

F. Prieto-García, C. A. Lucho Constantino, H. Poggi Valardo, M. Alvarez Suárez, E. Barrado Esteban
Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región
Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México
Ciencia Ergo Sum, vol. 14, núm. 1, marzo-junio, 2007, pp. 69-80,
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10414109>



Ciencia Ergo Sum,
ISSN (Versión impresa): 1405-0269
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma del Estado de México
México

¿Cómo citar?

Fascículo completo

Más información del artículo

Página de la revista

www.redalyc.org

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México

F. Prieto-García*, C. A. Lucho Constantino**, H. Poggi Valardo**, M. Alvarez Suárez*** y E. Barrado Esteban****

Recepción: 29 de junio de 2005
Aceptación: 7 de diciembre de 2005

*Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, C.P. 42076. Pachuca, Hidalgo, México.

Correo electrónico: prietog@uah.reduaeh.mx

** Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y Estudios Avanzados. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. México, D.F.

*** Centro de Estudios en Población. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

**** Departamento de Química Analítica. Universidad de Valladolid. España.

Resumen. En este trabajo se realiza el estudio de caracterización fisicoquímica y de extracciones secuenciales selectivas de metales trazas, tóxicos y no biodegradables y el metaloide arsénico, en suelos de la zona Actopan-Ixmiquilpan. La caracterización fisicoquímica se realizó mediante determinaciones de texturas de suelos, materia orgánica, pH, entre otros, para clasificar los suelos; paralelamente se realizaron evaluaciones de extracciones secuenciales selectivas de metales trazas (Pb, Cd, Cr y Hg) y del metaloide As, siguiendo el esquema de Tessier *et al.* (1979), con el fin de correlacionar las características de estos suelos con los tiempos de irrigación, la cual se realiza con aguas negras desde hace más de 20 años (para esta zona). En general se encontró una correlación directa de los tiempos de irrigación con los contenidos de materia orgánica y una acumulación apreciable de Pb y Cr fundamentalmente, que puede acarrear problemas a más largo plazo por contaminación de cultivos.

Palabras clave: suelos, extracción secuencial, metales trazas, riego con aguas negras.

Physicochemical Characterization and Speciation of Heavy Metals and Trace Elements in Soils of the Region Actopan-Ixmiquilpan, District of Watering 03, Mezquital Valley, Hidalgo, Mexico

Abstract. In this work we studied the physicochemical characterization and selective sequential extractions of trace metals, toxics and nonbiodegradables, and nonmetallic arsenic (As), in soils of the Actopan-Ixmiquilpan zone. The physicochemical characterization was made by determination of soil texture, organic matter and pH, among others, to classify soils. Parallel evaluations of selective sequential extractions of trace metals (Pb, Cd, Cr and Hg) and of nonmetallic As, following the scheme of Tessier *et al.* (1979) were made, with the purpose of correlating the characteristics of these soils with the time of irrigation, which has been done with black waters for all but 20 years (for this zone). In general, one fundamental finding was a direct correlation of the time of irrigation with the content of organic matter and an appreciable accumulation of Pb and Cr, that can carry problems to the more long term through contamination of cultivations.

Key words: soils, sequential extraction, trace metals, black water irrigation.

Introducción

El Valle del Mezquital se encuentra en la parte sureste del estado de Hidalgo, a 50 km al noreste de la Ciudad de México, entre los

20°05' y 20°30' de latitud norte y 99°25' y 98°55' de longitud oeste; en él está localizado el Distrito de Riego 03 (DR03), que a nivel mundial posee la mayor superficie con más tiempo de irrigación (de 20 hasta 99 años) (CNA & BGS, 1995). El DR03 recibe,

además, cerca del 70% de los efluentes de la Ciudad de México y áreas conurbanas. Según estudios realizados, estas aguas presentan altas concentraciones de detergentes, grasas, aceites y metales trazas que inciden sobre los suelos. Sin embargo, se hace notar que las aguas residuales que se utilizan cumplen generalmente con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Méndez, 1982; CNA & BGS, 1995).

En cuanto a la agricultura, los principales cultivos son hortalizas, legumbres y especias (alfalfa, maíz, trigo, avena, frijol, jitomate, chile y betabel); existiendo una restricción para cultivos de lechuga, col, cilantro, rábano, zanahoria, espinacas y perejil (aunque se cultivan en la actualidad) y que se debe a la regulación para la reutilización de aguas residuales para la protección de la salud (Maples, 1990).

El DR03 presenta cuatro series de suelos, Actopan (tipo fluvisoles y feozems háplicos), Tepatepec (vertisoles pélicos y feozems con propiedades vérticas), Lagunilla (fluvisoles y feozems calcáricos) y Progreso (leptosoles y feozems calcáricos con fase petrocálica), distribuidas en todo el distrito (Hernández, *et al.*, 1994), que abarca una extensión de 47,867 ha (figura 1a). Se puede observar que los tiempos de irrigación para cada una de las zonas es diferente, teniendo para la zona I un tiempo promedio de 20 años (tiempos mínimos de 5 y máximos de 32 años); para la zona II un tiempo promedio de 99 años (prácticamente en toda la zona II los tiempo de irrigación oscilan entre 96 y 105 años); y por último, para la zona III dividida en A y B, se tienen tiempos promedios de 87 y 69 años, respectivamente.

En el presente trabajo se realizó la caracterización fisicoquímica y extracciones secuenciales selectivas de metales trazas, del metaloide arsénico y el Boro, en suelos de la zona que va desde Actopan hasta Ixmiquilpan y que comprende un total de 8,912 ha, encontrándose en ella las cuatro series de suelos mencionadas anteriormente. La caracterización fisicoquímica de los suelos incluyó las determinaciones de: textura, carbono orgánico e inorgánico, potencial redox (Eh), nitrógeno (orgánico, amoniacal, nitratos y nitritos), y pH, con la finalidad de clasificar los suelos y de realizar un análisis de multivariadas a los mismos.

1. Muestreo

Se realizó un muestreo de tipo estratificado en el cual su población en estudio se dividió en estratos por tipo de series y por zonas, con el fin de facilitar el estudio y la representatividad, los datos se muestran en el cuadro 1. Los cálculos para definir los tamaños de las muestras se

Figura 1a. Mapa de las zonas del Distrito de Riego 03.

