

RIESGO DE ACUMULACIÓN DE Cd, Pb, Cr y Co EN TRES SERIES DE SUELOS DEL DR03, ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO

Gilberto Hernández-Silva¹,
Lourdes Flores-Delgadillo¹,
Mireya Maples-Vermeersch²,
José Gregorio Solorio-Munguía² y
Jorge René Alcalá-Martínez¹

RESUMEN

El incesante incremento de las actividades humanas e industriales en la zona metropolitana de la Ciudad de México, ha sido la causa del deterioro de la calidad de las aguas de drenaje que son utilizadas, desde principios de siglo, para regar los suelos de lo que ahora se conoce como Distrito de Riego 03, Estado de Hidalgo. Estas aguas están caracterizadas por su alcalinidad, la que permite disminuir la solubilidad de los metales pesados. Por otro lado, 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. La serie Tepatepec presenta mayores riesgos de retención de metales pesados totales, debido al lento pero constante aumento en el contenido de materia orgánica y a su mayor vulnerabilidad a la disminución del pH alcalino y a las altas reservas de carbonatos, sulfatos y fosfatos que proporciona el material parental calcáreo, originando compuestos insolubles. Todos los metales pesados susceptibles de ser extraídos muestran, claramente, un ascenso desde 1974. De las características de los suelos de las tres series, la materia orgánica mostró tener mayor influencia en la distribución de los metales pesados estudiados, siendo mayor su acumulación en los horizontes Ap.

Palabras clave: Pedología, suelo, metales pesados, DR03, Hidalgo, México.

ABSTRACT

The constant increase of human and industrial activities in Mexico City's metropolitan zone has been the cause of deterioration in sewage water quality. This water is used to irrigate the land now known as Irrigation District 03, State of Hidalgo, a water usage that dates from the beginning of this century. This water is characterized by its alkalinity, a fact that reduces the solubility of heavy metals. On the other hand, the soil mineralogy shows no evidence that parental material is the cause of possible abnormal accumulation of heavy metals. The Tepatepec series presents greater risks of a total heavy-metal retention due to the slow, but constant, increase in the contents of organic materials, and to its greater vulnerability as pH decreases. Mid textures and moderate permeability, which characterize the Actopan series, facilitate the loss and lixiviation of metals. The Progreso series presents less risks of heavy-metal solubilization due mainly to alkaline pH values and to high reserves of carbonates, sulphides and phosphates in soils supplied by calcareous parental material, thus originating insoluble compounds. All the extractable heavy metals studied show clearly an increase since 1974. From the soil characteristics in the three series, organic material had the greatest influence in the distribution of the heavy metals studied, being its greatest accumulation in the Ap horizons.

Key words: Pedology, soil, heavy metals, DR03, Hidalgo, Mexico.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca aproximadamente 50,000 ha, dentro de lo que es el Distrito de Riego 03, localizado en la región conocida como valle del Mezquital, Estado de Hidalgo (Figura 1).

La litología está dada principalmente por caliza del Cretácico Inferior, basalto y brecha volcánica de naturaleza básica, toba ácida, y aluvión y material volcánico-clástico del Terciario superior. Las formaciones sedimentarias son de gran importancia en la región, ya que constituyen aproximadamente el 60% del área. Las porciones planas y partes de las laderas están constituidas por toba arcillosa y pumicita, así como por

arena y arcilla. Además, las rocas sedimentarias de origen no ígneo, que sobresalen en la zona, están formadas por caliza y áreas pequeñas de pizarra (Blázquez, 1938).

El clima del valle del Mezquital es BS₁kw(i')gw''; es decir, representa el más húmedo de los climas áridos, es templado con 16.7°C de temperatura media anual y tiene verano cálido con promedio de 19.8°C. La precipitación media anual varía entre 435 y 618 mm en las diferentes regiones del valle. Se trata de una zona deficiente en lluvia y con gran variación de la precipitación, de una época del año a otra y entre un año y otro, lo que hace indispensable la aplicación de riego (García, 1980).

Una buena cantidad de los suelos se forma de depósitos residuales *in situ*, como resultado de la meteorización física, química y biológica. La gran actividad volcánica que ha caracterizado a México a través de su historia geológica, principalmente durante el Terciario y Cuaternario, ha dado origen a

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F.

²Estación Regional del Centro, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 376, 36000 Guanajuato, Gto.

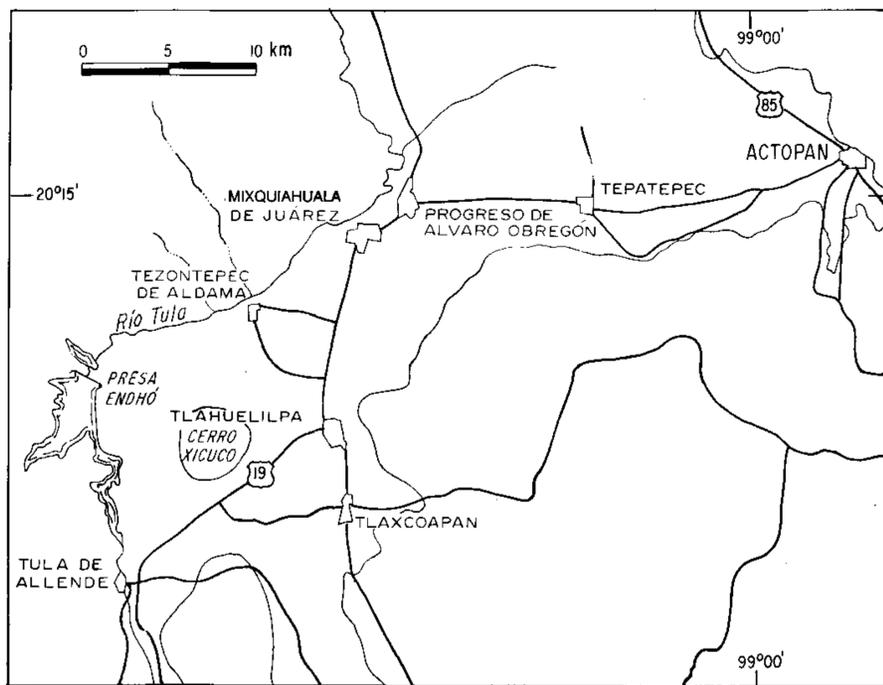


Figura 1.- Mapa de localización de la zona de estudio.

grandes zonas con suelos derivados de rocas ígneas incluyendo materiales piroclásticos; la presencia de caliza es, asimismo, relevante en la zona de estudio. Los factores formadores del suelo inherentes a la región y las prácticas de manejo de los recursos naturales, incluyendo el riego, están modificando el edafoclima en la zona de estudio.

Los suelos que predominan en la región son los Vertisoles pélicos, Feozems háplicos y calcáricos, Rendzinas y Litosoles (DETENAL, 1982).

SERIES DE SUELOS

De acuerdo con las características morfogenéticas, las series representativas del área de estudio son las siguientes (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973):

Serie Actopan

Estos suelos están localizados en las vegas de los ríos de la región; son profundos—hasta 200 cm—; la textura dominante es gruesa; han sido originados por diversos materiales transportados por las corrientes, entre los que predominan toba y andesita; su formación es aluvial con grado incipiente de desarrollo; la topografía es plana; el drenaje superficial es moderadamente deficiente, mientras que el interno es rápido, dadas las texturas gruesas que dominan el perfil. Los Grandes Grupos que corresponden a esta serie son los Fluvisoles y los Feozems háplicos (Figura 2).

