

EVOLUCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y
QUÍMICAS DE SUELO Y ABSORCIÓN DE
METALES PESADOS EN PRODUCCIÓN
AGRÍCOLA CON AGUAS RESIDUALES

EMILIO RASCÓN ALVARADO

T E S I S

**Presentada como requisito parcial
para obtener el grado de
Doctor en Ciencias
en Ingeniería de Sistemas Agrícolas**

Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro



PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila
Octubre de 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

EVOLUCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELO Y
ABSORCIÓN DE METALES PESADOS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
CON AGUAS RESIDUALES

TESIS

POR

EMILIO RASCÓN ALVARADO

ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE
ASESORÍA Y APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

COMITÉ PARTICULAR:

Asesor principal

Dr. Edmundo Peña Cervantes

Asesor

Dr. Rubén López Cervantes

Asesor

Dr. Eduardo A. Narro Farías

Asesor

Dra. Manuela Bolívar Duarte

Asesor

Dr. Javier de J. Cortés Bracho

Asesor

Dr. Mario Cantú Sifuentes

Dr. Jerónimo Landeros Flores

Subdirector de Postgrado

Buenvista, Saltillo, Coahuila. Octubre de 2006

AGRADECIMIENTOS

En general a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y en lo particular a la Subdirección de Posgrado y la División de Ingeniería, por el apoyo económico y la oportunidad para mi desarrollo profesional.

Al Dr. Edmundo Peña Cervantes por tomar la responsabilidad de conducirme para la conclusión de esta carrera.

Al Dr. Rubén López Cervantes por su paciencia y sugerencias en la elaboración de los escritos.

Al Dr. Eduardo A. Narro Farías, Dra. Manuela Bolívar Duarte, Dr. Javier de J. Cortés Bracho y Dr. Mario Cantú Sifuentes por su colaboración desinteresada y atenta.

Al personal del Centro de Investigación en Química Aplicada: L. C. Q. José Luis Saucedo M., M. C. Silvia Torres Rincón, L. C. Q. Irma Y. Angulo Rodríguez, Q. F. B. Noemí Cantú González, Q. F. B. Myriam Lozano Estrada e Ing. Federico Cerda; por la realización de análisis de caracterización para los tipos de agua experimentales.

Al Ing. Isaías Montejo López, Ing. Enrique Eduardo Castañeda Ocaña, Ing. Lázaro Hernández Hernández y José Márquez Cortés; por su gran colaboración en las actividades de campo y laboratorio.

DEDICATORIA

Al Creador Jehová Dios por darme la vida, permitirme conocerle y darme tiempo para esta fase de mi vida.

A mi querida esposa Luz María Torres de Rascón, mi suegra María de la Luz Rivera Martínez y Hugo Santoyo Longoria por su cooperación y paciencia por tantos momentos robados a la convivencia familiar e incremento de penurias por causa de este compromiso.

A todos mis hermanos espirituales de la Congregación Ojo de Agua por su apoyo y fortalecimiento sincero.

A mi familia carnal en Zacate Colorado II, Municipio de Ignacio de la Llave, Ver.: mi papá Cirilo Rascón Hernández, mi mamá Crescenciana Alvarado Molina, mis hermanos: Angelis, Pablo, Panuncio, María de los Ángeles, Adelina, Edith, Elizabeth, Silvio, Elda y Francisco; además de, a todos mis sobrinos a través de ellos.

Con un recuerdo y mención especial a Hilario Rascón García y María Cristina Salinas Ortega por su cercana guía y soporte mientras nuestras vidas duraron.

A infinidad de personas que me han tendido la mano, no digamos en situaciones positivas, sino sobremanera en momentos difíciles que tocan nuestras vidas.

COMPENDIO

Evolución de propiedades físicas y químicas de suelo y absorción de metales pesados en producción agrícola con aguas residuales

POR

EMILIO RASCÓN ALVARADO

DOCTOR EN CIENCIAS

INGENIERÍA DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. OCTUBRE 2006

Dr. Edmundo Peña Cervantes – Asesor –

Palabras claves: Agua residual, frecuencia de riego, propiedades físicas y químicas de suelo, metales pesados, acelga (*Beta vulgaris* I)

Se evaluó a nivel de campo el impacto sobre propiedades físicas y químicas de suelo y la acumulación de metales pesados en la vía agua de riego – suelo – planta, debido al riego con tres tipos de agua residual (AR) y una de primer uso (PU) como testigo, nativas de la zona Saltillo – Ramos Arizpe, Coahuila; aplicando una lámina de

20 milímetros a cada 2, 4, 6 y 8 días, con el monitoreo en los estratos 0.00 – 0.30, 0.30 – 0.60 y 0.60 – 0.90, metros.

Las propiedades físicas evaluadas fueron: densidad de sólidos (DS), densidad aparente (DA), contenido de humedad a capacidad de campo (CC) y color de suelo (CS). En propiedades químicas se evaluaron: pH (pH), conductividad eléctrica (CE), porcentaje de carbonatos totales (CO_3^{2-}) y porcentaje de materia orgánica (MO). Los metales pesados estudiados fueron: cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn).

La densidad de sólidos no mostró cambios estadísticamente significativos, lo que sí sucedió para densidad aparente, con incrementos desde un promedio inicial de $1.18 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ hasta $1.28 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ para el suelo donde se adicionó PU en la aplicación más frecuente. El contenido de humedad a capacidad de campo siempre fue descendente, en mayor grado con agua PU, desde 24.89 por ciento al inicio hasta 18.04 por ciento al final. El estrato superficial, en seco, oscureció por las aplicaciones de agua AR, desde 5YR 7/1, gris claro, al inicio hasta, 10YR 5/2, café grisáceo, al final.

El pH del suelo incrementó desde 7.56 al inicio, con AR hasta 7.69 y con PU hasta 7.73. La conductividad eléctrica mediante el riego con AR descendió hasta $0.91 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, y con agua PU a $0.82 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; desde $1.09 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ al inicio. El porcentaje de carbonatos totales, desde 43.60 por ciento, aumentó con AR a 45.98 por ciento y con PU a 46.76 por ciento. El porcentaje de materia orgánica, desde 1.25 por ciento inicial, mediante AR finalizó en 1.26 por ciento y con PU en 1.37 por ciento.

Los resultados mostraron que las acumulaciones de metales pesados en hoja de acelga (*Beta vulgaris* L.) fueron mínimas y en el orden $Cu < Ni < Pb < Zn$, con el comportamiento de AR parecido al de PU.

Se concluye que las aguas residuales empleadas pueden ser destinadas para actividades agrícolas como pueden ser: producción de árboles forestales, árboles frutales y producción de flor para corte; con los debidos cuidados de salud pública en su manejo.

ABSTRACT

Physical and chemical soil properties evolution and heavy metals absorption
in wastewater agricultural production

BY

EMILIO RASCÓN ALVARADO

DOCTOR IN SCIENCES

AGRICULTURAL ENGINEERING SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. OCTOBER, 2006

Dr. Edmundo Peña Cervantes – Advisor –

Index words: Wastewater, irrigation frequencies, physical and chemical soil properties,
heavy metals, beet (*Beta vulgaris* L)

Opened conditions, impact on physical and chemical soil properties and heavy
metals accumulation in water – soil – plant manner irrigation, due three fellows
wastewater irrigation (AR) and first use water (PU) like witness, Saltillo – Ramos
Arizpe, Coahuila zone natives; applying 20 millimeters plate each 2, 4, 6 and 8 days,
with monitoring in 0.00 – 0.30, 0.30 – 0.60 and 0.60 – 0.90 m, strata, was evaluated.

Physical properties evaluated were: density of solids (DS), bulk density (DA), field capacity (CC) and soil color (CS). In chemical properties, were evaluated: pH (pH), electrical conductivity (CE), total carbonates percent (CO^{3-}) and organic matter percent (MO). The studied heavy metals were: copper (Cu), lead (Pb), nickel (Ni) and zinc (Zn).

Density of solids did not evidence statistically significant changes, that definitely happened for bulk density, with $1.18 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ initial average to $1.28 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ increments on soil, where PU, in more frequent application, was added. Field capacity was descending always, mainly PU, from 24.89 percent at starting, ending in 18.04 percent. AR applications on superficial stratum, warm, obscured it, at starting, from 5YR 7/1, light gray, even 10YR 5/2, brown grayish, at ending.

Soil pH increased from 7.56, to 7.69 with AR and 7.73 with PU, applications. Electrical conductivity lowered even $0.91 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ by AR irrigation, and PU to $0.82 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; from $1.09 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ at starting. Total carbonates percent, from 43.60 percent, enlarged with AR applications to 45.98 percent, while PU to 46.76 percent. Organic matter percent, from 1.25 initial percent, by means AR ended it in 1.26 percent, while PU in 1.37 percent.

Results evidenced that heavy metals beet leaf (*Beta vulgaris* L.) accumulations were minimal, at $Cu < Ni < Pb < Zn$ order, with AR and PU, similar behavior.

Wastewater evaluated can be destined to agricultural produce, for example: forestry trees, fruit trees and cut flower; with public health cares in his handling, is concluded.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	4
OBJETIVOS GENERALES	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
REVISIÓN DE LITERATURA	6
DEFINICIÓN DE AGUA RESIDUAL	6
MANEJO DEL AGUA RESIDUAL A TRAVÉS DEL TIEMPO	7
CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	9
AGUAS DOMÉSTICAS Ó URBANAS	9
AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	10
AGUAS DE USOS AGRÍCOLAS	10
AGUAS PLUVIALES	10
CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	11
TRATAMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES	11
TRATAMIENTO PRELIMINAR	12
TRATAMIENTO PRIMARIO	12
TRATAMIENTO SECUNDARIO	13

TRATAMIENTO Terciario	13
DESINFECCIÓN	13
VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL RIEGO AGRÍCOLA CON AGUAS RESIDUALES	14
CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL PARA RIEGO AGRÍCOLA	18
ESPECIFICACIONES	21
EFECTOS EN SUELO POR LA IRRIGACIÓN CON AGUAS RESIDUALES	22
PRESENTE Y FUTURO DEL REUSO DE AGUA EN MÉXICO	25
MATERIALES Y MÉTODOS	30
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL	30
CARACTERIZACIÓN DE AGUAS Y SUELO	31
METODOLOGÍA	34
MANEJO DEL CULTIVO	34
EVOLUCIÓN DE PROPIEDADES EN SUELO	36
CUANTIFICACIÓN DE METALES EN AGUA DE RIEGO, SUELO Y HOJA DEL CULTIVO	36
MODELO ESTADÍSTICO	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS Y SUELO EXPERIMENTALES	41
EVOLUCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	45
DENSIDAD DE SÓLIDOS	45
DENSIDAD APARENTE	48

CAPACIDAD DE CAMPO	52
COLOR DEL SUELO	54
EVOLUCIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	56
pH	56
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	59
CARBONATOS TOTALES	63
MATERIA ORGÁNICA	65
EVOLUCIÓN CONJUNTA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELO	68
ABSORCIÓN DE METALES PESADOS	71
CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE RIEGO Y SUELO	71
CONTENIDO DE ELEMENTOS EN PLANTA Y DESARROLLO FISIOLÓGICO	76
BALANCE DE MOVIMIENTO DE ELEMENTOS	79
CONCLUSIONES	83
LITERATURA CITADA	85
APÉNDICE	95

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO N°.	TÍTULO	PÁGINA
2.1.a	Factores que influyen en la aplicación a suelos agrícolas de las aguas residuales urbanas (I).....	19
2.1.b	Factores que influyen en la aplicación a suelos agrícolas de las aguas residuales urbanas (II).....	20
2.2	Norma Oficial Mexicana 001 – ECOL – 1996. Niveles máximos permisibles de contenidos físicos, químicos y biológicos en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales – <i>uso en riego agrícola</i> –	21
2.3	Norma Oficial Mexicana 001 – ECOL – 1996. Niveles máximos permisibles de elementos contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales – <i>uso en riego agrícola</i> –	22
2.4	Reuso del agua residual tratada en México	27
3.1	Tipos de agua y tratamiento, sitio de muestreo y abasto de las aguas empleadas	31
3.2	Parámetros evaluados en la caracterización inicial de las aguas experimentales	32
3.3	Caracterización agronómica de las aguas utilizadas ...	32
3.4	Características de calidad agronómica en las aguas experimentales	33
3.5	Propiedades de suelo evaluadas en la caracterización inicial y durante el experimento	33
3.6	Tratamientos experimentales evaluados	34
4.1	Resultados de caracterización inicial en aguas experimentales	41

4.2	Resultados para calidad agronómica en las aguas experimentales	44
4.3	Resultados de análisis físico y químico de suelo experimental previo a riegos	44
4.4	Cuadrados medios y significancias de los factores evaluados y sus interacciones para las variables físicas de suelo evaluadas	45
4.5	Valores medios para densidad aparente ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) en la interacción (tipo de agua) (frecuencia de riego)	49
4.6	Color del agua y del suelo agrícola regado con aguas residuales en el estrato 0.00 – 0.30 m	55
4.7	Cuadrados medios y significancias de los factores evaluados y sus interacciones para las variables químicas de suelo analizadas	56
4.8	Resumen e hipótesis para explicar el contenido de materia orgánica en áreas irrigadas y no irrigadas	67
4.9	Límites máximos permisibles y contenidos de metales pesados en aguas residuales ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) y suelo ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) experimentales	72
4.10	Cuadrados medios y significancia estadística en absorción de metales pesados durante el experimento	76
4.11	Cuadrados medios y significancia estadística en altura y peso seco de acelga (<i>Beta vulgaris</i> I.) producida con agua residual	78
4.12	Altura de acelga (<i>Beta vulgaris</i> I.) (cm) a los 270 días en riego con aguas residuales	78
4.13	Cantidad de elemento soluble suministrado por riegos, materia seca final de hoja, y acumulado final de elementos en hoja de acelga (<i>Beta vulgaris</i> I.)	79

A.1	Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual. Nivel : (Tipos de agua) (Frecuencias de riego)	95
A.2	Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual. Nivel: (Tipos de agua) (Frecuencias de riego) Estrato 0.00 – 0.30 m	96
A.3	Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual. Nivel: (R EF) (Frecuencias de riego) Estrato 0.00 – 0.30 m .	97
A.4	Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual. Nivel: (P UA) (Frecuencia de riego) Estrato 0.00 – 0.30 m ..	98

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N°	TÍTULO	PÁGINA
1.1	Esquema del área en estudio.....	3
3.1	Ubicación del sitio experimental	30
3.2	Sitios de muestreo de las aguas residuales	31
3.3	Ubicación de áreas experimentales en campo	35
4.1	Niveles de contenidos biológicos en aguas experimentales	43
4.2	Valores en densidad de sólidos de suelo agrícola regado con aguas residuales	46
4.3	Representación de interacción (tipo de agua) (estrato) para densidad de sólidos de suelo regado con aguas residuales	47
4.4	Comportamiento de algunas variables de planta, por tipo de agua y frecuencia de riego, al emplear aguas residuales	50
4.5	Representación de la interacción (tipo de agua) (frecuencia de riego) para contenido de humedad a capacidad de campo	53
4.6	Valores de pH por estratos de suelo en la aplicación de aguas residuales	58
4.7	Valores de pH en el riego a cada ocho días y para el estrato 0.00 – 0.30 m durante el lapso de la investigación	59

4.8	Valores de conductividad eléctrica por estratos de suelo en aplicación de aguas residuales	60
4.9	Valores mensuales de conductividad eléctrica, por tipo de agua y riego a cada seis días, en el estrato 0.00 – 0.30 m, en suelo regado con aguas residuales .	62
4.10	Valores de carbonatos totales por estratos de suelo en aplicación de aguas residuales	64
4.11	Porcentaje de carbonatos totales de suelo para el estrato 0.30 – 0.60 m por la aplicación de aguas residuales	65
4.12	Porcentaje de materia orgánica por estratos de suelo con aplicación de aguas residuales	67
4.13	Ubicación mediante componentes principales de variables físicas y químicas de suelo observadas para el estrato 0.00 – 0.30 m en riego con aguas residuales.....	69
4.14	Ubicación mediante componentes principales de variables observadas en riego con P UA, a cada seis días, en el estrato 0.00 – 0.30 m, con aplicación de aguas residuales	71
4.15	Cantidad de elementos por sitios, en el flujo del agua residual R UA hacia Laguna de Oxidación	75
4.16	Lectura trimestral de elementos contenidos en hoja de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L.) regada cada ocho días con agua residual R UA	77

INTRODUCCIÓN

El desarrollo integral de la humanidad se vincula estrechamente con la capacidad de la sociedad para lograr relaciones sustentables con su entorno ambiental, de modo que el total de las actividades humanas orientadas a obtener satisfactores y a mejorar las condiciones de vida, que como sostiene Hespanhol (1992), se realizan mediante proyectos de desarrollo que generan efectos favorables o desfavorables sobre el ambiente. En el logro de los anteriores objetivos muchos productos de desecho constituyen un valioso recurso que el hombre puede recuperar, reciclar o reutilizar en su propio beneficio.

En este caso, el agua, después de un primer uso, por las adiciones y su marcada naturaleza solvente, conforma un desecho complicado para limpiar y acondicionar a fin de ser vuelta a usar. Sin embargo, la presencia, en el agua residual, de materiales potencialmente útiles, junto a la escasez del vital líquido en muchas áreas del mundo, obligan a buscar tecnologías de acondicionamiento para éstos recursos desechados a fin de allegarse los volúmenes de agua faltantes.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (1997) la agricultura consume alrededor del 70 por ciento del agua extraída, por lo que es uno de los demandantes más interesados en desarrollar experiencias de producción empleando las agua residuales, objetivo, en el que México esta presente desde 1886, en el Valle del

Mezquital, siendo al presente, de acuerdo con Silva *et al.*(2002), asunto de creciente interés.

Y es que, de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2005), alrededor del 56 por ciento de la superficie la República Mexicana es árida o semiárida y donde se asienta alrededor del 77 por ciento de su población, con la generación del 85 por ciento de su Producto Interno Bruto y apenas un 32 por ciento de la disponibilidad natural media de agua, lo que de acuerdo con Jiménez *et al.* (2002), implica grandes dificultades para lograr disponer del agua como satisfactor.

Ubicada sobre un valle aluvial semiárido, el área urbana Saltillo – Ramos Arizpe, Coahuila (Figura 1.1); según CNA (2002) con una población actual cercana a los 640 000 habitantes, genera un volumen de aguas residuales alrededor de los 1 100 litros por segundo, los cuales en su mayoría son de origen doméstico y en menor proporción de naturaleza industrial (Garza, 2003) y que son desechados sin darles utilidad alguna.

El principal cuerpo receptor de estas aguas residuales es El Arroyo del Pueblo o Arroyo La Encantada, cuyo cauce a “cielo abierto” en dirección de sur a norte es la vía para su desecho fuera de la zona.

Acorde a lo reportado por Díaz y Antón (2002) y Egide *et al* (2001), las primeras investigaciones locales por parte de Cortés *et al.* (1991) y Bernabé (1996), sugieren que con las debidas reservas a su empleo, las aguas residuales de esta zona urbana, con distintos grados de tratamiento, pueden llegar a ser útiles para lograr producciones

agrícolas satisfactorias, a la vez que permite lograr ahorros importantes de agua limpia y de esta forma, ayudar a preservar los acuíferos de la región.

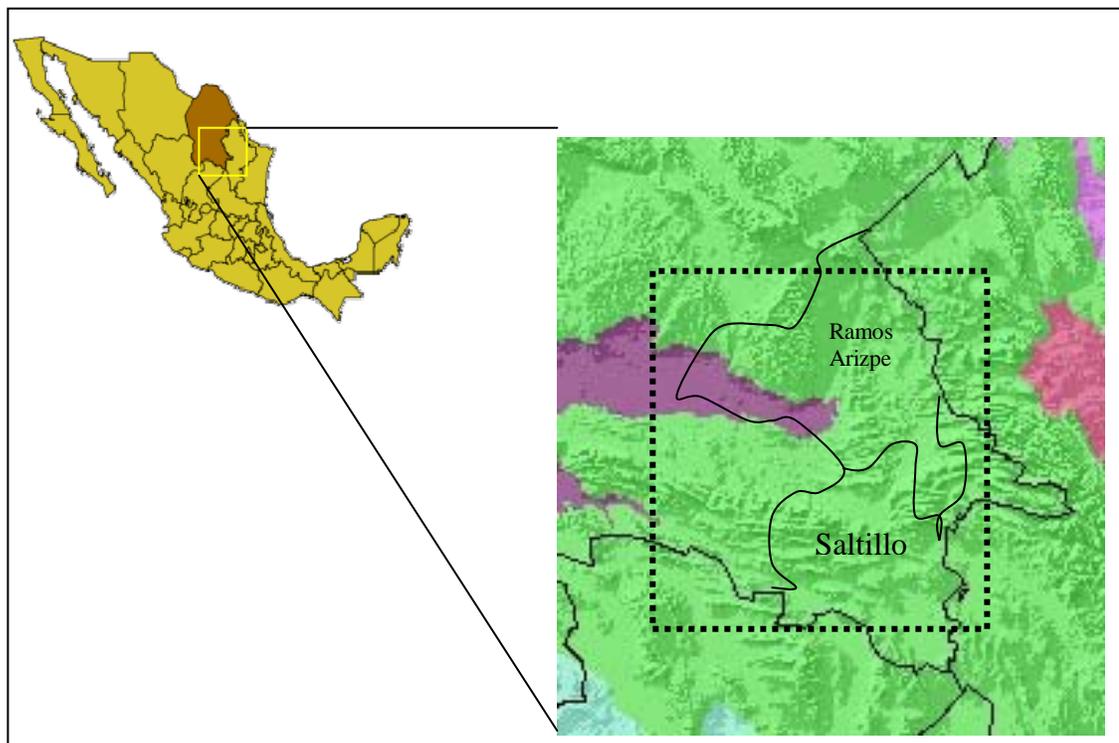


Figura 1.1 Esquema del área en estudio.

Por lo anterior, en el presente trabajo usando como agua de riego tres tipos de aguas residuales de la zona y una de primer uso como testigo, se planeó hacer el seguimiento en la evolución de algunas propiedades físicas y químicas de un suelo agrícola y el movimiento de algunos metales pesados a través de la vía agua de riego – suelo – planta, mediante la producción a “cielo abierto” de acelga (*Beta vulgaris* L.) con la siguiente hipótesis y objetivos:

HIPÓTESIS

Las aguas residuales de la zona Saltillo – Ramos Arizpe, Coahuila; provocan efectos positivos sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo, al ser usadas en riego agrícola.

