

Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México

Soil degradation in the irrigation District 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, Mexico

Flora María CORNEJO OVIEDO¹, Maritza LÓPEZ HERRERA¹✉, Rosa Icela BELTRÁN HERNÁNDEZ², Otilio A. ACEVEDO SANDOVAL³, Carlos Alexander LUCHO CONSTANTINO⁴ y María Isabel REYES SANTAMARÍA³

¹Laboratorio de Morfofisiología Vegetal. Centro de Investigaciones Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Carretera Pachuca-Tulancingo. Km 4,5. Mineral de la Reforma. 42184. Hidalgo, México. ²Centro de Investigaciones Químicas, UAEH, ³Instituto de Ciencias Agropecuarias. UAEH. Tulancingo, Hidalgo y ⁴Universidad Politécnica de Pachuca. Departamento de Biotecnología. Zempoala, Hidalgo, México.
E-mails: flora611@hotmail.com, maritzalh2003@gmail.com ✉ Autor para correspondencia

Recibido: 09/11/2010

Fin de arbitraje: 09/03/2012

Revisión recibida: 22/11/2012

Aceptado: 29/11/2012

RESUMEN

En el Distrito de Riego 003 Tula, en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México se usan aguas residuales para irrigar los cultivos desde hace más de 100 años. Se realizó un análisis comparativo de dos muestreos, uno en 1984 y otro en 2009 a dos profundidades (0-10 y 10-50 cm) con el propósito de cuantificar los cambios en las características físicas y químicas del suelo, y la concentración de metales pesados en suelo y en alfalfa (*Medicago sativa* L.), cultivo de importancia en el distrito. La mayoría de las características del suelo en ambas profundidades mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$), excepto el porcentaje de arcilla y la conductividad eléctrica (CE_s). La textura del suelo cambió de franco arcillo arenoso a franco arcilloso. La CE_s disminuyó 0,1 dSm a 25 °C a profundidades de 0 a 10 cm. El pH se modificó de alcalino a neutro. La CIC y la materia orgánica (MO) se incrementaron. Las bases intercambiables disminuyeron significativamente su concentración. En la alfalfa el Ni con 3,01 mg kg⁻¹ y el Cd con 0,9 mg kg⁻¹ sobrepasaron el valor establecido en la norma. Se determinó que en los últimos 25 años, la textura del suelo se modificó y existió una tendencia a la acidificación y a la pérdida de bases intercambiables por el incremento de la MO debido al uso de las aguas residuales, las prácticas agrícolas de riego por inundación con deficientes sistemas de aplicaciones y la cercanía a zonas industriales de la Región Tula, los cuales conducen a una degradación física y química del suelo influyendo en la productividad agrícola; la presencia de metales tóxicos en la alfalfa representa un riesgo para la salud y el medio ambiente.

Palabras clave: Degradación de suelos, metales tóxicos, contaminación, alfalfa

ABSTRACT

In the Tula Irrigation District 003 at the Mezquital Valley, Hidalgo, Mexico, wastewater to irrigate crops have been used for more than 100 years. A comparative analysis of two samples, one in 1984 and another in 2009 at two depths (0-10 y 10-50 cm) was performed to quantify changes in the physical and chemical soil characteristics and the concentration of heavy metals in soil and alfalfa (*Medicago sativa* L.) one of the most important crops in that district. Most of the characteristics of the soil at both depths showed significant differences ($p < 0.05$), except the percentage of clay and electrical conductivity (CE). Soil texture changed from sandy clay loam to clay loam. The CEs decreased 0.1 dS m at 25 °C from 0 to 10 cm. The pH was changed from alkaline to neutral. The CIC and organic matter increased. The interchangeable bases significantly decreased their concentration. In alfalfa, Ni with 3.01 mg kg⁻¹ and Cd with 0.9 mg kg⁻¹ exceeded the set standard values. It was determined that in the last 25 years the soil texture was modified with a tendency to acidification and the loss of exchangeable bases due to the increase of organic matter due to the use of wastewater, agricultural practices, flood irrigation with deficiency systems of applications and proximity to industrial areas Tula region, which lead to physical and chemical degradation of soils impacting on agricultural productivity, the presence of toxic metals in the alfalfa poses a risk to health and the environment.