Serie Progreso

Estos suelos están en las lomas de los cerros; generalmente son de poco espesor; yacen sobre material calizo que dificulta la penetración de raíces y el paso del agua. La topografía es inclinada, las texturas predominantes del perfil son medias y finas; se originan de una capa de caliza consolidada;

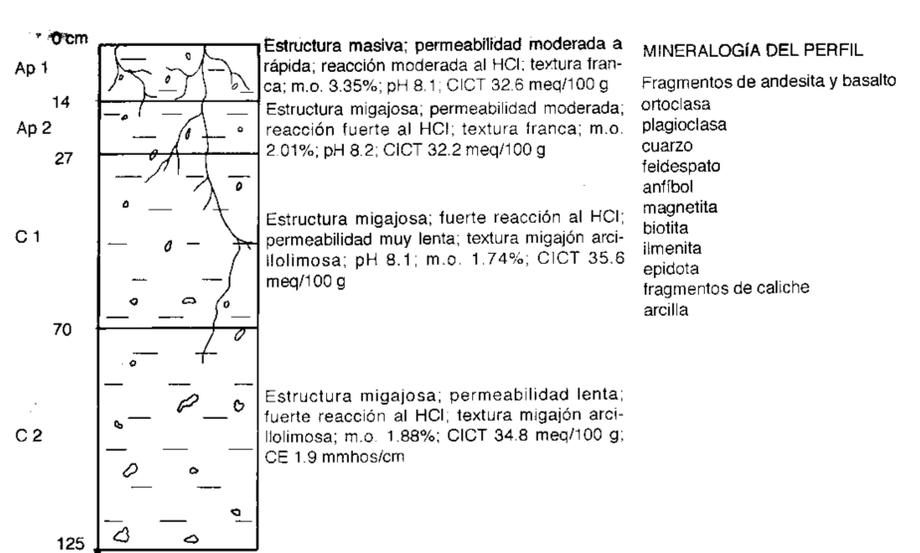


Figura 2.- Perfil de suelos de la serie Actopan.

su modo de formación es *in situ* en las partes altas, y coluvial en las laderas. El drenaje interno es regular y el superficial varía de rápido a muy rápido. En estos suelos predominan los Feozems calcáricos con fase petrocálica y dúrica, así como Leptosoles (Figura 3).

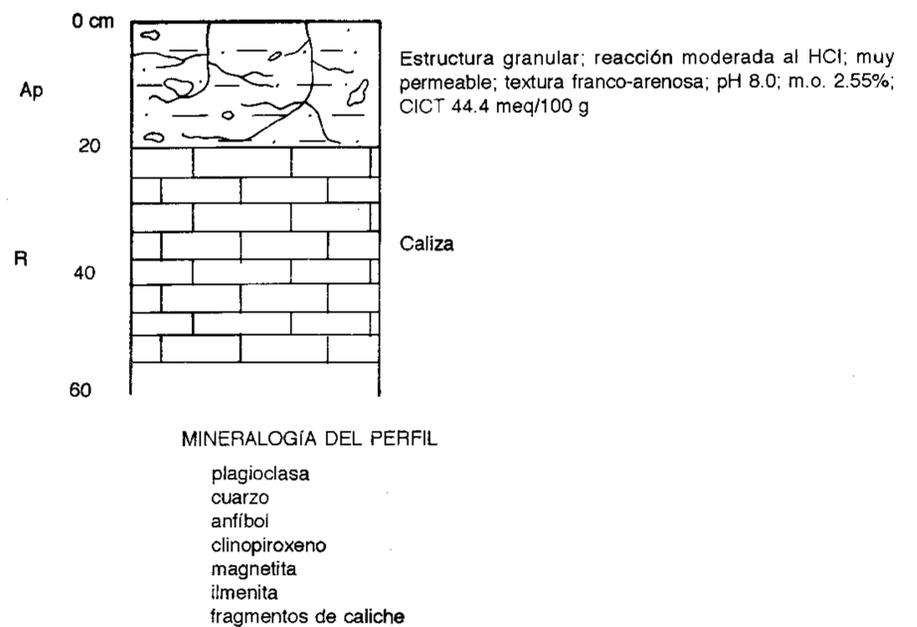


Figura 3.- Perfil de suelos de la serie Progreso.

Serie Tepatepec

Son suelos con profundidad que varía entre 50 y 150 cm, de textura media a fina y con topografía sensiblemente plana o inclinada, con lomeríos formados principalmente por tobas; su formación es *in situ*; por su grado de desarrollo, son considerados medianamente meteorizados; descansan sobre toba compacta—sin llegar a estar cementada—en la que hay concreciones calcáreas, o bien acumulaciones amorfas. A esta serie corresponden los Vertisoles pélicos y Feozems con propiedades vérticas (Figura 4).

MATERIALES Y MÉTODOS

El pH del suelo se midió en una suspensión de suelo-agua con relación 1:2.5 (Chapman y Pratt, 1973); la materia orgánica, por combustión húmeda (Walkley y Black, 1934); y los

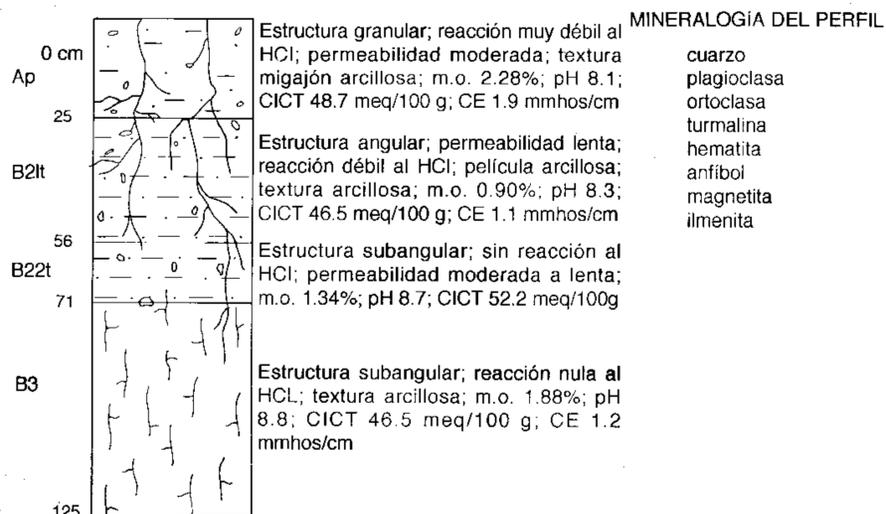


Figura 4.- Perfil de suelos de la serie Tepatepec.

caciones intercambiables, centrifugando con acetato de amonio normal, pH 7.0 (Jackson, 1970).

