de tu existencia con nosotros, siempre te recordaré.

A Luis Adolfo Cuevas García, mi adorado hijo y a la mejor compañía de mi vida **Jorge Luis Cuevas Hernández** que me han sabido dar su amor, apoyo y

compresión incondicional en esta aventura de mi vida, mil gracias por ser mi inspiración y fortaleza para continuar, los adoro.

A la M.C. Martha Vázquez Rodríguez, por su amistad, fe y confianza desinteresada que depositó en mí desde el día que la conocí, por escucharme y por darme sus sabios consejos, por estar en momentos felices y difíciles y sobre todo por darme su apoyo e insistir en que culminara esta mi carrera, le estaré agradecida siempre.

Al Dr. Miguel Ángel Capó Arteaga por ser mi amigo y un excelente guía a seguir, por sus sabios consejos y apoyo incondicional durante mi etapa de estudiante ya que sin él hubiera sido un poco más difícil terminar mi carrera, por compartir conmigo y mi familia momentos especiales y difíciles de nuestras vidas.

A toda la familia Cuevas por su apoyo incondicional, mil gracias a Dios por ser parte de su familia ya que son un ejemplo muy valioso a seguir, mi admiración y respeto para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme abierto las puertas de esta mi segunda casa, por haberme formado ya que gracias a esta institución he logrado culminar un objetivo más en la vida. Mil Gracias a mi Alma Terra Mater.

Al Dr. Ricardo Requėjo López por compartirme su sabiduría, su amistad y sobre todo su tiempo y sabios consejos durante mi etapa de estudiante y por ser un excelente guía en la elaboración de este proyecto, mil gracias.

A la M.C. Leticia Escobedo Bocado por su confianza y apoyo que me ha otorgado de manera incondicional, son muy valiosos para mí, pues me facilitó la oportunidad de desarrollarme como estudiante y por su participación en la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Emilio Rascón Alvarado por su valiosa amistad, confianza además de su admirable paciencia que me brindó durante toda la carrera, por transmitirme sus conocimientos y apoyo para la elaboración de este proyecto.

A todas las personas, amigos, compañeros y maestros que han sido parte de mi formación como persona y profesionista pues me han apoyado en

situaciones positivas y también en momentos difíciles de mi vida. A todos ellos mil gracias.

I.- INTRODUCCION

En la actualidad la irrigación de cultivos agrícolas con aguas residuales es una práctica común, especialmente en regiones áridas como en el norte de México, donde su uso se ha generalizado debido a la escasez de agua de buena calidad. Sin embargo, existen requerimientos de calidad que deben tomarse en cuenta para su aprovechamiento en riego, para evitar contaminación a los cultivos, que puedan afectar a los animales y al hombre. (Rivas *et al.*, 2003).

A la fecha los desarrollos tecnológicos para el tratamiento de aguas residuales presentan ventajas en el aspecto ambiental pero no en el de rendimiento agrícola, por lo que es necesaria la tecnología técnica y económicamente disponible que pueda ser adoptada y que represente beneficios en ambos aspectos. (Orta *et al.*, 2006).

En cuanto a la calidad de aguas residuales con fines de riego en suelos agrícolas, existen límites máximos permisibles normativos referidos como estándares de calidad de agua (NOM-001-ECOL-1996). Estos estándares se relacionan con lo estético y el uso del medio ambiente receptor para suministro público del agua, recreación, mantenimiento de la vida acuática y silvestre o agricultura. Las variables de la calidad del agua que definen los límites físicos, químicos y biológicos incluyen sólidos flotantes y sedimentables, turbidez, color, temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DQO)

número de organismos coliformes, materiales tóxicos, metales pesados y nutrientes (Rivas *et al.*, 2003).

El impacto de las aguas residuales en el ambiente puede variar ampliamente de acuerdo con Bitton, (1994). Las aguas residuales pueden contener elementos tóxicos que incluyen metales pesados, cuya concentración varía considerablemente, muchas aguas residuales contienen altos niveles de metales tóxicos (Basta y Tabatabai, 1991; Lunin, 1986). Se ha demostrado que la aplicación continua de aguas residuales a suelos agrícolas incrementa los niveles de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, y Pb (Cajuste *et al.*, 1991).

En México no es común que los contaminantes sean removidos por el tratamiento de aguas residuales; no obstante; el agua se usa para irrigar cultivos, y como resultado, se han detectado trazas de metales, microorganismos patógenos y algunos compuestos orgánicos tóxicos en las legumbres y otros cultivos (Ibekwe *et al.*, 1995; Cisneros *et al.*, 1997).

Debido a la necesidad de una reutilización segura de aguas residuales para su uso en suelos agrícolas se ha pensado en probar un sistema de tratamiento de aguas residuales a base de arena sílica, aplicación de O₃, aplicación de Ca(OH)₂ e NaOH como posibles precipitadores químicos de elementos pesados presentes en el agua residual, que se puedan encontrar de manera disponible para la planta y tengan algún efecto negativo en el cultivo.

Tomando en consideración lo antes expuesto, en esta investigación se pretende que el agua residual sometida a diferentes tipos de tratamientos, pueda reutilizarse de manera segura en las actividades agrícolas, y revertir los efectos negativos de la contaminación ambiental.

Objetivo

Disminuir la acumulación de metales pesados en el tejido vegetal del cultivo de acelga regada con agua residual

Hipótesis

Es posible disminuir la cantidad de metales pesados que se acumulan en el tejido vegetal, mediante tratamientos acondicionantes al agua residual

II.- REVISION DE LITERATURA

Aguas Residuales

Definición

En la Legislación Mexicana de acuerdo con NOM-001- 1996, se consideran como aguas residuales “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas” (Diario Oficial de la Federación (DOF), 1980).

Para algunos autores las aguas residuales son líquidos procedentes de la actividad humana, que llevan en su composición gran parte de agua, y que generalmente son vertidos a cursos o masas de agua continental o marina. Seoáñez (1999).

Mas sin embargo *Fairet al.*, (1966) y Juárez y Mijaylova (2004) dicen que el agua residual se origina por la introducción en ella de organismos patógenos o sustancias toxicas que la hacen inapropiada para consumo humano o uso doméstico. Metcalf y Eddy (1998) definen el agua residual como “la combinación de los residuos, procedentes de residencias, instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que, en algunas ocasiones se les pueden agregar aguas subterráneas, superficiales y pluviales”.

Martínez (2001) dice que son aguas degradadas debido al uso municipal o pecuario, mezcladas o no con aguas superficiales, subterráneas o de lluvia, y que contienen 0.10 por ciento de sólidos en suspensión o solución, lo que las convierte en peligrosas para uso humano.

Las investigaciones realizadas por los investigadores muestran el concepto amplio de las aguas residuales y sus componentes, para que estas aguas sean de calidad para el riego agrícola y para consumo animal y humano se necesitan más procesos económicos y prácticos que sean redituables para los productores agrícolas.

Características de las aguas residuales

Existe una diversidad de aguas residuales por naturaleza así como sus niveles de contenidos, de acuerdo a los sitios por donde fluyen , según Reynolds (2002), las aguas residuales consisten de dos componentes: un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo.

Es importante tener referencia sobre la calidad del agua residual en particular, así como la cantidad de parámetros de sus constituyentes físicos, químicos y biológicos; que sirven como criterio para determinar los procedimientos y equipos depuradores más adecuados según el tratamiento a aplicar.

De acuerdo a Metcalf y Eddy (1998) los más importantes son: la temperatura, sólidos, materia flotante, color y olor; pH, grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y metales pesados; coliformes totales y fecales.

De acuerdo con el Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York (1976) cuando son frescas, presentan coloraciones grises y con olor a moho no desagradable, mientras con el transcurso del tiempo el color pasa a negro, desarrollándose olor ofensivo y desagradable.

Reutilización agrícola de aguas residuales (AR)

La aplicación de AR a terrenos agrícolas para riego, aprovechando su valor fertilizante, o para su eliminación evitando la contaminación de ríos, es una práctica realizada desde la antigüedad por griegos y romanos y habitual en China, Inglaterra o Alemania desde el siglo XVI. La aplicación en riego de las aguas residuales es un sistema alternativo de depuración, como mecanismo eficaz para regular los recursos hídricos en zonas muy deficitarias.

La agricultura en zonas áridas y semiáridas depende casi absolutamente del riego, y la demanda de agua de riego representa un porcentaje que supera

el 60% de la demanda total de agua. La elevada demanda de agua para riego, convierte el aprovechamiento de las aguas residuales en una fuente inestimable de este recurso (Pérez y Vallverdú, 2000).

Aprovechamiento de AR en agricultura y sus limitaciones

El aprovechamiento para riego en la agricultura de las AR constituye una alternativa especialmente adecuada de reutilización. Ésta será óptima si se cuenta con las condiciones y conocimientos necesarios para garantizar tanto la conservación de la fertilidad del suelo (características orgánicas, minerales e hidrogeológicas) así como la obtención de productos que respondan a las calidades higiénicas y sanitarias exigibles según su destino.

Los elementos presentes en las AR, que pueden limitar su uso en riego, son los siguientes:

Sólidos en suspensión: su acumulación da lugar a depósitos de lodos que generan condiciones anaeróbicas en el suelo, pudiendo, además, provocar obturaciones en sistemas de riego localizados.

Materia orgánica biodegradable: las proteínas, carbohidratos y grasas generan necesidades de oxígeno disuelto, medidas como DBO o DQO(Demanda bioquímica y química de oxígeno), cuya no satisfacción da lugar al desarrollo de condiciones sépticas.

Patógenos: la presencia de virus(enterovirus, adenovirus, rotavirus) y bacterias (coliformes, fecales) de origen humano y su posible transmisión a través de los productos cultivados puede ser origen de enfermedades.

Nutrientes: los nutrientes como nitrógeno, fosforo o potasio esenciales para el desarrollo vegetal, enriquecen las aguas para riego, pero una carga excesiva puede provocar efectos nocivos para el terreno y/o las aguas subterráneas.

Materia orgánica no biodegradable: determinados productos tóxicos no degradables por los sistemas de tratamiento de AR, tales como fenoles, pesticidas y órganoclorados, pueden limitar el uso de riego de las AR.

pH: El pH del agua afecta la solubilidad de los metales y pueden alterar el equilibrio del suelo.

Metales pesados: Los vertidos industriales, pueden aportar al agua metales como cadmio, mercurio, zinc y otros, cuya presencia reduce la aplicabilidad para riego de las AR por sus efectos tóxicos para los cultivos y para la salud.

Conductividad eléctrica: una excesiva salinidad derivada de una presencia de iones Na, Ca, Mg, Cl ó B, puede producir daños a los cultivos y provocar problemas de permeabilidad en el suelo.

Cloro residual: Concentraciones de radicales de cloro libre mayores que 0.5 mg/l, limitan la aplicación del agua a cultivos sensibles.

El conocimiento de todos estos parámetros nos permitirá adecuar el tratamiento a que deban someterse las aguas residuales para reutilizarlas en riego, en función del tipo de cultivo a que se apliquen (Pérez y Vallverdú, 2000).

Metales en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo

Como consecuencia del uso directo del agua residual para irrigar cultivos desde hace más de 100 años en el valle del Mezquital en el estado de Hidalgo,

se han acumulado metales pesados en los suelos. En 1996 se realizó un estudio en esta región con la finalidad de diagnosticar el proceso de acumulación y variabilidad en las concentraciones de cadmio, níquel y plomo en agua y suelo, en las especies: maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticumaestivum*) y alfalfa (*Medicago sativa*), las cuales son de mayor importancia económica en la región.

En las aguas usadas para regar los cultivos, se han encontrado concentraciones de Cd, Ni y Pb. Por ejemplo, se ha encontrado plomo a una concentración de 0.13 mg/ L^{-1} en el agua del gran canal de desagüe, mientras que en el agua proveniente de la presa Endhó la concentración encontrada fue de 0.054 mg/ L^{-1} . Esto se debe principalmente a que el agua en estos dos sitios proviene directamente de la zona metropolitana de la ciudad de México y las características químicas de estas aguas son afectadas por el tiempo en que tardará en llegar a la zona de riego (Cajuste *et al.*, 2001).

De acuerdo con Chang *et al.*, (1992) la cantidad máxima de Cd permitida en el suelo regado con aguas residuales es de $5 \text{ a } 20 \text{ kg ha}^{-1}$, esta concentración puede ser tóxica para los consumidores de productos agrícolas cultivados en esos suelos.

Por ejemplo en el cultivo de trigo, se encontraron concentraciones de cadmio del tejido foliar y en el grano, el cual disminuyó al aumentar la edad de la planta, (1.5 mg/L^{-1}). El plomo permaneció en el follaje del trigo en cantidades de 0.8 mg/L^{-1} en el mes de marzo y aumentó a 2.4 mg/L^{-1} en abril. El Níquel aumentó de marzo a abril, por lo cual se infiere que hubo una transferencia de níquel hacia el grano(Cajusteet *al.*, 2001).