Key words: Soil degradation, toxic metals, pollution, alfalfa

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las plantas se suele relacionar frecuentemente con la disponibilidad de

nutrientes más que con las condiciones físicas del suelo (fertilidad física), lo que ha llevado a que los aspectos químicos de la fertilidad del suelo se estudien más ampliamente. La degradación de la

fertilidad física del suelo puede ocasionarse por las acciones antrópicas directas e indirectas que pueden provocar un deterioro de las propiedades físicas que afectan directamente al crecimiento de las plantas (Porta *et al.* 2003).

El Distrito de Riego 003 Tula, del Estado de Hidalgo ha sido utilizado por más de 100 años para uso agrícola, el agua residual proveniente de la Zona Metropolitana del Valle de México. En la actualidad la superficie cultivada en este distrito es aproximadamente de 50.000 ha (Figura 1) siendo los principales cultivos maíz (*Zea mays*) y alfalfa (*Medicago sativa*).

El Distrito de Riego 003 ha sido investigado por diferentes autores debido al impacto de las aguas residuales tanto al suelo como a los cultivos de la zona. Entre las sustancias que se incorporan al suelo vía el agua residual, se encuentran los metales pesados, los cuales pueden participar en diversos procesos como la incorporación al ciclo del agua, acumularse en el suelo con diversos grados de disponibilidad o en el tejido vegetal debido a su absorción por las plantas (Vázquez Alarcón *et al.*, 2005).

En cuanto a la concentración de metales tóxicos en el suelo y en plantas, Hernández Silva *et al.* (1994) afirmaron que la mineralogía de los suelos, demuestra que no hay evidencia de que el material parental sea el causante de una posible acumulación anómala de metales pesados en la zona.

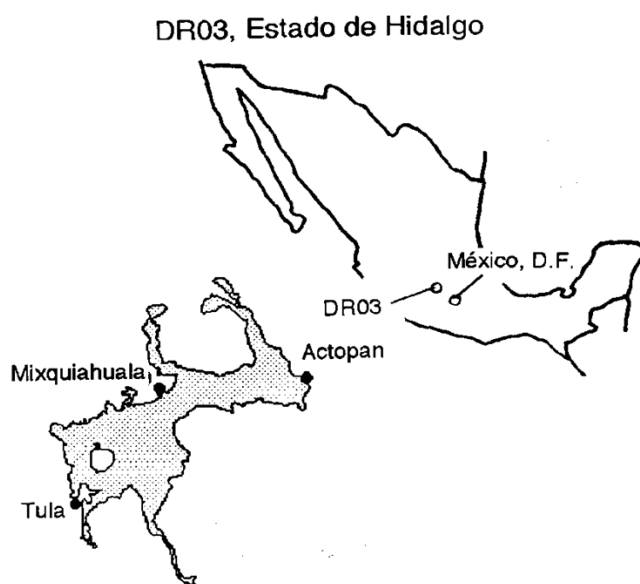


Figura 1. Mapa de localización del Distrito de Riego 03, Estado de Hidalgo, México.

Por su parte Siebe (1994) observó una tendencia de aumento en las cantidades de metales pesados presentes en los suelos conforme al tiempo y que éstos se acumulan en el horizonte Ap; de los metales estudiados la concentración de Cd y Pb se reportó por arriba de los valores sugeridos por la actual Norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2008) que establece, según la autoridad nacional de México, las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis, y los valores para algunos metales según la tolerancia de los cultivos (Cuadro 1).

Cajuste *et al.* (2001), analizaron el suelo en la misma zona y apreciaron también una tendencia general al aumento de la disponibilidad del Pb, Ni y Cd, por efecto del tiempo de uso del agua residual, indicando que el Ni y el Pb presentan una mayor tasa anual de acumulación, mientras que el Cd tiene una tasa 4,3 veces inferior en relación con la del Ni; en cuanto a la concentración de metales en tejido foliar en alfalfa, afirman que el Cd tiende a incrementarse en los cultivos a medida que aumenta el tiempo de uso del agua residual, lo que indica un riesgo potencial para la salud de los organismos consumidores.