Se seleccionó los sitios de muestreo representativos dentro de las tres series de suelos. Para establecer el comportamiento de los metales pesados en cuestión, fueron tomados en cuenta los resultados obtenidos por Mascareño-Castro (1974), Gutiérrez-Ruiz (1982), Méndez-García (1982) y Hernández-Silva y colaboradores (1990). El Cd, Pb, Cr y Co totales en suelos fueron cuantificados por digestión con los ácidos fluorhídrico y perclórico, siendo determinados en un espectrofotómetro de absorción atómica (Linn y Jackson, 1982). Para los elementos disponibles se usó como extraente el EDTA, cuantificándose por espectrofotometría de absorción atómica (Viro, 1955). Para el estudio estadístico de pH, materia orgánica, y Ca y Mg intercambiables, se utilizó un análisis de regresión lineal, tomando en cuenta la información generada por el laboratorio de suelos del distrito de riego, abarcando el período de 1976 a 1987 (Tabla 1). El mismo procedimiento estadístico se utilizó para determinar la tendencia de los cuatro metales pesados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS DE RIEGO

La calidad de las aguas residuales utilizadas en el Distrito de Riego 03 se vio afectada aún más a partir de los años cuarenta, cuando se inició propiamente la industrialización de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Se clasifica esta agua como C3S1 y C3S2 (Hernández-Hernández, 1988), es decir, condicionada para su uso por su alta salinidad—C3—y contenidos bajos—S1—y medios de sodio—S2—; la conductividad eléctrica de las aguas es baja, variando de 0.71 a 2.20 mmhos/cm; el pH fluctúa entre 7.1 y 8.3. En consecuencia, la conductividad eléctrica baja y el pH alcalino, muestran que no hay riesgo de que estas aguas sean portadoras de cantidades apreciables de metales pesados en solución. En cambio, los contenidos de sodio intercambiable y el sodio posible son superiores a los contenidos de calcio y magnesio, lo cual sí pudiera representar un riesgo de sodicidad en los suelos.

Tabla 1.- Variación de las características químicas de los suelos (1976-1987).

Año	Serie	pH	M.O.	Ca	Mg
1976	A	7.80	2.01	-	-
	T	8.00	2.47	-	-
	P	8.10			
1977	A	8.15	0.73	7.60	5.24
	T	8.20	-	2.38	4.76
	P	8.40	2.36	2.38	4.76
1978	A	8.40	1.04	2.70	2.70
	T	8.65	2.86	1.80	1.44
	P	7.85	5.20	5.40	2.76
1979	A	8.00	1.54	3.00	3.44
	T	7.75	3.00	2.00	1.68
	P	7.50	4.57	3.00	3.00
1980	A	8.10	2.50	5.00	5.00
	T	8.40	2.36	3.00	3.00
	P	8.80	3.02	4.00	4.00
1981	A	8.50	0.90	1.93	1.45
	T	8.40	2.21	4.11	3.41
	P	8.00	3.57	3.14	3.06
1982	A	7.50	0.85	1.80	1.72
	T	7.60	3.54	2.00	1.52
	P	8.10	3.77	2.80	1.65
1983	A	7.90	1.35	2.60	3.00
	T	7.75	2.87	2.03	1.17
	P	7.75	4.45	3.00	2.00
1984	A	7.85	1.70	2.57	2.37
	T	8.00	3.16	2.20	1.55
	P	7.70	3.41	2.19	1.94
1985	A	7.15		3.47	2.44
	T	7.15	3.40	2.71	1.77
	P	7.15	3.31	1.30	1.20
1986	A	7.90	2.89	2.64	2.57
	T	7.80	2.39	1.56	0.94
	P	8.10	3.21	1.44	1.06
1987	A	8.30	2.45	1.40	1.23
	T	8.20	1.80	1.33	1.07
	P	8.10		1.45	1.12

Datos proporcionados por el Laboratorio de Suelos del Distrito de Riego 03, Hidalgo.

Los suelos que han sido regados con aguas negras durante un mayor número de años están entre Juandhó y Tlahuelilpan (~ 100 años), correspondiendo la mayor parte de esta área a la serie Progreso. Las series Tepatepec y Actopan han sido regadas indistintamente con aguas negras y mezcladas, durante un lapso que va de los últimos 50 a 70 años (Figuras 5 y 6).

MINERALOGÍA

El análisis mineralógico de los suelos representativos—fracción gruesa >2 mm—de las tres series estudiadas mostró,

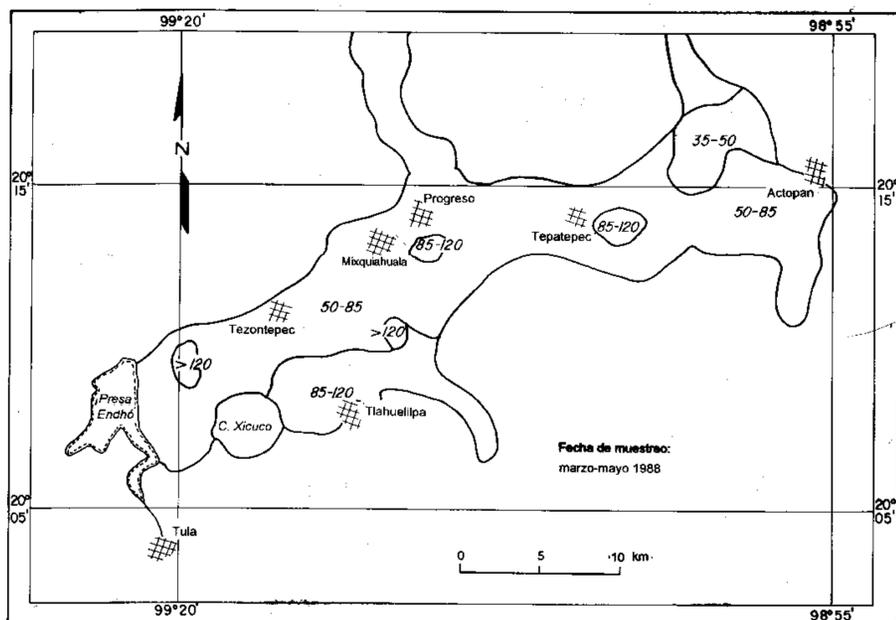


Figura 5.- Mapa de distribución del plomo en los suelos del DR03 (en ppm). Primera aproximación. Profundidad 0-30 cm.

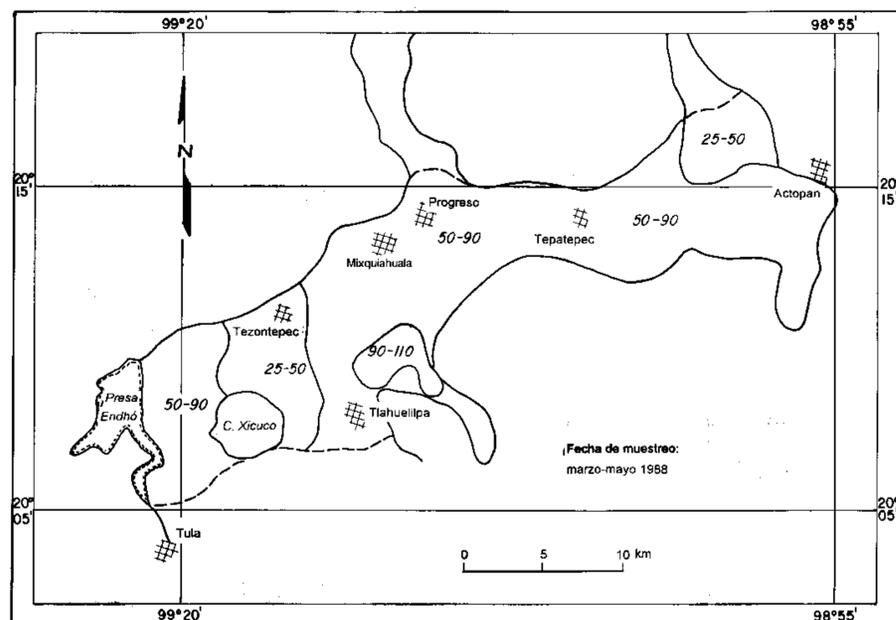


Figura 6.- Mapa de distribución del cromo en los suelos del DR03 (en ppm). Primera aproximación. Profundidad 0-30 cm.

para la serie Progreso, la presencia de plagioclasa > cuarzo > anfíbol > clinopiroxeno > magnetita > ilmenita > caliche. Para la Actopan, andesita (cuarzo, feldespato y piroxeno) > cuarzo > plagioclasa > piroxeno (hematita). Para la Tepatepec, cuarzo > plagioclasa > ortoclasa > turmalina > hematita > anfíbol > magnetita > ilmenita > toba > toba carbonatada.