Y por lo tanto se concluyó que la cantidad promedio de Cd que se acumula anualmente en el suelo es de 384 a 640 g ha^{-1} , considerada una tasa de acumulación alta. La cantidad de Cd, Ni y Pb extraída del suelo con EDTA 0.05 M se asoció con la antigüedad de riego con agua residual, y resultó que la tasa de acumulación anual es mayor para Ni y Pb que para el Cd(Cajusteet *al.*, 2001).

El contenido de Cd y Ni en la hoja y en grano de trigos acumulable en el grano de trigo, lo que indica un riesgo potencial para la salud de los organismos consumidores de ese alimento básico. Se deben establecer criterios de calidad del suelo en función de la cantidad aceptable de metales que se puedan acumular en este sustrato, para minimizar los riesgos por exposición nociva a Cd y Ni (Cajusteet *al.*, 2001).

Efectos tóxicos de los metales pesados en las plantas

Algunos metales juegan un papel doble, al ser esenciales para el desarrollo de las plantas y a su vez pueden ser dañinos a altas concentraciones. Los elementos limitantes en el desarrollo de las plantas pueden conducirlos a la muerte y producirse por incrementos relativamente pequeños en la concentración del elemento esencial, como puede ser el caso del Zn y el Cu. Para el caso de aquellos elementos no esenciales, la baja concentración de estos no ocasiona efecto alguno sobre las plantas; los daños pueden ser observados cuando la concentración llega a valores considerados tóxicos(Navarro *et al.*, 2007).

La habilidad que tienen las plantas de impedir la toma de metales es limitada y depende del proceso de acumulación de los elementos en el suelo. La reducción en la capacidad de exclusión por parte de la planta está en función del incremento de la cantidad de estos elementos.

Entre los elementos más fáciles de asimilar por la plantas están el Cd, Ni y Zn, por lo que en periodos cortos se pueden esperar efectos perjudiciales como acumulación en el tejido de las plantas y alteración de la función de los elementos esenciales que son similares desde el punto de vista químico (Navarro *et al.*, 2007).

Las concentraciones comúnmente reportadas de plomo en las plantas son menores de 1 mg kg^{-1} en frutos y semillas; de $1-3 \text{ mg kg}^{-1}$ en hojas. En cantidades muy altas son cuantificadas en las raíces (Wallance y Wallance, 1994). Haque *et al.*, (2008) indican que la concentración de plomo en el tejido de la hoja para varias especies está en un rango permisible con $5-10 \text{ mg Pb kg}^{-1}$ de peso seco y es excesivo o tóxico con $30-300 \text{ mg kg}^{-1}$.

Los metales pesados como Cu y Zn son esenciales y son imprescindibles para el crecimiento de las plantas, aunque las concentraciones elevadas de metales pueden propiciar la inhibición del crecimiento y síntomas de toxicidad. Por tanto la absorción y la toxicidad de los metales varían según las especies de las plantas, las características del suelo y las proporciones de los metales pesados presentes (Bernal *et al.*, 2007).

Las plantas poseen un intervalo de mecanismos celulares potenciales que pueden estar involucrados en la desintoxicación de metales pesados (Hall, 2002). La presencia de metales pesados en el ambiente ejerce un efecto inhibitorio sobre los organismos vivos, pero también varía la resistencia al efecto tóxico del metal, estas variaciones solo se expresan en presencia de los iones metálicos a los que son resistentes (Suarez y Reyes, 2002).

La acelga como fitoextractora de metales pesados

Los conocimientos que se tienen de plantas que pueden extraer metales pesados pueden ayudar en los esfuerzos de fitorremediación, empleando algunas especies de plantas especializadas que acumulan metales pesados y han sido propuestas como una alternativa para retirarlos de suelos contaminados. Por ejemplo *Beta vulgaris* Les una especie que ha sido utilizada para reducir concentraciones de metales pesados (Zn, Cd, Ni y Cu) en suelos bajo condiciones de invernadero (Haqet *al.*, 1980).

Angelova *et al.*, (2005) mencionan que la contaminación de metales pesados en el suelo y agua puede convertirse en un problema grave para la agricultura y la salud. Se han propuesto tecnologías alternativas para la remediación del suelo como las especies de plantas acumuladoras de metales pesados en tallo.

La acumulación de Cd, Pb y Zn por diversas plantas cultivadas en suelos contaminados con metales pesados, se dividieron en cuatro grupos de acuerdo a su capacidad de acumular los metales pesados: (i) Acumulador bajo, maíz y guisantes; (ii) acumulador moderado (cebada, lentejas, girasol, sésamo, hinojo, coriandro, eneldo, hierbabuena, albahaca, algodón, patatas, datura); (iii) alto acumulador (trigo, soja, habas, cacahuetes, anís, mostaza negra, lino, cáñamo, remolacha, remolacha forrajera) y (iv) hiperacumuladoras (salvia y tabaco).

Cada una de estas plantas en estos grupos puede crecer con éxito en suelos levemente contaminados.

Iannacone y Alvariño (2005) evaluaron el efecto fitotóxico del Cr^+ , Hg^+ y Pb^+ en forma de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), cloruro de mercurio (Cl_2Hg) y acetato de plomo ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$), respectivamente, sobre el crecimiento radicular de cuatro especies de plantas superiores terrestres: cebollas (*Allium cepa*), Acelga (*Beta vulgaris*), Arroz (*Oriza sativa*) y rabanito (*Raphanussativus*) a 192 h (8 días) de exposición. Se realizaron bioensayos de toxicidad para cada metal y para cada especie de planta.

Tratamiento de aguas residuales

De acuerdo a Metcalf y Eddy (1998) los métodos de tratamiento en los que se aplican fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias y aquellos en los que la eliminación de contaminantes se consigue mediante reacciones químicas o biológicas se conocen como procesos unitarios.

Las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir lo que se conoce como tratamientos, los cuales son: preliminar, primario, secundario y terciario o avanzado. Con estos tratamientos se busca suplir la falta de capacidad autodepuradora del medio ambiente debido al exceso de carga de los afluentes. Los tratamientos son:

Tratamiento preliminar

En este tratamiento se retiran del agua residual aquellos sólidos suspendidos que por su naturaleza presentan interferencias en etapas posteriores del proceso.

Tratamiento primario

En este tratamiento se eliminan la materia decantable, orgánica e inorgánica, mediante decantación, también se elimina la materia flotante y las espumas mediante barrido superficial. De ésta manera se eliminan entre 25-50 por ciento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), entre 50-70 por ciento de Material En Suspensión (MES) y 65 por ciento de los aceites y grasas del afluente. Se elimina una parte del nitrógeno orgánico, del fosforo orgánico y de los metales pesados contenidos en el afluente, pero no afecta a la materia coloidal ni a la disuelta.

Tratamiento secundario

Consiste en la eliminación de la materia orgánica biodegradable, tanto disuelta como coloidal, mediante un proceso biológico aeróbico. En presencia de oxígeno diversos microorganismos aeróbicos metabolizan la materia orgánica contenida en el agua obteniendo un crecimiento microbiano y subproductos orgánicos (dióxido de carbono y agua).

Para que el tratamiento esté completo se deben separar los microorganismos del agua tratada para obtener un afluyente secundario desprovisto de materia en suspensión. Hay una decantación secundaria similar a la primaria de donde se obtiene la materia biológica denominada fangos secundarios o fangos biológicos y que normalmente se mezclan con los fangos primarios para ser tratados conjuntamente.

Tratamiento terciario

Se utiliza cuando se quiere eliminar algún componente del agua residual que no se ha podido eliminar con el tratamiento secundario. Son procesos específicos que permiten obtener un agua residual sin nitrógeno, fosforo, materia en suspensión no decantada, materia orgánica no biodegradable, metales pesados o materia disuelta. Elimina la materia coloidal y en suspensión que inhibe la desinfección afectiva de los virus.

Desinfección

Consiste normalmente en la inyección de una disolución de cloro al inicio del canal de cloración. La dosis de cloro depende entre otros factores del contenido microbiano y suele estar entre 5- 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con la opción de emplear, en vez de cloro, el ozono. El máximo tiempo de contacto del agua con el cloro debe ser de 15 minutos. Existen otras alternativas de desinfección, tales

como la aplicación de rayos ultravioletas, tratamiento con ozono, dióxido de cloro y solarización (desinfección por luz solar). (Mujeriego, 1990).

Uno de los objetivos principales de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es reducir algunas de sus características indeseables, de tal manera que la disposición final de estas aguas, cumpla con las normas y requisitos mínimos definidos por la autoridades de un determinado país o región Metcalf y Eddy (1998).

Acondicionamiento de agua residual para producción agrícola

La eliminación de metales pesados y determinados aniones no deseados en las aguas afluentes de los tratamientos terciarios o avanzados se realizan mediante métodos de tratamientos que se conocen como tratamientos “especiales o específicos”. Mediante la adición de productos químicos bien elegidos puede reducirse la concentración de ciertas sales disueltas y modificar el pH y el grado de oxidación de algunos compuestos. En este trabajo se realizaron diferentes métodos para la reducción del contenido de algunos iones, como los de los metales pesados.

Arena sílica

Hoy en día se han implementado tecnologías apropiadas para la purificación del agua en los países en desarrollo, entre las cuales se encuentra

la filtración del agua a través de dispositivos con medios porosos que permiten obtener un agua efluente con buena calidad fisicoquímica y bacteriológica.

Sin embargo, la eficiencia del uso de filtros en la remoción de gérmenes patógenos que son resistentes a la acción bactericida del cloro, como desinfectante mas generalizado, ha motivado el uso de filtros en países desarrollados.

El proceso de filtración es el proceso por el cual, el agua pasa a través de sustancias porosas capaces de retener materias en suspensión. Logra la remoción de pequeños flóculos o partículas precipitantes que no son removidos por coagulación. De igual manera las sustancias orgánicas se remueven por adsorción mediante una columna de arena sílica. En general este material poroso es arena, es de bajo costo y alta eficiencia.

En cuanto a la remoción de bacterias, los filtros lentos trabajan satisfactoriamente en aguas que no tengan más de 10ppm de materia en suspensión y 200 bacterias por mililitro. Bajo estas condiciones su eficiencia es de aproximadamente de 96%. Además se ha demostrado también que remueve metales pesados (Rivas *et al*, 2003)

Precipitación química de metales pesados. Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e hidróxido de sodio (NaOH)

Los métodos de depuración química por precipitación son aplicaciones de la ley de Berthollet y se basa en la adición al agua bruta de un reactivo soluble, que con los iones indeseables que esta contiene provoque la precipitación de un producto hasta alcanzar su límite de solubilidad.

Hidróxido de calcio

El hidróxido de calcio, también conocido como cal muerta y/o cal apagada, es un hidróxidocáustico con la fórmula $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Es un cristal incoloro o polvo blanco, obtenido al reaccionar óxido de calcio con agua. Puede también precipitarse mezclando una solución de cloruro de calcio con una de hidróxido de sodio. Esta sustancia es usada con mucha frecuencia para la neutralización de la acidez de las aguas residuales y además favorecen la coagulación.

La adición de un álcali como el hidróxido de calcio (cal hidratada) o de carbonato de calcio, la equilibra de manera inocua, estabilizando el pH ácido que causa agentes corrosivos, características fisicoquímicas del agua (Trujillo *et al*, 2008).

Hidróxido de sodio

Es una base fuerte y no forma sales insolubles, neutralizando eficientemente los ácidos fuertes, siendo, por lo tanto, una solución más satisfactoria para el

problema de la neutralización; sin embargo, también disminuye la presión de CO_2 en el reactor, lo cual puede ocasionar una mezcla explosiva de metano y oxígeno que conllevaría al colapso estructural del reactor, adicionalmente una sobre dosificación del producto ocasionaría un incremento súbito del pH por tratarse de una base fuerte, además de requerir de mayor cuidado durante su manipulación (Cotoruelo y Marqués, 1999).

Recuperación de cromo (Cr) trivalente descargado en las aguas residuales mediante agentes precipitadores.

En León, Gto. se realizó un estudio en una tinería donde se curten pieles, ya que el 1.5–2.0 % del efluente total contiene un 98% de cromo trivalente descargado. En este estudio se seleccionaron como agentes precipitantes $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , y Na_2CO_3 . Las remociones de cromo obtenidas con la aplicación de NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fueron de 99.9 % con dosis de 4-6 g/g Cr^{3+} , con tiempos de reacción de 40 minutos. Con estos resultados se puede concluir que el afluente está libre de como trivalente (Juárez y Mijaylova, 2004).

Cuadro 2.1 Ejemplos de procesos para la eliminación de metales en las aguas. (Cotoruelo y Marqués, 1999)

Metales	Precipitado	Agente	pH	Separación	Precauciones
Cromo	Cr(OH)_3	Ca(OH)_2	9. – 10	Floculación Filtración	Precipitación solo después de la reducción completa
Mercurio	HgS	H_2S	8.5	Sedimentación Filtración Adsorción	Eliminación Final del exceso de H_2S
Plomo	PbCO_3 Pb(OH)_3	NaCO_3 Ca(OH)_2	6.-10	Sedimentación y filtración	Operar al nivel optimo de pH
Cobre	Cu(OH)_2	Ca(OH)_2 (*)	9-10.3	Floculación Filtración	Eliminación previa de CN^- NH_3
Zinc	Zn(OH)_2 ZnS	Ca(OH)_2 H_2S	9-10 (8.5)	Sedimentación y filtración	Eliminación previa de CN^- ycromatos

Ozono (O_3)

El uso del Ozono en el tratamiento de agua

La palabra ozono deriva del término griego “ozein” (lo que huele) y fue acuñada en 1840 por Schobein . La capacidad del ozono para desinfectar agua contaminada fue determinada en 1886 por el francés Meritens (Cajicas, 1982).