El sitio de estudio ha sido reportado por la SRH (1973) dentro de la Serie Tepatepec, el INEGI (1999) lo caracteriza como un Vertisol y Cornejo (1984) lo clasificó dentro del orden Molisol, Suborden Xerolls, Gran Grupo Argixerolls, e identificó los siguientes subhorizontes: A_{10p} de 0 a 10 cm, A_{11p} de 10 a 50 cm, el horizonte B de 50 a 80 cm y el horizonte C de 80 a 90 cm. Prieto García *et al.* (2007) realizaron muestreos en las 4 series de suelo de acuerdo a los tiempos de irrigación con aguas negras, reportaron problemas de salinidad en un solo sitio (Serie Lagunilla CE 14,09 dS m⁻¹), suelos medianamente alcalinos (Serie Progreso pH 8,15) a fuertemente alcalinos (Series Lagunilla pH 9,09 y Tepatepec pH 8,95), suelos entre oxidantes y reductores, hasta suelos altamente reductores (series Progreso -100 mV y Tepatepec -151 mV), suelos arcillosos (en las 4 series, con contenidos de arcilla ≥ 32%) con muy alta capacidad de intercambio

Cuadro 1. Valores (mg kg⁻¹) de elementos tóxicos en el suelo según la tolerancia de los cultivos NOM-021-SEMARNAT-2000

Clase	Cd	Ni	Pb
Normal	0,35	50	35
Peligroso	3 - 5	100	100 - 300

catiónico (Serie Progreso 40,13 Cmol.g^{-1} . Serie Tepatepec 35,22 Cmol.g^{-1}), por lo que los procesos de adsorción-desorción de cationes es elevada, lo que supone que concentraciones bajas de metales traza provenientes de las aguas de riego, pueden llegar a depositarse en los suelos, acumularse y lixivarse, provocando contaminación en la capa arable y la subsiguiente contaminación de cultivos.

La absorción de metales en alfalfa está en función de su concentración y disponibilidad biológica, de la composición de los exudados de la raíz, de la presencia de micorrizas y materia orgánica en el suelo, del pH, del potencial redox, de la temperatura y de la concentración de otros elementos (Naya, 2007).

En el presente trabajo el objetivo fue comparar algunas características fisicoquímicas de un suelo agrícola en dos años de muestreo (1984 y 2009) del mismo sitio y además contrastar la concentración de los metales tóxicos en suelo y en alfalfa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y diseño experimental

La investigación se realizó en marzo 2009 en una parcela de la zona agrícola en el municipio de Tlahuelilpan, Hidalgo, ubicado en el Distrito de Riego 003 Tula, entre las coordenadas $20^{\circ} 07.652'$ longitud Norte y $99^{\circ} 12.881'$ longitud Oeste a 2.078 msnm. Los suelos del sitio tienen más de 80 años de irrigación con aguas residuales y actualmente son cultivados principalmente con alfalfa y maíz.

La parcela tuvo una superficie de 2,83 ha. El muestreo del suelo se hizo en zig zag, se tomaron 10 submuestras de 0 a 10 cm de profundidad (subhorizonte A_{10p}) y 10 submuestras de 10 a 50 cm de profundidad (subhorizonte A_{11p}) para formar dos muestras compuestas. Las muestras compuestas fueron de dos kg cada una y se guardaron en bolsas de polietileno para luego secarse al aire a temperatura ambiente y pasarse por un tamiz de malla de 2 mm de diámetro (certificado NIST, tamiz de Fisher Scientific Company).

Técnicas

Se evaluaron las siguientes características en el suelo: textura, pH, materia orgánica (MO),

conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CE_s) de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, potencial redox (E_h) de acuerdo a Fernández *et al.* (2006), capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método reportado por Yúfera y Carrasco (1973) y las bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) por el método del Fraccionamiento 1 de Tessier (Tessier *et al.*, 1979). Los datos del año 1984 se tomaron de los resultados reportados por Cornejo (1984) para el mismo sitio. Para la identificación de los metales (As, B, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Fe y Se) se colectaron muestras del cultivo aplicando un esquema de Z en el sitio de estudio, cuando se presentó 10% de la floración aproximadamente (determinado por el porcentaje de inflorescencias presentes en el sitio; este es un criterio aplicado por el productor que decide la etapa de corte o de cosecha de la planta). Los análisis de metales en suelo y planta fueron realizados en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), en éste último se utilizó la digestión del método EPA 3051 para metal total en suelos (EPA, 1995), el método EPA 3052 para metales en alfalfa (EPA, 1996) y en un horno de microondas (MarsX, E.U.A). Las muestras que se obtuvieron de la digestión del suelo y alfalfa fueron aforadas a 50 mL con HNO_3 al 3%. La lectura de los metales se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica (SpectrAA 880, Varian, Australia) partiendo de estándares de referencia con una pureza de 99,98%. Se realizaron tres repeticiones por cada muestra compuesta en cada determinación.