El sitio 76 (Tabla 2) resultó tener el mayor contenido de Pb en el horizonte B (45-76 cm). Este lugar se caracteriza por tener cuarzo celular > plagioclasa > piroxeno (augita) > calcita > magnetita > ilmenita > ortoclasa > calcedonia > limonita > hematita > zircón. La galena, esfalerita y calcopirita comúnmente están asociadas con Pb y Cd, minerales que no fueron detectados y, aunque en los ferromagnesianos puede haber familias de Cr, Co, Cd y Pb, los niveles detectados resultaron muy bajos y heterogéneos para encontrar una relación directa de Pb o Cd derivada de la mineralogía del material parental.

Por otro lado, los piroxenos ocasionalmente contienen ciertas cantidades de Cr, Mg y Ti y, cuando se llevan a cabo

procesos químicos, generalmente se produce alteración que conduce a sustitución. No obstante lo anterior, el análisis mineralógico mostró que el material, que ha sido rodado y acarreado, no ha sufrido transformación; por lo tanto, los niveles de Cr y Mg no sobresalen por su contenido en relación con otros sitios, en tal forma que pudiera inferirse que se trate de un producto de la meteorización química del material parental, capaz de dejar en libertad elementos en concentración anómala.

LAS SERIES DE SUELOS Y LOS METALES PESADOS

El conocimiento de la evolución de las principales características de los suelos de la región ayuda a explicar el comportamiento de la dinámica de los metales pesados en los perfiles del suelo de la zona de estudio.

De acuerdo con el comportamiento de los iones metálicos en los perfiles de los suelos de las tres series, las gráficas

Tabla 2.- Elementos pesados (en ppm) en suelos de algunos sitios del Distrito de Riego 03, Estado de Hidalgo.

Sitio	Serie	Profundidad [cm]	Horizonte	Totales				Susceptibles de ser extraídos			
				Cd	Cr	Co	Pb	Cd	Cr	Co	Pb
62	Actopan	0-14	Ap	7.9	65.9	30.0	85.3	2.35	3.58	7.36	44.8
62		14-27	C1	6.8	43.9	26.6	85.3	7.72	1.15	6.74	30.4
62		27-70	C2	3.9	22.0	20.0	27.1	0.88	0.12	9.50	17.6
62		70-125	C3	5.1	51.5	36.6	62.0	0.84	0.25	9.20	17.6
76	Tepatepec	0-17	Ap	7.9	60.6	40.0	100.8	1.26	0.76	8.28	27.2
76		17-05	B1	5.7	45.5	36.6	77.5	0.92	0.51	8.58	24.0
76		45-76	BC	5.1	39.4	33.3	736.4	0.67	0.25	8.89	16.0
83	Tepatepec	0-30	Ap	6.4	62.9	25.0	62.5	1.34	0.76	9.50	27.2
83		30-56	B21t	3.9	46.3	31.2	50.0	1.00	0.51	11.04	21.6
83		56-71	B22t	3.2	57.4	34.4	37.5	0.75	0.38	11.65	16.0
83		71-125	B3	5.1	31.5	25.0	37.5	0.04	0.25	11.04	17.6
83		125-150	C	4.5	77.7	31.2	50.0	1.00	0.25	8.28	20.8
114	Progreso	0-20	Ap	5.7	50.0	30.0	96.9	0.96	1.53	7.97	38.4
117	Progreso	0-25	Ap	6.2	90.1	33.3	100.8	2.15	3.07	8.28	51.2

(Figura 7) muestran que el contenido de Cd y Pb totales disminuye con la profundidad (Figura 8); esta característica puede deberse a que la materia orgánica también disminuye con la profundidad. El Co, en cambio, tiene su mayor concentración en el horizonte B de la serie Tepatepec, y en el C2 de la serie Actopan.

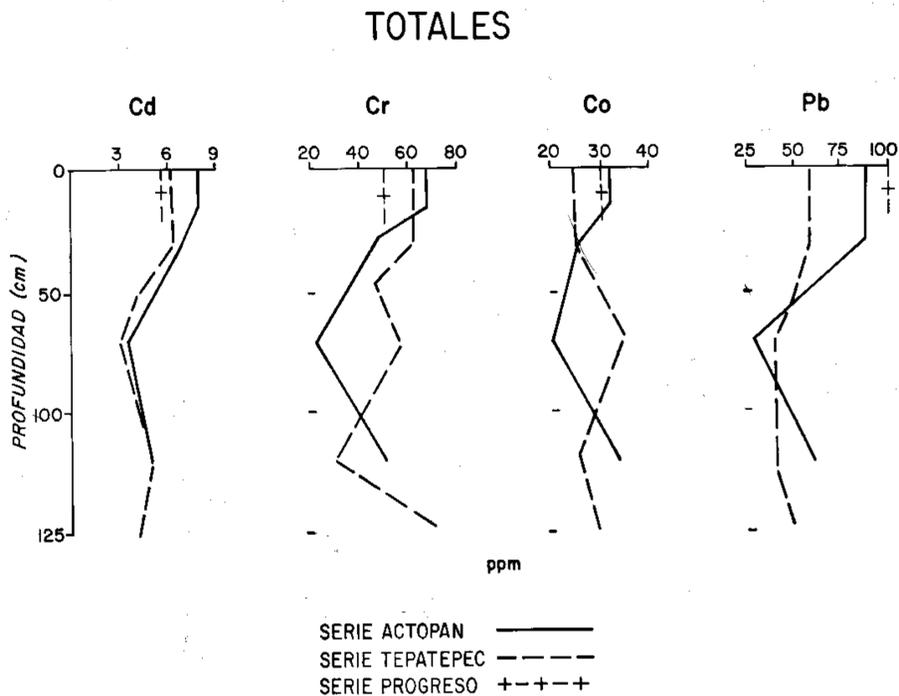


Figura 7.- Comportamiento de metales pesados totales en relación con la profundidad de los suelos de las tres series.

La gráfica que se obtuvo para la materia orgánica (Figura 9) señala que, para las series Tepatepec y Actopan ha existido un aumento constante de la materia orgánica en la capa superficial del suelo; sin embargo, para la serie Progreso, el descenso fue notable, lo cual pudiera deberse a que en 1978 y 1980 fueron consignados 5.2 y 6.0%, respectivamente, de materia orgánica, lo que seguramente implica ruido en la información. La tendencia de esta acumulación significa una inmovilización de compuestos por la presencia de coloides orgánicos y la formación de quelatos que alteran la solubilidad y transporte de iones y que a la vez afecta la disponibilidad de iones metálicos (Emmerich *et al.*, 1982; Chang *et al.*, 1984; Rappaport *et al.*, 1982; Williams *et al.*, 1985).