OBJETIVOS

Generales:

- Comparar la evolución en algunas propiedades físicas y químicas del suelo por el riego con tres aguas residuales locales frente al riego con agua de primer uso.
- Cuantificar la acumulación de algunos metales pesados a través de la vía agua de riego – suelo – planta en el riego con tres aguas residuales locales, frente al riego con agua de primer uso.

Específicos:

- Cuantificar en suelo la evolución en densidad de sólidos (DS), densidad aparente (DA), capacidad de campo (CC) y color (CS), por el riego con tres aguas residuales locales frente al riego con agua de primer uso.

- Cuantificar en suelo la evolución en pH, conductividad eléctrica (CE), carbonatos totales (CO_3^{3-}) y materia orgánica (MO) por el riego con tres aguas residuales locales frente al riego con agua de primer uso.
- Cuantificar la acumulación de cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn) a través de la vía agua de riego – suelo – planta en el riego con tres aguas residuales locales, frente al riego con agua de primer uso.

REVISIÓN DE LITERATURA

Definición de Agua Residual

En la Legislación Mexicana de acuerdo con NOM-001-ECOL-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), 1997]. Para Seoáñez (1999_a) las aguas residuales son los 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.

En cambio, para Fair *et al.*, (1966) y Juárez (2005) el agua residual se origina por la introducción en ella de organismos patógenos o sustancias tóxicas que la hacen inapropiada para consumo humano o uso doméstico. Concepto similar considera Metcalf y Eddy (1998), pues mencionan que desde el punto de vista de las fuentes de generación, se puede definir el agua residual como “la combinación de los residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales”. Finalmente, Martínez (2001) expone 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 inmediato.

Los conceptos anteriores dejan ver la variedad de componentes que el agua residual contiene, siendo necesarios procesos muy diversos para devolverle su calidad inicial, sobre todo en nuestros días, en que las sustancias en ella vertidas, son mucho más complejas.

Manejo del Agua Residual a Través del Tiempo

Los métodos de depuración de residuos se remontan a la antigüedad pues se han encontrado instalaciones de alcantarillado en lugares prehistóricos de Creta y en las antiguas ciudades asirias, inclusive las canalizaciones de desagüe construidas por los romanos todavía funcionan en nuestros días (Juárez, 2005; Seoáñez, 1999_b).

Siglos después se recuperó la costumbre de construir desagües, en su mayor parte en forma de canales al aire o zanjas en la calle. Al principio estuvo prohibido arrojar desperdicios en ellos, pero en el siglo XIX se aceptó que la salud pública podía salir beneficiada si se eliminaban los desechos humanos a través de los desagües para conseguir su rápida desaparición.

A comienzos del siglo XX, algunas ciudades e industrias empezaron a reconocer que el vertido directo de desechos en los ríos provocaba problemas sanitarios, lo que llevó a la construcción de instalaciones de depuración. Durante la segunda década de ese siglo, el proceso del cieno activado, desarrollado en Gran Bretaña, supuso una mejora

significativa por lo que empezó a emplearse en muchas localidades de todo el mundo, como consideran Metcalf y Eddy (1998).

Relacionado a esto, Eweis *et al.* (2002), mencionan que la biorrecuperación ha desarrollado a partir del entendimiento de que el procesamiento de las aguas residuales vertidas sobre los suelos, suponía la acción de las bacterias edáficas en él presentes. Así a partir de 1960, se han seguido incluyendo nuevos métodos de aplicación al terreno y procesos para la biodegradación de los compuestos, lo que se ha enfocado mucho hacia el tratamiento de terrenos y acuíferos contaminados, sobre todo, por compuestos derivados del petróleo. Los más recientes avances en el tratamiento del agua han sido las mejoras alcanzadas en el desarrollo de membranas para osmosis inversa y otras técnicas como la ozonización buscando la eliminación del cada vez mayor número y proporción, de contaminantes encontrados en el agua.

Situaciones, como, lo errático y mal distribuido de la precipitación pluvial por todo el planeta, de modo que alrededor del 75 por ciento de las lluvias anuales globales ocurren en áreas donde habita sólo 33 por ciento de la población mundial, además de que en América Latina solo 6 por ciento de las aguas residuales son tratadas y depuradas según Third World Center for Water Management (2005), con porcentajes sumamente bajos en los demás países en desarrollo, el agotamiento de las áreas de cultivo y fuentes de agua limpia, junto a la contaminación más compleja del agua, entre otras; determinan la necesidad, en el futuro cercano, de adentrarse más al conocimiento en el reuso del agua.

Según el Comité Científico para los Problemas del Medio Ambiente (PNUMA, 1999) tanto la escasez como la contaminación del agua dulce, están considerados entre las principales cuestiones emergentes que son necesarias de abordar en el Siglo XXI, apenas después del cambio climático y la deforestación.

Clasificación de las Aguas Residuales

De acuerdo a Reynolds (2002), las aguas residuales pueden englobarse dentro de cuatro clases:

Aguas Domésticas o Urbanas

Estas resultan de la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua procedente de casas, edificios comerciales e instituciones, zonas en las que no se efectúan, o solo en muy poca escala, las operaciones industriales; junto con las aguas superficiales o de precipitación pluvial que puedan agregarse. El Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York (1976), inclusive, considera el agua de infiltración subterránea como parte de estas mismas. Constituyentes comunes de estas aguas son los desechos humanos y animales, desperdicios caseros; además de elevadas cantidades de sólidos diversos, materia orgánica, grasas, aceites y detergentes.

Aguas Residuales Industriales

Son las aguas desechadas de los procesos industriales, las que pueden disponerse en forma aislada o pueden agregarse a las domésticas urbanas.

Aguas de Usos Agrícolas

Son las desechadas por la agricultura, en sus diferentes facetas, las cuales retornan a los cuerpos de agua más cercanos, una vez que la demanda de los suelos queda satisfecha.

Aguas Pluviales

Están formadas por los escurrimientos superficiales de las lluvias, mismas que fluyen desde los techos, pavimento y otras superficies naturales de terreno.

De modo general, todos los tipos de agua están progresivamente sufriendo de contaminación más compleja, debido a la gran cantidad de desechos antropogénicos de composición sintética menos degradable; y en particular, las desechadas del uso agrícola, están adquiriendo cada día mayor importancia, debido a los escurrimientos de fertilizantes (nitratos y fosfatos) y pesticidas que representan los principales causantes del envejecimiento de lagos y pantanos.

Características de las Aguas Residuales

Aunque las aguas residuales presentan diversidad por naturaleza y niveles de contenidos, de acuerdo a los sitios por donde fluyen, de modo general y de acuerdo a Reynolds (2002), las aguas residuales consisten de dos componentes: un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo.

Por ello, para tener idea de la calidad de cierta agua residual en particular, es necesario conocer las cantidades de tres tipos de parámetros que las constituyen: físicos, químicos y biológicos; los cuales sirven como criterio para determinar los procedimientos y equipos depuradores más adecuados según el tratamiento por aplicar. De acuerdo a Metcalf y Eddy (1998), entre los más importantes tenemos: temperatura, sólidos, materia flotante, color y olor; pH, grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y metales pesados; y coliformes totales y fecales.

Según 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.

Tratamientos de las Aguas Residuales

Sostiene Mujeriego (1990), que los métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de fuerzas físicas son conocidos 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

El objetivo de un tratamiento preliminar es retirar del agua residual aquellos sólidos suspendidos que por su naturaleza presentan interferencias en etapas posteriores del proceso.

Tratamiento Primario

Los objetivos de este tratamiento son: eliminar tanto la materia decantable, orgánica e inorgánica, mediante decantación, como eliminar la materia flotante y las espumas mediante barrido superficial. Se elimina así entre 25 - 50 por ciento de 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 fósforo 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 inorgánicos (dióxido de carbono, y agua principalmente). Para completar el tratamiento han de separarse 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, fósforo, 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 efectiva 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 oscilar entre 5 - 10 mg • L⁻¹, con la opción de emplear, en vez de cloro, el ozono. El máximo tiempo de contacto del agua con el cloro suele ser de 15 minutos. Aunque expone Eweis *et al.* (2002), que se están estudiando alternativas debido a que en la cloración se forman algunos productos como los trihalometanos que se suponen son cancerígenos, así como muchos otros compuestos organoclorados tóxicos. Entre las alternativas se encuentra la desinfección por rayos ultravioletas, tratamiento con ozono, dióxido de cloro y la solarización (desinfección por luz solar) (Mujeriego, 1990).

Acorde a Metcalf y Eddy (1998) los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen como objetivo principal el reducir algunas características indeseables, de manera tal que el uso o disposición final de estas aguas, cumpla con las normas y requisitos mínimos definidos por las autoridades sanitarias de un determinado país o región. Según Almeida (1997), la selección de tecnologías para la recolección y tratamiento de las aguas residuales deberá considerar, cada vez en mayor medida, alternativas que incluyan el reuso de agua.

Ventajas y Desventajas en el Riego Agrícola con Aguas Residuales

De acuerdo con Seoáñez (1999_a), en la actualidad el agua residual puede ser aprovechada en aplicaciones industriales, recarga de acuíferos, recarga de terrenos marginados, recuperación de zonas áridas y áreas incendiadas, productividad forestal, producción acuícola, abastecimiento de agua, y riego agrícola y de áreas verdes.

La aplicación de las aguas residuales en riego agrícola constituye una de las herramientas más valiosas que tienen los países en vías de desarrollo para controlar la contaminación y hacer frente al reto que conlleva incrementar la producción agrícola con recurso hídrico escaso. Las aguas residuales pueden llegar a ser un problema sanitario en muchas partes del mundo, pero son un recurso de gran valor económico en áreas desérticas o regiones con sequías prolongadas.

Como destaca Hammer (1986), mediante la irrigación con el agua de reuso se tienen ventajas como, el bajo costo del agua, el uso benéfico del agua por parte de las plantas y el ingreso monetario por cultivos redituables desarrollados mediante este sistema.

Según expone Seoáñez (1999_b) en América Latina, la irrigación con agua residual es una práctica reciente que suele asociarse a una actividad informal o clandestina y de pequeña escala, con empleo diverso, como por ejemplo: riego de cereales, forrajes, bosques, frutales y hortalizas. Este mismo autor considera que la aplicación a los suelos agrícolas del agua residual urbana, tiene una triple vertiente: primeramente, se trata de aprovechar las posibilidades de aplicación de ciertas formas de energía, como puede ser utilizar de manera positiva la materia orgánica contenida en ellas; también, se intentan desarrollar sistemas de tratamiento y depuración de las aguas usadas de bajo costo y sencilla aplicación, y finalmente, se busca el aprovechamiento del agua que independientemente de su calidad, sería vertida –y no reutilizada– directamente a cursos de agua, o tratada en estaciones depuradoras convencionales, perdiéndose así una etapa de posible uso en riego de zonas agrícolas o forestales.

Tomando como ejemplo a México, según Jiménez *et. al.* (2002) el reuso en riego agrícola es una práctica generalizada iniciada en 1896; pero, no fue hasta 1920 cuando se empezó a visualizar la importancia económica de aprovecharla para fines agrícolas. Siguen mencionando estos autores que, en la actualidad, se destinan 1 781 metros cúbicos por segundo para uso agrícola, de los cuales el 67.2 por ciento proviene de fuentes superficiales y 32.8 por ciento de fuentes de abastecimiento de agua subterránea.

La reutilización del agua en la agricultura constituye una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país ya que en la actualidad se descarga un total de 200 metros cúbicos por segundo, de los cuales un volumen total de 3.4 kilómetros cúbicos por año son aprovechados en riego agrícola; sin embargo, sólo el 8.2 por ciento tiene algún proceso de tratamiento, mientras que el 91.8 por ciento se aplica sin tratamiento alguno en 254 597 hectáreas distribuidas en 26 Distritos de Riego (DR). Entre estos, destaca el DR 03 ubicado en el valle del Mezquital, Hidalgo, el que, con un total de 90,000 hectáreas y una antigüedad de 105 años en operación continua; es ejemplo único de riego con aguas residuales, pues representa el 43 por ciento del volumen y un 34.4 por ciento de área total nacional cultivada con este sistema.

De acuerdo con Jiménez *et al.* (1999), se puede decir que el empleo de esta agua fue una consecuencia espontánea, no prevista, ni planificada, de las obras de desagüe del Valle de México hacia el valle del Mezquital, donde hoy día, debido a su gran contenido de nutrientes y materia orgánica, esta agua es altamente valorada por los agricultores, ya que permite aumentar significativamente la producción agrícola.

Por su parte Cifuentes *et al.* (1994) exponen que la discusión sobre el uso del agua residual tiene aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales de gran relevancia. Algunos de sus beneficios son, el que permite obtener grandes cosechas en extensiones considerables de tierras semiáridas e improductivas; sus cualidades de fertilizante agrícola hacen posible altos rendimientos por unidad de superficie cultivable; genera empleo en áreas de alta migración como son las zonas rurales áridas, y su aplicación planeada en tierras agrícolas evita que se realicen descargas de drenajes en los cuerpos de agua superficial, con lo que se reduce la contaminación de este vital recurso. Sin embargo, también existen riesgos para la salud pública y deterioro en la calidad del ambiente, que requieren de una evaluación permanente; a fin de contribuir a que el agua residual se utilice de manera racional y segura en la producción agrícola.

En opinión de Romero (1997), el uso racional de aguas residuales para riego en agricultura, forestación o en acuicultura es una práctica productiva de gran utilidad que contribuye al desarrollo sustentable, el cual fue el objetivo central de la Agenda XXI aprobada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED) en Río de Janeiro en 1992. Las acciones necesarias para mejorar la eficiencia en el uso de aguas residuales para proteger la salud y salvaguardar el medio ambiente, requieren un completo entendimiento de las condiciones socioculturales y económicas. Tal entendimiento debe resultar en acciones que deben ser convertidas en normatividad para su pronta aplicación.

Calidad del Agua Residual Para Riego Agrícola

Tanto Carter (1975) como Zimmerman (1976) y Pasternak y De Malach (1994) recomiendan que antes de iniciar cualquier aprovechamiento en gran escala de las aguas residuales, deben hacerse estudios exhaustivos, dentro de los cuales, un punto sobresaliente será evaluar los efectos en suelo y ambiente más próximos al sitio bajo estudio.

Considera la Secretaría de Recursos Hidráulicos (S.R.H.) (1970), que para proteger las tierras de cultivo y los productos agrícolas, es necesario que las aguas utilizadas satisfagan determinadas normas de calidad, principalmente, en lo que respecta a su contenido de sales, lo cual debe cuidarse, según Sánchez (1988) debido a las presiones osmóticas que suceden en la solución del suelo que esta en contacto con las raíces, impidiendo la transposición de elementos nutritivos.

Según expone Richards (1973), el Departamento de Agricultura de Estados Unidos considera que aparte de la concentración total de sales solubles, otras características importantes que determinan la calidad del agua de riego, son, la concentración relativa de sodio con respecto a otros cationes, la concentración de boro u otros elementos que pueden ser tóxicos, y bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio.

Cadahía (2000) considera que la interpretación de la calidad de una determinada agua de riego, debe hacerse considerando simultáneamente las características del suelo y el cultivo, correspondientes.

Seoáñez (1999_b) menciona que en la mayoría de las agrupaciones humanas donde se ha practicado la agricultura con aguas residuales, para el mejor resultado, deben de ser considerado factores como los expuestos en los Cuadros 2.1a y 2.1b.

Cuadro 2.1a Factores que influyen en la aplicación a suelos agrícolas de las aguas residuales urbanas (I), tomado de Seoáñez (1999_b)

Características del vertido	Características del suelo	Características geológicas	Características topográficas
Composición Caudal Origen Posibilidades de almacenamiento	Tipo Horizontes Porosidad Estabilidad Permeabilidad Contenido de arcillas Tipo de arcillas Capacidad de intercambio de cationes Potencial de adsorción del fósforo pH Potencial de adsorción de metales pesados Contenido de materia orgánica Temperatura Salinidad	Roca madre Tipo Profundidad Permeabilidad Acuíferos Composición Puntos de descarga Movimiento y alteraciones del suelo	Pendientes Aspecto general del área de aplicación Erosión Cultivos Cursos de agua próximos Masas de agua próximas Superficie del área de aplicación Localización de la fuente de vertido Tamaño de la comunidad que produce el vertido Características de la aglomeración: – Industrial – Turística – Residencial – Mixta

Por otra parte, el aspecto sanitario, es de primordial importancia para Hammer (1986) pues sostiene que conocer el contenido de coliformes fecales en el agua residual indica el nivel de protección de la salud humana.

Cuadro 2.1b Factores que influyen en la aplicación a suelos agrícolas de las aguas residuales urbanas (II), tomado de Seoáñez (1999_b)

Factores climáticos	Cubierta vegetal	Sistemas y técnicas de vertido	Calidad del área de vertido y su entorno
Temperatura Precipitaciones Evapotranspiración Heladas Vientos – dirección – velocidad – frecuencia Tormentas (frecuencia) Huracanes y tornados	Especies autóctonas Capacidad de absorción de nutrientes Ciclo vegetativo Tolerancia de – humedad – sombra – agentes tóxicos Productividad Rentabilidad Tamaño – herbáceas – matorral – cubierta vegetal	Sistema Intensidad Drenajes Material Duración Frecuencia	Uso anterior del suelo Tipo de cosecha Pastizal – de uso – de depuración Zonas de entorno – Turísticas – Residenciales – Agrícolas – Forestales – Industriales – Periurbana abandonada – Deportivas – Pantanosas – Reservas naturales – Cursos de agua – Masas de agua Valoración del suelo – En el área de vertido – En el entorno Aspecto estético (olores) Aspectos sanitarios

Dentro de la legislación mexicana, la Norma Oficial Mexicana – 001 – ECOL-1996 (DOF, 1997) mostrada en parte en los Cuadros 2.2 y 2.3, establece los límites máximos permisibles para las aguas residuales que son vertidas en aguas y bienes nacionales, y hace referencia a dos niveles y tipos de contaminantes: contaminantes básicos como, grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno₅, nitrógeno total, fósforo total y temperatura. Para pH y contaminantes patógenos y parasitarios como los coliformes fecales y los huevos de helminto, textualmente remarca:

Especificaciones

- a) El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.

Cuadro 2.2 Norma Oficial Mexicana 001 – ECOL – 1996. Niveles máximos permisibles de contenidos físicos, químicos y biológicos en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales –*uso en riego agrícola*– (DOF, 1997).

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS						
PARÁMETROS	RÍOS		EMBALSES NAT. Y ARTIF.		SUELO	
(mg • L ⁻¹)	P. M.	P. D.	P. M.	P. D.	P. M.	P. D.
Temperatura (°C)	N.A.	NA.	40	40	N.A.	N.A.
Grasas y Aceites	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante	A*	A*	A*	A*	A*	A*
Sól. Sed. (mL•L ⁻¹)	1	2	1	2	N.A.	N.A.
Sól. Susp. Tot.	150	200	75	125	N.A.	N.A.
DBO ₅	150	200	75	150	N.A.	N.A.
Nitrógeno Total	40	60	40	60	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	N.A.	N.A.

Notas: P. M. = Promedio mensual P. D. = Promedio diario
N. A.= No aplica A* = Ausente

- b) “Para determinar la contaminación por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente”.
- c) “Para determinar la contaminación por parásitos se tomará como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de

cinco huevos por litro para riego no restringido, lo cual se llevará a cabo de acuerdo a la técnica establecida en el anexo 1 de esta Norma”.

Cuadro 2.3 Norma Oficial Mexicana 001 – ECOL – 1996. Niveles máximos permisibles de elementos contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales –*uso en riego agrícola*- (DOF, 1997).

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS						
PARÁMETROS*	RÍOS		EMBALSES NAT. Y ARTIF.		SUELO	
(mg • L ⁻¹)	P. M.	P. D.	P. M.	P. D.	P. M.	P. D.
Arsénico	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4	0.2	0.4	0.05	0.1
Cianuro	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	1.0	1.5	1.0	1.5	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Plomo	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0	10.0
Zinc	10.0	20.0	10.0	20.0	10.0	20.0

Notas:

(*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario P.M.= Promedio Mensual N.A.= No es aplicable

Realmente, el conocimiento del conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua residual es la mejor guía para determinar el buen empleo de este recurso en riego agrícola y con el menor riesgo sanitario hacia las personas.

Efectos en Suelo por la Irrigación con Aguas Residuales

Al resumir sobre los efectos de la irrigación a largo plazo con aguas residuales, Czyzyk (1992) menciona que la aplicación de agua residual causa incremento en la contaminación de aguas subterráneas y superficiales respecto a sitios adyacentes libres

de éstos suministros. Sostiene este investigador, que tal nivel de contaminación depende principalmente de las condiciones del suelo, en particular, de la permeabilidad y la cantidad de desecho aplicado.

En cambio Seoáñez (1999_b) menciona que los suelos que entran en el grupo de los admisibles para la aplicación de aguas residuales bajo las modalidades de riego o la de infiltración - percolación, deben tener como normas comunes un buen drenaje, que va relacionado a la textura, la estructura y la constitución geológica, así como buena recuperación, la cual implica ciertas características químicas y de textura. Este autor sostiene que los requisitos antes mencionados son de primera importancia en vista de que el vertido de las aguas residuales sobre el suelo provoca una serie de alteraciones debidas a los componentes presentes en esta agua, como pueden ser, mejorar la fertilidad por los nutrimentos adicionados, o provocar toxicidad, si la cantidad del vertido es excesiva.

Por su parte, Lado *et al.* (2005), consideran que el uso de efluentes en irrigación puede afectar las propiedades químicas e hidráulicas del suelo debido a su alto contenido de sales y materia orgánica; por lo cual, para impedir un posible efecto degradante en la estructura del terreno, recomiendan primero, identificar terrenos y áreas sensitivas antes de la aplicación de efluentes para la irrigación. Criterio parecido exponen Tarchitzky *et al.* (1999), pues consideran, que aunque las aguas residuales son fuente importante de agua de regadío en regiones áridas y semiáridas, la calidad de éstos recursos, en especial su contenido de sólidos disueltos inorgánicos –en forma de sales principalmente– llegan

a limitar el crecimiento de la plantas, resultando muy reducida la conductividad hidráulica en los suelos donde tales materiales se aplican.