La primera planta piloto fue fabricada en 1881 por la firma alemana Siemens –Halske, y los ensayos realizados con ella en MartiniKenfelde, (Alemania), mostraron la efectividad del ozono contra las bacterias. En 1887, el químico francés Marius Paul Otto fundó la primera empresa especializada en la fabricación e instalación de equipos de generación de ozono(Pérez y Vallverdú, 2000).

La primera planta, a escala real, para tratamiento de agua potable se realizó en 1893 en Ouashoorn (Holanda), a la que le siguieron en los años siguiente otras construidas en Francia, Alemania y Estados Unidos, incluyendo una en Madrid construida en 1910. Hasta la 1° Guerra mundial en 1914, existía en Europa 40 plantas de diversos fabricantes para tratamiento de agua potable. Las investigaciones sobre el cloro durante la guerra, mucho más barato, produjo una fuerte disminución en la aplicación del ozono (Pérez y Vallverdú, 2000).

Los usos del ozono

En todas las plantas de primera generación, el ozono era usado como desinfectante y mejorador del sabor del agua. Hasta 1950 a estos usos se incorporan las utilidades de mejora de color y de oxidación de hierro y manganeso.

Desde 1960, diversas investigaciones demostraron la capacidad del ozono como floculante (control de turbidez en preozonización) y oxidante de ciertos microcontaminantes como los fenoles y algunos tipos de pesticidas, así como para el control de crecimiento de algas.

Los más recientes usos del ozono están relacionados en el control de productos intermedios como el Dibutilftalato (DBP), en la desinfección por cloro y la estabilización biológica, o la minimización del potencial del crecimiento microbiológico del agua. Un ejemplo del control de DBP, son los trialometanos (THM) producidos por la cloración, y muy peligrosas para la salud. El ozono sustituye ventajosamente al cloro como pretratamiento al filtrado con carbón activado granular o lecho de carbón biológico activado controlado de forma efectiva a ciertos tipos de componentes orgánicos(Pérez y Vallverdú, 2000).

Caracterización física del ozono

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno, que físicamente se caracteriza por ser un gas de color azulado y olor característico, cuya masa molar es de 48 gr/mol, y su densidad en relación al aire es 1,657, teniendo una masa voluminosa a 0°C y 760 mm. de Hg de 2,143 kg/m³. Se encuentra habitualmente en forma gaseosa mezclado con aire a muy bajas concentraciones, siendo muy inestable y muy sensible a descomposición por calor.

Las propiedades como oxidante se deben a su elevado potencial de oxidoreducción (2.07 voltios), que supera a otros elementos oxidantes como el cloro y el bromo. A estas propiedades se une un elevado poder desinfectante, habiéndose demostrado su capacidad biocida contra bacterias y virus, sobre los que produce una inactivación superior al 99% (Pérez y Vallverdú, 2000).

III.- MATERIALES Y METODOS

Descripción del sitio donde se llevó a cabo el experimento.

El experimento se realizó en un invernadero localizado en el Departamento Ciencias del Suelo, que se encuentra en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en la localidad de Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, que se sitúa a los 25° 23 de latitud norte y 101° 00 de longitud oeste, a una altura de 1742 msnm (Figura 3.1).

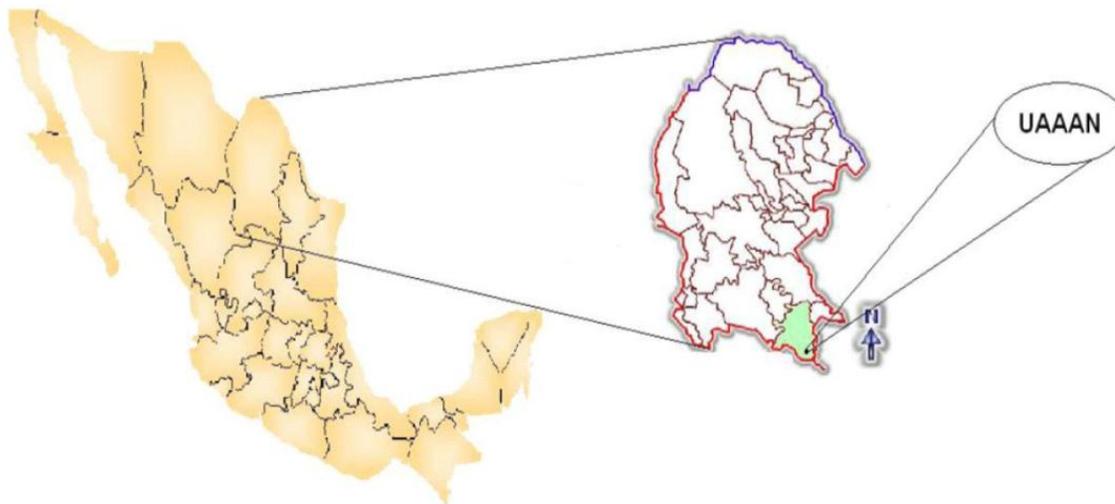


Figura 3.1 Ubicación del sitio experimental

El clima es seco y templado con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 13.3° C, con una oscilación media de 10.4°C, presentándose los meses de junio, julio y agosto como los más cálidos, con temperaturas máximas

de 37°C. En época de invierno los meses mas fríos son enero y diciembre registrándose una temperatura media de 10°C, con heladas regulares durante diciembre y febrero. Los vientos predominantes vienen del noroeste y se presentan con mayor intensidad en los meses de febrero y marzo (Mendoza, 1983).

El invernadero cuenta con 5 m de ancho por 10 de largo, es de tipo túnel, cuenta con un extractor de aire caliente en la parte oriente, malla sombra en el interior y una pared húmeda de ladrillos en la parte poniente.

Materiales

Colecta del suelo experimental

En mayo de 2011 se realizó un viaje de Saltillo, Coahuila al estado de Hidalgo para la colecta del suelo de la parcela agrícola que se ubica en el Ejido de la comunidad de Caxuxí, Municipio de San Salvador y que es propiedad del Sr. Cliserio García Azpeitia. El suelo experimental se colectó con palas y se tamizó con malla de 2 milímetros, después se envasó en costales de plástico para facilitar el traslado en camioneta hasta la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila.



Figura 3.2 Riego con aguas residuales en el ejidode CaxuxiMpio. de San Salvador, Hgo, terreno de donde se extrajo el suelo experimental.

Obtención del agua residual experimental

El traslado del agua residual se realizó en camioneta y con un tinaco con capacidad de 650 L desde la planta tratadora de aguas residuales de la escuela de nivel medio superior “SECFOR” en la ciudad de Saltillo hacia la UAAAN. Dentro de la universidad, el agua fue colocada en un contenedor de 700 L. Para facilitar su manejo se ubicó cerca de las instalaciones del invernadero en donde se llevó a cabo el experimento, en el departamento de Ciencias del Suelo.



Figura 3.3 Suministro del Agua Residual Figura 3.4 Planta tratadora “SECFOR”

Germinación de la semilla

El 10 de junio del 2011 se tamizó perlita volcánica con tamiz de 2 mm, con la que fueron rellenas 2 charolas de poliestireno con 200 cavidades previamente lavadas y desinfectadas para proseguir a la siembra de las semillas de acelga variedad Lyon, con una profundidad de 0.5 cm. Unavez terminada la siembra, dentro del invernadero las charolas fueron colocadas en cajas de madera con dimensiones de 39 x 79 cm con capacidad de 24 litros, forradas con plástico, se aplicó agua ozonizada en la producción de plántula.



Figura 3.5 Producción de plántula de acelga en el invernadero.

Métodos

Para el establecimiento del experimento se realizó un previo análisis al agua residual, para saber el aporte de metales antes de que se filtrara con arena sílica, se le agregara la solución nutritiva, O₃ y precipitadores químicos, los cuales son los tratamientos a aplicar en este experimento.

Caracterización del agua residual

Cuadro 3.1.- Características generales del Agua Residual

Análisis fisicoquímico del agua Residual			
Parámetros	Unidades	Resultados	Norma
Color	Escala Pt-Co	13	NMX-AA-45
Conductividad	µS	1125	NMX-AA-93
Sólidos totales	mg/L	836	NMX-AA-34
Potencial de hidrógeno	Unid.pH	7.56	NMX-AA-08
Sólidos disueltos totales	mg/L	835	NMX-AA-34
Alcalinidad a la ff (CaCO ₃)	mg/L	0	NMX-AA-36
Alcalinidad total (CaCO ₃)	mg/L	121	NMX-AA-36
Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	337	NMX-AA-72
Dureza de calcio (CaCO ₃)	mg/L	198	NMX-AA-72
Calcio	mg/L	79	Por cálculo
Magnesio	mg/L	33	Por cálculo
Cloruros	mg/L	75	NMX-AA-73
Sulfatos	mg/L	193	NMX-AA-74
Carbonatos	mg/L	0	Por cálculo
Bicarbonatos	mg/L	147	Por cálculo
Oxidrilos	mg/L	0	Por cálculo
Sílice	mg/L	21.8	NMX-AA-75
Nitratos (cromo N)	mg/L	0.87	NMX-AA-79
Fierro	mg/L	0.06	Std. Methods
Fosfatos (Ortofosfatos)	mg/L	4.5	NMX-AA-29

Análisis químicos del suelo experimental

Se realizaron los análisis correspondientes para la determinación del contenido de materia orgánica, pH y conductividad eléctrica en el suelo experimental, como se muestran en el Cuadro 3.1

Cuadro 3.2 Análisis químicos del suelo experimental evaluados en la caracterización inicial del experimento.

Parámetros	Símbolo	Método	Referencia
Ph	pH	Potenciómetro	InLab - 740
Conductividad eléctrica	CE	Conductivímetro	InLab - 740
Materia Orgánica	MO	Walkey y Black	Walkey y Black (1934)

Acondicionamiento del agua de riego

El agua residual ozonizada que se utilizó en este experimento, fue tratada con un generador de ozono marca Morezon 10, Ozone generator (Made in Taiwan) 10 mg / hora de O₃ (Figura 3.6).



Figura 3.6. Proceso de ozonización del agua residual.

El agua experimental filtrada que se utilizó en este trabajo fue pasada por filtros de arena sílica y colectada en garrafones de 19 litros, los filtros

consistieron en contenedores de 4 kg de arena sílica con 19 litros de agua residual por sesión (Figura 3.7).



Figura 3.7 Proceso de filtración de agua residual a través de filtro de arena sílica.

Formulación de la solución nutritiva ideal 100%

La solución madre para el cultivo de acelga se preparó tomando en consideración los siguientes aspectos: Macro y meso-elementos en base a la solución ideal del cultivo menos la concentración de los elementos que aportó el agua residual (Cuadros del 3.3 al 3.5).

Cuadro 3.3.-Formulacion de la solución nutritiva para el cultivo de Acelga

MACROELEMENTOS	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
AGUA RESID	0	0	4	2.4	2.1	0	0	4	2.8
SOLUC.IDEAL	19	2	2.2	0	0	1.25	11	9	2
APORTES	19	2	0	1.9	0	1.25	11	5	0

Las unidades están en Meq/L. Solución nutritiva ideal (Cadahía, 2000).

Cuadro 3.4. Valores de microelementos empleados en la solución nutritiva para acelga.

MICROELEMENTOS (en unidades mg/L)					
Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
2.2	0.5	0.26	0.32	0.05	0.05

Cuadro 3.5. Diseño de la solución nutritiva en aniones y cationes para acelga.

meqL-1	NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄	TOTAL
NH ₄		1.25		1.25
K	11			11
Ca	5			5
Mg				0
H	1.15	0.75		1.9
TOTAL	17.15	2	0	

En los cuadros 3.6 y 3.7 se muestra la cantidad de fertilizantes que se aportan de los macro, meso y microelementos utilizados para preparar 10 litros de la solución ideal para el cultivo de acelga.

Cuadro 3.6 Cantidad de fertilizantes (macro y meso elementos) empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga.

Fertilizantes	meqL-1	Peq	Densidad	Riqueza	Factor	mL ⁻¹	Para 10 L
HNO3	1.15	63	1.42	70	0.06	0.7	7 ml
H3PO4	0.75	98	1.7	85	0.07	0.05	0.5 ml
KNO3	11	101			0.1	1.1	11 g
Ca(NO3)2;4H2O	5	118			0.12	0.6	6 g
NH4H2PO4	1.25	115			0.12	0.15	1.5 g

Cuadro 3.7 Cantidad de fertilizantes para los microelementos empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga.