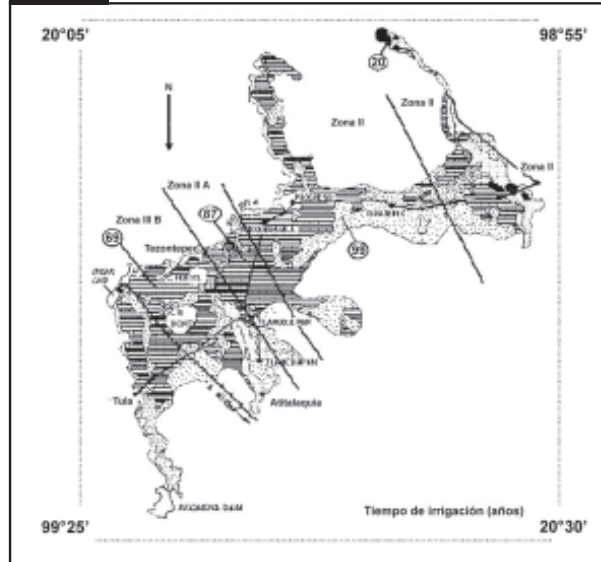


Figura 1b. Esquema de la zona I y ubicación de los puntos de muestreo representados por S.



realizaron de la siguiente manera (Münch, *et al.*, 1998; Tamayo, *et al.*, 1998):

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q \times N}{N \times e^2 + Z^2 \times p \times q}$$

donde: n es el tamaño de la muestra a tomar; p la probabilidad a favor; q la probabilidad en contra; Z el nivel de confianza; N como universo o población total y e nivel de error de estimación.

Considerando un nivel de confianza del 95% y que el valor del universo (N) equivale a que cada ha es 1kg de suelo a muestrear, los datos iniciales fueron:

q = 0.30; Z = 1.96; N = 47,867.60 kg; p = 0.70 y e = 0.05

Cuadro 1. Zonas del Distrito de riego 03 (DDR03). Extensión (ha) de las áreas divididas por zonas y series. Cálculo del tamaño de la muestra (n), a partir del tamaño de la población (N) en kilogramos (kg)

Serie	Ext. Total (ha)	% Ext. 52.0	% Ext. en Zona-I	Zona I (ha)	% Ext. en Zona-II	Zona II (ha)	% Ext. en Zona-III A	Zona IIIA (ha)	% Ext. en Zona-III B	Zona IIIB (ha)	Tamaño de población N _i (kg)	Tamaño de muestra n _i (kg)	Zona I (kg)
Progreso	24890.0	37.0	10.0	2489.0	30.0	7467.0	20.0	4978.0	40.0	9956.0	24890.0	166.6	16.6
Tepatepec	17719.6	9.9	20.0	3543.9	50.0	8859.8	10.0	1771.9	20.0	3543.9	17719.6	118.6	23.7
Lagunilla	4756.4	1.0	50.0	2378.2	5.0	237.8	0.0	0.0	45.0	2140.3	4756.4	31.8	15.9
Actopan	501.6	100.0	100.0	501.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	501.6	3.3	3.3
Total	47867.6			8912.7		16564.6		6749.9		15640.3	47867.6	320.5	59.6

Los tamaños de las muestras se representan en el cuadro 1, el tamaño de la muestra para la zona I fue de 59.69 kg. Se realizaron tres campañas de muestreo divididas en cuatrimestres.

2. Análisis fisicoquímico de los suelos

- Secado y tamizado de las muestras. Para el secado se colocó la muestra a una temperatura de 95°C en un horno de secado durante 4 horas, el tamizado se realizó en tamices Tyler del número 50, 60, 100 y 120, correspondientes a las fracciones entre 2 mm y 120 μm.
- Determinación de la textura. Basado en el método de Bouyoucos (Villegas *et al.*, 1978). Los cálculos obtenidos se llevan al triángulo de clasificación de los suelos según textura (EPA, 1998).
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CE), pH y potencial redox (Eh) (EPA, 1998).
- Determinación de carbono orgánico e inorgánico (Richard, 1973).
- Determinación de nitrógeno: determinación de nitrógeno amoniacal y orgánico, método Kjeldahl y determinación de nitratos y nitritos (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

3. Extracciones secuenciales

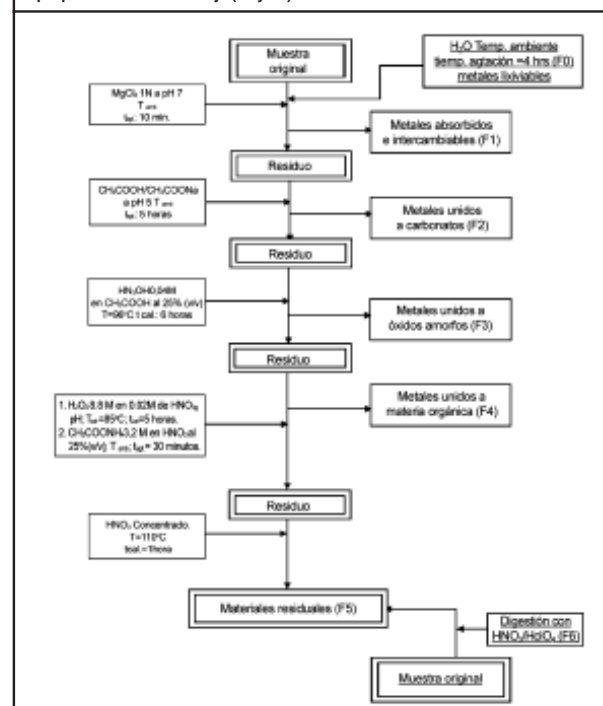
Se utilizó el método de Tessier *et al.* (1979); se agregaron dos fracciones al esquema original como modificación al esquema. La primera, llamada fracción de metales fácilmente lixiviables (fracción 0 o F0) donde se usó como extractante exclusivamente agua desionizada, para determinar los metales que simplemente pueden lixiviar por disolución en agua como Na, K y Mg, entre otros. En la primera fracción original se utiliza como extractante el MgCl₂, y por tanto no es posible determinar este metal en las fracciones subsiguientes; al incluir esta F0, es posible evaluar el Mg inicial o fácilmente solubilizable. Se denomina fracción 1 o F1 a la que se obtiene por extracciones con adición de MgCl₂, definida como fracción de metales fácilmente adsorbidos e intercambiables. La otra fracción agregada al esquema es una mineralización total (F6) que se realiza a una muestra

original, ésta se hizo con HNO₃/HClO₄, a las muestras de esta fracción se les determinaron los metales totales lixiviados (incluidos el metaloide As y el B) como metales totales, y además se cuantificaron y caracterizaron los sólidos que quedan como no disueltos (SND) por difracción de rayos X (DRX). En la figura 2 se muestra un esquema del proceso de extracciones secuenciales que se siguió y las modificaciones realizadas (fracción 0 [F0] y fracción 6 [F6]).

4. Determinación de metales

Las determinaciones de los metales Pb, Cr, Cd, Ca, Mg, K y Na e incluido el B, se realizaron por espectroscopia de emisión con fuente de plasma (ICP), en un espectroscopio de emisión con acoplamiento inductivo de plasma de la

Figura 2. Esquema de Tessier *et al.* (1979). Incluye las modificaciones propuestas en este trabajo (F0 y F6).



firma Perkin–Elmer (USA), en matrices de HNO_3 . Para ello se tomaron las soluciones obtenidas de los procesos de digestión nítrica aforadas a 25 ml. Se realizaron las diluciones necesarias en cada caso. Todos fueron leídos contra blancos de referencia para la corrección de matriz.