Análisis de datos

Los datos obtenidos se analizaron bajo el diseño de tratamientos completamente al azar con arreglo factorial 2^2 , donde los factores principales fueron: años de evaluación (1984 y 2009) y profundidad (0-10 cm y 10-50 cm). Se realizó un análisis de varianza, seguido de un análisis de comparación de medias (Tukey, $p < 0,05$). Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el paquete estadístico SAS.

RESULTADOS

Los resultados muestran que la mayoría de las características del suelo variaron en los últimos 25 años (Cuadros 2 y 3). En ambos subhorizontes (A_{10p} , 0 - 10 cm y A_{11p} , 10 - 15 cm) se observa una pérdida de la fracción arenosa y un incremento en limo y arcilla conforme al tiempo. Para el porcentaje de

arena, el análisis estadístico mostró diferencias en el subhorizonte A_{11p} en el tiempo y para el porcentaje de limo y arcilla se registraron diferencias entre los dos subhorizontes entre ambos años (Cuadros 2 y 3). La fracción arenosa, presentó, para el año 2009, una disminución de 26,6% y 33,4% para el primer y segundo horizonte respectivamente. Por otro lado, el porcentaje de limo y arcilla se incrementaron, por su parte, el limo tuvo un incremento de 16,5% en el primero horizonte y de 40,6% en el segundo. A su vez la arcilla presentó un incremento aproximado del 8,4% en ambos horizontes en el 2009. La clase textural determinada en 1984 fue franco arcillo arenoso y en 2009 se modificó a franco arcilloso (Cuadro 2).

El pH también mostró una disminución conforme al tiempo en ambos sub-horizontes, estas diferencias son significativas estadísticamente ($p < 0,05$). En 1984, el pH se encontraba entre 8,20 (medianamente alcalino) y 8,55 (fuertemente alcalino) para el sub-horizonte A_{10p} y el A_{11p} respectivamente y para el año 2009 disminuyó a 7,19 (neutro) en el primero y 7,62 (medianamente alcalino) en el segundo (Cuadros 2 y 3).

El potencial redox (E_h) del suelo solo se reportó para el año 2009 y se observó que es fuertemente reductor, de 0 a 10 cm fue -459,5 mv y de 10 a 50 cm fue -490,0 mv, lo que indica condiciones anóxicas y anaerobias (Cuadro 2).

En cuanto a la CE, también presentó una disminución al 2009, ésta es más evidente en el sub-horizonte A_{10p} con un 31% con respecto a 1984, estas diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0,05$); en el sub-horizonte A_{11p} no hay cambios importantes, los valores de la CEs en ambos sub-horizontes expresan efectos despreciables de la salinidad (Cuadros 2 y 3).

La CIC se mantuvo alta, con un ligero incremento (11%) para el 2009 y se observó una ligera tendencia hacia al ascenso. La materia orgánica mostró un incremento, para el año 2009, del 29,5% en el sub-horizonte A_{10p} y del 34,0% en el segundo sub-horizonte, para ambas fechas de muestreo los valores expresaron un contenido medio de materia orgánica (Cuadros 2 y 3). De las bases intercambiables evaluadas (Ca, Mg, Na y K) todas, a excepción de Mg, presentaron, para el 2009, una disminución en las

Cuadro 2. Cuantificación de diversas características en dos profundidades del suelo en los años 1984 y 2009 en el municipio de Tlahuelilpan, Hidalgo, México.