Otro tipo de afectación es puntualizada por Seoáñez (1999_c) pues considera, de modo general, que los vertidos industriales y urbanos, los lodos de estaciones depuradoras y los depósitos de residuos industriales, aumentan el contenido de metales pesados, al ser vertidos sobre los suelos (especialmente cadmio, cobre, plomo y zinc), hasta una profundidad de 35 a 40 cm, dándose la acumulación máxima de éstos en los cinco centímetros más superficiales.

Según Seoáñez (1996) el papel del suelo como depurador, se ve limitado tanto por *factores de tipo ecológico* como el clima, vegetación presente, aspectos abióticos y microorganismos presentes, así como por *factores meramente sanitarios*, es decir; los niveles al que las cargas biológicas en las aguas depuradas, se abaten, después de pasar a través de una columna de suelo en particular.

Ramalho (1996) considera que las propiedades físicas y mecánicas del suelo, como el grado de dispersión de las partículas del suelo, la estabilidad de los agregados, la estructura y la permeabilidad, son propiedades sensibles a los iones intercambiables presentes en el agua de riego. Como sigue mencionando este autor, por lo tanto, en los casos en los que se pretende regar con agua residual recuperada, se debe tener en cuenta tanto, además de las propiedades del suelo, las características de producción del cultivo. Por su parte, Levy *et al.* (1999); resalta que las propiedades hidráulicas del suelo son de

las primeramente afectadas cuando se aplican, de manera inapropiada, los riegos mediante aguas residuales.

Para condiciones de ambiente árido, reportan Inzunza y Monger (2005), que por sí sola, la práctica del riego provoca en el suelo alteraciones notorias. Revisando las afectaciones por 22 años de irrigación continua en el norte de la República Mexicana, al comparar, áreas irrigadas con áreas no irrigadas; encontraron que el contenido de materia orgánica disminuyó en 50 por ciento durante este lapso en la áreas irrigadas, mientras que, disminuyó en 30 por ciento en las áreas irrigadas respecto a las libres de esta práctica. Además reportan que el pH incrementó de 4.1 por ciento a 5.6 por ciento durante este mismo período y en análisis similar. Consideran éstos autores que la materia orgánica sufrió este tipo de cambio debido a que las fases de humedecimiento y secado propios de la irrigación, provocaron una mayor actividad microbiana, y de ello, ocurrió mayor descomposición y agotamiento de la materia orgánica; mientras que el pH aumentó debido al depósito de sales en suelo por el agua de riego.

De modo que, en las aplicaciones al suelo del agua residual mediante riego agrícola, es de primordial importancia una evaluación anticipada de las características del sustrato, así como el seguimiento en los cambios provocados en él.

Presente y Futuro del Reuso de Agua en México

De acuerdo con el Consejo Coordinador Empresarial (CCE) (1998), el balance de recursos hídricos para México muestra que anualmente se reciben 1 570 km³ de agua por

precipitación, de la cual se pierden por evaporación alrededor del 68 por ciento, lo que establece la oferta de agua a nivel nacional en 473 km³; siendo la demanda, de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA) (2004) cercana a los 225 km³. A pesar de ello, persisten problemas de disponibilidad de agua a causa de la distribución fisiográfica y climática desfavorable, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y por el incremento acelerado en las demandas que requieren los diferentes usos.

Ante la eminente escasez del recurso en algunas áreas nacionales, el reuso del agua se plantea una alternativa para el abastecimiento; aunque desde luego para su implementación son necesarios aspectos como la demanda del agua tratada, la disponibilidad de tales recursos, la capacidad para tratar esta agua a la calidad requerida y los usuarios potenciales.

Aunque el reuso del agua por el sector agrícola es una práctica conocida en el país, potencialmente puede crecer su uso con fines industriales, en servicios municipales, usos secundarios y para la recarga de acuíferos; actividades, actualmente, con poca aplicación.

Este enfoque plantean Escalante *et al.*, (2002) después de obtener respuestas positivas en entrevistas para medir el nivel de aceptación hacia el empleo de estos recursos por parte de usuarios potenciales, como también se desprende del hecho, sostenido por ellos mismos, que el costo del metro cúbico de agua residual tratada varía de \$ 1.48 a \$ 5.00 mientras el de agua potable es de \$ 4.00 a \$ 14.00. Al referirse a la infraestructura para éstos fines, éstos investigadores hallaron que en México se tienen en

total 1 132 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las que 938 están en operación, con un gasto instalado de $73\,853\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, más teniendo en operación solamente $50\,810\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$; de los que $10\,868\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ se ocupan para diversos usos y el resto se vierte a cuerpos receptores. De esta última cifra, $3\,562\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ se destinan al uso agrícola, $2\,810\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ para usos industriales, principalmente en Coahuila, Edo. de México y Nuevo León (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4 Reuso del agua residual tratada en México ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)

Estado	Riego agrícola	Uso industrial	Áreas verdes	Agrícola /Á. verdes	Á.verde industrial	Energía eléctrica	Río / Riego forrajes	Total	% estatal
Aguascalientes	3.8							3.8	0.0
B C N	31.2		5.0					36.2	0.3
B C S	410.5		245.0					655.5	6.0
Chihuahua	60.0		50.0					110.0	1.0
Coahuila	42.0	500.0	50.0					592.0	5.5
D. Federal	250.0		356.0	2 100.0	488.0			3 194.0	29.4
Durango	15.6		2.5					40.6	0.4
Guanajuato	0.0					45.0		45.0	0.4
Hidalgo	19.0							19.0	0.2
Jalisco	1.0							28.0	0.3
Edo. de Méx.	1 330.0	870.0	27.0					2 200.0	20.2
Michoacán	310.0							310.0	2.9
Nayarit	26.0							26.0	0.2
Nuevo León	219.6	1 440.0	149.5					1 809.1	16.7
Oaxaca	0.0		140.0					140.0	1.3
Puebla	209.9							209.9	1.9
Querétaro	528.0							528.0	4.9
Quintana Roo	0.0		320.0					320.0	2.9
S. Luis Potosí	0.0		170.0					170.0	1.6
Sinaloa	40.0		60.0					100.0	0.9
Sonora	46.0		17.0				233.9	296.9	2.7
Tamaulipas	11.0							11.0	0.1
Veracruz	9.0							9.0	0.1
Zacatecas	0.0		13.6					13.6	0.1
Suma	3 562.6	2 810.0	1 628.1	2 100.0	488.0	45.0	233.9	10 867.6	100
% actividad	32.8	25.9	15.0	19.3	4.5	0.4	2.2		

Fuente: Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Municipales (CNA, 2001)

El panorama futuro sobre el empleo del agua residual en el país, deja ver que este tendrá un crecimiento notorio en el corto plazo en vista de que, como sucede a nivel mundial, las áreas donde el agua de primer uso es escasa, se van incrementando, acompañado ello, casi siempre, por el incremento poblacional y las demandas que de allí derivan.

Para lograr lo anterior, según Arreguín *et al.* (1998), se requiere alcanzar la optimización en los sistemas de tratamiento mediante la combinación de procesos unitarios físicos, químicos y biológicos, para producir un agua tratada de calidad cada vez mayor.

La investigación sobre estos temas tiene un camino largo por recorrer, en lo que respecta a los límites de detección que analíticamente es posible medir con las técnicas y los equipos actuales. El efecto que estos contaminantes causan a la salud humana es también un tema prioritario sobre investigación relativa al reuso del agua. La mayor preocupación es la remoción de patógenos, sobre todo virus.

En el resumen de la reunión binacional México – Estados Unidos sobre manejo integral de los recursos hídricos fronterizos, confirma Núñez (2003) la necesidad de mantener vigente el enfoque expuesto líneas arriba, y en especial remarca que el 80 por ciento de consumo por las actividades agrícolas debe ser abatido mediante disposición más eficiente.

En el alcance de estas metas, la Normatividad Oficial Mexicana tendrá que ser actualizada a fin de garantizar la producción de agua residual de calidad confiable al ser empleada, con manejo y disposición amigable con el entorno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área Experimental

El experimento se realizó a “campo abierto”, en una superficie de 60 x 20 m² representada en la Figura 3.1, que se localiza a los 25° 21’ 29” latitud norte, 101° 01’ 59” de longitud oeste y 1 767 metros de altura; dentro del Campus principal de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN) en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

El clima predominante es BWhw(x’)(e), muy seco, semicálido, con invierno fresco, extremo, con lluvias de verano y precipitación invernal superior a 10% de la total anual, con temperatura media anual de 19.8 °C y precipitación media anual de 298.5 milímetros (Mendoza, 1983).

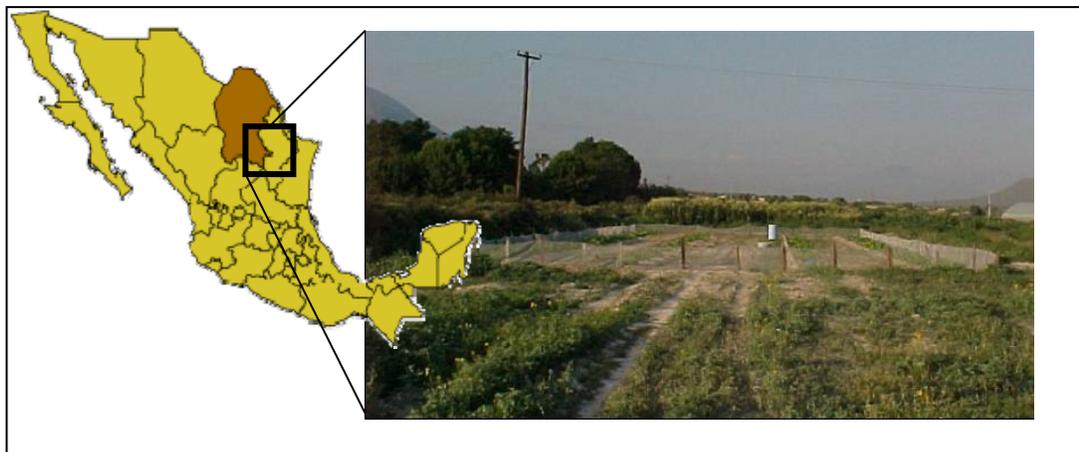


Figura 3.1 Ubicación del sitio experimental

Caracterización de Aguas y Suelo

La identificación y nivel de tratamiento de las aguas empleadas en el experimento se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Tipos de agua y tratamiento, sitio de muestreo y abasto de las aguas empleadas

Tipo de agua y tratamiento	Identificación	Sitio de muestreo y abasto
Residual doméstica, primario y secundario	(R UA)	Campus de la UAAAN Laguna de almacenamiento
Residual urbana municipal, ninguno	(R MP)	Ejido “El Mesón”, Ramos Arizpe, Coahuila Arroyo Municipal Saltillo – Ramos Arizpe
Residual doméstica, terciario	(R EF)	Escuela Forestal Carr. Saltillo–Zacatecas Km. 6.5 Salida a riego de áreas verdes
Pozo Profundo, primer uso (testigo)	(P UA)	UAAAN Salida a riego de áreas agrícolas

Previamente a la aplicación de los recursos mencionados, con el objetivo de realizar su caracterización, y la ayuda de personal del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), se realizaron muestreos simples en los sitios definidos y mostrados en la Figura 3.2, de acuerdo a NMX-AA-003-1980 (DOF_a, 1980).



Figura 3.2 Sitios de muestreo de las aguas residuales

Los análisis a parámetros de interés fueron realizados de acuerdo a los protocolos de las Normas Oficiales Mexicanas y de Environmental Protection Agency (EPA), expuestos en el Cuadro 3.2

Cuadro 3.2 Parámetros evaluados en la caracterización inicial de las aguas experimentales

Parámetro	Norma	Referencia
Sólidos totales	NOM-AA-034-1980	DOF _b , 1980
Coliformes totales y fecales	NMX-MX-AA-042-1987	DOF _c , 1987
Grasas y aceites	NMX-MX-005-SCFI-2000	DOF _a , 2000
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	DOF _b , 2000
Metales solubles	NMX-AA-051-SCFI-2000	DOF _c , 2000
	EPA 200.7	EPA, 1982
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	DOF _a , 2001
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	DOF _b , 2001
Color platino – cobalto	NMX-AA-045-SCFI-2001	DOF _c , 2001
Nitratos	NMX-AA-058-SCFI-2001	DOF _d , 2001
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2001	DOF _e , 2001

Además de la caracterización de acuerdo a la Norma Oficial también se determinó la calidad agronómica de estas aguas mediante las normas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Richards, 1973) y usando como base el análisis de calidad de las aguas efectuado en el laboratorio del Departamento de Ciencias del Suelo y laboratorio de Ciencias Básicas, ambos dentro de la UAAAN. Los parámetros determinados en tal análisis aparecen en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3 Caracterización agronómica de las aguas utilizadas

Ión	Método	Unidad	Referencia
Ca ²⁺	Absorción Atómica	meq • L ⁻¹	Plenecassagne <i>et al.</i> (1997)
Mg ²⁺	“	meq • L ⁻¹	
Na ⁺	“	meq • L ⁻¹	
K ⁺	“	meq • L ⁻¹	
CO ₃ ⁼	Volumetría	meq • L ⁻¹	
HCO ₃ ⁻	“	meq • L ⁻¹	
SO ₄ ⁼	“	meq • L ⁻¹	
Cl ⁻	“	meq • L ⁻¹	

A fin de lograr una interpretación más correcta de la calidad de las aguas empleadas, a partir de las determinaciones anteriores se calcularon las características expuestas en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4 Características de calidad agronómica en las aguas experimentales

Característica	Símbolo	Unidad	Referencia
Relación de adsorción de sodio	RAS _{ajustado}	meq • L ⁻¹	Suárez, 1981
Porcentaje de sodio intercambiable	PSI	%	Richards, (1973)
Carbonato de sodio residual	CSR	meq • L ⁻¹	Cadahía, 2000
Dureza	D	meq • L ⁻¹	Junta de Extremadura (1992)
Índice de Scott	IS	meq • L ⁻¹	Cánovas (1986)
Clasificación USDA	Normas Riverside		Richards (1973)

Para la caracterización inicial del suelo experimental, después del barbecho, rastreo, nivelación, y antes de iniciar las aplicaciones de agua, se realizó el muestreo en tres sitios representativos, en los estratos 0.00 – 0.30, 0.30 – 0.60 y 0.60 – 0.90 metros. El suelo fue secado al aire, tamizado a 2 mm, y procesado según los análisis correspondientes mostrados en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Propiedades de suelo evaluadas en la caracterización inicial y durante el experimento

Parámetro	Símbolo	Método	Referencia
P. físicas			
Densidad de sólidos	DS	Gravimétrico	Narro (1994)
Densidad aparente	DA	Probeta	Narro (1994)
Capacidad de campo	CC	Columnas Coleman	Aguilar (1988)
Color de suelo	CS	Cartas de Munsell	Munsell Color (1975)
Textura	T [†]	Densímetro	Bouyoucos (1936)
P. químicas			
pH	pH	Potenciómetro	
Conductividad eléctrica	CE	Extracto de pasta	
Carbonatos totales	CO ³⁼	Titulación	
Materia orgánica	MO	Walkey y Black	Walkey y Black, (1934)

NOTA: T[†] No evaluada como variable experimental

Metodología

En campo, mediante una distribución de bloques al azar, y arreglo de parcelas subdivididas, se trazaron cuatro áreas iguales de (10 x 30) m² cada una, según el tipo de agua por aplicar, y hacia el interior de cada una de ellas, se delimitaron 16 áreas de 1 m², separadas a 2 m entre sí, para las aplicaciones según las frecuencias de riego: a cada 2, 4, 6, y 8 días; con 4 repeticiones, haciendo un total de 64 unidades experimentales. La lámina neta de riego, por gravedad, fue de 20 milímetros para cada frecuencia de riego. Los tratamientos resultantes se muestran en el Cuadro 3.6.

Cuadro 3.6 Tratamientos experimentales evaluados

Tratamiento	Tipo de agua	Frec. de riego	Tratamiento	Tipo de agua	Frec. de riego
1	R UA	Cada 2 días	9	R EF	Cada 2 días
2	R UA	Cada 4 días	10	R EF	Cada 4 días
3	R UA	Cada 6 días	11	R EF	Cada 6 días
4	R UA	Cada 8 días	12	R EF	Cada 8 días
5	R MP	Cada 2 días	13	P UA	Cada 2 días
6	R MP	Cada 4 días	14	P UA	Cada 4 días
7	R MP	Cada 6 días	15	P UA	Cada 6 días
8	R MP	Cada 8 días	16	P UA	Cada 8 días

La ubicación en campo de las áreas experimentales quedó de la manera mostrada en la Figura 3.3.

Manejo del Cultivo

La germinación de la acelga (*Beta vulgaris* L.) variedad Lyon, se realizó a condiciones ambientales, en charolas de polietileno de 200 cavidades usando como

sustrato suelo experimental del estrato 0.00 – 0.30 m. A los 15 días de germinación, en cada unidad experimental, se sembraron, por trasplante, nueve plantas de acelga, a 0.30 m entre sí.

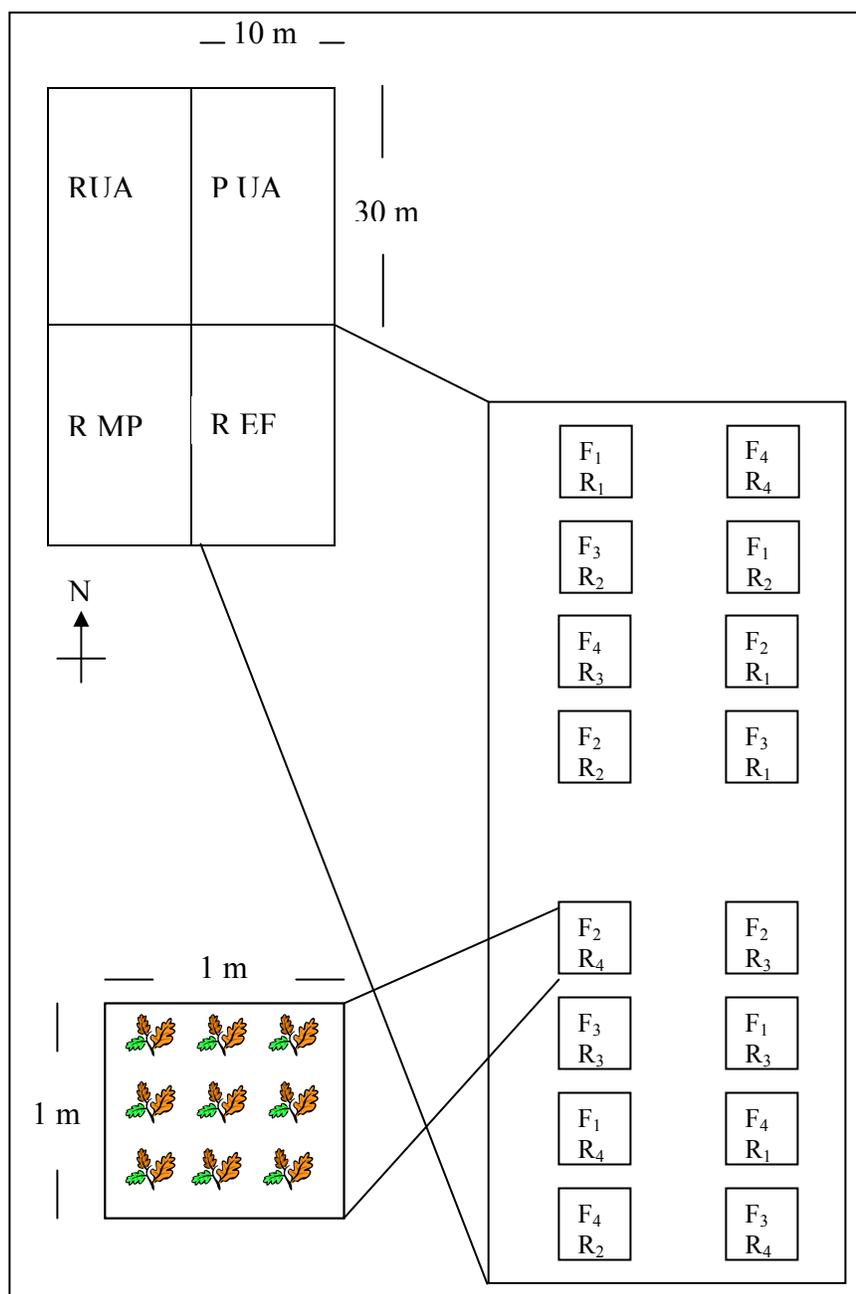


Figura 3.3 Ubicación de áreas experimentales en campo

Los cuidados al cultivo consistieron en mantenerlo libre de malezas en forma manual, sin labores culturales, cero fertilización y sin necesidad de control de plagas y enfermedades, cosechándole únicamente el follaje necesario para los análisis.

Evolución de Propiedades en Suelo

Para el seguimiento en la evolución de las propiedades de interés en suelo (Cuadro 3.5), después de iniciados los riegos, cada 30 días, mediante barrena, se realizaron los muestreos al mismo, en los tres estratos antes mencionados y con el manejo, expuesto anteriormente, para las muestras.

Cuantificación de Metales en Agua de Riego, Suelo y Hoja del Cultivo

En las aguas de riego, las cantidades de metales solubles en los tres muestreos iniciales, fueron promediadas y tomadas como las cantidades presentes, en cada tipo de agua, durante el lapso experimental. La determinación, en estos recursos, de mercurio y arsénico se hizo mediante la generación de hidruros en espectrofotómetro de absorción atómica Varian 250 plus, según el instructivo de la norma NMX-AA-051-SCFI-2000 (DOF_c, 2000). La determinación de cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc; se realizó por aspiración directa en espectrofotómetro de plasma ICP Thermo Jarrel Ash – Iris Advantage y horno de microondas MARS 5, de acuerdo a la guía EPA 200.7 (EPA, 1982).

En suelo, la cuantificación como elemento total fue mediante digestión ácida con solución 2:1 de ácido nítrico: perclórico concentrados, mientras que, para la fracción extractable se procedió de acuerdo al método de Lindsay y Norvell (1978), ambas leídas

en espectrofotómetro de absorción atómica del Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Para este caso se ocuparon únicamente las muestras de suelo del estrato 0.00 – 0.30 m obtenidas a los 90, 180 y 270 días después del trasplante (DDT) del cultivo.