La espectrofotometría de absorción atómica se utilizó para la determinación de As y Hg, mediante las técnicas de generación de hidruros y de vapores fríos, respectivamente. En ambos casos se utilizó un espectrofotómetro Varian Spectra 800 (USA).

Para las determinaciones de As se realizó una pre-reducción, con KI al 1% y HCl 1M. En la fracción 4 (F4) del esquema de extracciones secuenciales de Tessier *et al.* (1970), en la que se utiliza $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ como extractante, ya que al ser éste un agente reductor, previo a la adición de KI, se adicionan 3 mL de ácido ascórbico, para evitar la formación de I_2 . Además, se utilizó como reductor una solución de Na_3HB al 0.6% en NaOH al 0.6% y como ácido una solución de HCl 5 M. Para las determinaciones de Hg, las soluciones fueron analizadas en matriz de HCl al 20%, utilizando como reductor una solución de SnCl_2 al 25% (m/v) en HCl al 20% (v/v).

La difracción de rayos X (DRX) se utilizó con la finalidad de caracterizar las fracciones no disueltas derivadas de los procesos de digestión (SND), con el objetivo de corroborar sólidos o compuestos de óxidos de Si, tales como cuarcita, andesita, albita, cristobalita, entre otros. Estas fracciones resultan difíciles de mineralizar totalmente y se obtuvieron al concluir las mineralizaciones con $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$, filtradas a través de papel Millipore de 0.47 μm , lavadas, secadas, cuantificadas gravimétricamente y trituradas en mortero de ágata a 100 μm aproximadamente. Los espectros de difracción se obtuvieron en un difractor Philips, modelo X Pert, USA, con fuente de radiación $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0.5406$ nm, filtro de Ni, portamuestra de Al, tensión del generador y corriente de 40 kV y 30 mA, respectivamente. Se realizaron barridos de ángulos (2θ) de 10 a 70° con integrador de señales acoplado.

5. Análisis multivariante de correlaciones

Se realizó el análisis factorial con el método de extracción de componentes principales (ACP) de las variables fisicoquímicas de los suelos, así como su correlación con el tiempo de irrigación. Los análisis anteriores se realizaron utilizando el paquete estadístico SPSS (por sus siglas en inglés, Software Products Statistic System) versión 9.0 para Windows (SPSS Inc., 1999). Para el análisis e interpretación de resultados se empleó el método de esta-

dística multivariante, que permite extraer información no asequible a primera vista, encontrando las relaciones no aparentes entre objetos y variables (información simultánea sobre diversas especies químicas), así como clasificar los objetos en clases de acuerdo con su origen, naturaleza o cualquier otro criterio. Las variables empleadas en este estudio son de naturaleza diferente, lo cual implica diferencias en el tipo de escala, así como en el orden de magnitud de los elementos correspondientes a cada objeto. En este caso se pueden producir efectos no deseados, ya que las variables de mayor magnitud tendrán un peso superior y en muchos casos injustificado en el resultado final. En este caso es conveniente transformar o normalizar las variables antes de llevar a cabo el ACP para compensar esos efectos. La transformación se llevó a cabo por logaritmo base 10, dado que los valores de las variables de estudio no mostraban una matriz simétrica.

6. Resultados y discusión

Se trabajó con siete lotes de muestras que fueron colectados en tres campañas de muestreo. De la serie Actopan se tuvieron dos variedades (Ixmiquilpan y Actopan), para la serie Lagunilla tres variedades (Actopan, Ixmiquilpan y Villagrán) y para las series Progreso y Tepatepec, se presentó sólo una variedad para ambas (Villagrán y Actopan, respectivamente).

6.1. Caracterización fisicoquímica de los suelos

Según muestran los resultados de CE, sólo uno de los suelos presentó problemas de salinidad, en cuanto al pH, el intervalo de valores fue de 8.10–9.09, que corresponde a lo reportado por algunos autores (Ramírez, 2000; Flores *et al.*, 1997) y se clasifican como moderadamente alcalinos. En cuanto al Eh, se presentaron suelos que van desde el tipo intermedio (entre oxidantes y reductores) hasta suelos fuertemente reductores (cuadro 2). Estos resultados corresponden a los valores de pH encontrados.

El cuadro 2 muestra que, mayoritariamente, se trata de suelos con alta CIC, por lo que la posibilidad de un proceso de adsorción-desorción de cationes es elevada; esto supone que concentraciones relativamente bajas de metales trazas provenientes de las aguas residuales empleadas en el riego, puedan llegar a depositarse en los suelos, acumularse y simultáneamente lixiviar con gran facilidad, lo cual puede acarrear contaminación en las capas arables y a su vez la posibilidad de contaminar los cultivos. Sólo las series Lagunilla (Villagrán e Ixmiquilpan) presentaron una CIC clasificada como media (<25

Cuadro 2. Resultados de conductividad eléctrica (CE), pH, potencial Rredox (Eh), capacidad de intercambio catiónico (CIC), de textura y por ciento de sólidos no disueltos (%SND).

Serie	Conductividad eléctrica		pH		Potencial Redox.		Textura			Sólidos no disueltos	Capacidad de intercambio catiónico	
	C E (dS m ⁻¹)	Suelo	pH	Suelo	Eh (mV)	Suelo	% Arenas	% Limos	% Arcillas	Suelo	% SND	CIC (C mol.kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	0.778	no salino	8.15	moderadamente alcalino	-100	Intermedio	56	12	32	Arcilla arenosa	70.39	40.13
S2 Lagunilla (Villagrán)	1.110	no salino	9.09	muy fuertemente alcalino	-160	Altamente reductor	42	12	46	Arcilla	66.81	24.02
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	1.750	no salino	8.71	fuertemente alcalino	-137	Altamente reductor	48	8	44	Arcilla arenosa	66.06	53.44
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	14.090	muy salino no salino	8.10	moderadamente alcalino	-100	Intermedio	42	12	46	Arcilla	61.89	24.79
S5 Tepatepec (Actopan)	1.490	no salino	8.95	muy fuertemente alcalino	-151	Altamente reductor	36	12	52	Arcilla	55.27	35.22
S6 Actopan (Actopan)	1.560	no salino	8.79	fuertemente alcalino	-142	Altamente reductor	48	8	44	Arcilla arenosa	53.24	52.40
S7 Lagunilla (Actopan)	1.060	no salino	8.50	fuertemente alcalino	-122	Altamente reductor	56	12	32	Arcilla arenosa	69.82	44.72

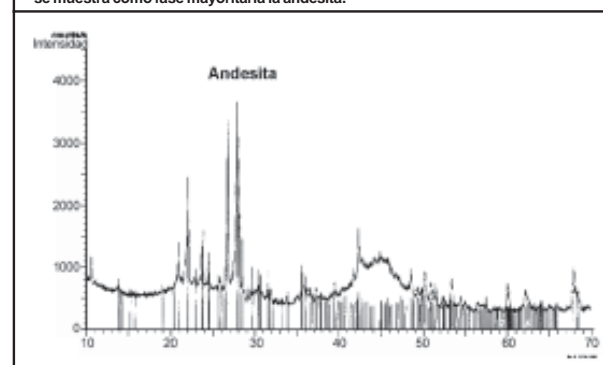
Cmol.kg⁻¹). Destaca que la serie Actopan, ya sea en los municipios Ixmiquilpan o Actopan, presentó los valores más altos de CIC, y los valores más bajos corresponden a suelos arcillosos. Esto es algo poco común pues a suelos con mayores contenidos de arcilla, debían corresponder mayores CIC.