Variables	Años de muestreo			
	1984 (Cornejo, 1984)		2009	
	Suelo (profundidad cm)			
	0 - 10	10 - 50	0 - 10	10 - 50
Textura				
Arena (%)	45,3	50,8	37,59	33,84
Limo (%)	25,6	21,0	30,67	35,36
Arcilla (%)	29,1	28,2	31,74	30,80
Clase textural	FAa	FAa	FA	FA
pH				
	pH 1:2,5	pH 1:2,5	pH 1:2	pH 1:27,62
	8,2 (Medianamente Alcalino)	8,55 (Fuertemente Alcalino)	7,19 (Neutro)	(Medianamente alcalino)
PR (mV)				
	NR	NR	-459,5 reductor	-490,9 reductor
CE (dS m⁻¹) a 25 °C				
	0,35	0,14	0,24	0,13
	Efectos despreciables de salinidad	Efectos despreciables de salinidad	Efectos despreciables de salinidad	Efectos despreciables de salinidad
CIC (Cmol.kg⁻¹)				
	34,4 (alta)	33,4 (alta)	38,7 (alta)	37,5 (alta)
MO (%)				
	3,45 (medio)	2,01(medio)	4,89 (alto)	3,06 (medio)
Bases intercambiables (mg kg⁻¹)				
Ca	7134	4809	1554	1439
Mg	389	1118	605	483
Na	621	575	486	304
K	1251	1055	423	167

PR: Potencial redox; CE: Conductividad eléctrica; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; MO: Materia orgánica y NR: no reportado.

concentraciones en ambos sub-horizontes. El comportamiento del Ca, Mg y Na también muestra diferencias significativas entre los dos sub-horizontes y para los años 1984 y 2009 (Cuadros 2 y 3).

De los metales evaluados, los valores de As, Hg y Se, tanto en suelo como en tejido vegetal, fueron menores al límite detectable, el Cr se detectó en tejido vegetal, el Pb en el horizonte A_{10p} y el Fe fue detectado tanto en el sub-horizonte A_{10p} como en tejido vegetal, finalmente tanto el Cd como el Ni se detectaron en los dos sub-horizontes, en raíz y biomasa aérea (Cuadro 4).

DISCUSIÓN

Comparando las características del suelo de los dos años de muestreo y de las dos profundidades, se observa una pérdida significativa de la fracción arenosa del suelo, en la profundidad de 10 a 50 cm y la fracción limosa se incrementa, presentando diferencia significativa para las dos profundidades en los dos años, lo cual puede deberse al trabajo de subsuelo, al riego por inundación, a la pendiente ligera (15%) del terreno que provocan una pérdida gradual a través de los años del material constituyente del suelo. Para el porcentaje de arcilla las diferencias no son significativas pero se observa un ligero incremento en las dos profundidades, que puede

Cuadro 3. Comparación de medias entre las dos profundidades y en los años 1984 y 2009 para las variables estudiadas en el municipio de Tlahuelilpan, Hidalgo, México.

Variables	Profundidad (cm)			
	0 - 10		10 - 50	
	1984 (Cornejo, 1984)	2009	1984 (Cornejo, 1984)	2009
Arena (%)	45,3 ^a	37,59 ^a	50,85 ^a	33,8 ^b
Limo (%)	25,6 ^b	30,67 ^a	21,00 ^b	35,40 ^a
Arcilla (%)	29,1 ^a	31,75 ^a	28,15 ^a	30,80 ^a
pH 1:2	8,2 ^a	7,19 ^b	8,55 ^a	7,62 ^b
CE _s (dS m ⁻¹ a 25 °C)	0,34 ^a	0,24 ^b	0,14 ^a	0,13 ^a
CIC (Cmol.kg ⁻¹)	34,4 ^b	38,77 ^a	33,35 ^b	37,50 ^a
MO (%)	3,45 ^b	4,84 ^a	2,01 ^a	3,06 ^a
Ca (mg kg ⁻¹)	7134,5 ^a	1554,67 ^b	4809 ^a	1438,67 ^b
Mg (mg kg ⁻¹)	389 ^b	604,67 ^a	1118,5 ^a	483,33 ^b
Na (mg kg ⁻¹)	621,5 ^a	486,67 ^b	575 ^a	304,33 ^b
K (mg kg ⁻¹)	1251,5 ^a	423,33 ^b	1055,25 ^a	166,67 ^b

CE: Conductividad eléctrica; CIC: Capacidad de intercambio catiónico y MO: Materia orgánica

Medias con letras diferentes dentro de la misma fila y profundidad indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Cuadro 4. Cuantificación de metales en suelo y alfalfa en marzo del 2009 en el municipio de Tlahuelilpan, Hidalgo, México.