	Micronutrientes					
	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
	2.2	0.5	0.26	0.32	0.05	0.05
Requerimientos para 10 L	0.2g	0.02 g	0.03 g	0.02 g	0.006 g	0.00001 g

Fe, Zn y Cu se aplicaron como quelatos (Cosmocel[®]) y Mn como sulfato, B con ácido Bórico y Mo, como Molibdato de Amonio.

Cálculos para la determinación de la cantidad de precipitadores químicos (Ca (OH)₂ e Na (OH)) a aplicar al AR con 100% de solución nutritiva.

De acuerdo al aporte de metales pesados en AR del SECFOR, (Rascón, 2006), que se muestran en el Cuadro 3.8, se obtuvieron los miliequivalentes por litro de cada metal para obtener la cantidad deseada de precipitadores químicos a agregar al AR, para lograr el efecto precipitante de los mismos se aplicó 10 veces más la cantidad.

Cuadro 3.8. Metales pesados provenientes del AR

METALES	PPM
Cr	0.01
Hg	0.01
Cu	0.04
Ni	0.54
Zn	0.39
Fe	0.06

Cálculos

$$\text{Fórmula} = \frac{meq}{l} = \frac{ppm}{Pe}$$

$$\frac{meq}{l}$$

$$\text{Cr} = \text{Pe} = \frac{52}{2} = 26 \therefore \frac{0.01}{26} = 0.0004$$

$$\text{Hg} = \text{Pe} = \frac{200.6}{2} = 100.3 \therefore \frac{0.01}{100.3} = 0.00001$$

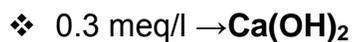
$$\text{Cu} = \text{Pe} = \frac{63.55}{2} = 31.8 \therefore \frac{0.04}{31.8} = 0.001$$

$$\text{Ni} = \text{Pe} = \frac{58.7}{2} = 29.35 \therefore \frac{0.54}{29.35} = 0.02$$

$$\text{Zn} = \text{Pe} = \frac{65.4}{2} = 32.7 \therefore \frac{0.39}{32.7} = 0.01$$

$$\text{Fe} = \text{Pe} = \frac{55.85}{2} = 27.93 \therefore \frac{0.06}{27.93} = \underline{0.002}$$

$$\Sigma = 0.03 \text{ meq / l}$$



$$Pe = \frac{74}{2} = 37 \frac{g}{eq} \rightarrow (37) \left(\frac{1eq}{1000meq} \right) = 0.037 \frac{gr}{meq}$$

$$(0.3 \frac{meq}{l}) (0.037 \frac{g}{meq}) = \mathbf{0.01} \frac{g}{l}$$

Para 10 lt de agua residual = 0.1 gr de **Ca(OH)₂**.

❖ 0.3 meq/l → **NaOH**

$$Pe = \frac{40}{1} = 40 \frac{g}{eq} \rightarrow (40) \left(\frac{1}{100} \right) = 0.04 \frac{g}{meq}$$

$$(0.3 \frac{meq}{l}) (0.04 \frac{g}{meq}) = \mathbf{0.01} \frac{g}{l}$$

Para 10 lt de agua residual = 0.1 gr de **NaOH**.

Cuadro 3.9 Cantidad de fertilizantes (macro y meso elementos) empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga más el precipitador químico Hidróxido de Calcio $Ca(OH)_2$.

Fertilizantes	meqL-1	Peq	Densidad	Riqueza	Factor	g/L	Para 10 L
HNO3	1.15	63	1.42	70	0.06	0.7	7 ml
H3PO4	0.75		1.7	85	0.07	0.05	0.5 ml
KNO3	11				0.1	1.1	11 g
Ca(NO3)2;4H2O	5				0.12	0.6	6 g
NH4H2PO4	1.25				0.12	0.15	1.5 g
Ca(OH)₂	0.3	74			0.037	0.01	0.1 g

Cuadro 3.10 Cantidad de fertilizantes (macro y meso elementos) empleados en la preparación de 10 litros de solución ideal para el cultivo de acelga más el precipitador químico Hidróxido de sodio Na(OH).

Fertilizantes	meqL-1	Densidad	Riqueza	Factor	g/l	Para 10 L
HNO ₃	1.15	1.42	70	0.06	0.7	7 ml
H ₃ PO ₄	0.75	1.7	85	0.07	0.05	0.5 ml
KNO ₃	11			0.1	1.1	11 g
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	5			0.12	0.6	6 g
NH ₄ H ₂ PO ₄	1.25			0.12	0.15	1.5 g
Na(OH)	0.3			0.04	0.01	0.1 g

Una vez obtenidas las cantidades de fertilizantes, se pesaron en la balanza analítica marca Ohaus modelo ES30R, y se agregaron a 10 litros de agua residual, contenida en garrafones de plástico de 19 L, previamente filtrada, excepto al tratamiento 1, el cual consistió en AR sin filtrar y únicamente solución nutritiva. Después se agitaron manualmente quedando listas para aplicarse como riego para las macetas experimentales.

Llenado de macetas

Se seleccionaron 24 macetas con capacidad de 2 kg, se lavaron y desinfectaron, posteriormente se llenaron con 2 kg de suelo experimental previamente tamizado a 2mm proveniente del estado de Hidalgo. Después se colocaron dentro del invernadero en 3 filas, en la primera y segunda se

colocaron 10 macetas y en la tercera fila 4 macetas, estas últimas correspondían a los testigos (Figura 3.8).



Figura 3.8. Llenado de macetas.

Trasplante

El 29 de junio de 2011, una vez desarrolladas las plántulas aptas para el trasplante, se extrajeron de las charolas de poliestireno y se plantaron en el sustrato experimental. Las macetas fueron etiquetadas con el tratamiento y repetición de la unidad experimental.

Después del trasplante se les aplicó el primer riego con las soluciones experimentales, la cantidad de solución a aplicar fue de 200 ml por maceta, excepto las plantas testigo que fueron regadas con agua de la llave en la misma proporción de líquido (Figura 3.9).



Figura 3.9. Trasplante de plántula a macetas y aplicación del primer riego y tratamiento.

Diseño del experimento

En el Cuadro 3.11 se describen los 5 tratamientos y el testigo de acuerdo a la solución nutritiva y tipo de tratamiento de agua, en un diseño completamente al azar, con 4 repeticiones. La distribución aleatoria de los cinco tratamientos, fueron aplicados a las unidades experimentales, las cuales fueron las plantas de acelga.

Cuadro 3.11. Lista de tratamientos aplicados al agua residual utilizados en el riego del cultivo de acelgas.

Tratamiento	Agua residual o agua corriente	Solución Nutritiva + Precipitador Químico u (O_3).
1	Sin filtro de arena sílica	Solución nutritiva al 100%
2	Con filtro de arena sílica	Solución nutritiva al 100%
3	Con filtro de arena sílica	Solución nutritiva al 100% + $Ca(OH)_2$
4	Con filtro de arena sílica	Solución nutritiva al 100% + $Na(OH)$
5	Con filtro de arena sílica	Solución nutritiva al 100% + O_3
6	Agua corriente	

Manejo del cultivo

Una vez establecido el cultivo bajo condiciones de invernadero se colocaron en las macetas de las plantas testigo dos tensiómetros para monitorear la necesidad hídrica del cultivo. En los primeros 28 días después del trasplante, se aplicó con una probeta graduada un riego de 200 ml de las soluciones experimentales cada tercer día, exceptuando a las plantas testigo, a las que solo se les aplicó agua corriente.

El 27 de julio del 2011 se inició el riego de forma diaria hasta el penúltimo día de la cosecha, debido al crecimiento y desarrollo positivo de la planta y en consecuencia se incrementó la demanda de agua y nutrimentos. Se presentó una infestación de áfidos en las plantas testigo, los cuales se trataron con espuma de agua con detergente.

Cosecha

El día 19 de Agosto del 2011 se realizó la cosecha de forma manual; se disectaron con unas tijeras de jardín las hojas de la planta para facilitar su manejo en la evaluación de las variables agronómicas.

Variables evaluadas al final del cultivo

Para cada uno de los tratamientos se evaluaron las siguientes variables en el cultivo:

- Análisis de presencia de metales pesados y elementos de importancia agrícola en tejido vegetal, suelo y agua (Cuadro 3.12). Para esto se uso Espectrofotómetro de absorción atómica del Departamento de Ciencias del Suelo en la UAAAN mediante una solución de HCL 0.05 N + H₂SO₄ 0.025N como soluciones extractoras; en una relación suelo - solución-extractora de 1:4, y el tiempo de agitación fue de 15 min(Wear y Evans, 1968.)

Cuadro 3.12. Metales a evaluar en tejido vegetal, agua y suelo.

METAL PESADO	ELEMENTO DE IMPORTANCIA AGRICOLA
Cromo	Calcio
Cadmio	Magnesio
Níquel	Sodio
Plomo	Potasio
	Hierro
	Zinc
	Cobre

Las lecturas reportada por el espectrofotómetro del contenido del elemento de interés venían expresadas en microgramos por mililitro de

disolución y este valor fue multiplicado por 100 mililitros (volumen de la 1ra disolución), y el resultado dividido entre la masa de tejido vegetal empleada como muestra origen (siempre fue 2 gramos de peso seco del tejido vegetal). Estos valores resultantes (μg de elemento/ gr de peso seco del tejido vegetal) fueron los empleados para hacer los análisis de varianza respectivos.

Variables agronómicas.

- Altura de la planta (ALP)

Las 24 macetas se sacaron del invernadero y se llevaron al laboratorio de Planeación Ambiental y Edafología del Depto. de Ciencias del Suelo y se colocaron en una mesa por tratamiento y repeticiones. Después se tomó la altura de cada planta, desde la base del pecíolo de las hojas hasta el ápice del limbo más alto y se realizó el concentrado de datos para el análisis estadístico correspondiente a esta variable.

- Numero de hojas (NH)

Se contaron de forma manual todas las hojas, chicas y grandes de cada planta.

- Numero de hojas comerciales (NHC)

En esta variable se consideraron las hojas más grandes de aspecto comercial, el conteo fue de forma manual.

- Peso Fresco (PF)

Se disectaron las hojas desde la base de la planta, con unas tijeras de jardín para después pesarlas en una balanza marca Ohaus modelo ES30R.

- Área Foliar Total (AFT)

En el laboratorio de Fisiología Vegetal del departamento de Botánica se realizaron las mediciones del área foliar, considerando a todas las hojas de la planta, la medición se realizó con un medidor de área foliar modelo LI3100.

- Área Foliar Comercial (AFC)

En esta variable se consideraron únicamente las hojas más grandes y de aspecto comercial para medirles el área foliar con el medidor antes mencionado en el laboratorio de Fisiología vegetal del departamento de Botánica.

- Peso Seco (PS)

Después de que se realizó la evaluación de las variables arriba mencionadas se lavaron las hojas, se colocaron en bolsas de papel estraza perforadas y etiquetas con sus respectivos tratamiento y se colocaron en una estufa de secado "Boekel" Mod 131400 a 65°C y 70° C por 48 horas, posteriormente se pesaron con una balanza marca Ohaus modelo ES30R.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un análisis estadístico para los resultados obtenidos en este experimento utilizando el programa "Statistical Product and Service Solutions". En el cuadro 4.1 se muestra una correlación de las variables evaluadas en este trabajo.

El análisis estadístico de la variable altura de la planta (ALP) no mostró diferencias significativas para cada uno de los tratamientos, esto quiere decir que ninguno de los tratamientos aplicados al cultivo influyó de manera positiva sobre esta variable.

Por su parte, Ramírez y Pérez,(2006), en un estudio realizado con la aplicación de biosólidos obtenidos de una planta tratadora a un cultivo de rábano, demostró que la altura de la planta tuvo un incremento significativo; mientras que Mañas *et al.*, (2002), en un cultivo de lechuga regada con agua residual y agua corriente, no encontró diferencias significativas en la altura de la planta.

La correlación estadística que existe entre la variable Numero de Hojas (NH) y Área Foliar Total (AFT) es altamente significativa ($r = 65\%$) por lo que a mayor producción de hojas mayor área foliar se tendrá. Dato contrario

encontrado por Ramírez y Pérez, (2006), quienes encontraron que con la aplicación de biosólidos al cultivo de rábano disminuye el NH y en consecuencia el AFT. Azcon y Talon, 2000 mencionan que esto pudo haberse debido a las altas concentraciones de fósforo (933 ppm) y Zinc (43.8 ppm) presentes en el biosólido, y explica que, el exceso tanto las deficiencias de estos nutrientes pueden ocasionar disminuciones en el crecimiento de las plantas

En cuanto a la correlación que existe entre el NH y el Peso Fresco (PF) es altamente significativa ($r=67\%$). Dato similar encontrado por Ramírez y Pérez, (2006), en el cultivo de rábanos en donde las plantas a mayor producción de hojas mayor peso fresco se obtuvo, mientras que Mañas *et al.*, (2002). en el cultivo de lechuga no encontraron diferencias significativas en cuanto a peso fresco.

La correlación que existe entre el NH y el Peso Seco (PS) es altamente significativa ($r= 59\%$) por lo que a mayor NH, mayor PS se obtiene en el cultivo de acelga. Ramírez y Pérez, (2006), en el cultivo de rábanos, menciona que obtuvo un mayor incremento de hojas y peso seco. Mientras que en un cultivo de lechuga no se observó diferencias significativas en cuanto a peso seco (Mañas *et al.*, 2002).