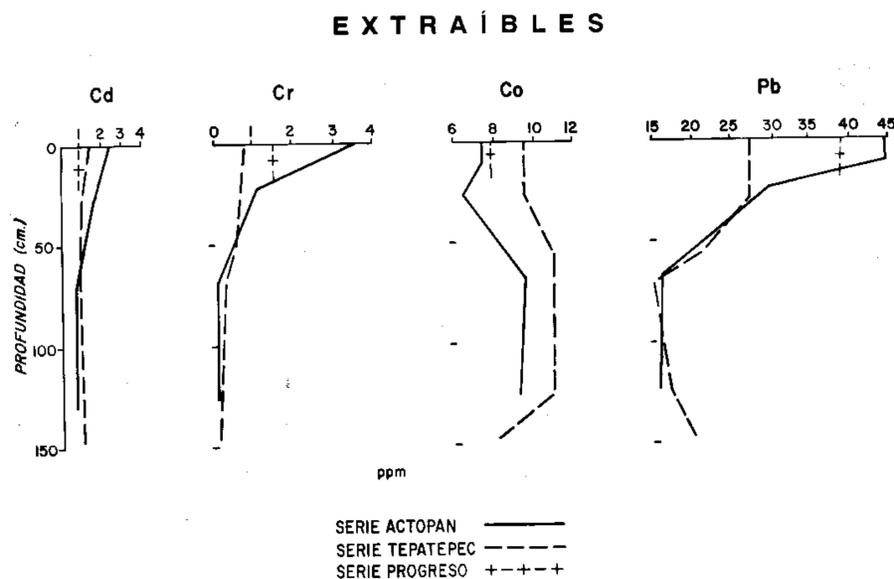


Figura 8.- Comportamiento de metales pesados susceptibles de ser extraídos en relación con la profundidad de los suelos de las tres series.

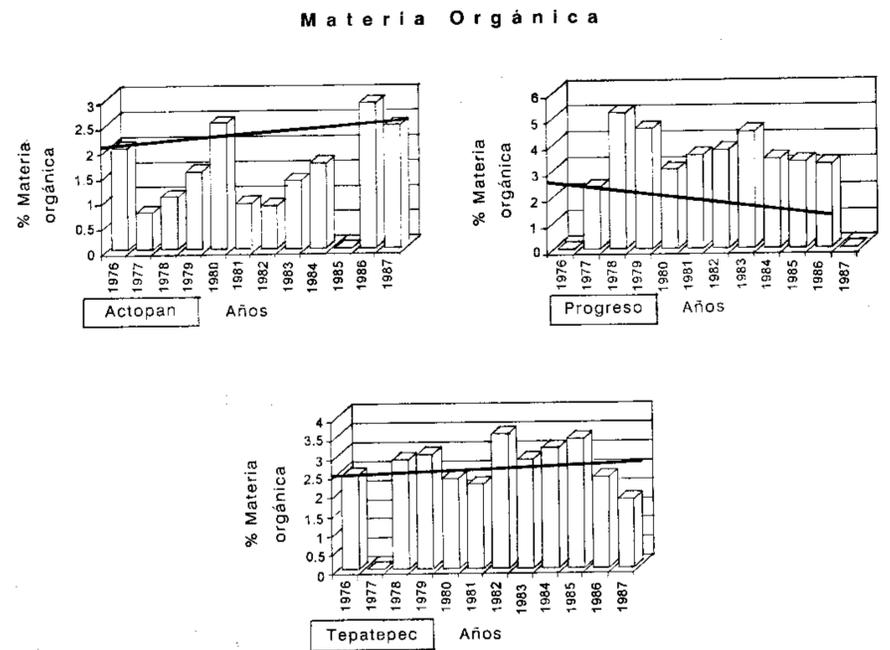


Figura 9.- Comportamiento de la materia orgánica a través de los años.

La gráfica de la Figura 10 muestra el comportamiento del pH en las capas superficiales (horizonte Ap) de las tres series, y en ella se puede ver que durante 11 años ha existido una disminución paulatina del pH (tendencia de la media), que va de alrededor de 0.5 (serie Actopan) a 0.75 (serie Tepatepec); la serie Progreso, por el material calcáreo que yace debajo de ella, sólo ha sufrido un 0.2 de disminución.

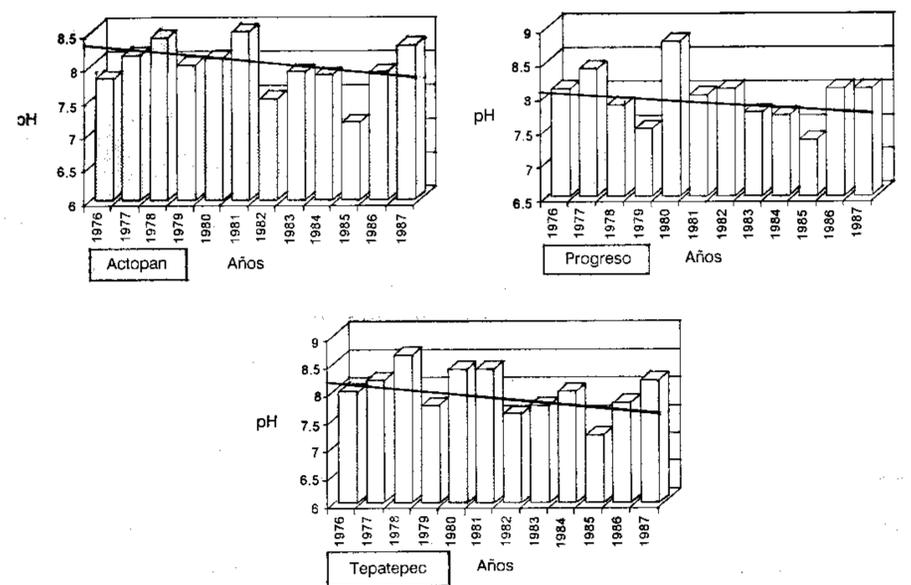


Figura 10.- Comportamiento del pH a través de los años.

También se comprobó el comportamiento del pH en función del contenido de Ca y Mg intercambiables; fueron graficadas sus tendencias bajo la misma tónica que el pH y la materia orgánica.

La gráfica del Ca de la serie Tepatepec casi muestra estabilidad en su contenido, así como un aumento lento en la serie Actopan y un incremento rápido en la serie Progreso. Para esta última, las reservas de Mg son altas y para las otras dos van en descenso (Figuras 11 y 12).