Metales (mg kg ⁻¹)	Suelo 0-10 cm		Suelo 10-50 cm		Raíz		Hoja/Tallo
	Total	Intercambiable	Total	Intercambiable	0-10 cm	10-50 cm	
Arsénico							<LD
Boro	5,76						
Cadmio	0,62-1,45	0,26	1,12	0,13	2,25	<LD	0,1/0,9
Cromo	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD/1,02
Hierro	7,54						86/90
Mercurio							<LD
Níquel	10,66-31,50	0,48	8,0	0,57	0,27	0,83	<LD/3,01
Plomo	53,89						<LD
Selenio	<LD						<LD

< LD: menor al límite de detección.

deberse al depósito de material sólido arrastrado por el agua de riego, éste incremento podría permitir una mayor adsorción de nutrimentos y metales tóxicos. Porta *et al.* (2003), afirmaron que al ser el suelo un sistema abierto, los cambios en la fase sólida mineral no llegan a un estado estable pero que estos cambios tienen lugar de forma tan extremadamente lenta que se considera a la textura como constante; lo que puede estar ocurriendo en el suelo del sitio estudiado, en donde la fase mineral ha cambiado en el lapso de 25 años, encontrándose una pérdida significativa en arena y limo, la fracción arenosa está más propensa al lavado que la arcillosa, con lo que también puede ocurrir pérdida de nutrientes solubles por el exceso de la lámina de riego aplicada.

De acuerdo con lo reportado por Prieto García *et al.* (2007) para la Serie Tepatepec, el pH del sitio estudiado ha disminuido una unidad, por lo que se observa una tendencia hacia la acidificación en el suelo del sitio, el pH disminuyó 1,01 de 0 a 10 cm de profundidad y 0,93 de 10 a 50 cm de profundidad, presentó diferencia significativa para las dos profundidades y para los dos años, lo anterior puede deberse más a la deposición de contaminantes de las emisiones atmosféricas producidas por la zona industrial donde se encuentra la Refinería Miguel Hidalgo y la Comisión Federal de Electricidad, que a la aplicación de agroquímicos dado que esta práctica no es común que se realice por los productores de la zona, aunque algunos ya comienzan a aplicar fertilizantes y plaguicidas en la siembra. Como consecuencia de la disminución del pH, la disponibilidad de nutrimentos y la movilidad de los metales pueden verse afectadas (Tsadilas, 2001), el pH ácido incrementa la disponibilidad del metal debido a que el ion H^+ tiene una afinidad alta por las cargas negativas de los coloides, compitiendo con los iones metálicos por estos sitios y por lo tanto se pueden liberar metales (Greger, 2004).

En cuanto al potencial redox es reductor, lo que hace que las especies oxidadas se hagan inestables y se propicien condiciones para microorganismos anaerobios y por lo tanto se presente la movilidad de los metales tóxicos. Las condiciones anaerobias pueden originarse por el tipo de riego por inundación utilizado en la zona, además del manejo agronómico que se le da al cultivo de alfalfa, es decir durante tres o cuatro años el suelo no se mueve y aproximadamente cada mes se introduce maquinaria agrícola para su corte, empaque y recolecta. Los procesos redox afectan el pH del

sistema, así como la disponibilidad, persistencia y toxicidad de ciertas especies minerales (Porta *et al.*, 2003).

Respecto a la conductividad eléctrica hubo diferencia significativa solo en la profundidad de 0 a 10 cm, observándose que existe una tendencia hacia la disminución, al igual que lo reportaron Prieto García *et al.* (2007), existen efectos despreciables de salinidad.

Los valores de la CIC aunque han cambiado muy poco en 25 años son significativamente diferentes para las dos profundidades en los dos años, los valores se deben al contenido y tipo de minerales de arcilla pero también pueden deberse a los componentes orgánicos acumulados en el suelo provenientes de las aguas residuales; es un dato que resulta relevante primero como reserva nutrimental abundante para los cultivos de la zona, y segundo porque se incrementa la capacidad de adsorber metales en los minerales y coloides del suelo (Bradl, 2005), por lo que resulta necesario identificar los metales que actúan en el complejo de intercambio.