La correlación que existe entre el número de hojas comerciales (NHC) y el área foliar comercial (AFC) es altamente significativa ($r= 78\%$) por lo que a mayor NHC, mayor AFC se tendrá. Ramírez y Pérez, (2006), en el cultivo de rábano también encontró un incremento de área foliar.

La correlación que existe entre el AFT y el AFC es altamente significativa ($r=65\%$) lo cual quiere decir que a mayor AFT mayor AFC se obtendrá en el cultivo de acelga.

La correlación que existe entre el AFT y el Peso Fresco (PF) es altamente significativa ($r=92\%$), por lo que a mayor AFT mayor PF se obtuvo. Por su parte (Mañas *et al.*, 2002) en el cultivo de lechuga no encontró diferencias significativas en el peso fresco.

La correlación estadística que se observó entre el AFC y el PS fue altamente significativa ($r=84\%$) por lo que a mayor AFC mayor PS se obtuvo. Ramírez y Pérez, (2006), encontró mayor AF y por lo tanto también mayor PS en el cultivo de rábano. Mientras que (Mañas *et al.*, 2002). En el cultivo de lechuga no encontró diferencias significativas en el peso fresco.

La correlación estadística que existe entre el PF y el PS es altamente significativa ($r=91\%$). Pues es proporcional el PF al PS.

Correlación con metales pesados

La correlación estadística que se observa entre el zinc (Zn) y el calcio (Ca) es altamente significativa ($r= 61\%$). Puesto que al aplicar CaOH_2 se regula el pH en el suelo y esto mejora la disponibilidad el Zn en el suelo para las plantas. (Borges *et al*, 1983).

La correlación que existe entre el Zn y el Potasio (K) es altamente significativa ($r= 54\%$).

Correlación con elementos de importancia agrícola

Existió una correlación altamente significativa entre el Ca y el Mg ($r=64\%$). La aplicación de CaOH_2 y las concentraciones de Mg contenidas en la solución nutritiva, según García *et al*, (2006) dicen que utilizar aguas duras con alta concentración de HCO_3 , Ca y Mg condiciona los procesos de solubilización y la concentración de sales y, por tanto, los productos de formación a producirse. Los procesos de humedecimiento y secado, lavado-transpiración y la absorción de agua por las plantas causa concentración de la solución del suelo y precipitación de sólidos de acuerdo con su producto de solubilidad. Así se

espera que los carbonatos de calcio y magnesio con muy baja solubilidad en agua, sean en su orden los primeros en formarse y el sulfato de Mg debido a su alta solubilidad permanezca en solución. Tal vez esta sea la causa de que se haya observado una correlación altamente significativa entre el Ca y Mg en este trabajo.

Cuadro 4.1 Matriz de correlación de las variables evaluadas.

	AFT	AFC	PF	PS	Ca	Mg	Na	K
ALP								
NH	0.651**		0.673**	0.590**				
NHC		0.789**						
AFT		0.652**	0.926**	0.842**				
AFC			0.636**	0.553**				
PF				0.912**				
PS								
Zn					0.610**			0.543**
Ca						0.643**	0.422*	
Mg							0.570**	

ALP= Altura de la Planta; NH= Numero de Hojas; NHC=Numero de Hojas Comerciales; AFT= Área Foliar Total; AFC = Área Foliar Comercial; PS = Peso Seco; PF = Peso Fresco; Zn = Zinc; Ca = Calcio; Mg = Magnesio; Na = Sodio; K = Potasio; ** = Valores Altamente Significativos al 0.01 (Pearson); * = Valores Significativos al 0.05 (Pearson).

Análisis de varianza de las variables evaluadas

En el Cuadro 4.2 se muestran los cuadrados medios y las significancias de las variables evaluadas en el experimento.

En primer lugar para la fuente de variación Tratamientos el comportamiento de las variables en el análisis estadístico fue diferente, sin que se observara una tendencia clara en algunas de ellas. Para las variables AFT, PF y PS presentaron diferencias altamente significativas, mientras que para las variables AFC, Ca, Mg y Na presentaron diferencias significativas y por último las variables ALP, NH, NHC, Zn, Fe y K, no tuvieron diferencias significativas;

Este comportamiento fue debido a que los tratamientos aplicados al agua residual fueron diferentes entre ellos, como por ejemplo la aplicación de O₃ y el filtrado con arena sílica, son tratamientos diferentes y por lo tanto no existen efectos similares para las variables evaluadas.

El coeficiente de variación (CV) para las características evaluadas varió de 7.2 por ciento para el potasio encontrado en planta a 52.6 por ciento para el hierro y un promedio general de un 20 por ciento para el experimento, dando a entender que todas las variables del experimento poseen un porcentaje aceptable de dispersión en torno a sus valores medios.

Cuadro 4.2 Cuadrados medios y significancias para las variables evaluadas en el análisis de varianza en plantas de acelga (*Beta vulgaris* Var. Lyon) regada con agua residual.

F.V.	G.L.	ALP	NH	NHC	AFT	AFC	PF	PS	Zn	Fe	Ca	Mg	Na	K
T	5	5.19 ^{NS}	6.66 ^{NS}	2.74 ^{NS}	5140324.30**	556561.12*	943.53**	32.36**	0.01 ^{NS}	0.56 ^{NS}	0.03 *	0.04 *	0.01 *	0.00 ^{NS}
C.V. (%)		10.66	14.22	20.1	23.97	21.64	25.25	27.02	25.78	52.65	11.7	13.42	5.44	7.27

F.V.=Fuente de Variación; G.L.=Grados de Libertad; T=Tratamientos; ALP= Altura de la Planta; NH= Numero de Hojas; NHC=Numero de Hojas Comerciales; AFT= Área Foliar Total; PF= Peso Fresco; PS= Peso Seco; Zn = Zinc; Fe= Hierro; Ca= Calcio; Mg = Magnesio; Na = Sodio; K = Potasio ; C.V.= Coeficiente de Variación; N.S.= No Significativo; * = Significativo al 0.05 (Tukey); **= Altamente Significativo al 0.01 (Tukey)

Datos de Ca, Mg, Na y K transformados mediante la función de arcoseno \sqrt{X} , con la finalidad de que se observara una normalidad entre los mismos, pues presentaban cierta variabilidad, debido a la diferencia entre tratamientos. (Reyes. 1982).

VARIABLES AGRONÓMICAS

Área foliar total

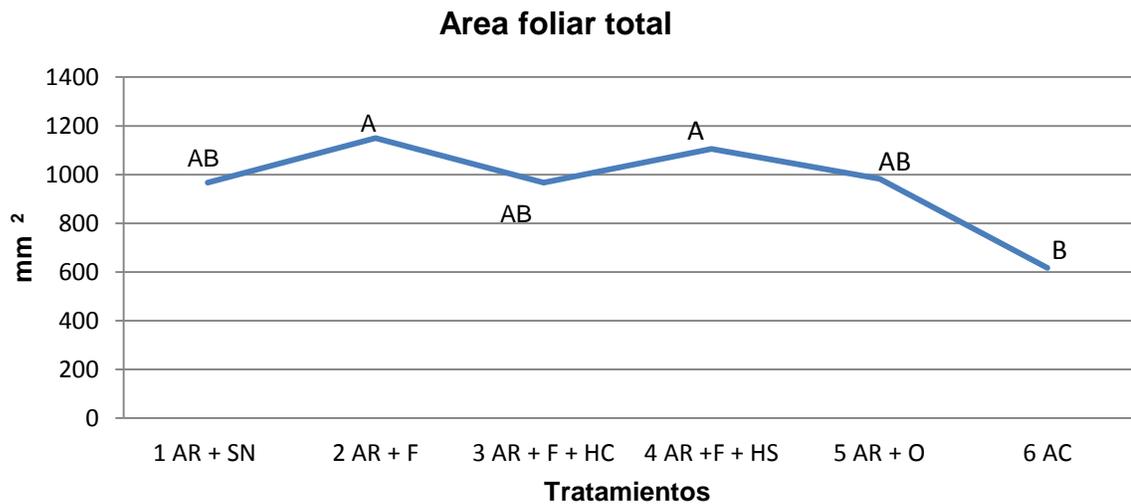


Figura 4.1. Efecto de los tratamientos y comportamiento del área foliar total.

En la figura 4.1 se observa que en el primer grupo estadístico, el cual consiste en los los primeros 5 tratamientos indujeron a una producción ($r = 1150.14$ mm) significativa del área foliar en el cultivo de acelga en comparación con las plantas testigo que corresponden al tratamiento 6, con un valor total de 617.22 mm de área foliar total de acelgas. Esto quiere decir que el efecto de los acondicionantes que se aplicaron al AR es el mismo en cuanto a la producción de área foliar total.

Morales *et al.*, (1992) en una investigación realizada con el cultivo de tomate regado con aguas negras observaron un aumento constante en el área foliar a diferencia de las plantas testigo.

Área foliar comercial

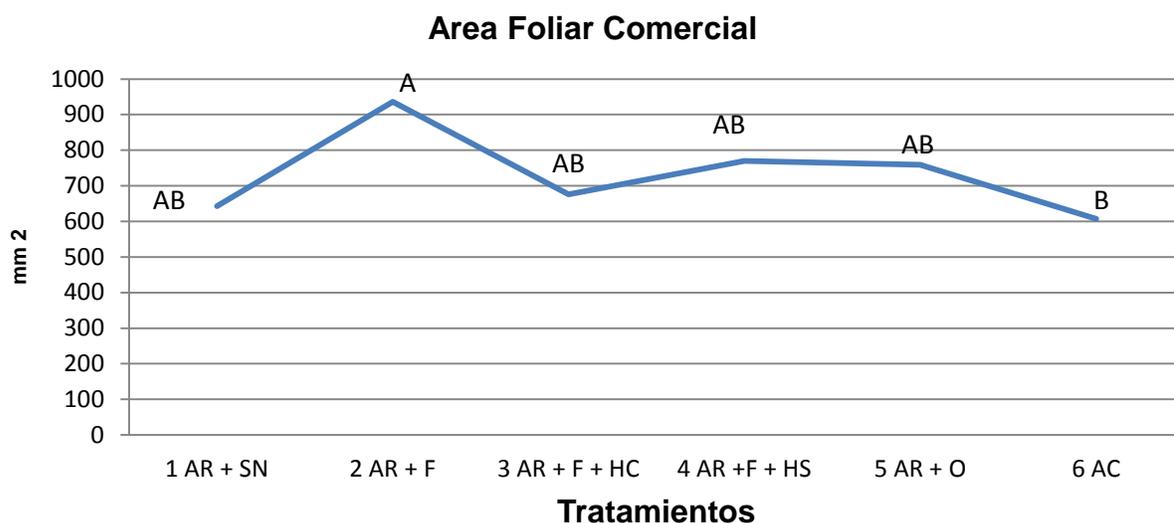


Figura 4.2. Efecto de los tratamientos y comportamiento del área foliar comercial.

En la figura 4.2 se observa el mismo efecto que se observó en el AFT con el área foliar comercial, los tratamientos aplicados al cultivo de acelga indujeron a una producción de área foliar significativa en comparación con el testigo.

Peso fresco

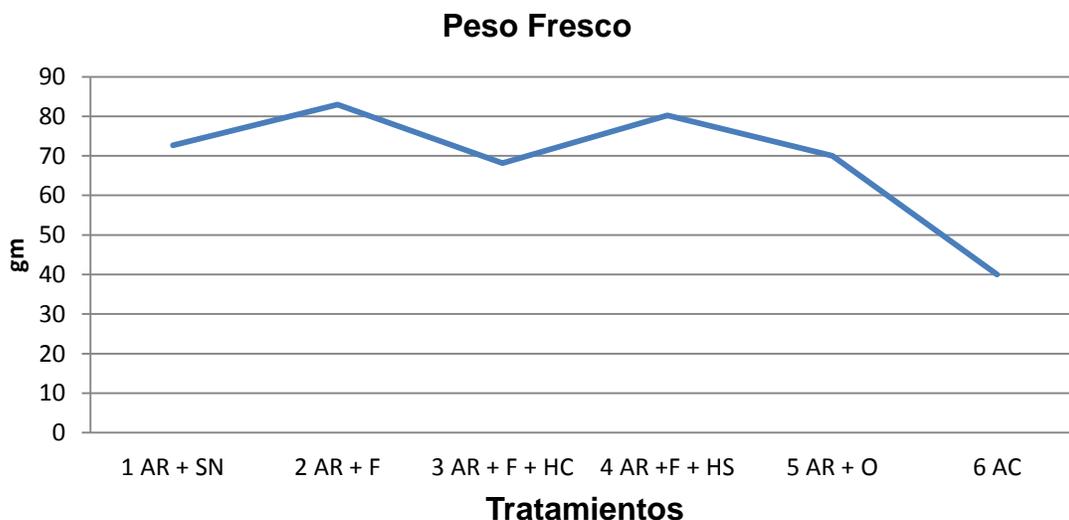


Figura 4.3 Efecto de los tratamientos y comportamiento del peso fresco en el cultivo de acelga.