Para la cuantificación en hoja, a las fechas antes mencionadas, se tomaron cuatro hojas representativas de cada uno de tres estadios: < 1 mes, 1 – 3 meses y > 3 meses, de desarrollo; doce en total por tratamiento. El follaje colectado fue secado en estufa a 65 °C por 72 horas, molido, calcinado en mufla por una hora a 600 °C y digerido con HCl 1:1; leyendo en su dilución los elementos de interés en espectrofotómetro de absorción atómica en el laboratorio de Ciencias del Suelo, en la UAAAN. Además, en cada fecha mencionada, de cada tratamiento se cosechó el follaje total de dos plantas para: peso de materia seca haciendo el secado en estufa a 65 °C por 72 horas, además del número de hojas por planta y altura de la misma.

Modelo Estadístico

Para el análisis del experimento y bajo el arreglo experimental antes mencionado, el modelo estadístico para el análisis de varianza, de acuerdo con Montgomery (1991), fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \delta_h + (\tau\delta)_{ih} + (\beta\delta)_{jh} + (\tau\beta\delta)_{ijh} + (\gamma\delta)_{kh} + (\tau\gamma\delta)_{ikh} + (\beta\gamma\delta)_{jkh} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkh}$$

donde:

$$\tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} = \text{parcela completa}$$

$$\tau_i = \text{bloques} = \text{meses}, \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (\text{factor A})$$

$$\beta_j = \text{tratamientos principales} = \text{estratos}, \quad j = 1, \dots, b \quad (\text{factor B})$$

$$(\tau\beta)_{ij} = \text{error de la parcela grande y para B}$$

$$\gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} = \text{parcela dividida}$$

$$\gamma_k = \text{tratamiento de la parcela dividida} = \text{tipos de agua}, \quad k = 1, 2, \dots, c \quad (\text{factor C})$$

$$(\tau\gamma)_{ik} = \text{interacción AC} = \text{error para C}$$

$$(\beta\gamma)_{jk} = \text{interacción BC}$$

$$(\tau\beta\gamma)_{ijk} = \text{error de la parcela dividida y para BC}$$

$$\delta_h + (\tau\delta)_{ih} + (\beta\delta)_{jh} + (\tau\beta\delta)_{ijh} + (\gamma\delta)_{kh} + (\tau\gamma\delta)_{ikh} + (\beta\gamma\delta)_{jkh} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkh} = \text{parcela subdividida}$$

$$\delta_h = \text{tratamiento de la parcela subdividida} = \text{frecuencia de riego}$$

$$h = 1, 2, \dots, d \quad (\text{factor D})$$

$$(\tau\delta)_{ih} = \text{error para D}$$

$$(\gamma\delta)_{kh} = \text{interacción CD}$$

$$(\beta\delta)_{jh} = \text{interacción BD}$$

$$(\tau\gamma\delta)_{ikh} = \text{error para CD}$$

$$(\tau\beta\delta)_{ijh} = \text{error para BD}$$

$$(\beta\gamma\delta)_{jkh} = \text{interacción BCD}$$

$$(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkh} = \text{error de la parcela subdividida y para BCD}$$

De acuerdo a Montgomery (1991), las medias de cuadrados esperadas para el diseño en parcelas subdivididas es:

		$a\ b\ c\ d\ 1$ $R\ F\ F\ F\ R$	
Factor		$i\ j\ h\ k\ l$	Medias de cuadrados esperada
	τ_i	$1\ b\ c\ d\ 1$	$\sigma^2 + bcd\sigma_\tau^2$
Parcela	β_j	$a\ 0\ c\ d\ 1$	$\sigma^2 + cd\sigma_{\tau\beta}^2 + \frac{acd\sum\beta_j^2}{(b-1)}$
completa	$(\tau\beta)_{ij}$	$1\ 0\ c\ d\ 1$	$\sigma^2 + cd\sigma_{\tau\beta}^2$
	γ_k	$a\ b\ 0\ d\ 1$	$\sigma^2 + bd\sigma_{\tau\gamma}^2 + \frac{abd\sum\gamma_k^2}{(c-1)}$
Parcela	$(\tau\gamma)_{ik}$	$1\ b\ 0\ d\ 1$	$\sigma^2 + bd\sigma_{\tau\gamma}^2$
dividida	$(\beta\gamma)_{jk}$	$a\ 0\ 0\ d\ 1$	$\sigma^2 + d\sigma_{\tau\beta\gamma}^2 + \frac{ad\sum\sum(\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$
	$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	$1\ 0\ 0\ d\ 1$	$\sigma^2 + d\sigma_{\tau\beta\gamma}^2$
	δ_h	$a\ b\ c\ 0\ 1$	$\sigma^2 + bc\sigma_{\tau\delta}^2 + \frac{abc\sum\gamma_k^2}{(c-1)}$
Parcela	$(\tau\delta)_{ih}$	$1\ b\ c\ 0\ 1$	$\sigma^2 + bc\sigma_{\tau\delta}^2$
subdividida	$(\beta\delta)_{jh}$	$a\ 0\ c\ 0\ 1$	$\sigma^2 + c\sigma_{\tau\beta\delta}^2 + \frac{ac\sum\sum(\beta\delta)_{jh}^2}{(b-1)(d-1)}$
	$(\tau\beta\delta)_{ijh}$	$1\ 0\ c\ 0\ 1$	$\sigma^2 + c\sigma_{\tau\beta\delta}^2$
	$(\gamma\delta)_{kh}$	$a\ b\ 0\ 0\ 1$	$\sigma^2 + b\sigma_{\tau\gamma\delta}^2 + \frac{ab\sum\sum(\gamma\delta)_{kh}^2}{(c-1)(d-1)}$
	$(\tau\gamma\delta)_{ikh}$	$1\ b\ 0\ 0\ 1$	$\sigma^2 + b\sigma_{\tau\gamma\delta}^2$
	$(\beta\gamma\delta)_{jkh}$	$a\ 0\ 0\ 0\ 1$	$\sigma^2 + \sigma_{\tau\beta\gamma\delta}^2 + \frac{a\sum\sum\sum(\beta\gamma\delta)_{ijk}^2}{(b-1)(c-1)(d-1)}$
	$(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkh}$	$1\ 0\ 0\ 0\ 1$	$\sigma^2 + \sigma_{\tau\beta\gamma\delta}^2$
	$\varepsilon_{l(ijkh)}$	$1\ 1\ 1\ 1\ 1$	σ^2 (no estimable)

Se realizó la comparación de medias de tratamientos en aquellas variables que en el análisis de varianza (ANVA) mostraron significancia estadística, utilizando para ello la Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

El análisis de varianza de los datos se realizó usando el paquete Minitab Versión 14 (Minitab Inc., 2005) y la prueba de medias Tukey 0.05, en Mstat – C (Russel y Einsensmith, 1990).

La representación en plano bidimensional de las variables se realizó mediante Análisis de Componentes Principales generados en el Programa de computadora STATISTICA 5.1 (Statsoft.com, 1997).

Evolución de Propiedades Químicas del Suelo

En el resumen de los cuadrados medios y significancias estadísticas sobre el comportamiento de las variables químicas de suelo evaluadas, que se expone en el Cuadro 4.7 puede apreciarse que las aplicaciones de los factores empleados bajo el manejo realizado, manifestaron cambios apreciables en suelo; con una afectación similar para los carbonatos totales y el porcentaje de materia orgánica.

Cuadro 4.7 Cuadrados medios y significancias de los factores evaluados y sus interacciones para las variables químicas de suelo estudiadas

Fuente de variación	G L	pH	CE	CO ³⁼	MO
Tipo de agua (TA)	3	0.079 ^{NS}	0.532 ^{**}	375.300 ^{**}	3.502 ^{**}
Frecuencia de riego (FR)	3	0.051 ^{NS}	0.046 ^{NS}	18.230 ^{NS}	0.127 ^{NS}
Estrato (E)	2	0.196 [*]	0.617 ^{NS}	450.780 ^{**}	84.940 ^{**}
TA · FR	9	0.014 [*]	0.051 ^{NS}	24.780 ^{NS}	0.153 ^{NS}
TA · E	6	0.014 ^{**}	0.233 ^{**}	83.820 ^{**}	0.250 ^{**}
FR · E	6	0.006 ^{NS}	0.089 [*]	13.960 ^{NS}	0.069 ^{NS}
TA · FR · E	18	0.006 ^{**}	0.037 [*]	24.020 ^{**}	0.072 ^{NS}

pH

El análisis estadístico para pH en el Cuadro 4.7 muestra que los tres factores empleados, por sí solos tuvieron diferencias altamente estadísticas, lo cual también fue determinante de los niveles alcanzados en las interacciones de factores.

Así, del efecto en suelo por tipos de agua, sobresale el menor valor estadístico de 7.67 provocado en el empleo de R EF, mientras las restantes aguas provocaron valores de 7.71 a 7.72, esto por el ajuste hacia la neutralidad a que es sometida R EF al final de

su acondicionamiento terciario en la planta de tratamiento generadora, parecido a lo reportado por Pérez (2002).

Es de particularizarse que la poca carga orgánica en la forma de sólidos totales, contenida en el agua P UA (Cuadro 4.1), no le permitió a este recurso ejercer efecto amortiguador sobre la variable, según asegura Pérez (2002); sino más bien ayudó en la dilución de las sales nativas del suelo, lo que ayudado por la alta evapotranspiración del sitio, coadyuvó al incremento del pH.

Igualmente, el riego a cada dos días fue estadísticamente superior con 7.74 puntos, mientras las restantes frecuencias fluctuaron de 7.69 a 7.70. También pudo apreciarse que el estrato superior con 7.74 y el intermedio con 7.71, superaron estadísticamente a los 7.67 del estrato inferior.

Esta manifestación de mayor pH en el estrato superior, de acuerdo con CNA (2002), es consecuencia evidente de las altas evaporaciones persistentes en la zona, las cuales provocan la concentración de las sales, tanto de las adicionadas por el riego, como las nativas del suelo y que son disueltas por la irrigación.

Pudo notarse que los valores del parámetro en la fase de caracterización para los tipos de agua R UA y R MP fueron inicialmente altos, en 8.30 y 7.89 unidades respectivamente (Cuadro 4.1), más el suelo, en el estrato superior, por las adiciones de tales recursos, alcanzó 7.71 y 7.74 unidades, en cada caso; dándose un aumento ligero a los 7.63 unidades iniciales del suelo (Cuadro 4.3). El agua Escuela Forestal, por el

contrario, desde su menor valor inicial de 7.24, al combinarse con el suelo, provocó en este un aumento hasta 7.67, solamente.

Independiente a los valores iniciales de pH de los tipos de agua, al equilibrio con el suelo, los valores giraron alrededor de 7.70, valor que es alcanzado rápidamente y no varía a través del tiempo; como evidencia de la capacidad amortiguadora de los suelos en general, según remarcan Seoáñez (1999_c) y Castellanos *et al.*(2000).

Para el caso de cualquiera de las interacciones entre los factores, los niveles alcanzados por los factores de modo aislados, marcaron el efecto en la acción conjunta. Por ejemplo, para la interacción con las frecuencias de riego, fue evidente que el valor estadísticamente mayor se dio al aplicar P UA en el riego a cada dos días con 7.78 puntos, mientras las aplicaciones de R EF giraron alrededor de 7.67. Un comportamiento similar se apreció en la interacción con los estratos, mostrada en la Figura 4.6.

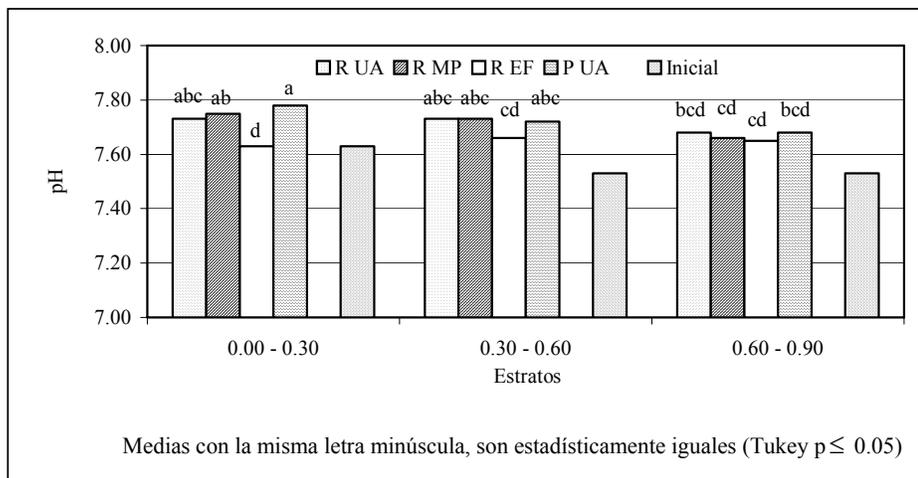


Figura 4.6 Valores de pH por estratos de suelo en la aplicación de aguas residuales

De modo general para esta variable, se dio un incremento rápido en los valores originales del suelo, sostenido durante el tiempo del trabajo, aunque a partir del mes sexto se apreció una caída general en los valores, de modo que hacia el final los valores incluso aparecieron por debajo del promedio inicial en suelo como se muestra en la Figura 4.7, con tendencia a esta disminución conforme se ampliaba la frecuencia de riego y los estratos profundizaban.

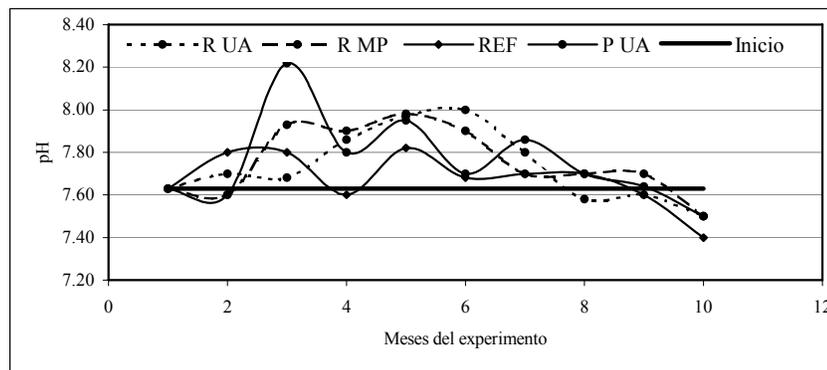


Figura 4.7 Valores de pH en el riego a cada ocho días y para el estrato 0.00 – 0.30 m durante el lapso de la investigación

Conductividad eléctrica

Respecto a conductividad eléctrica, del Cuadro 4.7 se aprecian diferencias estadísticas para la variable en suelo, por los tipos de agua empleados así como por la interacción de éstos con la ubicación de los estratos, sin que las tasas de agua aplicadas provocaran cambios distintivos en el sustrato.

La tendencia general fue hacia el abatimiento de la variable en suelo, respecto a los valores originales, tanto de las aguas como del suelo; presentándose, solamente en el estrato 0.00 – 0.30 m, por la aplicación de R MP, el valor estadísticamente superior de $1.15 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ que sobrepasó al original en suelo de $0.96 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y apreciado en la Figura 4.8.

A esto contribuyeron, las concentraciones salinas debidas a la marcada insolación en la región (CNA, 2002), el valor superior original de la conductividad eléctrica en R MP, de $2.52 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y la consiguiente clasificación restrictiva C_4 para este recurso al emplearla en irrigación, mencionada por Richards (1973), lo cual es mostrado en el Cuadro 4.2.

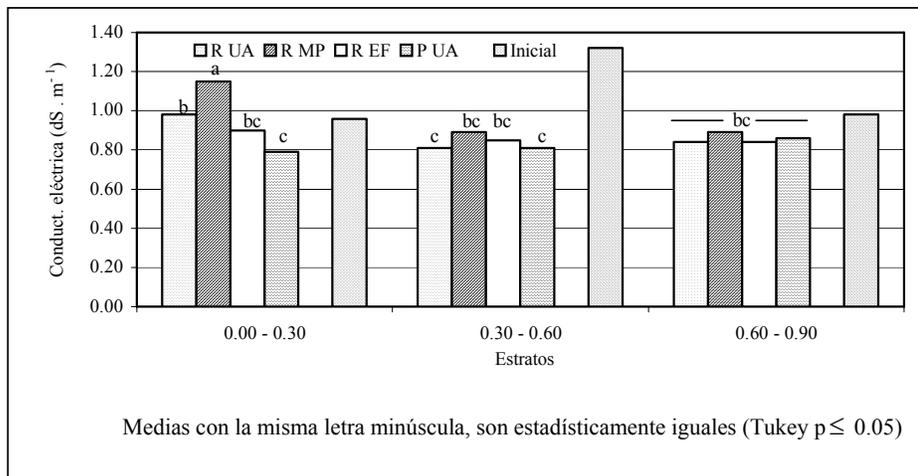


Figura 4.8 Valores de conductividad eléctrica por estratos de suelo en aplicación de aguas residuales

Es de remarcarse el abatimiento notorio que provocan los riegos en el estrato 0.30 – 0.60 m, en $0.48 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, respecto al valor inicial del suelo; tanto porque en este caso, la

concentración de sales que llega a este punto es menor por el papel filtrante del suelo (Pérez, 2002), como a que la concentración salina por la evaporación (CNA, 2002) es prácticamente nula.

La anterior situación también es evidente al revisar los resultados por la aplicación a cada dos días según la ubicación de los estratos, ya que los valores extremos para esta interacción, de $0.99 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y $0.79 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, suceden en esta frecuencia de riego, sin duda por la característica adsorbente y mayor insolación, en el estrato superior arcilloso (Cuadro 4.3), dándose así la infiltración a estratos más profundos, del líquido, en su mayoría, libre de solutos

Comportamiento parecido hallaron Zhong *et al.* (2005), en condiciones áridas, ya que al aplicar ellos una lámina de riego de $2\,400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, también apreciaron el mayor abatimiento de la salinidad en los 60 cm superiores del suelo.

Tomando como referencia el comportamiento en los estratos 0.30 – 0.60 m y 0.60 – 0.90 m, sin la estimulación ambiental a la concentración salina, el análisis estadístico por las frecuencias de riego aplicadas, no mostró diferencias en la variable, quedando, según este caso, la posibilidad de usarse las anteriores láminas de riego sin daños al suelo.

Debido a que, por estratos, los valores en suelo tuvieron consistencia con los valores originales del agua empleada, en este caso, la capacidad amortiguadora del suelo

no tuvo una acción tan evidente (Seoáñez, 1999_c y Castellanos *et al.*, 2000), como en el caso del pH.

Comentario [EU01]: El acento

La revisión del experimento en tiempo muestra de forma general un comportamiento de altibajos, ejemplificado en la Figura 4.9 mediante la interacción (tipo de agua) (riego a cada 6 días), viéndose en los muestreos de los meses 3, 5, y 7 cierta tendencia a puntos altos, los que descendían en los muestreos restantes.

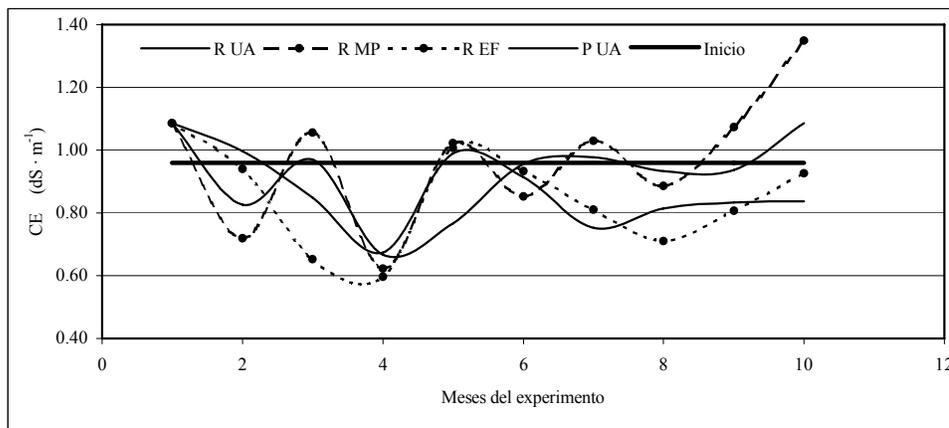


Figura 4.9 Valores mensuales de conductividad eléctrica, por tipo de agua y riego a cada seis días, en el estrato 0.00 – 0.30 m, en suelo regado con aguas residuales

Tal desarrollo muestra que, para al menos, en un lapso como el experimental, la capacidad amortiguadora del suelo logra contrarrestar satisfactoriamente los efectos acumulativos por sales en los tres tipos de agua con menores contenidos; y solamente con la aplicación de agua Arroyo Municipal logra cierta acumulación, que incluso, rebasa el valor inicial en suelo.

Carbonatos totales

En los carbonatos totales de suelo, el análisis estadístico muestra que tanto entre tipos de agua como entre estratos se dieron diferencias definitivas las cuales se muestran en el Cuadro 4.7.

La presencia común del calcio en variadas formas en el entorno regional según CNA (2002) y Martínez y Walthall (2000), fue determinante para que los valores originales del parámetro en las aguas y suelo experimentales prevalecieran, e inclusive, para el caso de los estratos 0.30 – 0.60 m y 0.60 – 0.90 m aumentara en 10.88 y 5.45, por ciento, respectivamente; como se aprecia en la Figura 4.10. De nuevo la marcada influencia de la radiación sobre el estrato superficial determinó que este aumento fuera menor en tal punto con solamente 4.60 por ciento.

A diferencia de lo que sucede con la aplicación de R UA que tiene el pH más elevado con 8.3, y la consiguiente menor dilución de carbonatos edáficos; fue notable el desempeño promotor a los valores estadísticamente superiores en suelo por la aplicación tanto de R EF como de P UA, ya que, la menor presencia de carga orgánica en estos recursos, les confirió mejor efecto diluyente en los contenidos cálcicos del suelo, comportamiento más evidente, sobre todo en el estrato más profundo.

La comparación de los valores de la variable entre estratos, deja ver que el superficial fue superior respecto tanto al intermedio como al más profundo, con 8.04 y

10.80 por ciento, respectivamente. Tales resultados de nuevo remarcan la influencia determinante de las evaporaciones hídricas en tal punto que terminan por concentrar tales sólidos en la capa arable.