Los datos de la materia orgánica son altos y significativamente diferentes solo para la profundidad de 0 a 10 cm, ésta se ha incrementado conforme al tiempo, por lo que la toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, los cuales facilitan la solubilidad, disponibilidad y dispersión de los metales tóxicos no sólo para las raíces de la alfalfa sino también para el cultivo del maíz que es la rotación que se hace en la zona. Los contenidos altos de materia orgánica también inmovilizan los metales que los unen a los ácidos húmicos o fúlvicos, en general el alto contenido de arcilla, materia orgánica y el pH son los que unen más firmemente a los metales y alargan su tiempo de residencia en el suelo (Greger, 2004).

En las cuatro bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) evaluadas sus valores fueron significativamente diferentes en las dos profundidades estudiadas y comparadas, se observa una pérdida de las mismas a través del tiempo, especialmente del Ca.

Del análisis de metales tóxicos, el arsénico, cromo, mercurio, plomo y selenio su concentración fue menor al límite detectable en el tejido aéreo, el boro se encuentra dentro del rango para la mayoría de las plantas, el cadmio tiene valores mayores a los

normales para la tolerancia de los cultivos y se presenta en suelo, raíz y tejido aéreo, el hierro se encuentra en el rango promedio de requerimiento para animales de pastoreo (Kabata Pendias y Muherjee, 2007), el níquel fue menor a los valores normales de la tolerancia de los cultivos pero su biodisponibilidad en suelo debe tomarse en cuenta en la absorción por las plantas.

Las plantas no tienen un mecanismo de transporte específico para los metales no esenciales por lo que utilizan sistemas de transporte de moléculas similares, como es el caso del Cd, que emplea canales de Ca, así el metal tóxico puede absorberse por la planta. El Cd es uno de los metales pesados más fácilmente absorbido por las plantas, se ha demostrado que inhibe la absorción de diversos elementos esenciales (Fe, Zn, K, Na, Cu, N y P) y la actividad de numerosas enzimas al unirse a grupos SH, al inducir cambios conformacionales y al sustituir iones metálicos como el Zn en las metaloproteínas (Naya, 2007). Aunque la concentración encontrada de metales tóxicos (Cd, Ni y Cr) no está determinada como peligrosa, su presencia representa un riesgo para la población por su carácter bioacumulable, dado que el cultivo de la alfalfa se usa como forraje para alimento de ganado lechero tanto en el estado de Hidalgo como en estados circunvecinos. El Cd fue el único metal que se encontró por arriba de la concentración normal para cultivos. Naya (2007) menciona que plantas expuestas a Cd o algunos otros metales pesados aumentan el contenido de especies reactivas de oxígeno (ROS) y se induce un estrés oxidativo con acumulación de H₂O₂ y activación de la peroxidación lipídica, por lo que resulta necesario estudiar la actividad enzimática, la formación de ROS y el crecimiento de la planta. No obstante, las respuestas de los antioxidantes varían en función de la concentración del metal y del tejido analizado. Una fuente de metales tóxicos es el agua residual usada para el riego en el DR003 como lo afirman Cajuste *et al.* (2001), que observaron concentraciones de metales en agua para riego más elevados que los permitidos por la norma oficial mexicana NOM-CCA-032 ECOL/1993 vigente en ese momento.

Se presentó una degradación física del suelo por la pérdida de partículas, en donde el proceso de lixiviación hídrica constituye un impacto negativo; una degradación química por la pérdida de bases intercambiables, debida a que lentamente ha ido disminuyendo la capacidad de autodepuración del

suelo; se identifica la presencia de metales tóxicos bioacumulables principalmente cadmio y níquel, lo que puede afectar al ciclo biogeoquímico agrícola de la zona, por lo que resulta necesario continuar con el análisis de las características del suelo ya que se observan modificaciones en las propiedades del sistema suelo-agua-organismos; se puede suponer una degradación biológica, dado que los cambios en las condiciones fisicoquímicas, especialmente del pH y el potencial redox pueden ocasionar una alteración de la diversidad de los microorganismos del suelo, así como una pérdida de la productividad del suelo; así mismo se considera que puede ocasionarse estrés abiótico por la presencia de Cd en el tejido aéreo y radicular de la alfalfa, lo que puede inducir a un estrés oxidativo y disminuir su crecimiento, impactando la economía agrícola de la zona, además de lo anterior, los metales tóxicos representan un riesgo para la salud de los consumidores al entrar a la cadena trófica.