La textura de los suelos varía desde arcilla arenosa hasta arcilla (cuadro 2). En lo que respecta a los sólidos no disueltos (SND), derivados de los procesos de mineralización total, se obtuvieron sus espectros de difracción de rayos X; como ejemplo se presenta el de la serie Progreso (Villagrán), la cual tuvo como fase mayoritaria la andesita, mineral con fórmula Na_{0.685} Ca_{0.347} Al_{1.46} Si_{2.54} O₈ (figura 3).

Es importante resaltar que en todas las muestras de suelos y en general en toda la zona de estudio, la andesita fue el mineral que apareció como fase mayoritaria en los residuos sólidos no disueltos; esto es indicativo de que los orígenes de estos suelos son similares geomorfológicamente, y que los cambios en texturas observados son derivados del uso y el tiempo en los sistemas de riego.

De los análisis de carbono inorgánico (CO₃²⁻, HCO₃¹⁻), carbono orgánico y total; N (total, orgánico, amoniacal y nítrico [NO₃⁻ y NO₂⁻]), que se realizaron a las muestras, se obtuvieron los resultados dados en los cuadros 3 y 4. Respecto al contenido de carbonatos y bicarbonatos, se obtuvo una concordancia con la extracción secuencial

Figura 3. Espectro de DRX de la serie Progreso (Villagrán). Dentro del espectro se muestra como fase mayoritaria la andesita.



Cuadro 3. Resultados de carbono (carbonatos, bicarbonatos, carbono orgánico y total) y tiempo de irrigación.

Serie	mg	mg	mg	mg	Tiempo de irrigación (años)
	CO ₃ ²⁻ kg ⁻¹ *10 ³	HCO ₃ ¹⁻ kg ⁻¹ *10 ³	C _{org} kg ⁻¹ *10 ³	C _{tot} kg ⁻¹ *10 ³	
S1 Progreso (Villagrán)	72.63	31.44	3.27	107.34	5
S2 Lagunilla (Villagrán)	97.01	35.95	3.14	136.10	6
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	325.81	157.19	3.58	486.58	7
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	168.64	91.29	3.44	263.37	10
S5 Tepatepec (Actopan)	596.28	296.26	12.97	905.51	32
S6 Actopan (Actopan)	270.00	124.98	13.72	408.69	38
S7 Lagunilla (Actopan)	63.89	17.23	14.91	96.03	41
Promedio: 19.9					

Cuadro 4. Resultados de nitrógeno (total, nitratos, nitritos, orgánico y amoniacal).

Serie	N amoniacal (mg kg ⁻¹)	NO ₃ (mg kg ⁻¹)	NO ₂ (mg kg ⁻¹)	N orgánico (mg kg ⁻¹)	N total(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	1250.00	86.80	2.43	2.32	1341.55
S2 Lagunilla (Villagrán)	1275.00	162.10	5.81	2.70	1445.61
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	1260.00	178.00	7.12	2.45	1447.57
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	900.00	8744.10	15.17	1.75	9661.02
S5 Tepatepec (Actopan)	1510.00	503.90	0.00	0.85	2014.75
S6 Actopan (Actopan)	300.00	473.30	0.00	8.65	781.95
S7 Lagunilla (Actopan)	1425.00	200.50	0.00	1.00	1626.50

de metales realizada a las muestras, sobre todo con los de la fracción 2 (F2), en la cual son lixiviados de metales asociados a dichas especies químicas. Del carbono orgánico se observa que las muestras de las series Lagunilla (Actopan), Actopan (Actopan) y Tepatepec (Actopan) presentaron las mayores concentraciones de carga orgánica acumulada, que corresponde con las edades de riego. En el cuadro 3 se aprecia la correspondencia que existe entre los contenidos de carbono orgánico y los años de irrigación. De los resultados de los contenidos de N (orgánico, amoniacal y nítrico) se debe notar que existió una elevada concentración de nitratos en la serie Lagunilla (Ixmiquilpan), que debe estar en relación con el área de mayor uso de fertilizantes nitrogenados; en las series que corresponden al municipio de Actopan (las tres últimas del cuadro 4) no se detectó presencia de nitritos, que puede ser indicio de una pobre o escasa acción de bacterias nitroreductoras. Con respecto a la concentración de N amoniacal (el más asimilable por los cultivos), la serie Actopan

(Actopan) es la más pobre y es de esperar que los cultivos en esa área tengan bajos rendimientos.

6.2. Extracciones secuenciales

En las F0 y F1 (metales fácilmente solubilizables e intercambiables y/o adsorbidos respectivamente), como pueden ser el Na, K, Mg y Ca, fundamentalmente, lixivian en estas dos fracciones. Se encontró que la serie Lagunilla (Ixmiquilpan) muestra la mayor salinidad, debido a que precisamente en las fracciones antes mencionadas se extraen las cantidades más elevadas

(mg) de estos elementos por cada kilogramo de muestra; por lo tanto, la salinidad de estos suelos puede clasificarse como elevada, resultado que concuerda con los datos de CE. Así por ejemplo, del total de Na y K (1002.0 y 3198.9 mg kg⁻¹), se tuvo que el 86.76% (m/m) y el 21.33% (m/m), respectivamente, lixivian entre estas dos fracciones. Estas cantidades pueden ser consideradas como elevadas. Para el caso del Ca el porcentaje de lixiviación en estas dos fracciones es menos marcado, solamente el 21.22% (m/m); y para el Mg puede considerarse muy bajo. Para estos dos últimos elementos es de esperar que se encuentren mayoritariamente asociados a carbonatos o en los residuales formando parte de las fracciones asociadas a rocas madre (cuadros 5 y 6).

En las F0 y F1 también se encuentran cantidades apreciables de Pb en todas las series de suelos; destacándose que en la F0, también se extraen concentraciones considerables de B en la totalidad de las series, siendo para la serie Lagunilla

Cuadro 5. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg para la fracción 0 (F0), simplemente solubilizables en agua. NR= no reportado. LD= límites de detección. Para B < 0.051 mg kg⁻¹, Cd < 0.022 mg kg⁻¹, Cr < 0.030 mg kg⁻¹, Pb < 0.015 mg kg⁻¹, As < 0.052 mg kg⁻¹, Hg < 0.06 mg kg⁻¹.