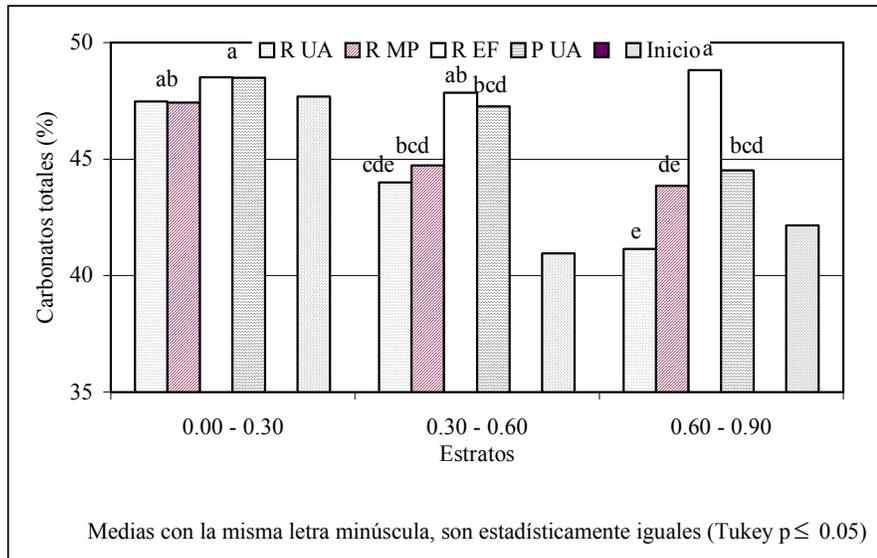


Figura 4.10 Valores de carbonatos totales por estratos de suelo en aplicación de aguas residuales

Con el propósito de reducir los valores de la alcalinidad para sitios como el presente, de acuerdo, tanto con Aguilar y Van Diest (1981) como con Rodas *et al.* (2001), se requiere de acciones específicas como: explotar plantas con absorción selectiva que abaten el pH de la rizosfera, acidulación parcial con azufre o ácido fosfórico, adición de estiércol en proceso de fermentación o la adición de fertilizantes nitrogenados y fosfatados; entre otras.

La tendencia hacia la acumulación progresiva a través del tiempo logró apreciarse en las curvas para los tipos de agua en el estrato intermedio representadas en la Figura 4.11, donde se ve como aunque el comportamiento tiende a ser horizontal, sin embargo, se mantiene siempre por arriba del valor original del suelo.

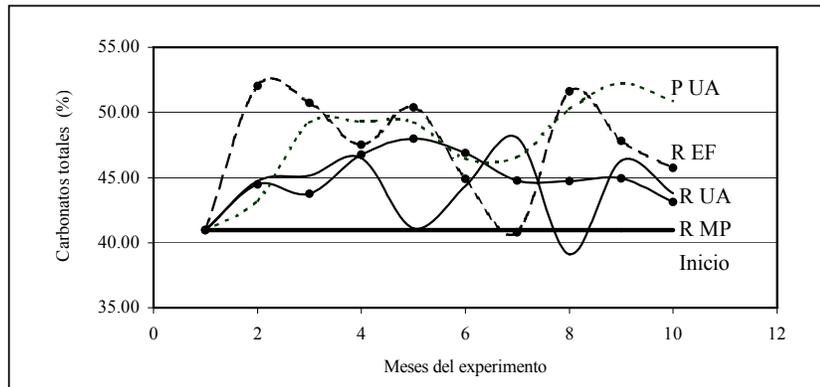


Figura 4.11 Porcentaje de carbonatos totales de suelo para el estrato 0.30 – 0.60 m por la aplicación de aguas residuales

Según la evolución de esta variable, es importante un manejo al suelo, acorde a las sugerencias antes expuestas, a fin de mantener su productividad, poniendo incluso mayor atención cuando el riego se realice con agua de poca carga orgánica.

Materia orgánica

El análisis estadístico para el contenido de materia orgánica mostrado en el Cuadro 4.7 permite apreciar que esta variable resultó afectada tanto por los tipos de agua como por la ubicación de los estratos.

En el caso de los tipos de agua, se aprecia que las adiciones de R EF y de P UA arrojaron los valores estadísticamente superiores, mientras que por frecuencias de riego, el riego a cada dos días y el riego a cada 6 días, mostraron los valores, menor y mayor, respectivamente. Entre los estratos, en el superficial apareció el mayor valor entre ellos.

Relacionado a lo anterior, de las situaciones expuestas por Inzunza y Monger (2005) y mostradas en el Cuadro 4.8, se aprecia que las aplicaciones de aguas residuales con alta carga orgánica, como fueron R UA y R MP, mostrado en el Cuadro 4.1, generaron mayor actividad microbiana en el suelo y el consiguiente mayor agotamiento de la materia orgánica presente, lo cual va de acuerdo a lo mencionado por Quiroga *et al.*, (1998) y Lado *et al.*, (2004); al presentar valores menores respecto al uso de las otras aguas, de menor carga microbiana.

Por otra parte, la ubicación del estrato superficial como el sitio donde se da la mayor dinámica de los ciclos naturales en la generación y acumulación de materia orgánica, según exponen tanto Bowman *et al.*, (1999) como Ortega *et al.*, (2002); se manifestó en el hecho de que este estrato mantuvo siempre las cantidades mayores de la variable en cuestión, lo que se representa en la Figura 4.12.

De cualquier modo, el poco contenido de materia orgánica predominante en los suelos de las áreas semiáridas, que de acuerdo con Crovetto (1996) y García *et al.*(2004) es alrededor del 2 por ciento, como en este caso, dejó ver que los valores originales no sufren, prácticamente, cambios notorios.

Cuadro 4.8 Resumen e hipótesis para explicar el contenido de materia orgánica en áreas irrigadas y no irrigadas (Tomado de Inzunza y Monger, 2005)

Situación	Resultado	Hipótesis
Suelo (S) no irrigado vs. S. irrigado, en 1975	Valores mayores en s. irrigado	Hay más producción de biomasa en área irrigada que en el ambiente árido (Bowman <i>et al.</i> , 1999)
S. no irrigado vs. S. irrigado, en 1997	Valor mayor de MO en s. no irrigado	En las áreas irrigadas se tienen condiciones óptimas al desarrollo microbiano. Hay más descomposición de MO que en área no irrigada (Lado <i>et al.</i> , 2004)
S. no irrigado, en 1975 vs. S. irrigado, en 1997	MO decreció de 0.6% a 0.4%	S. bajo cultivo, con irrigación, tienen condiciones óptimas para la descomposición de MO (Ortega <i>et al.</i> , 2002)
S. irrigado, en 1975 vs. S. irrigado, en 1997	MO decreció de 0.9% a 0.4%	El humedecimiento y secado del s. por el riego, cultivo y cosechas, incrementa la actividad microbiana y reduce la cantidad de MO (Quiroga <i>et al.</i> , 1998)

El leve incremento de 0.16 por ciento en MO por las aplicaciones de las aguas residuales (Figura 4.12), favorecen el empleo agrícola de éstos desecho, pues según Hyatt (1995), Marx *et al.* (1995) y Pérez (2002); los suelos de zonas semiáridas, incrementan su fertilidad mediante de este tipo adiciones.

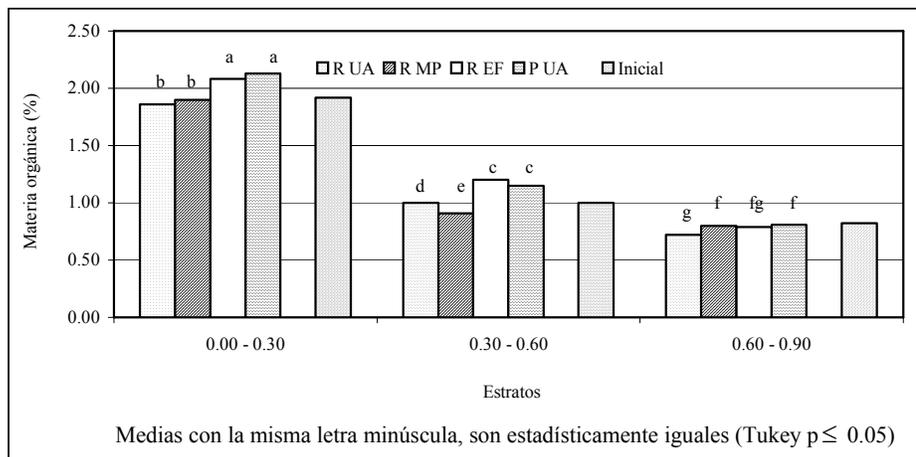


Figura 4.12 Porcentaje de materia orgánica por estratos de suelo con aplicación de aguas residuales

Evolución Conjunta de Propiedades Físicas y Químicas de Suelo

La matriz de correlaciones generales, por estrato, para el comportamiento de las propiedades evaluadas, que aparece en el Cuadro A.1 del Apéndice, refleja la independencia de efectos sobre suelo por la aplicación de los factores experimentales; efectos que decrecen conforme se da el avance en profundidad de estratos, sin duda muy relacionado a la mayor actividad química y biológica en el estrato superficial, lo cual esta de acuerdo a lo manifestado por Quiroga *et al.* (1998).

En base a esta independencia de efectos, para el caso particular del suelo experimental, el manejo hacia el incremento o abatimiento de una propiedad de interés, pudiera darse particularizado hacia la propiedad en cuestión, pero tomando muy en cuenta, la capacidad amortiguadora del suelo, como puntualizan tanto Seoáñez (1999,) como Castellanos *et al.*, (2000).

De la revisión a las correlaciones citadas, referente a los contenidos cálcicos tan comunes en el entorno inmediato al sitio de la investigación, el presente análisis deja ver que esta característica guarda poca relación con las demás que fueron revisadas, de donde también se puede inferir su posible manejo.

La representación en plano bidimensional del comportamiento de las variables en la Figura 4.13, muestra como efectivamente, aunque la densidad de sólidos (DS) y la densidad aparente (DA) caen dentro del mismo cuadrante, lo que indica cierto nivel de

correlación, esta apenas llega a 0.30 como aparece en el Cuadro A.1 inciso A del Apéndice.

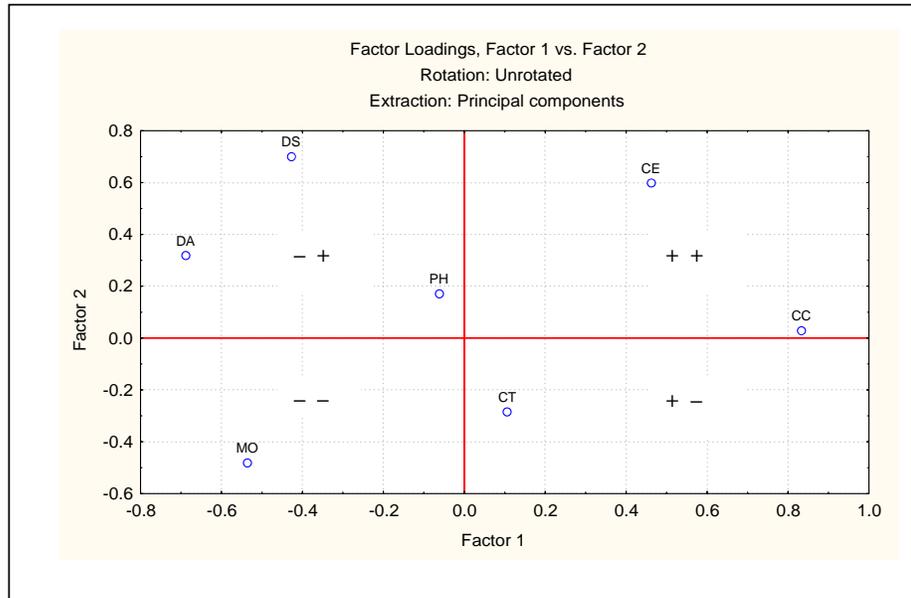


Figura 4.13 Ubicación mediante componentes principales de variables físicas y químicas de suelo observadas para el estrato 0.00 – 0.30 m en riego con aguas residuales

Por su parte, la otra variable física, el contenido de humedad a capacidad de campo (CC), se ubica en cuadrante distinto al de DS y DA, con correlación negativa en -0.26 y -0.42 , respectivamente, con ellas; como se muestra en el Cuadro A.1 inciso A del Apéndice.

Respecto a las propiedades químicas, en la misma Figura 4.13 se aprecia la ubicación de cada una de ellas por cuadrante, lo que indica su poca correlación positiva, y si acaso la hay, esta es negativa, de las que sobresale la que se da entre materia

orgánica (MO) y conductividad eléctrica (CE) en -0.25 , que aparece en el Cuadro A.1(A) del Apéndice.

Sin embargo, en este mismo Cuadro A.1(A), se aprecian influencias interesantes entre propiedades físicas con las químicas, siendo notorias la de CE : CC en 0.35 , MO : DA en 0.22 y MO : CC en -0.28 .

La revisión particular del efecto por cada tipo de agua en el estrato $0.00 - 0.30$ m, mostrada en el Cuadro A.2 del Apéndice, permitió ver que las interrelaciones más altas se dieron cuando se aplicaron el agua R EF con 0.56 en DA : DS, y al aplicar P UA en DA : CC con -0.67 .

El seguimiento a la aplicación de R EF mostrado en el Cuadro A.3, donde se destacan las correlaciones ≥ 0.75 , mostró para esta situación, que cuando se aplicó el riego a cada dos días, el umbral mencionado se alcanzó, en DS : DA con 0.80 y DA : CC con -0.75 , y cuando el riego fue a cada seis días, se presentó en DS : DA con 0.75 .

En la aplicación de P UA, mostrada en el Cuadro A.4; la correlación ≥ 0.75 se presentó en el riego a cada cuatro días en DS : CC con -0.82 y en el riego a cada seis días en DA : CC con -0.82 . Esto confirma que estas variables físicas son fácilmente impactables por el laboreo al suelo, aunque no de manera permanente, según mencionan Narro (1994) y Sustaita *et al.* (2000).

La representación esquemática, en la Figura 4.14, de la aplicación de P UA a cada seis días, sigue, sin embargo, manifestando distribución de los puntos similar a la de la Figura 4.13 –la independencia de efectos– como confirmación del comportamiento parecido de la capacidad amortiguadora del suelo sobre cada variable, a pesar de la diferencia de condiciones externas al proceso.

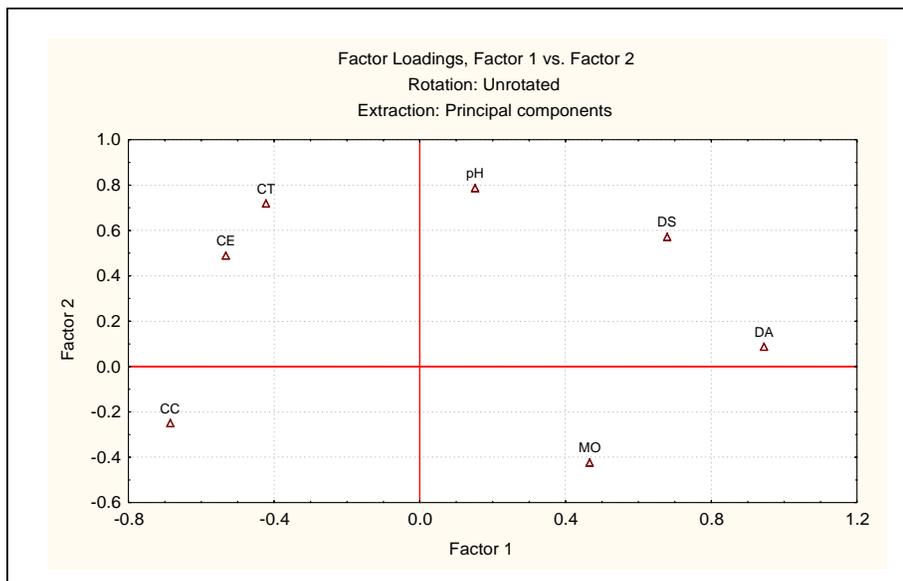


Figura 4. 14 Ubicación mediante componentes principales de variables observadas en riego con P UA, a cada seis días, en el estrato 0.00 – 0.30 m, con aplicación de aguas residuales

Absorción de Metales Pesados

Caracterización del Agua de Riego y Suelo

Los contenidos de metales pesados solubles en las aguas residuales, en su mayoría, estuvieron por debajo de los límites permisibles para su empleo en irrigación; según es

mostrado en el Cuadro 4.9 y de acuerdo a criterio de NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1997).

En el mismo cuadro se observa que tanto el arsénico como el cadmio presentaron la particularidad de no ser detectados en ninguno de los materiales de trabajo. Sin embargo, de cromo, en la frecuencia de riego más intensa, se adicionaron al suelo de 27.00 a 54.00, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ y de mercurio 27.00 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente, a pesar de lo cual, estos elementos no se lograron detectar en el suelo.

Este hecho no significa la ausencia de los mismos elementos, sino que llegan a estar acomplejados o adsorbidos a los coloides del suelo, según manifiestan Méndez *et al.*, (2000); o pueden formar compuestos insolubles por efecto del pH alcalino y la presencia de carbonatos; características evidentes en el suelo empleado acorde a lo expuesto por Basta *et al.*, (2005).

Cuadro 4.9 Límites máximos permisibles y contenidos de metales pesados en aguas residuales ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) y suelo ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) experimentales

ELEMENTO	PD [†]	Tipos de agua Elementos (E) Solubles				Suelo			
		R UA	R MP	R EF	P UA	E. Total		E. Extractable	
						Inicial	Final	Inicial	Final
Arsénico	0.40	ND [‡]	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cadmio	0.10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cromo	1.00	0.02	0.02	0.01	ND	ND	ND	ND	ND
Mercurio	0.01	0.01	0.01	0.01	ND	ND	ND	ND	ND
Cobre	6.00	0.02	0.02	0.04	0.02	10.00	10.00	ND	ND
Níquel	4.00	0.41	0.62	0.54	0.34	23.00	6.00	ND	ND
Plomo	10.00	ND	ND	ND	ND	73.00	70.00	1.00	2.00
Zinc	20.00	ND	0.94	0.39	ND	78.00	86.00	2.00	3.00

NOTA: [†]Promedio diario, máximo permisible NOM-001-ECOL-1996, (DOF, 1997).

[‡]ND=No detectable con estándar de menor concentración utilizado en la curva de calibración: 0.05 ppm = As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn; 0.003 = Hg, 0.025 = As

Al no poder darles el seguimiento correspondiente en los recursos analizados, arsénico, cadmio, cromo y mercurio; no son considerados posteriormente.

El cobre y el níquel, no lograron aparecer en la fracción extractable, aunque aparecieron en la forma total. El plomo, en cambio, no se mostró en las aguas de riego, pero sí en suelo, lo que sugiere su llegada a este sitio mediante el humo generado por la combustión automotriz, ya que el sitio experimental se halla en el perímetro de la mancha urbana, a 200 metros de la carretera Saltillo – Zacatecas y bajo la influencia de los vientos dominantes, resultados parecidos a los encontrados por Pugh *et al.*, (2002).

Del mismo modo, el zinc, además de aparecer de origen en el suelo experimental, se detectó solo en las aguas colectadas en la zona urbana y no en R UA y P UA, generadas en sitios periféricos como consideran, tanto Valdéz y Cabrera (1999) como La Comisión de Calidad Ambiental de Texas (2004).

Según manifiestan Peijnenburg *et al.* (2000), debido a que tanto en agua como en suelo, el pH fue ligeramente alcalino, la conductividad eléctrica baja y el nivel de carbonatos elevado, se tienen condiciones que favorecen la precipitación de los metales en cuestión, lo que coadyuva a su acumulación en suelo y poca solubilidad, con latente riesgo de incorporación a cadenas tróficas con el tiempo.

Aunque el contenido de los elementos en la forma total es significativa, la fracción potencialmente disponible para la planta se apreció bastante reducida, mostrando el

efecto inhibitor de la ligera alcalinidad mencionada antes, ya que el pH en suelo fue de 7.63 y en los tipos de agua, de 7.24 a 8.30.

La comparación de contenidos de elementos solubles y totales, en agua y suelo, respectivamente, en la fase inicial; mostró una diferencia marcada ya que, mientras las aguas residuales estuvieron aportando solo de 0.02 a 0.62, mg . L⁻¹, el suelo presentó de 10.00 a 78.00, mg . kg⁻¹. Hacia el final del trabajo, los contenidos de elemento total en suelo, para cobre se mantuvieron, níquel y plomo presentaron reducciones del 73.91 y 4.11 por ciento, respectivamente y el zinc se incrementó en 9.30 por ciento (Cuadro 4.9).

Durante el desarrollo del experimento, las cantidades de los elementos fueron bastante variables, en el suelo en las proporciones mayores, mientras que en las aguas, la variación fue relacionada al tipo de agua en estudio, lo cual se muestra en el Cuadro 4.9.

A fin de reforzar el entendimiento de la poca presencia de elementos pesados solubles en las aguas experimentales a pesar de que se desechan cantidades importantes, se realizó el muestreo y análisis de lodos y tejido de carrizos (*Arundo donax*) y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) que crecen en los lechos por donde fluye el agua residual R UA hasta la Laguna de Oxidación dentro del Campus Buenavista de la UAAAN, para cuantificar las cantidades de elementos pesados que se depositan en éstos sitios, logrando ser detectada la presencia de tres elementos, cobre, cromo y plomo, los que se usaron como guía.

De los resultados en este análisis y que se exponen en la Figura 4.15, de acuerdo a lo expuesto por Cifuentes *et al.* (2000), Méndez *et al.* (2000) y Jiménez *et al.* (2002); se aprecia que casi la totalidad de los elementos solubles monitoreados queda depositado en los lechos y vegetales que crecen ex profeso a través de la vía de flujo del agua residual, de modo que al llegar al almacenaje, prácticamente, llega limpia en este aspecto; sobre todo de cromo, el cual desde el punto Li desaparece, y plomo, en igual caso desde Fi.