Desde un punto de vista general, el descenso del pH en las tres series—que significa un aumento gradual en la dispo-

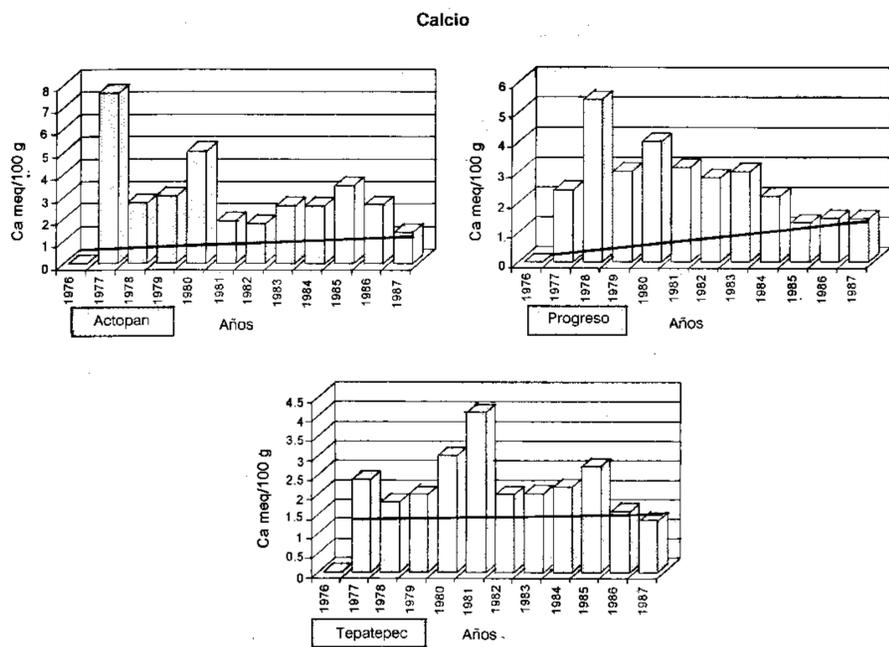


Figura 11.- Comportamiento del Ca a través de los años.

nibilidad de metales pesados—y el aumento paulatino y constante de la materia orgánica—que se traduce en la formación de complejos muy fuertes con los metales pesados, que repercute en un ascenso en la disponibilidad y retención de iones metálicos—señalan una clara correlación; es decir, a medida que aumenta el contenido de materia orgánica y el pH descendiendo, la disponibilidad de estos metales pesados se incrementa.

Como resultado de la dinámica de las propiedades físicas y químicas de las tres series estudiadas, así como del fenómeno de antropización del distrito de riego, se tiene que los suelos calcáreos de la serie Progreso presentan menores riesgos en cuanto a la retención de metales pesados, debido principalmente al pH, que va de ligeramente alcalino a alcalino, y a las altas reservas de Ca y Mg que les proporciona el material parental. En estos suelos alcalinos rápidamente se forman hidróxidos insolubles, lo que impide la disponibilidad de los metales pesados.

Aún en las condiciones alcalinas de los suelos con niveles altos de carbonatos se presenta un aumento en el contenido de algunos metales pesados; por ejemplo, el análisis estadístico de regresión lineal para el Cr y el Pb totales muestra un

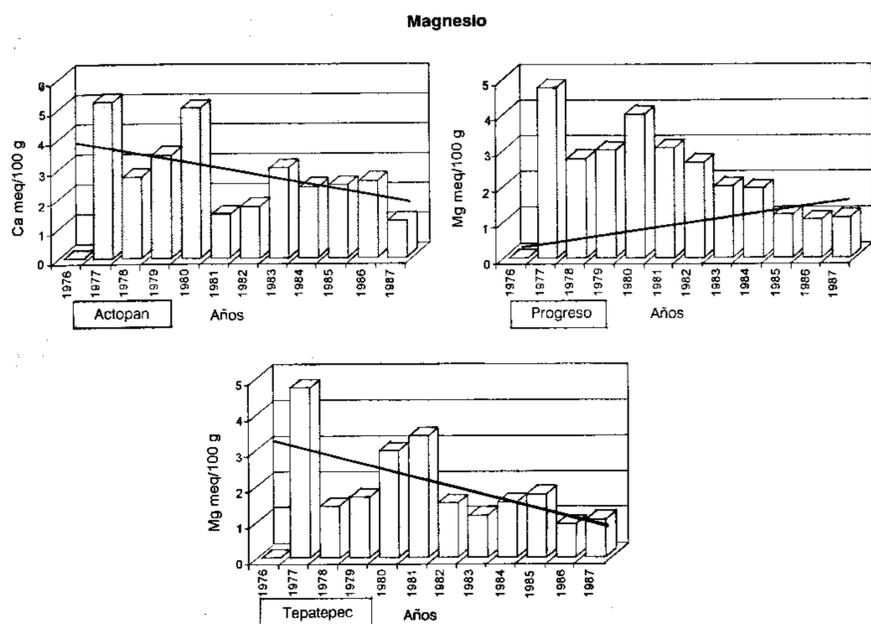


Figura 12.- Comportamiento del Mg a través de los años.

ascenso en las series Progreso y Tepatepec (Cr: $r = 0.70$, $P = 1.90$ y $r = 0.68$, $P = 0.11$; Pb: $r = 0.62$, $P = 0.13$ y $r = 0.61$, $P = 0.12$, respectivamente) que, en general, indica un coeficiente de correlación estadísticamente significativo. Este aumento coincide con el ascenso de la materia orgánica y el decremento del pH de 1976 a la fecha; en contraste, en la serie Actopan, el Cr muestra un descenso: $r = -0.54$ y $P = 0.13$ (Figuras 13 y 14). El incremento del Pb, relativamente grande en las series Progreso y Tepatepec y leve en la Actopan—estadísticamente no significativo—puede deberse a la formación de compuestos de coordinación con la materia orgánica.