Serie	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹ *10 ³)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	107.79	108.23	66.54	0.15	2.93	<LD	4.15	10.94	<LD	0.01
S2 Lagunilla (Villagrán)	73.24	179.27	133.22	1.02	2.49	<LD	<LD	5.02	<LD	<LD
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	75.85	183.77	201.78	0.76	1.76	<LD	2.12	12.38	<LD	<LD
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	721.13	622.51	1053.37	3828.51	5.03	<LD	<LD	4.48	<LD	<LD
S5 Tepatepec (Actopan)	150.81	142.34	101.84	908.60	2.60	<LD	0.39	8.54	<LD	<LD
S6 Actopan (Actopan)	106.44	149.53	160.46	626.07	2.97	<LD	2.62	10.53	<LD	<LD
S7 Lagunilla (Actopan)	46.92	194.44	140.95	417.25	3.12	<LD	1.32	9.04	<LD	<LD

Cuadro 6. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg para la fracción 1(F1), adsorbidos e intercambiables). NR= No Reportado. L.D.= Límites de Detección. Para B < 0.051 mg kg⁻¹, Cd < 0.022 mg kg⁻¹, Cr < 0.030 mg kg⁻¹, Pb < 0.015 mg kg⁻¹, As < 0.052 mg kg⁻¹, Hg < 0.06 mg kg⁻¹.

Serie	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹ *10 ³)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	168.05	757.89	NR	3.88	<LD	0.98	<LD	6.74	<LD	<LD
S2 Lagunilla (Villagrán)	179.97	74.88	NR	2.77	<LD	0.19	<LD	6.83	<LD	<LD
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	184.19	338.81	NR	3.09	<LD	<LD	<LD	6.20	<LD	<LD
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	147.59	59.82	NR	4.04	<LD	<LD	<LD	8.10	<LD	<LD
S5 Tepatepec (Actopan)	142.54	870.53	NR	3.59	<LD	<LD	<LD	11.42	<LD	<LD
S6 Actopan (Actopan)	125.57	879.39	NR	2.67	<LD	<LD	<LD	7.10	<LD	<LD
S7 Lagunilla (Actopan)	85.45	871.96	NR	2.73	<LD	<LD	<LD	5.07	<LD	<LD

(Ixmiquilpan) la mayor concentración relativa (5.03 mg kg⁻¹). Este B presente en la F0 puede considerarse que es el resultado de los detergentes (boratos, tetraboratos y otras formas de B en aniones) provenientes de aguas residuales domésticas. Sólo una pequeña cantidad del B lixivia en la F3 para las series Lagunilla (Villagrán) y Actopan (Ixmiquilpan); el resto del B se encuentra en la F5 o residual, es decir, asociado a los minerales poco lixiviables (cuadro 5).

En la serie Lagunilla (Villagrán), el porcentaje de Pb extraído entre las F0 y F1 fue de 29.7% (m/m), siendo el porcentaje más alto entre todas las series, pero a su vez resultó ser la serie de suelo de más bajo contenido total de este elemento (39.9 mg kg⁻¹). Sin embargo, la serie Progreso (Villagrán), la cual presenta el menor porcentaje de Pb extraíble en estas dos fracciones, 2.7% (m/m), es a su vez el área de más altos contenidos totales (659.4 mg kg⁻¹). Estas observaciones permiten señalar que en el área de Villagrán los cultivos pueden

verse afectados por las cantidades de Pb que pueden encontrarse en los lixiviados a pH neutro y ser asimilados y acumulados en las plantas (cuadros 5 y 6).

En la F0, el Cd no lixivió y, solamente una cierta concentración, relativamente baja, lixivió en la serie Progreso (Villagrán); por lo tanto, el Cd como elemento tóxico y acumulativo en esta área, puede considerarse que se encuentra como metal adsorbido y que puede lixiviar a pH neutro e incorporarse, al igual que el Pb, a los cultivos de dicha área. Sin embargo, la concentración total de Cd en todas las series de los suelos estudiados fue relativamente baja (< 20 mg kg⁻¹); sólo en la serie Progreso (Villagrán) se encontró en mayor concentración (27.27 mg kg⁻¹) (cuadros 5 y 6).

En cuanto a la F2 (metales unidos a carbonatos y bicarbonatos), en la mayoría de las series lixivió mayor cantidad de Ca, y en la serie Tepatepec (Actopan) en particular, se presentó la mayor concentración de Ca lixiviado (81.9 g kg⁻¹).

Cuadro 7. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg para la fracción 2 (F2), unidos a carbonatos NR= No Reportado. L.D.= Límites de Detección. Para B < 0.051 mg kg⁻¹, Cd < 0.022 mg kg⁻¹, Cr < 0.030 mg kg⁻¹, Pb < 0.015 mg kg⁻¹, As < 0.052 mg kg⁻¹, Hg < 0.06 mg kg⁻¹.

Serie	NNa(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	NR	1.06	3.36	3.19	<LD	0.04	12.88	70.88	<LD	<LD
S2 Lagunilla (Villagrán)	NR	0.07	0.13	2.94	<LD	<LD	<LD	10.43	<LD	<LD
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	NR	0.82	2.73	14.80	<LD	<LD	<LD	28.43	<LD	<LD
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	NR	1.19	2.76	11.82	<LD	<LD	<LD	21.26	<LD	<LD
S5 Tepatepec (Actopan)	NR	0.78	3.10	29.82	<LD	<LD	<LD	19.12	<LD	<LD
S6 Actopan (Actopan)	NR	0.87	3.42	13.32	<LD	<LD	<LD	13.40	<LD	<LD
S7 Lagunilla (Actopan)	NR	0.96	1.82	2.60	<LD	<LD	<LD	10.61	<LD	<LD

Este resultado concuerda con la concentración de carbonatos y bicarbonatos en esa misma serie, la cual mostró los mayores contenidos de dichas especies carbonatadas (cuadro 7).

En la F2, de los metales trazas, se destacó el comportamiento del Pb, que para las distintas series presentó concentraciones en los lixiviados entre 3 y 26% (m/m); el porcentaje mayor corresponde a la serie Lagunilla (Villagrán), pero a su vez fue la serie de menor contenido total (comportamiento similar al del Cd). Se pudo apreciar que en todas las fracciones de lixiviado aparecieron porcentajes relativos de Pb, que no son muy altos, pero al tratarse de un elemento de elevada toxicidad, puede llegar a repercutir de igual forma en los cultivos; merece especial atención el contenido total de 659.9 mg kg⁻¹ para Pb que se encontró en la serie Progreso (Villagrán), ya que esta cifra indica un índice elevado de contaminación de estos suelos (cuadro 7).

En la F3 (metales unidos a óxidos de Fe y Mn), las cantidades lixiviadas de Na, K, Mg y Ca fueron relativamente bajas, comparadas con las anteriores etapas de lixiviación; en el caso del B presentó lixiviación en las series Lagunilla (Villagrán) y Actopan (Ixmiquilpan), siendo esta última donde se obtuvo el mayor porcentaje de lixiviación (12.49% m/m) de esta fracción, sin embargo, fueron cantidades muy bajas (cuadro 8).