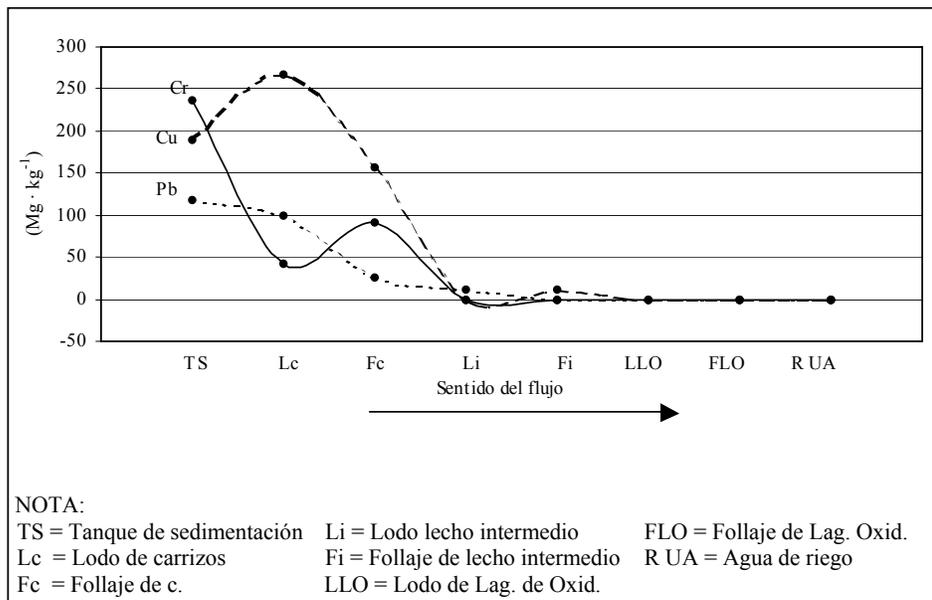


Figura 4.15 Cantidad de elementos por sitios, en el flujo del agua residual RUA hacia Laguna de Oxidación

De este modo, para los niveles de éstos elementos; los lodos generados en este tratamiento quedan en la clasificación de excelentes de acuerdo a los niveles manejados por NOM – 004 – SEMARNAT – 2002 (DOF, 2002), que para cromo es $< 1\ 200\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, en cobre $< 1\ 500\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y en plomo $< 300\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Contenido de Elementos en Planta y Desarrollo Fisiológico

De los análisis estadísticos para la acumulación de metales pesados por la planta, referidos al estrato 0.00 – 0.30 m, cuantificados en los cuatro muestreos (MU) y mostrados en el Cuadro 4.10, donde se puede apreciar que las absorciones, por tipos de agua (TA), para cada elemento, a excepción de níquel, no mostraron diferencias, sin duda debido, en parte, a las pocas cantidades disponibles, mismos resultados encontrados por Méndez (2000) y Basta *et al.*, (2005).

Cuadro 4.10 Cuadrados medios y significancia estadística en absorción de metales pesados durante el experimento

	TA	MU	TA · MU	EE	CV
GL	3	3	9	45	
Cu	0.807 ^{NS}	3.043 ^{**}	0.473 ^{NS}	0.419	32.66
Ni	4.964 ^{**}	8.289 ^{**}	2.449 [*]	0.863	38.96
Pb	0.218 ^{NS}	0.959 ^{**}	0.088 ^{NS}	0.158	11.35
Zn	0.799 ^{NS}	0.495 ^{NS}	2.751 ^{NS}	2.210	25.80

NOTA: ** significativo $p \leq 0.01$ * significativo $p \leq 0.05$ ^{NS} no significativo

De cualquier modo, también debe notarse la mayor presencia de níquel soluble, de origen en las aguas, sobre todo en las residuales (Cuadro 4.9); lo que sin duda contribuye al comportamiento diferencial de este elemento tanto en los factores por sí solos, como en la interacción de ambos.

Puede apreciarse igualmente en el Cuadro 4.10 gran variabilidad en las lecturas de contenido de elementos, lo cual se refleja en el coeficiente de variación alto (Steel y Torrie, 1986), ya que en muchos de los tratamientos, y de acuerdo con Deram *et al.* (2000) no logró manifestarse la presencia de éstos.

Como era de esperarse, relacionado a la mayor acumulación de materia seca con el transcurso del ciclo vegetativo mostrado en la Figura 4.16, sobre todo en el muestreo a los 180 días; se aprecia, también en el Cuadro 4.10, para la mayoría de elementos, diferencia significativa entre muestreos.

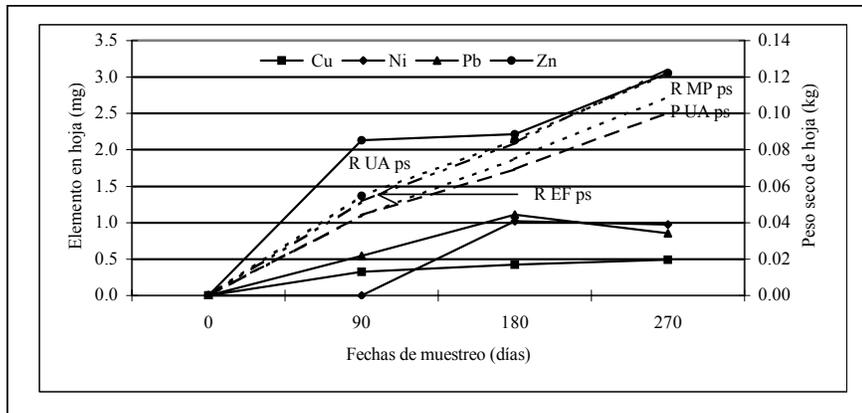


Figura 4.16 Lectura trimestral de elementos contenidos en hoja de acelga (*Beta vulgaris* L) regada cada ocho días con aguas residual R UA

Por otra parte, en el reporte del análisis estadístico para altura de planta y peso seco de hoja por fechas de muestreo, mostrado en el Cuadro 4.11, no es incluido el muestreo inicial, debido a que las plántulas presentaron características muy similares para estas variables.

Para los muestreos que sí aparecen, resulta bastante clara la influencia de los tipos de agua y las láminas de riego, sobre las variables en cuestión.

Cuadro 4.11 Cuadrados medios y significancia estadística en altura y peso seco de acelga (*Beta vulgaris* L) producida con agua residual

		TA	FR	TA · FR	EE	CV
GL		3	3	9	45	
90 días	Altura	0.541**	0.423**	0.042	0.081	6.85
	Peso seco	1.298*	3.343**	1.949**	0.370	6.85
180 días	Altura	1.273**	0.706**	0.210*	0.096	5.36
	Peso seco	11.796 ^{NS}	7.571 ^{NS}	3.951 ^{NS}	4.441	20.49
270 días	Altura	1.591**	0.878**	0.154 ^{NS}	0.114	5.16
	Peso seco	5.150**	1.829**	1.006*	0.380	4.81

NOTA: ** significativo $p \leq 0.01$ * significativo $p \leq 0.05$ ^{NS} no significativo

En relación a ello, como se ilustra en el Cuadro 4.12 con el muestreo a los 270 días, puede verse por las medias para altura de planta, que las aguas residuales superan a las de P UA, a la vez que las láminas de riego más cercanas a las más distanciadas; esto como resultado tanto de las mayores aportaciones de nutrimentos por las aguas residuales, como por el mayor dinamismo metabólico que se propicia con su aplicación, según reconocen Robles (1996), Quiroga *et al.* (1998), Ortega *et al.* (2002) y Lado *et al.* (2004).

Cuadro 4.12 Altura de acelga (*Beta vulgaris* L.) (cm) a los 270 días en riego con aguas residuales

Tipo de agua	Frecuencia de riego (días)			
	c/2	c/4	c/6	c/8
R UA	48.10 a	48.35 a	44.25 abcd	39.08 abcd
R MP	45.48 abcd	46.30 ab	39.38 abcd	39.75 abcd
R EF	44.78 abcd	46.10 abc	43.85 abcd	35.20 bcd
P UA	36.13 bcd	34.63 d	36.63 bcd	34.78 cd

Medias con igual letra son estadísticamente iguales (Tukey $p \leq 0.05$)

Balance de Movimiento de Elementos

Por la contabilización de las aportaciones totales de agua a través del experimento, mostradas en el Cuadro 4.13, tomando como referencia las aportaciones por R MP y R EF debido a que suministraron la mayoría de elementos bajo análisis, fue evidente que el orden de este suministro fue: $Pb < Cu < Zn < Ni$, sin embargo, el orden de las acumulaciones en hoja cambió a $Cu \leq Ni < Pb < Zn$.

Cuadro 4.13 Cantidad de elemento soluble suministrado por riegos, materia seca final de hoja, y acumulado final de elementos en hoja de acelga (*Beta vulgaris* I.)

	Suministrado por riego				materia seca final	acumulado final en hoja			
	----- mg • 1600 L ⁻¹ -----					---- g ----	----- mg • kg ⁻¹ -----		
	Cu	Ni	Pb	Zn		Cu	Ni	Pb	Zn
R UA	3.8	76.9	-----	-----	152.0 b	5.25	5.00	8.75	32.25
R MP	3.8	116.3	-----	96.86	183.8 a	2.25	3.75	10.75	30.50
R EF	7.5	101.3	-----	84.38	153.7 b	4.50	4.50	11.51	36.75
P UA	3.8	63.8	-----	-----	165.7 b	2.00	5.25	9.25	46.50

La falta de consistencia entre las cantidades suministradas por el riego y las absorbidas por la hoja demuestra el papel fundamental de las características del suelo como almacén y posible fuente para la fitoextracción, requiriéndose en cada situación un tratamiento particular al suelo a fin de movilizar, el o los elementos de interés, mediante el vegetal apropiado, como consideran Grcman *et al.* (2001), Schmidt (2003) y Nolan *et al.* (2005).

Respetando el hecho de que no se realizaron análisis de acumulación en raíz ni tallo del cultivo experimental, sin duda, gran cantidad de los elementos adicionados al suelo mediante los riegos, permaneció en éstas artes se requiere; por un lado, tomar conciencia que tales vertidos quedan como riesgo latente de incorporación a las cadenas alimenticias, animales y humanas, como reconocen tanto Méndez *et al.* (2000) como Peijnenburg *et al.*(2000).

Por otro lado, de acuerdo con Baker (1981) y Baker y Brooks (1989), una planta hiperacumuladora de metales pesados es aquella que en sus hoja acumula alrededor de $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de Cd, $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de Cu, $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de Pb, o bien $10\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de Zn; mientras esta investigación, las mayores acumulaciones en algunos tratamientos fueron: Cu $5.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni $5.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $10.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y Zn $46.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; cantidades bastante menores a los anteriores valores de referencia.

En el mismo Cuadro 4.13 se puede ver la tendencia de menor acumulación por la hoja, sobre todo en níquel, conforme se incrementó la cantidad de elemento suministrado por los riegos, lo cual fue aún más sobresaliente en el hecho de que en los sitios donde no se agregaron elementos con el riego, como el caso del Pb, y los sitios regados con R UA y P UA para zinc, se encuentran acumulaciones de tales elementos en planta.

En el caso del Cu y Zn, en todos los casos, los valores acumulados en hoja se pueden considerar bajos y medios, respectivamente, de acuerdo a Jones *et al.* (1991) para hojas de *Brassica sp.* Para el caso de cobre, los valores hallados en esta

investigación, también son bajos comparados a los $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para mostaza india (*Brassica juncea*) y $45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para tabaco, encontrados por Kayser *et al.* (2000). En igual categoría pueden situarse los resultados obtenidos en zinc, ya que Blaylock *et al.* (1997) así como Ebbs y Kochian (1998) para mostaza india reportan $450 - 700 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, mientras Kayser *et al.* (2000) en girasol reportan $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y en tabaco $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, y finalmente Kulli *et al.* (1999) en pasto ryegrass (*Lolium perenne* L.), hallaron de $505 - 2\,300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Los valores de acumulación para Ni, encontrados en este trabajo, resultaron bajos al compararlos con los $1\,300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ hallados, en pasto ryegrass (*Arrhenatherum elatius*), por Deram *et al.* (2000).

Para Pb, es de notarse que el total del elemento proviene del suelo, lo que demuestra la presencia de este elemento en forma “nativa” y su disponibilidad, aún en pequeñas cantidades para la planta. Las cantidades acumuladas en planta en esta investigación, concuerdan con los $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ hallados por Grcman *et al.* (2001) en el cultivo de col (*Brassica rapa* L).

De modo que, por el comportamiento de resultados tanto para el orden de movimiento de elementos, sobre todo en cuanto a las cantidades acumuladas en hoja, se confirma que las condiciones del suelo experimental, influyeron sobre la disponibilidad de este tipo de elementos por la planta, como lo exponen Méndez *et al.*, (2000), Peijnenburg *et al.* (2000) y Basta *et al.*, (2005).

A manera de resumen, fue evidente que las cantidades de elementos pesados adicionados al suelo mediante los riegos con aguas residuales, fueron pequeñas, en vista de que el mayor contenido queda en los lodos, por lo consiguiente las cantidades hacia hoja fueron mínimas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las Aguas y Suelo Experimentales

Los resultados de los análisis en las aguas de riego, previos a su aplicación al suelo que se ven en el Cuadro 4.1, mostraron que el valor del pH osciló desde 7.24 en R EF hasta 8.30 en R UA, clasificándose así como moderadamente alcalinas, de modo que el riego agrícola con estos tipos de agua requiere manejo cuidadoso, por el potencial incremento de la alcalinidad original, en suelos como los empleados en este trabajo según sugieren Castellanos *et al.* (2000).

Cuadro 4.1 Resultados de caracterización inicial en aguas experimentales

CARACTERÍSTICA		R UA	R MP	R EF	P UA
pH		8.30	7.89	7.24	7.66
Nitratos	mg · L ⁻¹	0.43	0.15	0.44	0.21
Alcalinidad	mg CaCO ₃ · L ⁻¹	426.13	396.67	183.00	365.00
Sólidos totales,	mg · L ⁻¹	0.91	2.48	0.67	0.48
DBO ₅ ,	mg · L ⁻¹	39.53	1256.10	37.05	10.30
Coliformes fecales	NMP [†] .100 mL ⁻¹	26 000	110 000	23 335	< 3

NOTA: [†]Número más probable

También en este cuadro se aprecia, que los nitratos en las aguas resultaron por debajo del nivel máximo permisible de 10 mg · L⁻¹, de acuerdo a NOM-AA-079 (DOF, 1986). Aunque durante el experimento, se adicionaron de 750 a 3 000 litros de agua por parcela experimental, totalizando de 330 a 1 320 mg · m⁻² de nitratos, estas cantidades

no resultan problemáticas a los mantos freáticos en la zona de estudio, ya que como sostiene Lesser (1996), los niveles estáticos de tales depósitos en la zona, se ubican de 60 – 100 metros de profundidad, que combinado con la alta evaporación predominante en esta zona, coadyuvan a la acumulación del nitrato en las capas superiores del suelo (Mace y Amrheim, 2001).

De acuerdo a la CNA (2002), los tipos de agua que se identifican en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe son bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, esto ayuda a explicar, en parte, los altos valores de alcalinidad presentados por las aguas experimentales, sin olvidar, además, la contribución de la contaminación por diversos usos domésticos e industriales, sobre todo la adición de detergentes.

Usando el contenido de sólidos totales, DBO_5 y presencia de coliformes fecales como guía de los acondicionamientos, primario y secundario, al que se someten la aguas residuales estudiadas, se aprecia en la Figura 4.1, que éstos son bastante nulos de modo general, sobre todo, en el caso del agua R MP, que sobrepasa de modo claro el límite máximo permisible para agua de contacto indirecto con humanos, de $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de DBO_5 y de $1\,000 \text{ NMP} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ en coliformes fecales según NOM-003-ECOL-1996 (DOF, 1997).

Estos resultados, al igual que lo encontrado por Jiménez *et al.* (2002), remarcan la importancia de realizar el manejo de estas aguas residuales con el debido equipo de protección, por el potencial peligro de afecciones a la salud pública.

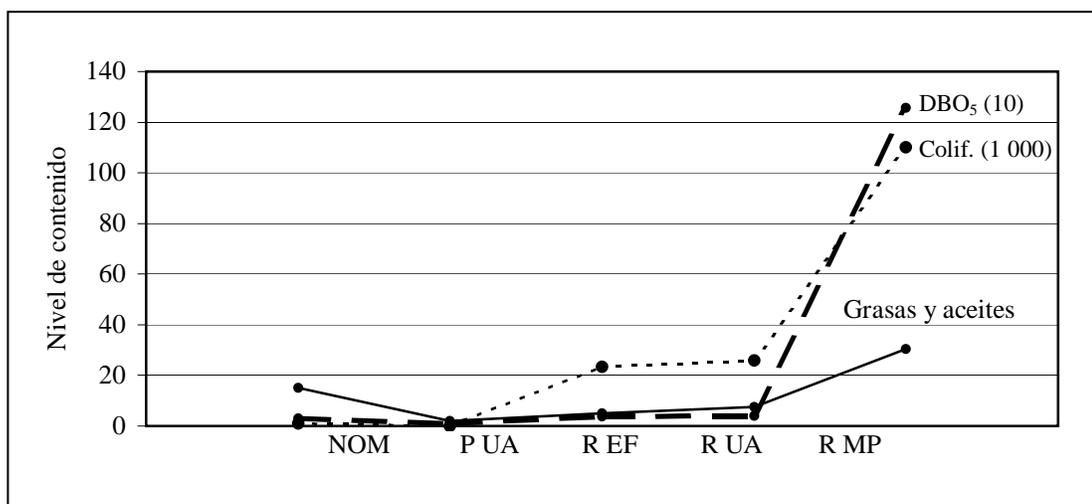


Figura 4.1 Niveles de contenidos biológicos en aguas experimentales

Para calidad agronómica de las aguas reportadas en el Cuadro 4.2, se apreció que aunque por el contenido de sodio no presentan problema, por su grado de salinidad en niveles de C₃ a C₄, de acuerdo a las Normas Riverside expuestas por Richards (1973), se hallan en uso restringido a suelos muy permeables con la aplicación de volúmenes en exceso para el lavado de las sales y utilizando cultivos muy tolerantes como recomiendan, tanto Western Fertilizers Handbook (WFH) 1975, como Goudie (1990), y Mace y Amrhein (2001).

Los resultados del análisis inicial al suelo, mostrados en el Cuadro 4.3, revelan por las características físicas, un material de textura pesada, pero viable al desarrollo vegetal, y suficiente almacenaje de humedad aprovechable.

Cuadro 4.2 Resultados para calidad agronómica en las aguas experimentales

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	R UA	R MP	R EF	P UA	Criterio de calidad	
						Buena	Mala
RAS _{ajustado}	meq . L ⁻¹	3.24	4.50	1.28	0.59	< 3.00	>9.00
Porcentaje de sodio int.	%	3.50	5.35	0.80	0.40	< 3.00	>3.00
Carbonato de sodio res.	meq . L ⁻¹	-3.20	-8.70	-7.90	-7.70	< 1.25	> 1.25
Dureza	meq . L ⁻¹	44.64	75.61	51.59	59.53	< 22.00	> 22.00
Índice de Scott	meq . L ⁻¹	140.76	0.23	1.37	3.31	> 6.00	< 6.00
Conductividad eléctrica	dS . m ⁻¹	1.23	2.52	1.00	0.80		
Ión sodio	meq . L ⁻¹	6.35	10.00	2.87	1.35		
Calidad agronómica		C ₃ S ₁	C ₄ S ₁	C ₃ S ₁	C ₃ S ₁	Útiles con precauciones	

De las propiedades químicas en suelo se aprecia como moderadamente alcalino, bajo en contenido de sales de acuerdo a la conductividad eléctrica encontrada, y en nivel medio, por la cantidad de materia orgánica, siendo evidente, el alto contenido de carbonatos en 47.68 por ciento en el estrato superficial.

Cuadro 4.3 Resultados de análisis físico y químico del suelo experimental previo a riegos

FÍSICAS	DS	DA	Ctes. de humedad			Color		Textura			
			CC	PMP	HA	Seco	Húmedo	†A	L	Ar	Ct
Estrato	Mg • m ⁻³		%					%			
0.00–0.30	2.12	1.12	43.4	29.8	16.2	5YR7/1 Gc [§]	5YR5/1 G	31	27	42	Ar [‡]
0.30–0.60	2.11	1.18	40.4	30.4	16.5	5YR7/1	5YR5/1	37	22	41	“
0.60–0.90	2.13	1.23	38.2	26.7	14.5	5YR7/1	5YR5/1	38	23	39	Ma
QUÍMICAS											
Estrato	pH	CE dS·m ⁻¹	MO %	CO ₃ ⁼							
0.00–0.30	7.63	0.96	1.92	47.68							
0.30–0.60	7.53	1.32	1.00	40.96							
0.60–0.90	7.53	0.98	0.82	42.15							
NOTA: † Arena Limo Arcilla Clase textural §Gc Gris claro, G Gris ‡Arcilloso, Migajón arcilloso											

Evolución de Propiedades Físicas del Suelo

En el Cuadro 4.4 se muestran los cuadrados medios y las significancias de las variables físicas cuantitativas de suelo evaluadas, dejándose al final de este apartado el reporte de comportamiento para el color de suelo, variable cualitativa.

Puede apreciarse que durante el lapso de la investigación, bajo el manejo implementado y con los factores empleados, la densidad de sólidos no mostró cambios estadísticamente significativos, lo cual sí se apreció para densidad aparente y capacidad de campo.

Cuadro 4.4 Cuadrados medios y significancias de los factores evaluados y sus interacciones para las variables físicas de suelo evaluadas

Fuente de variación	GL	Densidad de sólidos	Densidad aparente	Capacidad de campo
Tipo de agua (TA)	3	0.011 ^{NS}	0.022 ^{NS}	103.560 ^{**}
Frecuencia de riego (FR)	3	0.002 ^{NS}	0.000 ^{NS}	4.667 ^{NS}
Estrato (E)	2	0.002 ^{NS}	0.083 ^{**}	7.163 ^{NS}
TA · FR	9	0.008 ^{NS}	0.007 [*]	5.396 ^{NS}
TA · E	6	0.001 ^{NS}	0.012 ^{**}	10.964 ^{NS}
FR · E	6	0.008 ^{NS}	0.001 ^{NS}	3.993 ^{NS}
TA · FR · E	18	0.012 ^{NS}	0.003 ^{**}	2.252 ^{NS}

NOTA: ** = Significancia al 0.01, * = Significancia al 0.05, NS = No significativo

Densidad de sólidos

Como se estableció antes, para el caso particular de la densidad de sólidos, el análisis estadístico mostró que bajo el manejo realizado y mediante los factores implicados, no aparecieron diferencias estadísticas durante el lapso de la investigación.

Es de notarse, como se aprecia en la Figura 4.2, que durante el lapso de la investigación, el valor de la variable al emplear cualquier tipo de agua, estuvo alrededor del inicial del suelo en $2.12 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, como aparece en el Cuadro 4.3.