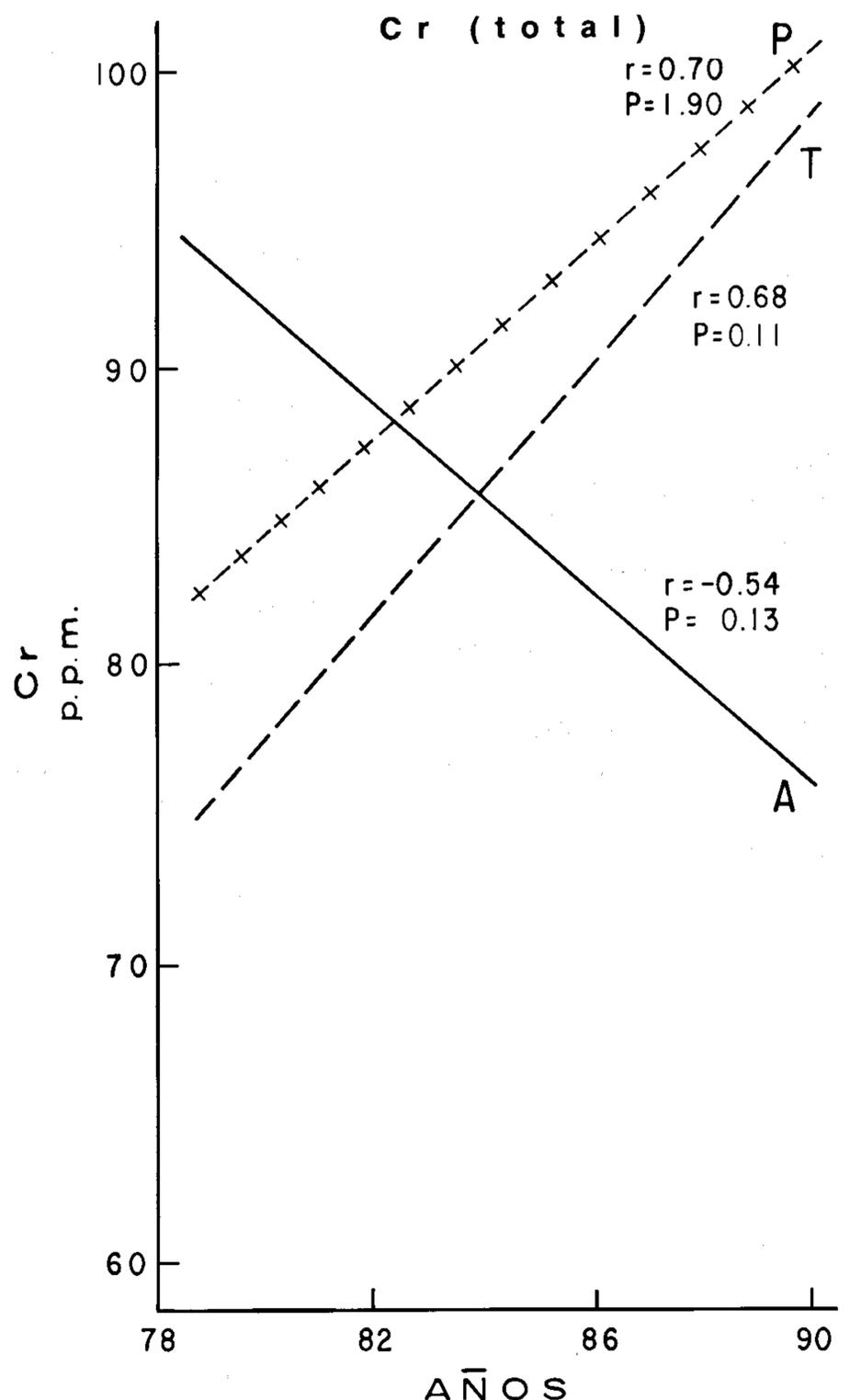


Figura 13.- Comportamiento del Cr total en las tres series.

El análisis estadístico del Cd y Co totales para las tres series no resultó significativo, por lo que no se discute su comportamiento.

De acuerdo con Mascareño-Castro (1974), Gutiérrez-Ruiz (1982), Hernández-Hernández (1988) y Hernández-Silva

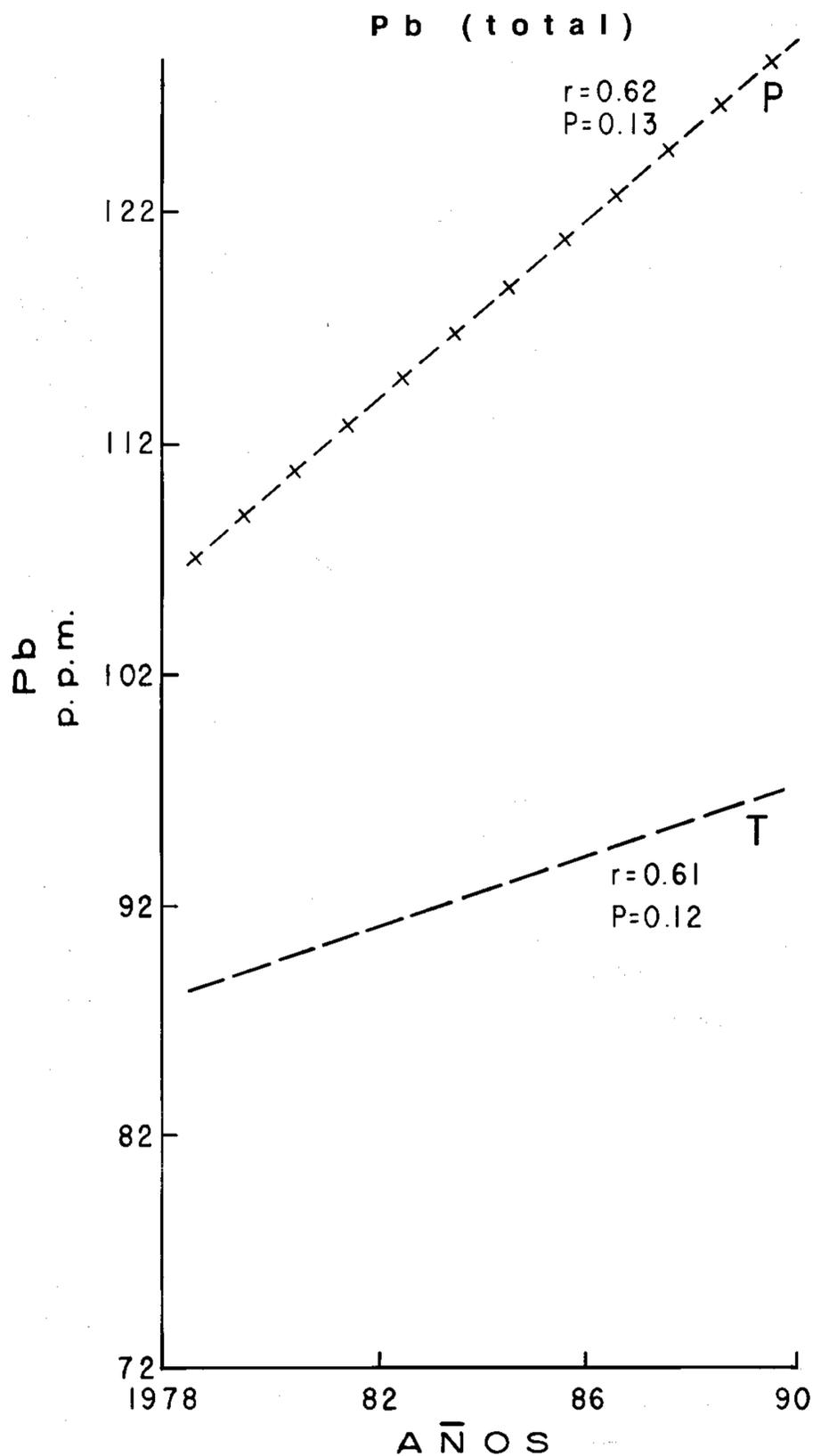


Figura 14.- Comportamiento del Pb total en las tres series.

y colaboradores (1990), el Pb, Co y Cd señalan claramente un ascenso, comprobado por el coeficiente de correlación alto y significativo (Figuras 15, 16 y 17). Este incremento puede deberse a que el aporte constante de iones metálicos, procedentes de las aguas de riego, permite una fijación parcial por parte de la materia orgánica y, al mineralizarse ésta, quedan liberados los iones metálicos, siendo detectados al ser extraídos en los análisis de laboratorio.

CONCLUSIONES

La salinidad alta y los contenidos bajos y medios de sodio de las aguas de riego del DR03, impiden que éstas sean portadoras de cantidades apreciables de metales pesados en forma de iones libres.