Para la F3 se presenta una apreciable lixiviación del Cr, siendo en suelos de la serie Progreso (Villagrán), donde se extrajo el mayor porcentaje de dicho elemento. Esto es indicativo de que siendo un área de poco tiempo de irrigación, el Cr tiene una mayor tendencia a asociarse fácilmente a óxidos. Esto se explica porque es un elemento de menor radio iónico y, por consiguiente, de mayor movilidad iónica que el Cd y el Pb, por lo que puede migrar más rápidamente a otros horizontes del suelo. El Cr proveniente de las aguas contaminadas que se usan para el riego pue-

de aparecer en estados de oxidación Cr6⁺ y Cr3⁺, el primero en forma de cromatos y dicromatos, presente en los residuales de la industria de la curtiembre, y que debido a las condiciones de los suelos (potencial redox) se reduce a Cr3⁺. Lo anterior se corrobora con lo analizado para los suelos del área de Villagrán (cuadro 8), que son altamente reductores y presentan los tiempos de irrigación menores. Esta condición también pone de manifiesto que cantidades apreciables de Cr puedan lixiviar e incorporarse a los cultivos del área. En general, el Cr lixivía a partir de las F3 y siguientes. Las series Progreso (Villagrán) y Lagunilla (Actopan) presentaron mayores concentraciones de Cr total. Estas cantidades pueden ser consideradas como elevadas, al presentarse en suelos muy reductores, han de encontrarse como especies mayoritarias en forma de Cr3⁺ (especie menos tóxica), pero no debe restarse importancia de su migración en estado lixiviado hacia los cultivos y la consecuente acumulación en los mismos.

En la F4 (metales unidos a materia orgánica), los metales como Na, K, Mg y Ca presentaron una lixiviación, pero en porcentajes menores del 12% (cuadro 9). En la misma fracción, la serie Progreso (Villagrán) presentó el mayor porcentaje de lixiviación de Cr, esto quiere decir que aunque la carga orgánica de dicha serie sea pobre, es en la que el Cr está asociado mayoritariamente. La serie Progreso (Villagrán) presentó la mayor cantidad de As que lixivía, por lo que se considera que el As se presenta unido a materia orgánica, y proveniente de las aguas residuales y no de la composición geoquímica de estos suelos. Para la serie Lagunilla (Actopan), donde el contenido de Cr total es también muy elevado, en la F4 las cantidades que lixivian no deben considerarse actualmente como preocupantes, dado que las concentraciones en el lixiviado fueron de 10.4 mg kg⁻¹. En esta serie

Cuadro 8. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg en mg kg⁻¹ para la fracción 3 (F3) unidos a óxidos. NR = no reportado. LD = límites de detección.

Para B < 0.051 mg kg⁻¹, Cd < 0.022 mg kg⁻¹, Cr < 0.030 mg kg⁻¹, Pb < 0.015 mg kg⁻¹, As < 0.052 mg kg⁻¹, Hg < 0.06 mg kg⁻¹.

Serie	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	NR	0.82	0.13	0.13	<LD	<LD	48.03	15.44	<LD	<LD
S2 Lagunilla (Villagrán)	NR	0.06	0.63	0.83	0.12	<LD	7.14	13.14	<LD	<LD
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	NR	0.67	1.04	1.44	1.15	<LD	7.68	14.39	<LD	<LD
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	NR	0.67	0.42	0.64	<LD	<LD	<LD	1.40	<LD	<LD
S5 Tepatepec (Actopan)	NR	0.74	0.31	1.53	<LD	<LD	<LD	1.39	<LD	<LD
S6 Actopan (Actopan)	NR	0.84	0.95	1.53	<LD	<LD	<LD	6.67	<LD	<LD
S7 Lagunilla (Actopan)	NR	0.48	0.36	0.27	<LD	<LD	<LD	11.15	<LD	<LD

Cuadro 9. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg para la fracción 4 (F4), unidos a materia orgánica. NR = no reportado. LD = límites de detección. Para B < 0.051 mg kg⁻¹, Cd < 0.022 mg kg⁻¹, Cr < 0.030 mg kg⁻¹, Pb < 0.015 mg kg⁻¹, As < 0.052 mg kg⁻¹, Hg < 0.06 mg kg⁻¹.

Serie	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	NR	232.33	436.04	357.74	<LD	<LD	184.27	75.36	0.28	0.06
S2 Lagunilla (Villagrán)	NR	19.56	249.78	346.85	<LD	<LD	0.68	1.89	<LD	<LD
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	NR	184.03	461.22	491.41	<LD	<LD	22.03	11.21	<LD	<LD
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	NR	203.13	345.51	339.66	<LD	<LD	11.27	11.27	<LD	<LD
S5 Tepatepec (Actopan)	NR	388.78	259.22	859.48	<LD	<LD	110.73	21.81	<LD	<LD
S6 Actopan (Actopan)	NR	388.86	588.33	705.27	<LD	<LD	18.79	15.98	<LD	<LD
S7 Lagunilla (Actopan)	NR	224.20	225.53	147.75	<LD	<LD	10.42	16.05	<LD	<LD

(cuadro 9) el Cr queda retenido mayoritariamente (95.5% m/m) en la F5.

Los resultados obtenidos en los lixiviados correspondientes a la F5 (especies metálicas en la fracción residual difícilmente lixiviable), muestran que Mg y B son los elementos de porcentajes más elevados (en todas las series > 70% m/m), lo que es indicativo de que estos elementos forman parte de los minerales primarios que no están identificados. Para el Na y K los porcentajes retenidos en la fracción residual fueron menores de 20% (m/m) en las 4 series estudiadas y solamente en las series Lagunilla (Actopan), Actopan (Ixmiquilpan) y Progreso (Villagrán) están entre un 50 y un 70% (m/m), aproximadamente (cuadro 10). Esto está en correspondencia con el hecho de que estas series presentan los suelos menos salinizados, y se encuentran asociados a los sólidos no disueltos, por ejemplo del tipo andesita u otros. El comportamiento del Ca en esta fracción fue similar al del Na y K, pero los porcentajes retenidos en la fracción residual

oscilaron entre 10 y 50% (m/m) aproximadamente (cuadro 10). Estos porcentajes indican que este elemento también forma parte de los minerales nativos o rocas madre; otras cantidades se encuentran en forma de carbonatos y bicarbonatos, característicos de suelos parcialmente calcáreos originados por procesos de meteorización.

De acuerdo con los resultados de todas las fracciones anteriores, en las que el Mg prácticamente no lixivía, se puede afirmar que sus niveles de concentración en las aguas residuales no fue elevado; pero al tratarse de un elemento considerado como micronutriente para los cultivos, es necesario señalar que en estos suelos sus concentraciones fueron relativamente pobres, lo que también puede repercutir en los cultivos. Corresponderá a posteriores estudios de agroquímica evaluar el aspecto deficitario del Mg lixiviable.

Sólo dos series presentaron contenido de Hg (cuadro 11), la serie Progreso (Villagrán) y la serie Actopan (Ixmiquilpan). El mayor contenido lixiviado de este elemento se presentó

Cuadro 10. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg para la fracción 5 (F5), unidos al material residual. NR= no reportado. LD= límites de detección. Para B < 0.051 mg kg⁻¹, Cd < 0.022 mg kg⁻¹, Cr < 0.030 mg kg⁻¹, Pb < 0.015 mg kg⁻¹, As < 0.052 mg kg⁻¹, Hg < 0.06 mg kg⁻¹.