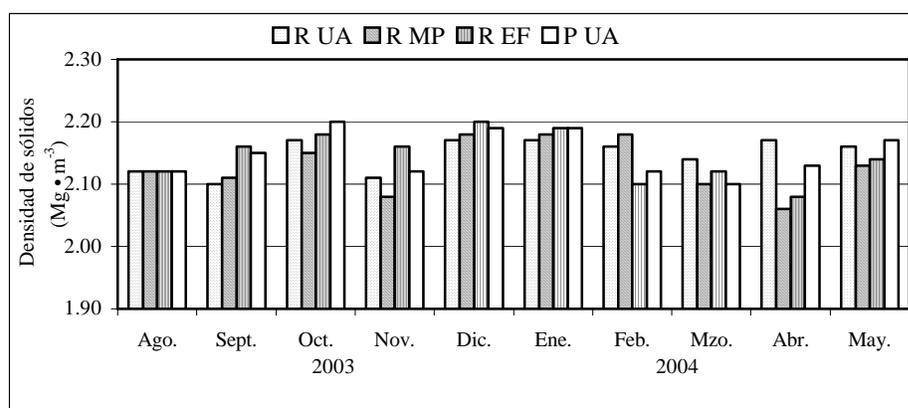


Figura 4.2 Valores en densidad de sólidos de suelo regado con aguas residuales

Estas leves fluctuaciones, con cualquier tipo de agua, se explican como consecuencia, tanto de la reorientación y arreglo de partículas debidas a la alternancia humedecimiento – secado del suelo, como a la poca cantidad de los sólidos adicionados en los tipos de agua empleados (Cuadro 4.1), lo cual concuerda con lo reportado por Lu *et al.*, (2004).

Acorde a Narro (1994), esta propiedad es difícil de ser modificada por un manejo como el llevado a cabo, de modo que esta similitud de valores mensuales, es lógico.

Aunado a lo anterior, el contenido significativo de arcilla del suelo, en 42 por ciento, en el estrato superior, y la característica, para las precipitaciones locales, de ser por breve tiempo, pero intensas, ayudan a la consolidación del suelo después del

laboreo, como en este caso; sobre todo a nivel superficial resultan muy semejantes a los de Levy *et al.*, (2002), de lo cual se explican los leves incrementos en la variables durante el tiempo del trabajo.

La representación gráfica de la interacción (frecuencia de riego)(estratos) mostrada en la Figura 4.3, confirma ligeros aumentos en la densidad de sólidos como resultado de las adiciones, sin embargo, ello no llegó a ser motivo para diferencia estadística; a pesar de que, por día, las tasas de aplicación, fluctuaron desde $10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ en la aplicación más frecuente, hasta $2.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$, en la más distanciada.

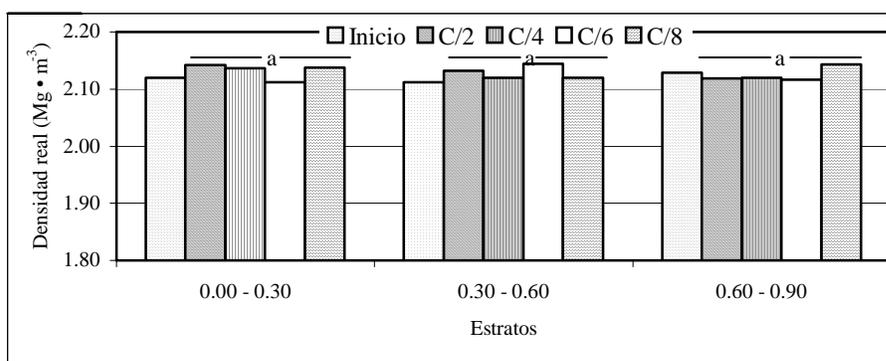


Figura 4.3 Representación de interacción (frecuencias de riego)(estratos) para densidad de sólidos de suelo regado con aguas residuales

Esta respuesta similar de la variable, para las diferentes láminas de agua aplicada confirma que la poca carga de sólidos en las aguas aplicadas no fue determinante de respuesta, sino más bien, que esta se debió a los cambios físicos propios de la matriz edáfica por la alternancia de fases humedecimiento – secado, referidas anteriormente y

que de acuerdo a Sustaita *et al.* (2000), consideran que son cambios momentáneos y propios del laboreo en el suelo.

De igual forma, por estratos, ni la ubicación de los mismos ni los diferentes tipos de agua o las cantidades aplicadas de éstas, fue determinante para provocar resultados estadísticamente distintos, entre ellos, hallándose todos alrededor de $2.13 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Punto positivo rescatable de este análisis es la ausencia de efectos diferenciales entre las aguas residuales usadas y el agua de primer uso, lo cual deja abierta la posibilidad de empleo de las primeras para aplicaciones agrícolas a los suelos.

Densidad aparente

En densidad aparente, por su fácil implicación de cambio en tamaño y forma de los poros del suelo, entre otras causas, debido al laboreo del terreno y las aplicaciones de agua, como consideran Narro (1994), Iglesias *et al.* (2004) y Eynard *et al.* (2004); fue posible apreciar cambios estadísticamente significativos.

Como se muestra en el Cuadro 4.5, entre tipos de agua, la prueba de medias dejó ver que tanto R UA como P UA causaron los valores estadísticamente más altos, con $1.26 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, mientras los restantes tipos de agua estuvieron en segunda categoría estadística con $1.24 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. A pesar de que entre frecuencias de las aplicaciones no aparecieron diferencias estadísticas, su valor fue superior a los valores iniciales del

suelo, el cual fue sostenido durante el lapso de la investigación en alrededor de $1.25 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Cuadro 4.5 Valores medios para densidad aparente ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) en la interacción (tipo de agua)(frecuencia de riego)

T. agua	Frecuencias de riego			
	1	2	3	4
R UA	1.24 abc	1.27 ab	1.27 ab	1.26 abc
R MP	1.24 abc	1.25 abc	1.22 c	1.23 bc
R EF	1.25 abc	1.24 bc	1.25 abc	1.24 abc
P UA	1.28 a	1.25 abc	1.27 ab	1.26 abc

Medias con igual letra son estadísticamente iguales (Tukey $p \leq 0.05$)

Por estratos, en cambio, fue evidente que la ubicación de los mismos fue determinante para diferencias estadísticas, de modo que el valor menor de $1.24 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ fue para el estrato más superficial, que de cualquier modo estuvo por arriba del inicial en tal punto de $1.12 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; alcanzándose en el más profundo hasta $1.27 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Así, en el estrato $0.00 - 0.30 \text{ m}$ el valor de la densidad aparente con cualquiera de las aguas fue menor a los restantes estratos, más evidente ello en el empleo de agua R MP, la de mayor carga orgánica en la forma de sólidos totales (Cuadro 4.1).

Contrario a lo que sucedió en este caso, en una evaluación del efecto por el riego con agua de pozo, por un lado, y agua residual doméstica, en cultivo de acelga (*Beta*

vulgaris I), Robles (1996) encontró, que la carga orgánica del agua residual sí provocó una disminución en la densidad aparente desde 1.92 hasta 1.85, $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Aunado a este efecto físico, en la mencionada investigación, se apreciaron manifestaciones de mejor desempeño fisiológico en la acelga (*Beta vulgaris* I.), como el que la cantidad de hojas en planta aumentó de 15 a 40, la altura final de planta de 20 a 45 centímetros, y el peso seco de follaje de 71.43 a 164.29 gramos por planta; al regar con agua residual, respecto a las aplicaciones con agua de pozo.

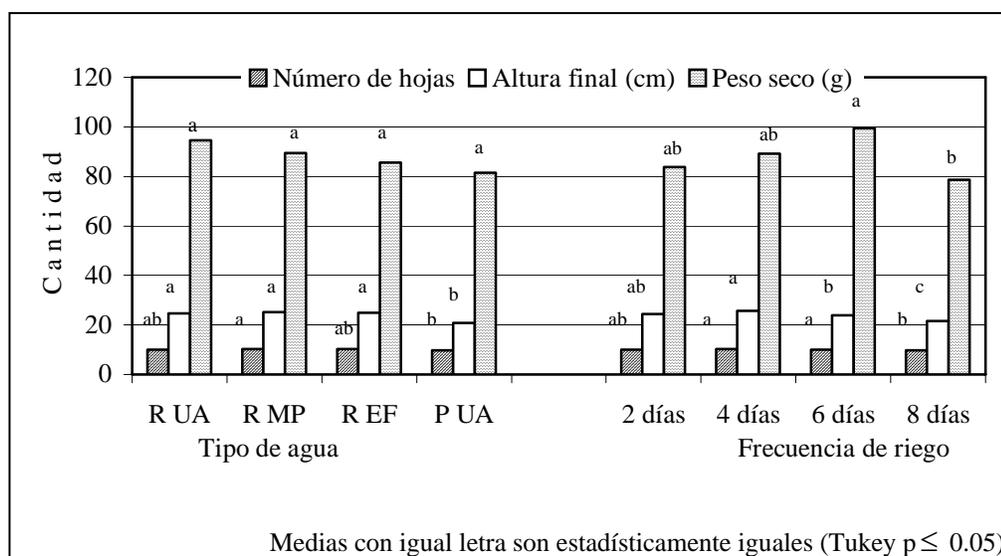


Figura 4.4 Comportamiento de algunas variables de planta, por tipo de agua y frecuencia de riego al emplear aguas residuales

Para el presente trabajo, se muestra en la Figura 4.4, que a pesar del aumento en la densidad aparente, para altura final y número de hojas, la planta de acelga mostró mejor desarrollo en las adiciones de aguas residuales, con valores estadísticamente superiores de 24.91 cm y 10.10 en cada caso, por 20.86 cm y 9.67, en el agua de primer uso; sin diferencias en el peso seco, en promedio de 87.78 g.

En esta figura también se muestra que solamente la frecuencia de riego a cada 8 días, fue estadísticamente menor con 9.67 hojas, 21.63 cm de altura de planta y 78.65 g de peso seco, mientras que se tuvieron 10.15 hojas, 23.99 cm de altura de planta y 90.82 g de peso seco, en las restantes frecuencias de riego.

De acuerdo con lo mencionado por Horn, (2004); el mayor incremento en densidad aparente que se tuvo durante el experimento en el estrato superficial, se relaciona a que los estratos inferiores, por lo general, son más compactos, de modo que en ellos repercuten menos los cambios debidos al laboreo agrícola.

Estos pequeños cambios en los valores de la densidad aparente, sostienen tanto Iglesias *et al.* (2004) como Eynard (2004) que se trata de un impacto a corto plazo en la generación de macroporos que facilitan el movimiento del agua y aire hacia el interior del suelo, aunque sin un aumento en la capacidad de retención de agua, cambios que son deseables pues indican una mayor vida útil del sustrato suelo.

A modo de resumen, de nuevo la aplicación, por tipos de agua no exhibió diferencias notorias entre las aguas residuales respecto al agua de primer uso, por lo que de nuevo queda abierta la posibilidad de aplicar las primeras en riego agrícola.

Capacidad de campo

Para contenido de humedad a capacidad de campo, de modo general se apreció una leve reducción en sus valores durante el desarrollo del experimento respecto a los

valores iniciales, hallándose en el análisis estadístico del Cuadro 4.4 únicamente diferencias altamente significativas entre los tipos de agua.

Mostrando una influencia positiva hacia mayor contenido de humedad en suelo por la cantidad de material sólido presente en cada tipo de agua el valor promedio de la variable por las aplicaciones del agua con mayor carga sólida reportada en el Cuadro 4.1, es decir R MP, alcanzó 25.38 por ciento y fue estadísticamente superior, seguido por las aplicaciones de R UA, R EF y al final P UA, el agua más limpia, con 23.13 por ciento.

En la interacción con las frecuencias de riego, mostrada en la Figura 4.5, el agua R MP fue determinante para que en cualquiera de las tasas aplicadas su uso ayudara a dar el valor de contenido de humedad mayor mientras el empleo de P UA provocara los valores más bajos. Similar comportamiento se tuvo en la interacción de los tipos de agua con los estratos, donde la ubicación de los mismos no marcó la diferencia.

Relacionado a que durante el trabajo, con el riego se vertieron al suelo por el empleo de las aguas residuales de 2.01 – 7.44 gramos de sólidos por unidad de área, ello fue suficiente para que se manifestaran las diferencias apreciadas respecto al empleo de agua P UA, de la que se adicionaron únicamente 1.44 gramos en el área mencionada.

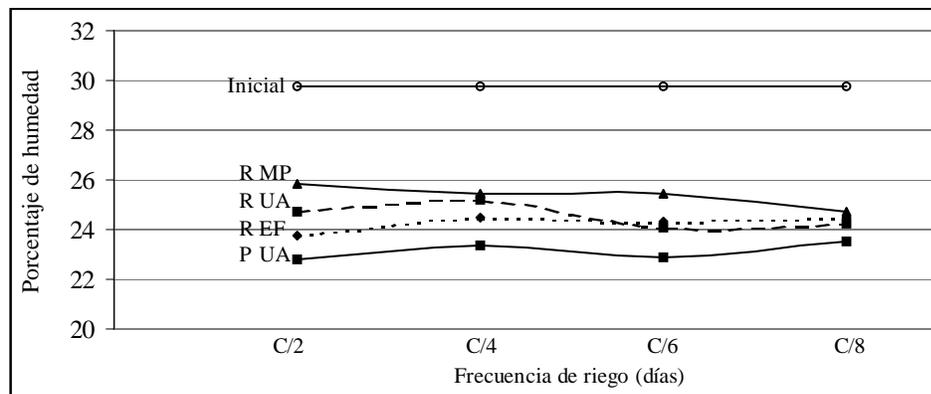


Figura 4.5 Representación de la interacción (tipo de agua)(frecuencia de riego) para contenido de humedad a capacidad de campo

Donde no hubo diferencias estadísticas, fue para el caso del efecto principal tanto entre las frecuencias de riego como entre los estratos estudiados, destacándose en este caso la sensibilidad al cambio en esta variable al registrarse efectos parecidos por la aplicación diaria de las tasas desde $2.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ hasta $10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ así como a las tres profundidades de los estratos revisados; siendo el valor alrededor de 24.33 por ciento, que de cualquier modo fue menor a los 29.79 por ciento iniciales, en el estrato superior.

Estos resultados concuerdan con una medición de los impactos en propiedades físicas y químicas del suelo por causa del laboreo en zonas semiáridas, llevado a cabo por Sustaita *et al.* (2000), donde encontraron que los suelos inalterados a diferencia de los labrados, sobre todo mecánicamente, por presentar una mayor macroporosidad biológica y estabilidad estructural, con poros redondeados y continuos hasta la superficie; tienen menos encostramiento, compactación y/o mayor retención de humedad y velocidad de infiltración.

De modo que tomando en cuenta las consideraciones de Sustaita *et al.* (2000) la compactación normal en el suelo después del laboreo explica muy bien las reducciones en el contenido de humedad apreciadas durante el desarrollo de la investigación.

Las reducciones generalizadas en el contenido de humedad observado durante el lapso experimental, tuvieron el mismo sentido descendente con todos los tipos de agua, por lo que de nuevo, el comportamiento fue parecido entre las aguas residuales y el agua de primer uso, lo que favorece el empleo de las aguas residuales en riego agrícola.

Color del suelo

En el caso de color del suelo, como se muestra en el Cuadro 4.6, de modo general el gris claro en seco, al inicio del experimento, en su mayoría se conservó, a excepción de donde se aplicó R MP, que mostró coloraciones blanco grisáceo y gris rojizo.

Las evaluaciones en suelo húmedo, en cambio, muestran que donde se aplicaron tipos de agua residual con valores altos de relación de color aparente/verdadero (A/V) provocada por la mayor cantidad de sólidos (Cuadro 4.4), lograron, en general, tonos más oscuros.

Por ejemplo, al regar con el agua R UA con $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sólidos totales y 215/40 de relación A/V, el suelo desde el gris inicial pasó a café grisáceo y gris oscuro.

Efecto parecido provocaron el empleo de R MP y de R EF. En cambio, el agua de primer uso, con solamente $0.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sólidos totales y una relación A/V de 2.5/2.5, provocó coloraciones húmedas, que se mantuvieron dentro del gris.

Cuadro 4.6 Color del agua y del suelo agrícola regado con aguas residuales en el estrato 0.00 – 0.30 m

Tipo agua	Trat.	Agua A / V [†]	Suelo			
			Inicial		Final	
			Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
R UA	1	215 / 40	5YR 7/1 Gc [‡]	5YR 5/1 G	10YR 7/2 Gc	10YR 5/2 Cg
“	2	215 / 40	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/2 Gc	10YR 5/1 G
“	3	215 / 40	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/2 Gc	10YR 5/2 Cg
“	4	215 / 40	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 6/2 Gcc	10YR 4/1 Go
R MP	5	107 / 37	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 8/2 B	10YR 6/2 Gcc
“	6	107 / 37	5YR 7/1	5YR 5/1	7.5YR 8/2 Bg	7.5YR 6/2 Gr
“	7	107 / 37	5YR 7/1	5YR 5/1	7.5YR 7/2 Gr	7.5YR 5/2 C
“	8	107 / 37	5YR 7/1	5YR 5/1	7.5YR 8/2 Bg	7.5YR 6/2 Gr
R EF	9	17 / 17	5YR 7/1	5YR 5/1	5YR 7/2 Gr	5YR 5/2 Grj
“	10	17 / 17	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/2 Gc	10YR 5/2 Cg
“	11	17 / 17	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/2 Gc	10YR 5/2 Cg
“	12	17 / 17	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 6/1 G	10YR 4/1 Go
P UA	13	2.5 / 2.5	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/2 Gc	10YR 5/2 Cg
“	14	2.5 / 2.5	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/1 Gc	10YR 5/1 G
“	15	2.5 / 2.5	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/2 Gc	10YR 5/2 Cg
“	16	2.5 / 2.5	5YR 7/1	5YR 5/1	10YR 7/1 Gc	10YR 5/1 G

NOTA:
[†] Aparente / Verdadero
[‡] Gc Gris claro, G Gris, Cg Café grisáceo, Gcc Gris café claro,
Go Gris oscuro, B Blanco, Bg Blanco grisáceo, Gr Gris rosáceo,
C Café, Grj Gris rojizo

Para los estratos más profundos, los cambios en las coloraciones fueron menos perceptibles, ya que el papel que como filtro juega el suelo, logró retener dentro del estrato más superficial los contenidos causantes de este efecto, como son: presencia natural de metales o iones metálicos en disolución, humus o residuos orgánicos, plancton o desechos industriales, según la NMX -AA-045-SCFI-2001 (DOF_c, 2001).

CONCLUSIONES

La caracterización a las aguas residuales experimentales mostró que se trata de recursos alcalinos, la aplicación de los cuales, en los suelos de la región, debe ser bajo supervisión, en vista de que tienden a incrementar la alcalinidad de estos suelos, que de origen es elevada.

El alto contenido biológico presente en las aguas residuales empleadas debe ser tomado en cuenta a la hora de tener contacto con tales recursos, por el potencial riesgo de infecciones.

El seguimiento a la evolución de la densidad real, densidad aparente, contenido de humedad a capacidad de campo y color, en el suelo experimental, mostró que éstas cambiaron poco, y de modo temporal, cambio que puede tomarse como normal por el laboreo y tiempo transcurrido, pues fue similar tanto a la aplicación de aguas residuales como al agua de primer uso.

En el caso de pH, conductividad eléctrica, porcentaje de carbonatos totales y porcentaje de materia orgánica, también mostraron variación mínima, y sin diferenciarse de modo claro el efecto por la aplicación de aguas residuales del provocado por el riego con agua de primer uso.

Es de remarcarse que la capacidad amortiguadora del suelo, sobre todo a la alteración química, ayudó a que éstos cambios fueran mínimos, permitiendo así, el desarrollo del cultivo y mayor tiempo de utilidad al hombre al llevar a cabo una autorecuperación aun con los vertidos más elevados que se aplicaron.

La exploración a la posible influencia del cambio en una variable sobre alguna de las otras bajo estudio, dejó ver, que solamente, la densidad real de modo directo y la densidad aparente en forma inversa, tuvieron cierta relación con el contenido de humedad a capacidad de campo.

La reducida presencia de metales pesados en las aguas de riego, junto a que su presencia se revisó únicamente en hoja, motivó que el contenido de éstos en el follaje del cultivo fuera apenas cuantificable.

En vista de lo anterior, la hipótesis del esperado efecto positivo de las aguas residuales experimentales sobre el suelo, se cumplió, y a partir de ello puede recomendarse su aplicación en agricultura, con los cuidados debidos a la salud pública en su manejo; sobre todo para cultivos no hortícolas o alguno donde el contacto con estas aguas residuales no sea directo con el hombre.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, S. A. 1988. Métodos de análisis de suelos. Edición preliminar. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México.
- Aguilar, S. A. y A. Van Diest. 1981. Rock-phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant Soil* 61: 27 – 42.
- Almeida, de S. M. A. 1997. Metodología de análisis de decisiones para seleccionar alternativas de tratamiento y uso de aguas residuales. Universidad de Brasilia. Brasil.
- Arreguín, C. F. I., G. Moeller C., V. Escalante E. y A. Rivas H. 1998. El reuso del agua en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. pp: 1 – 38.
- Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders—Strategies in the response of plants on heavy metals. *J. Plant Nutr.* 3: 643 – 654.
- Baker, A.J.M. y R.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1: 81–126.
- Basta N. T., J. A. Ryan y R. L. Chaney. 2005. Trace element chemistry in residual-treated soil. Key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34: 49 - 63. USA.
- Bernabé, A. V. 1996. Alternativas de tratamiento de aguas residuales domésticas para su rehuso agrícola en la UAAAN. Saltillo, Coahuila. pp: 23 – 76.
- Blaylock, M., D.E. Salt, S. Dushenkov, O. Zakharova, C. Gussman, Y. Kapulnik, B.D. Ensley, e I. Raskin. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol.* 31: 860 – 865.
- Bouyoucos, G. L. 1936. Direction for making mechanical analysis of soils by the hidrometer method. *Soil. Sci.* 42:3 – 6.
- Bowman, R. A., M. F. Vigil, D. C: Nielsen y R. L. Anderson. 1999. Soil organic matter changes in intensively cropped dryland systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 186 – 191.