En la figura 4.3 se observa que las plantas de acelga obtuvieron un peso fresco significativo ($r = 83$ g, T2) siendo regadas con el AR tratada a diferencia de las plantas testigo, quienes presentaron el menor peso fresco ($r = 40$ g).

Morales *et al.*,(1992) en el cultivo de tomate regado con aguas negras observaron en la primera cosecha un incremento significativo en el peso fresco más sin embargo éste fue disminuyendo gradualmente hasta la última cosecha.

Peso seco

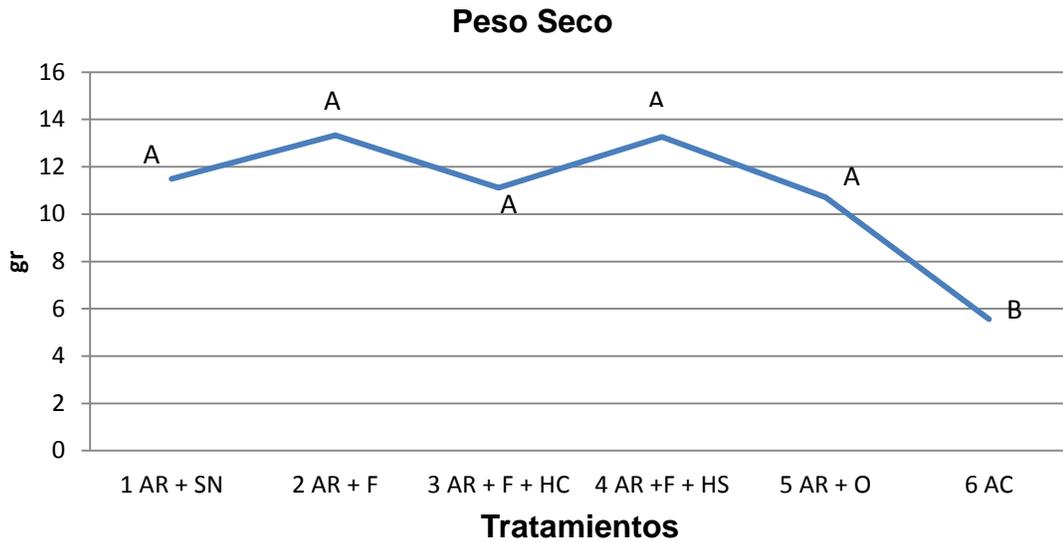


Figura 4.4. Efecto de los tratamientos aplicados en el cultivo de acelga en cuanto a la variable peso seco.

Para la variable peso seco, se puede observar en la Figura 4.4 que la aplicación de agentes acondicionantes al AR produce un efecto significativo en el peso seco del cultivo de acelga en comparación con las plantas testigo.

Castro *et al*, (2000) en un cultivo de lechuga regadas con aguas residuales y agua potable como testigo, observaron diferencias altamente significativas pues las plantas regadas con agua potable alcanzaron un valor medio de 23.8 gr y las regadas con agua residual su valor medio fue de 40.53 gr.

Elementos encontrados en el tejido vegetal del cultivo de acelgas.

Cuadro 4.3. Cuadrados medios y significancias para elementos encontrados en el tejido de acelga, regada con AR tratada

F.V.	G.L.	Zn	Fe	Ca	Mg	Na	K
T	5	35.00 ^{NS}	1416.66 ^{NS}	17591654 *	15710413 *	12799795 *	4325171 NS
C.V. %		28.73	51.54	19.77	20.21	8.41	15.19

F.V.= Fuente de Variación; G.L.= Grados de Libertad; T=Tratamientos; Zn = Zinc; Fe = Hierro; Ca = Calcio; Mg = Magnesio; Na = Sodio; K = Potasio; C.V.= Coeficiente de Variación; N.S.= No Significativo; * = Significativo al 0.05 (dms).

En el Cuadro 4.5 se muestran los cuadrados medios y las significancias de las variables evaluadas en el experimento, las unidades de los elementos Zn, Fe, Ca, Mg, Na y K fueron transformados de $\mu\text{g/ml}$ a mg/kg . En primer lugar para la fuente de variación Tratamientos el comportamiento de las variables en el análisis estadístico fue diferente, sin que se observara una tendencia clara en algunas de ellas.

Este comportamiento fue debido a que los tratamientos aplicados al agua residual fueron diferentes entre ellos, por lo tanto, no existen efectos similares para las variables evaluadas.

El coeficiente de variación (CV) para las características evaluadas varió de 8.4 por ciento para el sodio encontrado en planta a 51.54 por ciento para el hierro y un promedio general de un 24 por ciento para el experimento, dando a entender que todas las variables del experimento poseen un porcentaje aceptable de dispersión en torno a sus valores medios.

Dado el riesgo que supone la presencia de metales pesados en el suelo para la salud humana es importante conocer las posibles rutas de exposición, si bien el riesgo es mayor para las que están directamente conectadas con la cadena trófica.

Correlación de elementos presentes en planta, suelo y agua

Cuadro 4.4 Correlación de elementos presentes planta, suelo y agua.

ELEMENTOS EN SUELO	ELEMENTOS EN PLANTA					
	Zn	Fe	Ca	Mg	Na	K
Zn	0.938					
Fe		-0.372				
Ca			0.637			
Mg				-0.007		
Na					-0.664	
K						0.022
ELEMENTOS EN AGUA						
	Zn	Fe	Ca	Mg	Na	K
Zn	0.701					
Fe		0.727				
Ca			0.697			
Mg				0.396		
Na					-0.453	
K						0.099

La absorción de metales por parte de las plantas está condicionada por el elemento, su concentración y disponibilidad, especie vegetal y su interacción con macronutrientes del suelo (Felipó, 2001).

Metales pesados en planta

Los metales pesados detectados mediante espectrofotometría en el tejido de la planta, únicamente fueron Zn y Fe. El análisis estadístico de esta presencia se realizó con el programa de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Olivares, 1994) y se expresan de la siguiente forma:

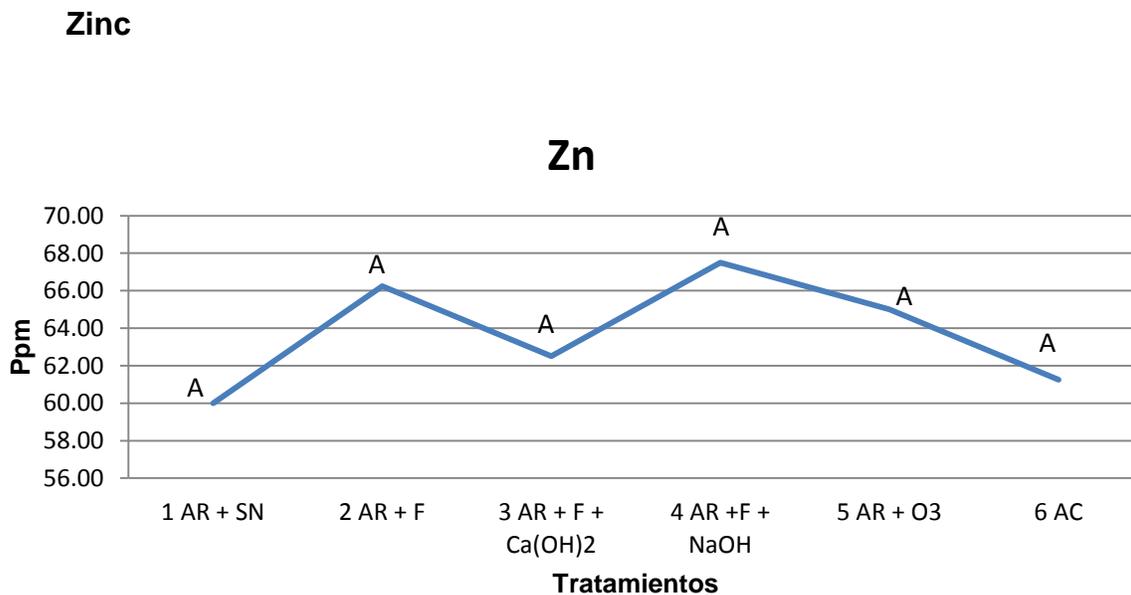


Figura 4.5. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento Zn en el tejido vegetal del cultivo de acelga.

En la Figura 4.5 se observa el efecto de los tratamientos aplicados al cultivo de acelga y el elemento Zn en el tejido vegetal. Como se puede observar el nivel más alto de Zn encontrado en este trabajo es de 66.25 ppm en acelga para el tratamiento 2 y 67.5 ppm para el tratamiento 4 y el nivel más bajo de Zn es de 60 ppm para el tratamiento uno, sin mostrarse diferencias significativas entre los tratamientos.

En una evaluación de metales pesados en un cultivo de remolacha, la cual fue cultivada con residuos urbanos en composteados, no encontraron diferencias significativas para el Zn en el tejido vegetal de la planta (Navarro, *et al.*, 2006).

De acuerdo a Reuter and Robinson (1986), el nivel de Zn normal en la acelga es de 35 ppm; de modo que en esta investigación, los niveles de este elemento excedieron tal contenido en un rango, desde (71.42 – 89.28 %), para el tratamiento a base de agua corriente y para el agua residual filtrada y adicionada con NaOH; respectivamente.

Ciebe (1990) en un análisis realizado a un cultivo de alfalfa regada con AR en Tula, Hgo, encontró Zn dentro de los niveles nutricionales “suficientes”. Por su parte, Navarro *et al.*, (2006), en un cultivo de remolacha, aplicaron residuos urbanos composteados y encontraron Zn en las hojas en la cantidad de 32.71 ppm.

En esta investigación se realizó una correlación entre los elementos encontrados en el tejido vegetal, suelo y agua, demostrando que a mayor presencia del elemento Zn en el suelo, mayores cantidades de Zn serán absorbidos por la planta (Coeficiente de correlación =0.9387), de la misma manera para éste elemento encontrado en el agua. Se encontró que a mayor presencia de Zn en el afluente, mayor cantidad de Zn fue absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = 0.7016).

Mientras que Siebe (1994) a evaluar metales pesados en un cultivo de alfalfa sembrada en suelos regados con agua residual y como testigo agua de pozo, encontró mayor cantidad de Zn en las plantas regadas con agua residual y en menor proporción las que fueron regadas con agua de pozo.

En esta misma investigación se realizó un análisis de regresión múltiple en donde se consideró el tipo de riego y suelo y se notó una influencia altamente significativa para el contenido de Zn en el tejido vegetal.

Hierro

El nivel más alto de Fe encontrado en este trabajo es de 100 ppm en el tratamiento 3 y el nivel más bajo de Fe es de 50 ppm para los tratamientos 5 y 6, sin mostrarse diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 4.6).

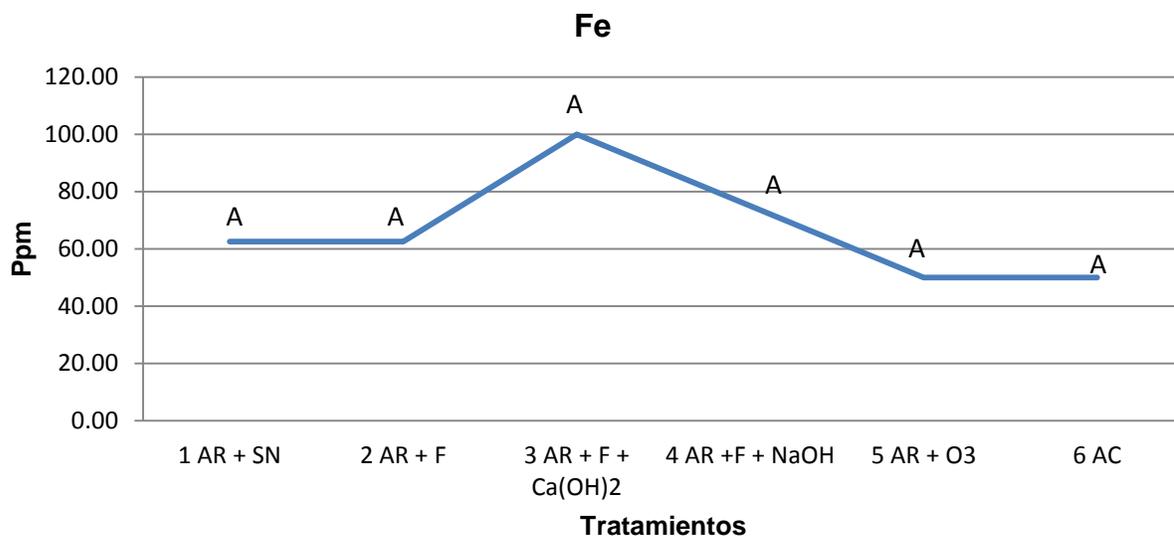


Figura 4.6. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento **Fe** en el tejido vegetal del cultivo de acelga.