Serie	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)
S1 Progreso (Villagrán)	300.49	0.58	83.21	5.80	19.93	26.25	7.50	480.51	0.05	3.19
S2 Lagunilla (Villagrán)	54.12	0.17	19.83	0.96	7.43	4.97	146.11	2.62	<LD	<LD
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	286.03	0.39	67.63	11.12	6.33	5.86	104.83	92.21	<LD	0.75
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	132.66	0.44	79.69	16.25	118.78	9.16	104.60	148.16	<LD	<LD
S5 Tepatepec (Actopan)	58.77	1.52	88.81	45.15	97.07	9.58	43.21	128.71	<LD	<LD
S6 Actopan (Actopan)	45.86	0.37	101.85	18.87	87.40	12.27	134.22	416.33	<LD	<LD
S7 Lagunilla (Actopan)	272.80	0.16	53.84	4.24	94.24	18.92	262.49	88.86	<LD	<LD

en la F5, por lo que se considera asociado a la parte mineral de los suelos. Sólo en la F3 un pequeño porcentaje de este elemento lixivió a la fase acuosa, 0.94% (m/m) y 1.34% (m/m), en Villagrán e Ixmiquilpan, respectivamente, lo que significa que sólo muy bajas cantidades de Hg se encuentran asociadas a óxidos y se corresponden a cierto grado de acumulación, aunque en poco tiempo de irrigación (5 y 7 años de riego, respectivamente).

De los procesos de mineralización se obtuvieron las concentraciones totales de cada uno de los elementos (cuadro 11). Los sólidos no disueltos en todos los casos corresponden con óxidos de Si, como la andesita, corroborado como fase mayo-

ritaria por DRX. La serie Progreso (Villagrán) tuvo los resultados más críticos. En cuanto a contenidos de metales trazas, el Pb y el Cr resultaron los elementos de interés medioambiental, por sus elevados contenidos y sus posibles migraciones a través de los lixiviados acuosos hacia los cultivos.

6.3. Análisis multivariante de los resultados

Las interrelaciones de los elementos traza y los componentes principales del suelo fueron analizadas por el ACP. La concentración de todos los elementos y algunas variables fisicoquímicas de los suelos fueron transformadas logarítmicamente para normalizar y reducir la influencia de

Cuadro 11. Concentraciones de Na, K, Mg, Ca, B Cd, Cr, Pb, As y Hg para la fracción 6 (F6), mineralización total. NR = no reportado. LD = límites de detección.

Para B < 0.051 mg kg ⁻¹ , Cd < 0.022 mg kg ⁻¹ , Cr < 0.030 mg kg ⁻¹ , Pb < 0.015 mg kg ⁻¹ , As < 0.052 mg kg ⁻¹ , Hg < 0.06 mg kg ⁻¹ .											
Serie	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹)	B(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Hg(mg kg ⁻¹)	
S1 Progreso (Villagrán)	576.33	3552.41	87208.21	13499.62	22.86	27.27	256.82	659.87	0.33	3.29	
S2 Lagunilla (Villagrán)	307.33	572.02	23789.04	6708.95	10.04	5.16	153.93	39.93	<LD	<LD	
S3 Actopan (Ixmiquilpan)	546.06	2588.34	72065.68	31703.91	9.24	5.86	136.66	164.81	<LD	0.77	
S4 Lagunilla (Ixmiquilpan)	1001.99	3198.93	84269.63	36919.10	123.81	9.16	115.87	194.66	<LD	<LD	
S5 Tepatepec (Actopan)	352.12	4448.28	92678.93	81855.57	99.67	9.58	154.33	191.00	<LD	<LD	
S6 Actopan (Actopan)	278.85	3493.79	106974.20	37715.08	90.37	12.27	156.16	470.01	<LD	<LD	
S7 Lagunilla (Actopan)	405.17	2889.21	56381.64	10405.24	97.36	18.92	274.23	140.78	<LD	<LD	

Cuadro 12. Análisis de componentes principales de los metales (Na, CA, K, Mg y B) en el suelo y la varianza total explicada.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6.481	43.207	43.207	6.481	43.207	43.207
2	3.227	21.514	64.721	3.227	21.514	64.721
3	2.449	16.328	81.048	2.449	16.328	81.048
4	1.393	9.286	90.335			
5	0.798	5.321	95.655			
6	0.445	2.964	98.619			
7	0.134	0.892	99.511			
8	3.872E-02	0.258	99.769			
9	1.944E-02	0.130	99.899			
10	1.095E-02	7.299E-02	99.972			
11	2.962E-03	1.975E-02	99.991			
12	1.035E-03	6.901E-03	99.998			
13	2.578E-04	1.719E-03	100.000			
14	1.683E-16	1.122E-15	100.000			
15	-2.120E-02	-1.410E-02	100.000			

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

las variables fuera del rango. Los parámetros fisicoquímicos de los suelos y las concentraciones de los metales adsorbidos y fácilmente intercambiables (F0 y F1), así como los metales unidos a materia orgánica y sulfuros, se encuentran en los cuadros 2 al 11. El primer componente principal fue la combinación lineal de los valores originales transformados conteniendo la varianza (autovalores iniciales). Los siguientes autovalores iniciales son extraídos en forma descendente de acuerdo con su magnitud, de tal manera que los componentes principales representan el decrecimiento sucesivo de las varianzas de los datos.

En el cuadro 12 se muestran los resultados de los tres primeros componentes de los metales (Na, Mg, Ca y K,

incluyendo el B) en el suelo (horizonte Ap), con variables fisicoquímicas asociadas a la salinización de suelos y el tiempo de irrigación, en el cual se muestran los autovalores iniciales y el 81.05% de varianza acumulada. Los autovalores iniciales indican que en el primer componente los metales lixiviables, adsorbidos y fácilmente intercambiables (Na, K, Mg, Ca, incluido el B), así como la CE, están asociados negativamente con el tiempo de irrigación, por lo que se considera que a menor tiempo de irrigación los suelos presentan mayor salinización (ver elipse A en la figura 4). El segundo componente principal representa la varianza del tiempo de irrigación asociado positivamente a la serie, los metales unidos a materia orgánica (K, Ca y Mg) y la CIC. En este componente se encuentra una alta correlación del K con el tiempo de irrigación y la serie, asimismo la CIC tiene una correlación positiva con el Ca y el Mg. Estos dos componentes describen 64.7% de la varianza de los datos (elipse B en la figura 4).

Los autovalores iniciales del componente 1 muestran una alta correlación entre metales unidos a materia orgánica (Cr, Pb, Hg) y el metaloide As, con algunos metales adsorbidos y fácilmente intercambiables (Cd y Cr), a su vez una negativa asociación al tiempo de irrigación. Este componente describe el 55.5% de la varianza (ver cuadro 13), por lo que las series de suelo sometidas a menor tiempo de irrigación presentan mayor acumulación de estos metales en cada una de las fracciones descritas. Esto resulta lógico toda vez que presentan menos efecto de lavado de arcillas y por tanto mayor capacidad para retenerlos.