- Cadahía, L. C.. 2000. Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales. 2ª edición. Mundi-Prensa. España. pp: 200 – 225.
- Cánovas, J. 1986. Calidad agronómica de las aguas de riego. Servicio de Extensión Agrícola. (MAPA). España.
- Carter, D. L. 1975. Problems of salinity in agriculture. Plants in saline environments. Springer. Berlin. pp. 25 – 76.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. INIFAP-Guanajuato, Campo Experimental Celaya, Guanajuato, México. pp: 102 – 123.
- Cifuentes, E., J. Villanueva y L. H. Sanin. 2000. Predictores de los niveles de plomo en sangre y su asociación con el riego con agua residual en comunidades agrícolas de México. *International Journal Occupational Environmental Health*, 3: 177 – 182.
- Cifuentes, E., U. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett y A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud Pública Mex.* 36:3 – 9. México.
- Cortés, B. J., J. N. Silva y M. Bolívar D. 1991. Evaluación de las aguas residuales con fines de riego agrícola antes y después de un tratamiento físico – biológico. XXIV Congreso Nal. de la Ciencia del Suelo. S. M. C. S. Pachuca, Hgo. pp: 58 – 64.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2001. Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (PTARM).
- CNA. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Saltillo – Ramos Arizpe, estado de Coahuila. pp: 21 – 29. México, D. F.
- CNA. 2004. Capítulo 4: Usos del agua. Gerencia del Registro Público de Derechos de Agua. Comisión Nacional del Agua. México. pp: 1 – 10.
- CNA. 2005. Estadísticas del Agua en México. Capítulo 3: El recurso hídrico en México. pp: 10 –14. México, D. F.
- Consejo Coordinador Empresarial (CCE). 1998. Eficiencia y uso sustentable del agua en México: participación del sector privado. Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable. CCE. México. pp: 1 – 18.
- Crovetto, C. 1996. Stubble over the soil: the vital role of plant residue in soil management to improve soil quality. American Society of Agronomy. USA.
- Czyzyk, F. 1992. Effect of long term irrigation with municipal sewage on groundwater and affluent quality. Institute for land reclamation and grassland farming. 40: 73 – 80. Poland.

- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. 1976. Manual de tratamiento de aguas. Limusa. México. pp: 34 – 45.
- Deram, A., D. Petit, B.H. Robinson, R.R. Brooks, P.E.H. Gregg, y C.V. Haluwyn. 2000. Natural and induced heavy-metal accumulation by *Arrhenatherum elatius*: Implications for phytoremediation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 413 – 421.
- Díaz D. C. y Antón D. 2002. Sequía en un mundo de agua. CIRA – UAMEX. México pp: 46 – 54.
- Diario Oficial de la Federación (DOF_a). 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.
- DOF_b. 1980. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-34-1980. Análisis de agua.- Determinación de sólidos. MA-FQ-29 Método gravimétrico y MA-FQ-30 Método volumétrico (Sólidos sedimentables). Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 3 – 12.
- DOF. 1986. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-079-1986. 1986. Protección al ambiente – Contaminación de agua. Determinación de nitrógeno de nitrato – MA-FQ-23 Método del sulfato de brucina. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 6 – 11.
- DOF. 1987. Norma Oficial Mexicana NMX-MX-AA-42-1987. 1987. Calidad de agua – Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerante) y *Escherichia coli* presuntiva. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 5 – 9.
- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en agua y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 3 – 7.
- DOF_a. 2000. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2000, 2000. Determinación de grasas y aceites. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. 1 – 3.
- DOF_b. 2000. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. Aguas. Determinación de pH. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 1 – 6.
- DOF_c. 2000. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2000. Análisis de agua, determinación de metales, método espectrofotométrico de absorción atómica. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 12 – 14.

- DOF_a. 2001. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 3 – 7.
- DOF_b. 2001. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de acidez y alcalinidad. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 2 – 5.
- DOF_c. 2001. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-045-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de color platino-cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 4 – 7.
- DOF_d. 2001. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-058-SCFI-2001. 2001. Análisis de agua. Determinación de nitrógeno de nitrato. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 3 – 8.
- DOF_e. 2001. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de la conductividad electrolítica. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 2 – 5.
- DOF, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM – 004 – SEMARNAT – 2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp: 4 – 5.
- Ebbs, S.D. y L.V. Kochian. 1998. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*), and Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environ. Sci. Technol.* 32: 802 – 806.
- Egide, L. N., G. W. Petersen, M. L. Himhoff, H. R. Sinclair, Jr, S. W. Waltman, D. S. Reed-Margentan, E. R. Levine, and J. M. Russo. 2001. Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 391 – 402.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1982. Method 200.7 Revision 4.4. Trace Element Analysis of Water and Wasted by ICP-/Atomic Emission Spectrometry . <http://www.epa.gov/OGWDW/methods/epachem.html> pp: 12 – 14.
- Escalante, V., Cardoso L., Ramírez E., Moeller G., Mantilla G., Montecillos J., Servín C. y Villavicencio F. 2002. El reuso del agua residual tratada en México. Instituto Mexicano en Tecnología del Agua. México. pp: 230 - 236

- Eweis, J. B., S. J. Ergas, D. P. Y. Chang y E. D. Schroeder. 1999. Principios de biorrecuperación: tratamientos para la descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y fisico-químicos. McGraw-Hill. España. pp: 12 – 17.
- Eynard, T. E. A., J. Schumacher, M. Lindstrom y D. D. Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated ustolls and usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1927-1934.
- Fair, G. M.; Geyer, J. C. y Okun, D. A. 1966. Water and wastewater engineering. Vol. 1. Water supply and wastewater removal. John Wiley Sons, Inc. Japan. pp: 234 -454.
- García, H. J. L., R. D. Valdéz C., B. Murillo A., A. Nieto G. L. F. Beltrán M., R. Magallanes Q. y E. Troyo D. 2004. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 509 – 515.
- Garza, N. N. 2003. Expoagua 2003, XI Reunión Internacional. Reuso en México. Caso Saltillo. Monterrey, N. L. México.
- Goudie, A. 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. Third edition. Blackwell. Oxford, England. 448 p.
- Grcman, H., S. Velikonja-Bolta, D. Vodnik, B. Kos y D. Lestan. 2001. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: Metal accumulation, leaching, and toxicity. *Plant Soil* 235: 105 – 114
- Hammer, M. J. 1986. *Water and wastewater technology*. Second edition. John Wiley and Sons. USA. pp: 125 – 225.
- Hespanhol, I. 1992. Reuso de Agua: Reciclaje de desechos humanos. Prevención y Control de la Contaminación Ambiental Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza. pp: 3 – 17.
- Horn, R. 2004. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1131 – 1137.
- Hyatt, G. W. 1995. Economic, scientific, and infrastructure basis for using municipal compost in agriculture. *ASA Special Publication*. 58: 19-72. Madison, WI, USA.
- Iglesias J., J. Galantini, S. Venanzi, A. Rausch, M. Barreiro, A. Albin, H. Kruger y M. Ripio. 2004. *Sistemas de Labranza: 3 Distribución del espacio poroso*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Estación Experimental Agropecuaria Bordenav. Argentina. Pp: 3 – 6.

- Inzunza, I. M. A. y H. C. Monger. 2005. Variation of soil chemical properties in irrigated and non-irrigated areas of The Laguna Mexico. *Terra*. 23: 429 – 436.
- Jiménez B., A. Chávez y C. Hernández. 1999. Alternative treatment for wastewater destined for agricultural use. *Water Science & Technology*. 40: 355 – 362.
- Jiménez C., B. E., A. C. Chávez M. y V. Silva C. 2002. Riego agrícola con agua residual y sus implicaciones en la salud. Caso práctico. Universidad Nacional Autónoma de México. México. pp: 3 – 8.
- Jones, J. B., B. Wolf y H. A. Miles. 1991. *Plant analysis handbook*. Micro-macro publishing Inc. USA. pp: 24 – 35.
- Junta de Extremadura. 1992. Interpretación de análisis de suelo, foliar y agua de riego. Consejo de Abonado. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Juárez, J. J. 2005. Aguas residuales: contaminantes y tratamiento. España. pp: 2
- Kayser, A., K. Wenger, A. Keller, W. Attinger, H. Felix, S.K. Gupta y R. Schulin. 2000. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments. *Environ. Sci. Technol.* 34:1778 – 1783.
- Kulli, B., M. Balmer, R. Krebs, B. Lothenbach, G. Geiger y R. Schulin. 1999. The influence of nitrilotriacetate on heavy metal uptake of lettuce and ryegrass. *J. Environ. Qual.* 28: 1699 – 1705.
- La Comisión de Calidad Ambiental de Texas. 2004. El envenenamiento con plomo. ¿De dónde proviene? ¿Cuáles son los riesgos?. Departamento de Salud del Estado de Texas .pp: 1–3 www.tceq.state.tx.us
- Lado, M., M. Ben-Hur y S. Assouline. 2005. Effects of effluent irrigation on seal formation, infiltration, and soil loss during rainfall. *SSSAJ*. 69:1432 – 1439.
- Lesser, J. J. M. 1996. Estudio geohidrológico de la zona Saltillo – Ramos Arizpe, Coah. Querétaro, México. pp: 2 – 24.
- Levy, G. J., A. Rosenthal, J. Tarchitzky, I. Shainberg y Y. Chen. 1999. Soil hydraulic conductivity changes caused by irrigation with reclaimed waste water. *Journ. Environmental Quality*. 28: 1658 – 1664.
- Lu, D., M. Shao, R. Horton, y Ch. Liu. 2004. Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties. *SS*. 169:319 –329.
- Lyndsay, W. L. y W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Am. J.* 42: 421 – 428.
- Mace, J. E. y C. Amrhein. 2001. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 199 – 204.

- Martínez, G. M. A y P. M. Walthall. 2000. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas en el encostramiento de suelos de México y Louisiana, EU. *Terra* 18: 179 – 185.
- Martínez, O. V. 2001. Utilización de aguas residuales en el cultivo y aprovechamiento de *Kochia scoparia* (L.) (Schrad). UAAAN. pp: 53 – 58.
- Marx, D. H., C. R. Berry, and P. P. Kormanik. 1995. Application of municipal sewage sludge to forest and degraded land. *ASA Special Publication*. 58: 275 – 295. USA.
- Méndez, G. T., L. Rodríguez D. y S. Palacios M. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de presencia de metales pesados en suelos. *Terra* 18: 277 – 288.
- Mendoza H. J. M. 1983. Diagnóstico climático para la zona de influencia inmediata de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. pp: 4 – 7.
- Metcalf y Eddy. 1998. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3ª. Edición. Vol.I. McGraw-Hill. México. pp: 28 – 123.
- Montgomery, C. D. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. México. pp: 589.
- Mujeriego, R. 1990. Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada. Ediciones de la Universitat Politècnica de Catalunya. España. pp: 14 – 36.
- Munsell Color. 1975. Munsell Soil Color Charts. Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. Maryland. USA. pp: 2 – 13.
- Nolan, A. L., H. Zhang y M. J. McLaughlin. 2005. Prediction of zinc, cadmium, lead, and copper availability to wheat in contaminated soils using chemical speciation, diffusive gradients in thin films, extraction, and isotopic dilution techniques. *J. Environ. Qual.* 34: 496 – 507. USA
- Nuñez, H. A. 2003. Implementing integrated water resources management for the western U.S.- México border region. *Agua Latinoamérica*. 3: 1 – 22.
- Organización Meteorológica Mundial. 1997. ¿Hay suficiente agua en el mundo? Organización Meteorológica Mundial. Reporte 857. pp: 1 – 3.
- Ortega, R. A., G. A. Peterson y D. G. Westfall. 2002. Residue accumulation and changes in soil organic matter as affected by cropping intensity in no-till dryland agroecosystems. *Agron. J.* 94: 944 – 954.

- Pasternak, D. y Y. de Malach. 1994. Crop irrigation with saline water. Handbook of plant and crop stress. Marcel Dekker Inc. USA. pp. 599 – 622.
- Peijnenburg W., A. Baerselman, T. Jager, D. Leenders, L. Posthuma y R. Van Veen. 2000. Quantification of metal bioavailability for lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 34: 420 – 430.
- Pérez, Z. O. 2002. Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo. Agrociencia. 36: 279 – 290.
- Plenecassagne A., Romero F. E. y López B. C. 1997. Manual de laboratorio. Análisis de suelos, aguas y plantas. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua – Suelo – Planta – Atmósfera. México. pp: 13 – 38.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 1999. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2000. Kenia. pp: 364.
- Pugh R. E., Dick D. G. y Fredeen A. L. 2002. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe, and Cu) contents of plant foliage near the Anvil Range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory. Ecotoxicol Environ Saf. 52: 273-279.
- Quiroga, A. R., D. E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1998. Management discriminant properties in semiarid soils. Soil Sci. 163: 591 – 597.
- Ramalho, R. S. 1996. Tratamiento de aguas residuales. Reverté. España. pp: 705
- Reynolds, K. A. 2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. Universidad de Arizona. USA. pp: 1 – 3.
- Richards, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México. pp: 2 – 39.
- Robles, C. 1996. Irrigación con aguas residuales domésticas. Efectos sobre suelo y plantas. Centro Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral Regional. Oaxaca. México.
- Rodas, C. A., R. E. Núñez, V. H. Espinosa G. G. Alcántar. 2001. Asociación lupino-maíz en la nutrición fosfatada en un Andosol. Terra 19: 141 – 154.
- Romero, A.H. 1997. El Valle del Mezquital, México. Estudio de Caso. Water Pollution Control. PNUMA, CCAIS,OMS. Pp: 1 – 3.
- Russel, F. y Einsensmith, S. P. 1990. Microcomputer Statistical Program for Experiment Design and Analysis (MSTAT-C). Michigan, USA.
- Sánchez, M. A. 1988. Diagnóstico del uso de las aguas residuales en la agricultura de la Región Lagunera. U. A. A. N. pp: 65 – 70.

- Secretaría Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1970. Uso agrícola de las aguas residuales. Comisión hidrológica de la Cuenca del Valle de México. México. pp: 33 – 98.
- Seoáñez, C. M. 1996. Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental. Ediciones Mundi – Prensa. España. pp: 27 – 231.
- Seoáñez, C. M. 1999_a. Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Ediciones Mundi – Prensa. pp: 49 – 95.
- Seoáñez, C. M. 1999_b. Aguas residuales urbanas. Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. 2^a. edición. Mundi – Prensa. España. pp: 86 – 249.
- Seoáñez, C. M. 1999_c. Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión. Ediciones Mundi – Prensa. España. pp: 221 - 280.
- Schmidt, U. 2003. The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals. *J. Environ. Qual.* 32: 1939 – 1954. USA.
- Silva, G. S. E., A. Muñoz O., M. de la Isla B. y A. Muñoz G. 2002. Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1. Agua. *Terra* 20: 243 – 251.
- Statsoft.com. 1997. STATISTICA 5.1. Edición para computadoras. [http:// statsoft.com](http://statsoft.com).
- Steel, R. G. D. y J. A. Torrie. 1986. Bioestadística: principios y procedimientos. 2^a. Edición. McGraw-Hill de México. pp: 132 – 187.
- Suárez, D. L. 1981. Relation between pH_c and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 30: 759 – 763.
- Sustaita, R. F., V. Ordaz Ch., C. Ortiz S. y F. de León G. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia* 34: 379-386.
- Tarchitzky, J., Y. Golobati, R. Keren y Y. Chen. 1999. Wastewater effects on montmorillonite suspensions and hydraulic properties of sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 554 – 560. USA.
- Third World Center for Water Management (TWCWM). 2005. Water pricing and public-private partnership in the Americas. México. Volumen 21. pp: 22 - 296.
- Valdés P. F. y Cabrera M. V. M. 1999. La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México. *Ciudadanía Lagunera por los Derechos Humanos*, A.C. Coahuila, México. pp: 1 – 11.

Walkey, A. y T. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 2.9 – 38.

Western Fertilizers Handbook (WFH). 1975. *Western Fertilizers Handbook*. California Association. Sacramento, CA, USA. pp: 126 – 250.

Zhong, F. Z., X. K. Wang y Z. W. Feng. 2005. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China. *Agricultural Water Management*. 71: 131 – 143.

Zimmerman, J. D. 1976. *El riego*. CECSA. México. pp: 120 – 354.

APÉNDICE

Cuadro 7.1 Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual

Nivel: (Tipos de agua) (Frecuencias de riego)

A)		Estrato 0.00 – 0.30 m						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	0.30	-0.26	0.13	0.06	-0.08	-0.08	
	Da	1.00	-0.42	-0.07	-0.00	-0.06	0.22	
		CH	1.00	-0.04	0.35	0.04	-0.28	
			pH	1.00	0.03	0.05	0.06	
				CE	1.00	-0.01	-0.25	
					CT	1.00	0.02	
						MO	1.00	
B)		Estrato 0.30 – 0.60 m						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	0.06	-0.28	0.25	-0.30	0.18	-0.02	
	Da	1.00	-0.34	-0.08	-0.30	0.00	0.00	
		CH	1.00	-0.09	0.41	-0.37	-0.25	
			pH	1.00	-0.38	0.20	0.03	
				CE	1.00	-0.20	-0.02	
					CT	1.00	0.30	
						MO	1.00	
C)		Estrato 0.60 – 0.90 m						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	0.07	-0.06	0.10	-0.02	0.04	-0.08	
	Da	1.00	-0.00	0.08	-0.23	-0.22	-0.13	
		CH	1.00	0.09	0.06	-0.16	-0.02	
			pH	1.00	-0.17	-0.01	-0.13	
				CE	1.00	0.05	0.12	
					CT	1.00	0.16	
						MO	1.00	

Cuadro 7.2 Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual

Nivel: (Tipos de agua)(Frecuencias de riego) Estrato 0.00 – 0.30 m

A)	R UA							
		Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
	Dr	1.00	0.15	-0.19	0.28	-0.06	-0.20	-0.24
		Da	1.00	-0.23	-0.01	0.40	0.12	0.29
			CH	1.00	-0.10	0.33	-0.00	-0.42
				pH	1.00	0.20	0.02	0.19
					CE	1.00	0.05	0.02
						CT	1.00	0.28
							MO	1.00
B)	R MP							
		Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
	Dr	1.00	0.17	-0.05	0.10	0.42	-0.16	-0.10
		Da	1.00	-0.19	-0.24	0.26	-0.11	0.02
			CH	1.00	0.01	0.04	0.26	0.00
				pH	1.00	-0.04	-0.14	-0.15
					CE	1.00	0.16	-0.18
						CT	1.00	0.01
							MO	1.00
C)	R EF							
		Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
	Dr	1.00	0.56	-0.42	0.10	0.01	0.04	-0.08
		Da	1.00	-0.47	0.07	-0.13	-0.26	0.07
			CH	1.00	-0.25	0.36	0.03	-0.15
				pH	1.00	-0.04	0.31	0.10
					CE	1.00	0.07	-0.02
						CT	1.00	-0.14
							MO	1.00
C)	P UA							
		Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
	Dr	1.00	0.26	-0.42	0.14	-0.19	0.01	0.00
		Da	1.00	-0.67	-0.26	-0.23	-0.16	0.33
			CH	1.00	0.08	0.33	0.10	-0.19
				pH	1.00	-0.27	0.11	0.29
					CE	1.00	-0.17	-0.22
						CT	1.00	-0.24
							MO	1.00

Cuadro 7.3 Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual
 Nivel: (R EF) (Frecuencias de riego) Estrato 0.00 – 0.30 m

A) Cada dos días							
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
Dr	1.00	0.80	-0.74	0.31	-0.63	0.07	-0.01
	Da	1.00	-0.75	-0.00	-0.43	-0.32	0.05
		CH	1.00	-0.48	0.58	0.11	-0.18
			pH	1.00	-0.52	0.17	0.01
				CE	1.00	-0.04	0.23
					CT	1.00	-0.65
						MO	1.00
B) Cada 4 días							
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
Dr	1.00	0.47	-0.40	-0.12	0.05	0.11	-0.35
	Da	1.00	-0.21	0.30	0.15	-0.15	0.25
		CH	1.00	-0.09	0.65	-0.02	-0.28
			pH	1.00	0.30	0.37	0.15
				CE	1.00	0.20	-0.32
					CT	1.00	-0.35
						MO	1.00
C) Cada 6 días							
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
Dr	1.00	0.75	-0.40	0.48	0.08	-0.01	0.06
	Da	1.00	-0.63	0.10	-0.37	-0.39	0.28
		CH	1.00	-0.14	0.18	0.01	-0.14
			pH	1.00	-0.00	0.53	-0.14
				CE	1.00	0.44	-0.44
					CT	1.00	-0.23
						MO	1.00
C) Cada 8 días							
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO
Dr	1.00	0.36	-0.10	-0.14	0.43	0.01	0.13
	Da	1.00	-0.47	-0.21	-0.08	-0.26	-0.18
		CH	1.00	-0.32	0.20	0.09	-0.10
			pH	1.00	0.03	0.14	0.34
				CE	1.00	-0.15	0.00
					CT	1.00	0.34
						MO	1.00

Cuadro 7.4 Porcentajes de correlación entre propiedades físicas y químicas en suelo regado con agua residual
 Nivel: (P UA) (Frecuencias de riego) Estrato 0.00 – 0.30 m

A)		Cada dos días						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	0.53	-0.66	-0.30	0.02	-0.31	-0.09	
	Da	1.00	-0.66	-0.51	-0.17	-0.07	0.15	
		CH	1.00	-0.01	0.32	0.14	-0.37	
			pH	1.00	0.19	0.26	0.54	
				CE	1.00	-0.47	-0.41	
					CT	1.00	0.44	
						MO	1.00	
B)		Cada 4 días						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	0.41	-0.82	-0.18	-0.21	0.06	0.20	
	Da	1.00	-0.62	-0.15	-0.48	-0.49	0.25	
		CH	1.00	0.03	0.51	0.08	-0.18	
			pH	1.00	-0.36	0.07	0.20	
				CE	1.00	0.30	-0.61	
					CT	1.00	-0.11	
						MO	1.00	
C)		Cada 6 días						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	0.05	-0.29	0.70	-0.58	0.51	-0.03	
	Da	1.00	-0.82	-0.12	-0.14	-0.15	0.57	
		CH	1.00	0.00	0.36	-0.28	-0.12	
			pH	1.00	-0.72	-0.07	0.24	
				CE	1.00	-0.25	-0.17	
					CT	1.00	-0.71	
						MO	1.00	
C)		Cada 8 días						
	Dr	Da	CH	pH	CE	CT	MO	
Dr	1.00	-0.01	0.03	0.28	-0.22	0.14	0.16	
	Da	1.00	-0.66	-0.23	-0.25	-0.02	0.26	
		CH	1.00	0.36	0.44	0.00	-0.32	
			pH	1.00	-0.55	0.31	0.45	
				CE	1.00	-0.11	-0.49	
					CT	1.00	-0.03	
						MO	1.00	