Dado que el nivel normal de Fe en la planta es de 200 ppm (Reuter and Robinson, 1986), en esta investigación la cantidad máxima de Fe encontrada se quedó en un 50% del nivel manejado por éstos autores (AR filtrada con SN al 100% adicionada con Ca(OH)₂), siendo en el resto de tratamientos las acumulaciones mucho menores.

Dato contrario para un cultivo de remolacha con residuos urbanos composteados, donde el nivel de Fe encontrado en este trabajo fue de 237.4 ppm en el tejido vegetal dando a entender que las hojas de éste cultivo no presentan problemas de acumulación del elemento y en donde afirman que el Fe tiene un comportamiento diferente en el suelo porque forma parte de los constituyentes del suelo como oxi – hidróxidos de Fe con equilibrios de solubilidad directamente influenciados por factores edáficos como pH, la presencia de ligandos orgánicos, etc. (Navarro, *et al.*, 2006).

Se realizó una correlación entre los elementos encontrados en el tejido vegetal, suelo y agua, demostrando que a menor presencia de Fe en el suelo, menor cantidad de éste elemento será absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = - 0.3720).

En cuanto al Fe encontrado en el agua, se encontró que a mayor presencia de Fe en el agua de riego, mayor cantidad de Fe fue absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = 0.7272).

Sin embargo en el cultivo de la remolacha con residuos urbanos composteados se observa mayor contenido de Fe en el suelo pero debido a su solubilidad y biodisponibilidad limitada, se encontró dentro de los niveles normales (237.4 ppm) Navarro *et al.* (2006).

Elementos de importancia agrícola en planta

A continuación se exponen la presencia de los elementos de importancia agrícola que se presentaron en la planta: Ca, Mg, Na y K.

Calcio

La figura 4.7 muestra que el nivel más alto de Ca fue de 14,375 ppm (1.43 %) para el tratamiento 3 (AR filtrada con arena sílica, SN adicionada con

Ca(OH)₂ mientras que el valor más bajo fue de 9000 ppm (0.90%) con solo agua corriente.

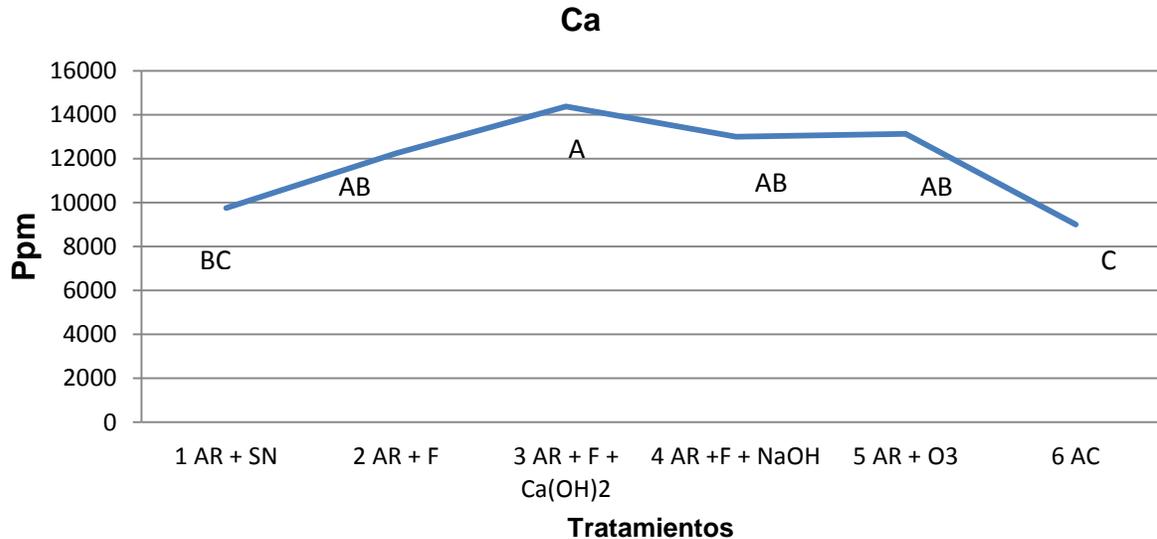


Figura 4.7. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento **Ca** en el tejido vegetal del cultivo de acelga.

Aunque Reuter and Robinson, (1986) reportan que el nivel normal de Ca en planta es de 35,000 ppm, en esta investigación la cantidad máxima encontrada se quedó en un 41.07% del nivel manejado por éstos autores (AR filtrada con SN al 100% adicionada con Ca(OH)₂), siendo en el resto de tratamientos las acumulaciones mucho menores.

Cuevas y Walter, (2004) en un cultivo de maíz en donde se le aplicó composta de lodo residual, encontraron 2,510 ppm de Ca en el tejido vegetal, además no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados.

La correlación del elemento Ca en suelo y agua fue de carácter positivo a la presencia del elemento en el tejido vegetal en valores de 0.63 y 0.70, respectivamente.

Como respaldo a esto, Rincón *et al.*, (1999) estudiaron y cuantificaron el crecimiento vegetativo y absorción de nutrientes en un cultivo de Brócoli, en donde mostraron tener una correlación positiva en la absorción del calcio proveniente del suelo y agua hacia el tejido vegetal.

Magnesio

El nivel más alto de Mg encontrado en este trabajo es de 12,750 ppm (1.28 %) para el tratamiento 5 y el nivel más bajo de Mg es de 7,500 ppm (0.75 %) para el tratamiento 1, mostrando una diferencia significativa entre tratamientos (Figura 4.8).

Mientras que el nivel normal de Mg en la planta es de 8,000 ppm (Reuter and Robinson, 1986), en esta investigación, el valor más alto de Mg excedió el nivel normal en el tejido en un rango del 59.3 % para la aplicación de AR+ filtro + SN + O₃(T5); mas sin embargo, las plantas regadas con agua corriente (T6), presentaron Mg dentro de los niveles normales (8,375 ppm).

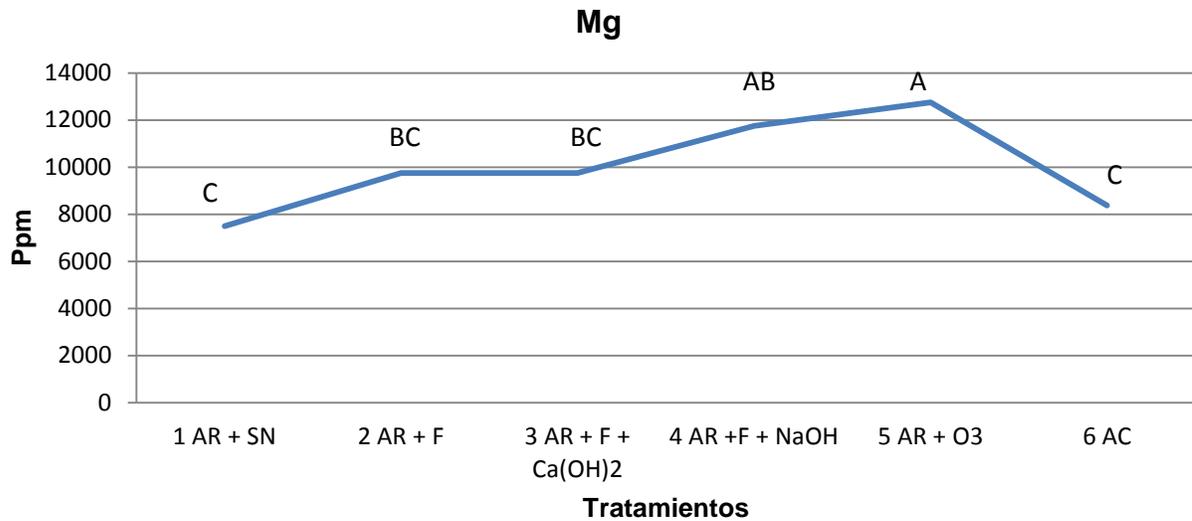


Figura 4.8 Efecto de los tratamientos y presencia del elemento **Mg** en el tejido vegetal del cultivo de acelga.

En una investigación realizada con el cultivo de lechuga regada con agua residual y agua potable como testigo para evaluar la posibilidad de su uso en cultivos de hortalizas encontraron Mg en el tejido vegetal dentro de los niveles normales (Mañas *et al.*, 2002).

Para la correlación que se realizó entre los elementos encontrados en el tejido vegetal, suelo y agua, demostraron que a menor presencia del elemento Mg en el suelo, mayores cantidades de Mg fueron absorbidos por la planta (Coeficiente de correlación = -0.0070). De la misma forma para el Mg en el agua, se encontró que a mayor presencia de Mg en el afluente, mayor cantidad de éste elemento fue absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = 0.3965).

En un análisis de la evolución del crecimiento vegetativo y absorción de macronutrientes de un cultivo de brócoli mediante fertirrigación encontraron una menor absorción del elemento Mg proveniente del suelo y agua (Rincón *et al.*, 1999).

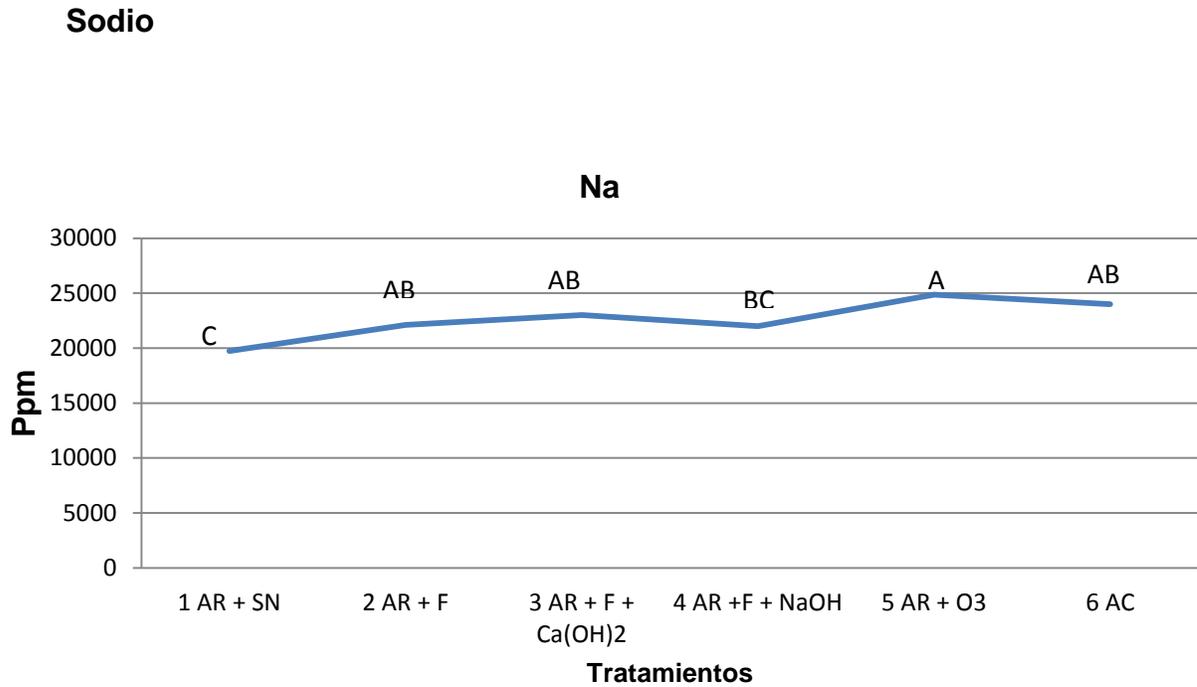


Figura 4.9. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento **Na** en el tejido vegetal del cultivo de acelga.

El nivel más alto de Na encontrado en este trabajo es de 24,875 ppm (2.48%) en el tratamiento 5 y el nivel más bajo fue de 19,750 ppm (1.97%) para el tratamiento 1, mostrando una diferencia significativa entre tratamientos (Figura 4.9).

Se evaluó la fitotoxicidad de distintos residuos orgánicos en un cultivo de lechuga, en donde no encontraron diferencias significativas en el Na encontrado en el tejido vegetal (Celis *et al.*, 2007).

Mientras que Reuter and Robinson, (1986) dicen que los niveles normales de Na en el tejido de la planta deben ser de 34,200 ppm, en esta investigación la cantidad máxima quedó en un 72.73% del nivel manejado por estos autores (AR + filtro + SN + O₃), y mostrando una cantidad menor en los demás tratamientos.

Para la correlación que se realizó entre los elementos encontrados en el tejido vegetal, suelo y agua, demostraron que a menor presencia del elemento Na en el suelo, mayores cantidades de Na son absorbidos por la planta (Coeficiente de correlación = -0.6642). De la misma forma para éste elemento en el agua, se encontró que a menor presencia de Na en el AR, mayor cantidad del mismo fue absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = -0.4534).

Dato contrario encontrado por Celis *et al.*, (2007) en donde la aplicación de lodos orgánicos a un cultivo de lechuga el Na tuvo una escasa respuesta en la absorción, pues argumentan que las plantas absorben mejor el ion K⁺ en lugar del ion Na, fenómeno típico en suelos con baja fertilidad.