El segundo componente principal representa 19.15% de la varianza, explicándose 74.7% de la varianza total acumula-

Figura 4. Representación de las variables antiguas [Na, K, Ca, Mg, B, capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CE), tiempo de riego y series de suelo] en el plano de los nuevos componentes.

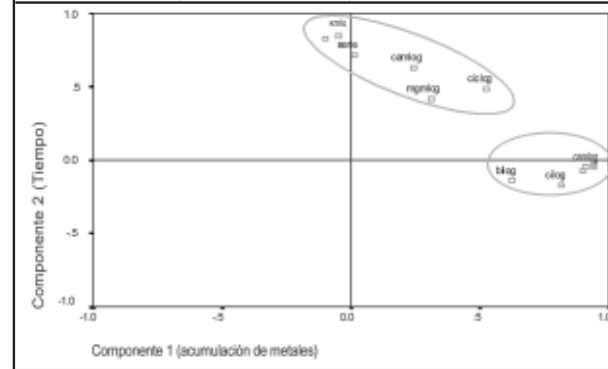
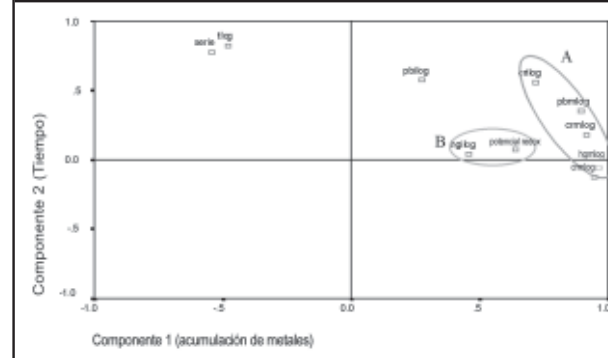


Figura 5. Representación de las variables antiguas [Pb, Cr, Cd, Hg, As, potencial redox (Eh), tiempo de riego y series de suelo] en el plano de los nuevos componentes.



da, en la cual el tiempo de irrigación y las series de suelos muestran una alta asociación con el Pb y Cr adsorbidos y fácilmente intercambiables (ver elipses A y B en la figura 5).

Cuadro 13. Análisis de componentes principales de los metales (Pb, Cr, Cd, Hg y As) en el suelo y la varianza total explicada.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6.110	55.546	55.546	6.110	55.546	55.546
2	2.107	19.152	74.698	2.107	19.152	74.698
3	1.159	10.533	85.232	1.159	10.533	85.232
4	1.025	9.317	94.548			
5	0.418	3.802	98.350			
6	0.157	1.430	99.780			
7	1.592E-02	0.145	99.925			
8	5.363E-03	4.875E-02	99.974			
9	2.108E-03	1.916E-02	99.993			
10	7.310E-04	6.645E-03	99.999			
11	5.875E-05	5.341E-04	100.000			

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Conclusiones

Las aguas residuales utilizadas en el DR03 para riego agrícola, a pesar de que sus contenidos en metales trazas, metaloide As y contenido en B se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, posibilitan que con el tiempo de uso en el riego (20 años promedio y en otros sitios más de 20 años), sea acumulados en las capas arables de los suelos y en distintas formas lixivien con relativa facilidad y puedan pasar a la cadena alimentaria en los cultivos de la región. Existe una correlación directa entre el contenido de materia orgánica (C orgánica,

nico) presente en los suelos y los años de riego, lo cual posibilita que los metales lixiviables en medios de pH moderadamente alcalinos, formen complejos solubles con metales. Según las texturas clasifican en suelos que van desde arcillosos a arcillo-arenosos; presentan de moderada a baja capacidad reintercambio catiónico (CIC) y son suelos no salinos (con una sola excepción, S4 Lagunilla – Ixmiquilpan–, que aparentemente se debe al exceso o sobreuso de fertilizantes del tipo nitrogenados). En cuanto a los metales trazas, tóxicos y peligrosos, se encontraron cantidades apreciables de Pb en todas las series de sue-

los y que lixivian en las fracciones solubilizables en agua y/o intercambiables, lo cual constituye un peligro potencial por la posible bioacumulación en cultivos. También lixivian concentraciones considerables de B, que puede ser fitotóxico para cultivos en concentraciones por encima de 2 mg.kg^{-1} , lo que estuvo presente en todas las series de suelo. Le siguen en orden de importancia las especies que se extraen en la F2 (especies asociadas a carbonatos), que con el continuo uso de las aguas residuales y la posibilidad de modificación en las texturas de estos suelos pueden tener importancia medioambiental a más largo plazo.

oblie

Bibliografía

- APHA-AWWA-WPCF (1995). *Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 20th ed. Washington D.C., USA.
- CNA & BGS (1995). *Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico*. Overseas Development Administration. México.
- EPA (1998). *Draft risk Assessment for Cement Kiln Dust Used as an Agricultural Soil Amendment*. Draft Report. ed. Washington D.C., USA. Reference DW 12938494-01-0.
- Flores, L., Blas, G., (1997). "Distribution and Sequential Extraction of Some Heavy Metals from Soils Irrigated with Wastewater from Mexico City". *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 98.
- Hernández, G., Flores, L., (1994). "Riesgo de acumulación de Cd, Pb, Cr y Co en tres series de suelos del DR03, estado de Hidalgo, México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 11, Núm. 1.
- Maples, M. (1990). "Antecedentes físicos, históricos y socioeconómicos del distrito de desarrollo rural 063 Estado de Hidalgo". *Primer Simposio Nacional. Degradación del Suelo*. Memorias. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
- Méndez, G.T. (1982). *Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo, por A.B.S., boro y metales pesados, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, México, 43-45.
- Münch, L. y E. Angeles (1998). *Métodos y técnicas de investigación*. 2a ed. Ed. Trillas, México.
- DOF (1997). "Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales", *Diario Oficial de la Federación*, 6 de enero.
- Ramírez, E. (2000). *Efectos de la adición de agua residual tratada y no tratada en las dinámicas del carbono y el nitrógeno y sus características en los suelos de distrito de riego 03 de Tula, Hidalgo*. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados Instituto Politécnico Nacional, México.
- Richard, L.A. (1973). "Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos". *Manual de Agricultura*. Núm. 60. Limusa, México.
- SPSS Inc. (1999). *SPSS Base 9.0 Applications Guide*. Ed. Basf, Chicago.
- Tamayo, L. y M. Tamayo (1998). *El proceso de la investigación científica*. 3a Edición. Ed. Limusa. México.
- Tessier, A., Campbell, P., (1979). "Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals". *Anal. Chem.* 51:1.
- Villegas, S. M., Aguilera, H., (1978). "Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo", *Rev. Int. Geología*. Vol. 2, Núm. 2. Universidad Nacional Autónoma de México.