LITERATURA CITADA

- Bradl, H. B. 2005. Heavy metals in the environment. Vol. 6. Elsevier Academic Press. p. 46.
- Cajuste, L. J.; A. Vázquez, G. Siebe, G. G. Alcántar y M. L. de la Isla de Bauer. 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35 (3): 267-274.
- Cornejo, F. M. 1984. Algunos estudios edáficos en el municipio de Tlahuelilpan, Hgo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. p. 39-41
- Environmental Protection Agency (EPA). 1996. Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. 1996. U.S. EPA: Washington, D. C. United States of America.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1995. EPA Method 3051: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludge, soils and oils in test methods for evaluating solid waste, 3rd edition. 3rd update; U.S. EPA: Washington, D. C. United States of America.
- Fernández, L. C.; N. G. Rojas, T. G. Roldán, M. E. Ramírez, H. G. Zegarra, R. Uribe, R. J. Reyes, H. Flores y J. M. Arce. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelo aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. Semarnat. Instituto Nacional de Ecología. México. p. 57-65

- Greger, M. 2004. Metal availability, uptake, transport and accumulation in plants. *In*: M. N. V. Prasad (Ed.). Heavy metal stress in plants from biomolecules to ecosystems. 2nd Ed. Springer. India. p. 2.
- Hernández Silva, G.; L. Flores Delgadillo, M. Maples Vermeersch, J. G. Solorio Munguía y J. R. Alcalá Martínez. 1994. Riesgo de acumulación de Cd, Pb, Cr, y Co en tres series de suelos del DR03, Estado de Hidalgo, México. *Rev. Mex. de Ciencias Geológicas* 11 (1): 53-61
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1999. Carta edafológica. Pachuca F14-11. Esc. 1:250,000.
- Kabata Pendias, A. y A. B. Mukherjee. 2007. Trace elements from soil and to human. Springer Verlag Berlin Heidelberg. Library of Congress. 550 p.
- Naya, A. L. 2007. Respuesta fisiológica, bioquímica y molecular de las leguminosas a estreses abióticos. Tesis doctoral. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España. p. 24, 27. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/2927/1/2008-TesisLoretoNaya.pdf>. Fecha de consulta: 19 agosto 2010.
- Porta, C. J.; R. M. López Acevedo y C. Roquero de Laburu. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España. p. 91, 407, 778, 826.
- Prieto García, F.; C. A. Lucho Constantino, H. Poggi Valardo, M. Álvarez Suárez y E. Barrado Esteban. 2007. Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos traza en suelos de la Región Actopan-Ixmiquilpan del Distrito de Riego 03, Valle del Mezquital, Hidalgo México. *Ciencia Ergo Sum* 14 (1): 69-80.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1973. Dirección General de Estudios. Dir. de Agrología. Estudio Agrológico Complementario del Distrito de Riego 03, Tula, Hgo. 15 pp.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2008. NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma oficial mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Consultado en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Normas Oficiales Mexicanas vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf>. Fecha de consulta: 3 de noviembre 2008.
- Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo. México. *Rev. Int. Cont. Amb.* 10 (1): 15-21.
- Tessier, A.; C. Campbell and M. Bisso. 1979. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metal. *Anal. Chem.* 51:844-851.
- Tsadilas, C. D. 2001. Soil pH Effect on the Distribution of Heavy Metals Among Soil Fractions. *In*: I. K. Iskandar (Ed.). Environmental restoration of metals contaminated soils. Lewis Publishers. Pág. 116.
- Vázquez Alarcón, A.; L. J. Cajuste, R. Carrillo González, B. Zamudio González, E. Alvarez Sánchez y J. Z. Castellanos Ramos. 2005. Límites permisibles de acumulación de cadmio, níquel y plomo en suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo. *TERRA Latinoamericana* 23 (4): 447-455
- Yúfera, P. E y D. J. M. Carrasco. 1973. Química agrícola. Ed. Alhambra. Barcelona. España. p. 273-276.