Potasio

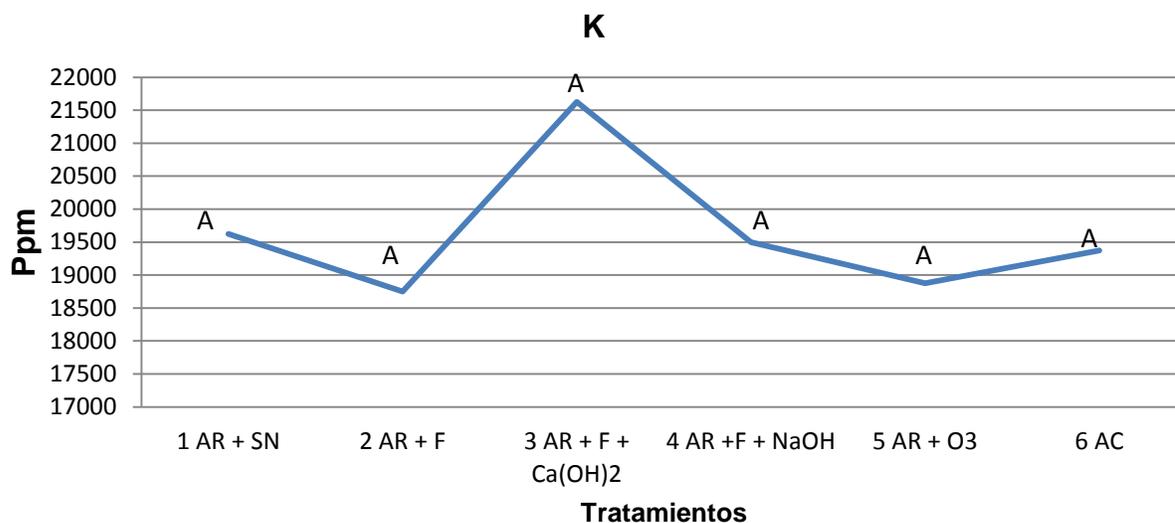


Figura 4.10. Efecto de los tratamientos y presencia del elemento **K** en el tejido vegetal del cultivo de acelga.

El nivel más alto de K encontrado en este trabajo es de 21 625 ppm (2.16%) en el tratamiento 3 y el nivel más bajo es de 18 750 ppm (1.88%) para el tratamiento 2, sin mostrar diferencias significativas entre tratamientos (Figura 4.10).

Aunque Reuter and Robinson, (1986) reportan que los niveles normales de K en el tejido de la planta son de 40 000 ppm, en esta investigación la cantidad máxima se quedó en un 54 % del nivel manejado por estos autores (AR+ filtro + SN + Ca(OH)₂) quedando el resto de los tratamientos en niveles mas bajos.

Se evaluó la aplicación de lodos provenientes de residuos orgánicos ricos en K en un cultivo de lechuga, en donde produjo un efecto positivo y significativo de este nutriente en las partes aéreas de la planta (Celis *et al.*, 2007).

Según la correlación para los elementos encontrados en el tejido vegetal, suelo y agua, se observa una ligera relación donde a mayor presencia del elemento K en el suelo, mayor cantidad del elemento fue absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = 0.0227), de la misma forma para éste elemento en el agua, se encontró que a mayor presencia de K en el agua de riego mayor cantidad del mismo es absorbido por la planta (Coeficiente de correlación = 0.0992).

V.- CONCLUSIÓN

De los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que el agua residual experimental es apta para el uso en el riego agrícola para la producción del cultivo de acelga sin necesidad de ser tratada con los acondicionantes evaluados.

VI.- PERSPECTIVAS

Se recomienda hacer análisis de la raíz de la planta para conocer el contenido de elementos que pudieran quedarse retenidos por ésta parte de la planta.

Se recomienda que antes de realizar el filtrado del AR, primero se agreguen los precipitadores químicos y después realizar el filtro para que en éste retenga los elementos ya precipitados.

Se recomienda hacer un análisis de la arena sílica que se utilizó para la retención de elementos pesados, para saber que porcentaje de éstos fueron retenidos por el material.

Se recomienda hacer un análisis del beneficio costo de los precipitadores empleados en esta investigación para conocer la factibilidad en otras entidades.

VII.- LITERATURA CITADA

- Angelova, V. Ivanova, R. y Ivanov, K..2005. Geophysical Reseach Abstracts, Vol. 7, 03931, SRef-ID:1607-7962/gra/EGU05-A-03931.
- Azcon, J. y Talon, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid: Editorial Interamericana McGall Hill. 704 p.
- Basta, N.T., and M. A. Tabatabai. 1991. Determination of total metals in sewage sludges by Ion Chromatography. J. Environ. Quality 20: 79-88.
- Bergmann, W. and Neubert, P. 1976. Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. VEB Gustav Fischer, Jena, pp 559 – 564.
- Bernal, M., Clemente, R., Vázquez, S. y Walker, D. 2007. Aplicación de fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados enAznaIcállar.Ecosistemas 16 (2): 67-76.
- Bitton, G. 1994. Wasterwater Microbiology. J. Wiley & Sons Inc. New York, N.Y. 478 P.
- Borges, A., Trujillo, I., Gutiérrez, F. y Angulo, A. 1983. Estudios sobre el mal de Panamá en las Islas Canarias. II.- Influencia de los desequilibrios nutritivos P-Zn y K- Mg del suelo, en la alteración de los mecanismos de resistencia de la platanera al mal de Panamá. Fruits. 38 (11): 755 – 758.
- Cadahía, L. C. 2000. Fertirrigación: Cultivos Hortícolas y Ornamentales. 2ª edición. Mundi-Prensa. España.
- Cajicas, A. 1982 El ozono y sus aplicaciones. Centro de estudios Hidrográficos. Ingeniería química. 51-56
- Cajuste, L. J., R. Carrillo, G., E. Cota, G., and R. J. Laird.1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. Water, Air, and SoilPollution 57 – 58: 763.771.
- Cajuste, L. , Vázquez, A., Siebe, C., Alcántar, G. y De la Isla, M. 2001. Cadmio, Níquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agociencia. Colegio de postgraduados. Texcoco, México. 003 (35): 267-274
- Castro, E., Mañas, P., Sanchez, J. y De las Heras J. 2000. Reutilizacion de aguas residuales depuradas procedentes de la E.D.A.R. de Albacet (S.E.España)

en cultivos Horticolas. Universidad de Castilla – La Mancha. E.T.S.I.A.
Campus univ. s/n 02071 Albacete. España.

- Celis, J., Sandoval, M. y Briones, M. 2007. Bioneso de fitotoxicidad de residuos orgánicos en lechuga y Ballica anual realizados en un suelo alfisol degradado. R.C. Suelo Nutr. Veg. 7 (3): 51 – 60.
- Ciebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 10 (1): 15-21
- Cisneros, E. X., B. R. Gontes, y R. R. Nuño. 1997. Contaminación de aguas superficiales y su efecto en el riego agrícola. Memorias técnicas del XL Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México.
- Chang, A., Granato, T y Page, A., 1992 . A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel, and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludge. J. Environ. Qual. 21: 521-536.
- Cotoruelo. L. y Marqués, M. 1999. Los metales pesados en las aguas. Ingeniería química. Universidad de Málaga. 213-219 pp.
http://scholar.google.es/scholar?q=los+metales+pesados+en+las+aguas+universidad+de+malaga+cotoruelo&btnG=&hl=es&as_sdt=0
- Cuevas, G. y Walter, I. 2004. Metales pesados en Maíz (*Zea mays* L.) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. Revista Internacional Contaminación Ambiental. 20 (2): 59-68
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1980. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-003-1980. Aguas residuales. Muestreo. Declaratoria de vigencia. Diario Oficial de la Federación . México, D. F. pp: 3 – 6.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. 1976. Manual de tratamiento de aguas. Limusa. México. 34-45. Pp
- Felipó, M. 2001. Los elementos potencialmente tóxicos como criterio en la aplicación de residuos orgánicos al suelo. Aplicación agrícola de residuos orgánicos. Eds. J. Boixadera y M.R. Teira. Universidad de Lleida. Pg. 159-174.
- Fair, G., Geyer, J. y Okum, D. 1966. Water and wastewater engineering. Vol. 1. Water supply and wastewater removal. John Wiley Sons, Inc. Japan. 234-454 pp.

- Haq, A., Bates, T. y Soon, Y. 1980. Comparison of extractant for plant available zinc, cadmium, nickel and copper in contaminated soils. *Soils Science Soc. Am. J* (44): 772-777.
- Hall, J. 2002. Cellular mechanism for heavy metal detoxification and tolerant. *Journal of Experimental Botany*. 53: 1-11.
- Haque, N., Peralta- Bidea, J., Jones, J., Gill, T. y Gardea- Torresdey. 2008. Screening the phytoremediation potential of desert broom (*Baccharis sarothroides* Gray) growing on mine tailing in Arizona, USA. *Environ Pollut.* 153 (2): 362-368.
- Ibekwe, A. M., J. S. Angle, R. L. Chaney, and P. Van Berkum. 1995. Sewage sludge and heavy metal effects on nodulation and nitrogen fixation of legumes. *J. Environ. Quality* 24:1199-1204.
- Iannaccone, O. y Alvariño, F. 2005. Efecto Ecotoxicológico de tres metales pesados sobre el crecimiento radicular de cuatro plantas vasculares. *Agricultura técnica*. 65 (2): 198-203.
- Juárez, M. y Mijaylova, P. 2004. Tratabilidad de baños agotados del curtido de pieles para la recuperación de cromo trivalente. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, Mexico.
- Lunin, J. 1986. Introducción. In: *Soils for management of Organic Wastes and waste Waters*. Published by ASA CSSA SSSA. 2 Ed. Madison, Wisconsin. 575 p.
- Mañas, P., Castro, E., de las Heras, J. y Sánchez, J. 2002. Aptitud agronómica del agua residual depurada procedente de la E.D.A.R. de Albacete. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 17(1):163-171
- Martínez, O. 2001. Utilización de aguas residuales en el cultivo y aprovechamiento de *Kochiascoparia* (L) (Schrad). UAAAN. 53-58 pp.
- Mendoza, H. 1983. Diagnostico climático para la zona de influencia inmediata de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 4-7 pp.
- Metcalf y Eddy. 1998. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3ª. Edición. Vol. 1. McGraw-Hill. México. 28-123 pp.
- Morales, E., Camarena, G. y Campos A. 1992. Estudios fisiológicos regados con aguas negras. I. Análisis de crecimiento de *Lycopersicon esculentum* (var Royal). Memorias. II simposio y I reunión nacional. Agricultura sostenible: un enfoque ecológico, socioeconómico y desarrollo tecnológico. 85-90 pp.

- Mujeriego, R. 1990. Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada. Ediciones de la universidad politécnica de Catalunya. España. 14-36pp.
- Navarro, J., Alonso, P. y López, J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de latolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas. 16 (2): 10-25.
- Navarro, M., López, J., Rad, C., Arribas, Y., Alonso, B., López, J., Fernández, M., Peña, S., Olalla, C., Bustillos, M. y Gonzalez, J. 2006. Aplicación de compst de residuo urbano en un cultivo de remolacha (*Beta vulgaris* L.) en la provincia de Burgos. WWW.YOSOYAGRICULTOR.ES
- Olivares, E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL. Versión 2.5. Facultad de agronomía UANL. Marín, N.L.
- Pérez, J., y Vallverdú, A. 2000. Reutilización de las aguas residuales de la ciudad de Almería en los regadíos del bajo Andarax. 265 - 287 pp.
- Ramírez, R. y Pérez, M. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo. Revista facultad nacional de Agronomía –Medellín, 59 (2) : 3543 – 3556.
- Rascón, A. E. 2006. Evolución de propiedades físicas y químicas del suelo y absorción de metales pesados en producción agrícola con aguas residuales. Tesis doctoral. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 116 pp.
- Reuter, D.J. and Robinson, J.B. 1986. Plant Analysis. And interpretation. Manual. Inkata Press. Australia. 218 pp.
- Reyes, P. 1982. Diseño de experimentos aplicados. Editorial Trillas, México. 344 pp
- Reynolds, K. 2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. Universidad de Arizona. USA. 1-3 pp.
- Rincón, L., Saez, J., Pérez, J., Gómez, M. y Pellicer, C. 1999. Crecimiento y absorción de nutrientes del brócoli. Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg. 14 (1-2): 225 – 236.
- Rivas, B., Nevárez, G., Bautista, R., Pérez, A. y Saucedo, A. 2003. Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. Agrocienza 37: 157-166.

- Seoáñez, C. 1999. Aguas residuales: tratamiento por humedales superficiales. Ediciones Mundi- Prensa. 49-95 pp.
- Suarez, P. y Reyes, R. 2002. La incorporación de metales pesados en las bacterias y su importancia para el ambiente. *Interciencia* 27(4): 160-164.
- Trujillo, E., Martínez, V. y Flores, N. 2008. Ajuste del equilibrio químico del agua potable con tendencia corrosiva por dióxido de carbono. *Información tecnológica*. 6 (16): 89-102.
- Wallance, G. y Wallance, A. 1994. Lead and other potentially toxic heavy metals in soils common. *Soil Sci. Plant Anal.* 25: 137-14