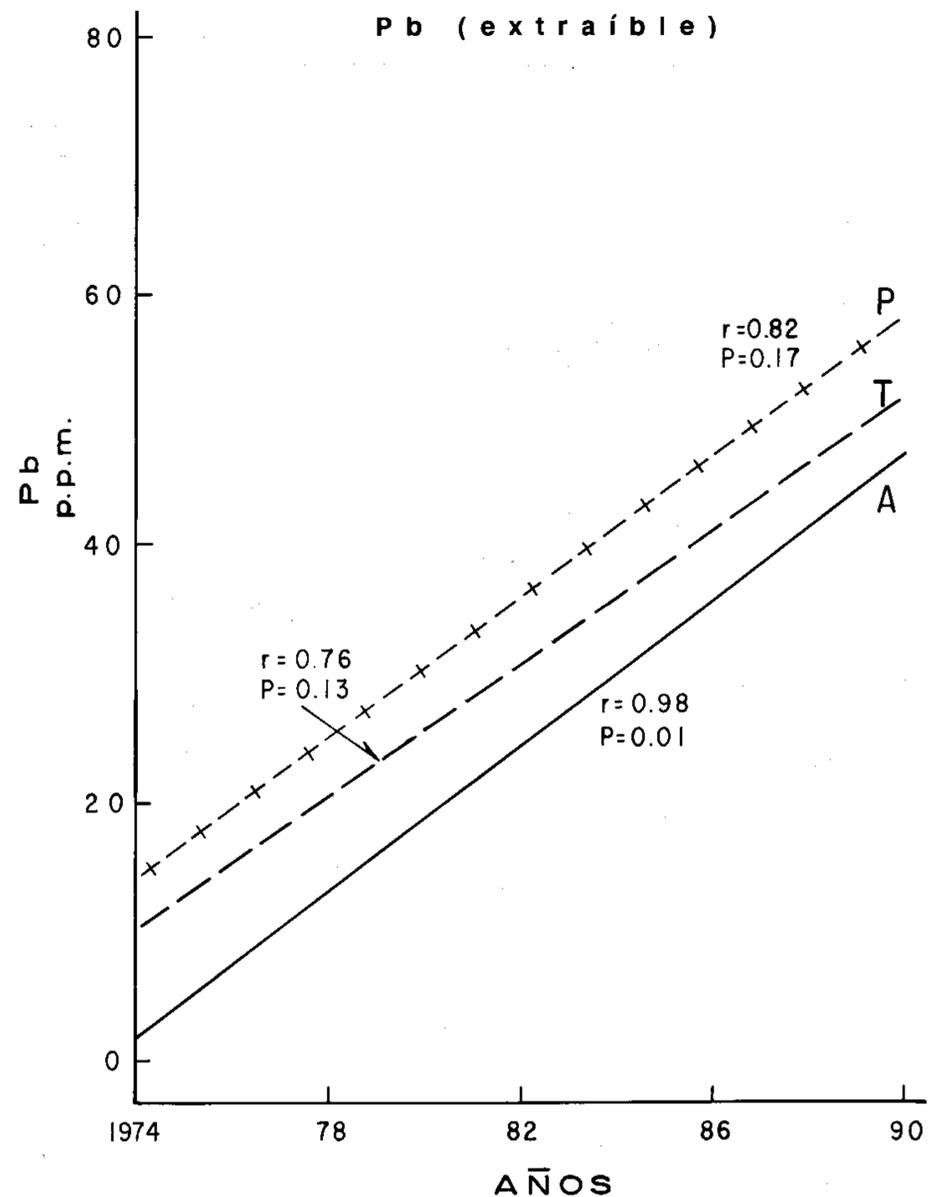


Figura 15.- Comportamiento del Pb susceptible de ser extraído en las tres series.

La mineralogía de la fracción gruesa del suelo indica que no hay evidencia de que el material parental sea la causa de anomalías en la acumulación de metales pesados.

El comportamiento de los metales pesados totales respecto al perfil presenta variantes: el Pb, Cd y Cr disminuyen con la profundidad en las tres series; el Cr y Co tienen mayores concentraciones en el horizonte B de la serie Tepatepec; en susceptibles de ser extraídos, el Pb, Cr y Cd disminuyen con la profundidad; excepto para el Co, el Pb, Cr y Cd susceptibles de ser extraídos, también se acumulan en el horizonte A. Esta mayor retención se debe, básicamente, a que es en el horizonte A donde se presenta la mayor acumulación de materia orgánica.

El análisis estadístico mostró que el pH está disminuyendo con el tiempo, siendo la serie Progreso la menos afectada, debido a su material parental calcáreo; en términos generales, el Ca y Mg intercambiables concuerdan con el comportamiento del pH; el contenido de materia orgánica para las tres series va en constante aumento. Estas características químicas del suelo están íntimamente relacionadas con la retención y tendencias de los contenidos de metales pesados en las series estudiadas.

La naturaleza morfogénica de la serie Progreso, en especial el pH alcalino y las altas reservas de Ca y Mg intercambiables del material calcáreo, facilita la formación de hi-

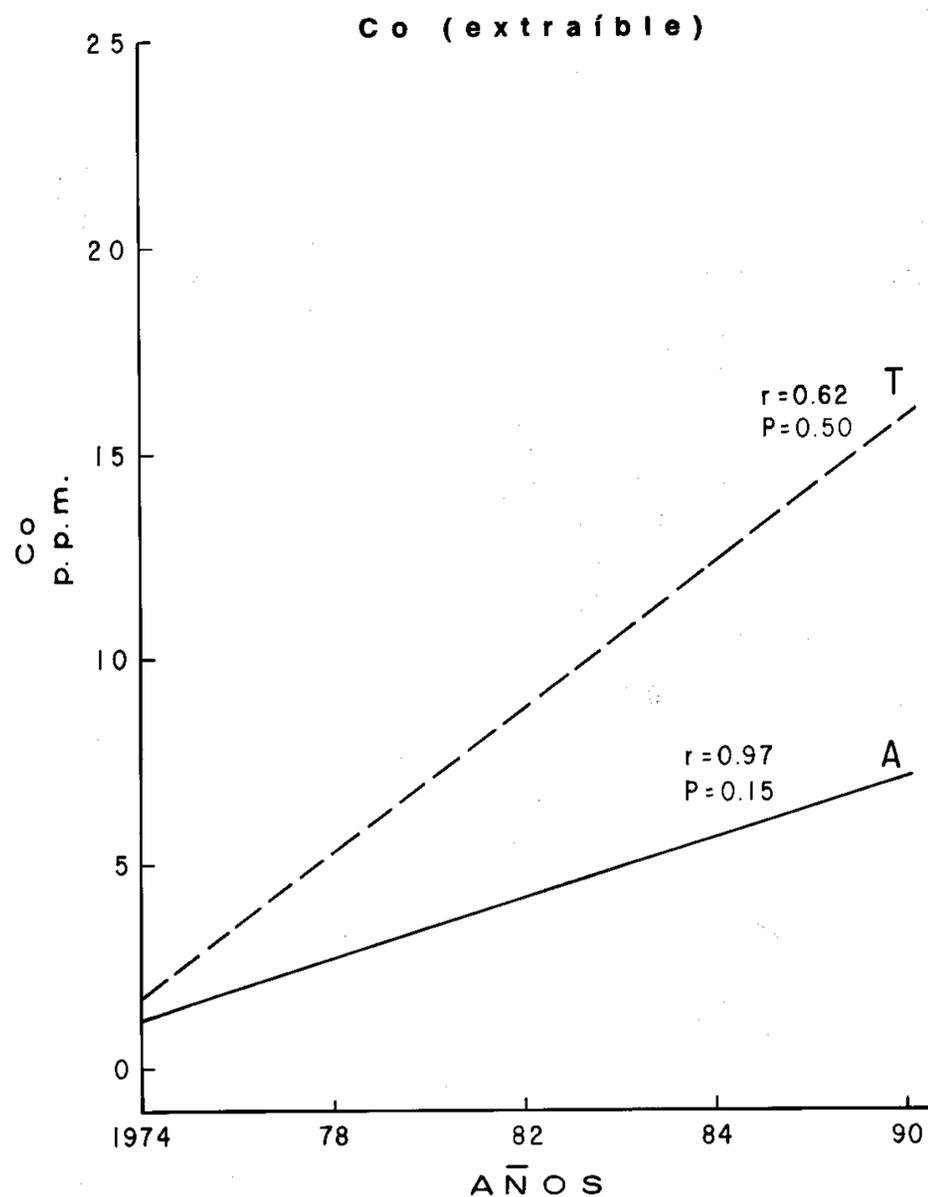


Figura 16.- Comportamiento del Co susceptible de ser extraído en las tres series.

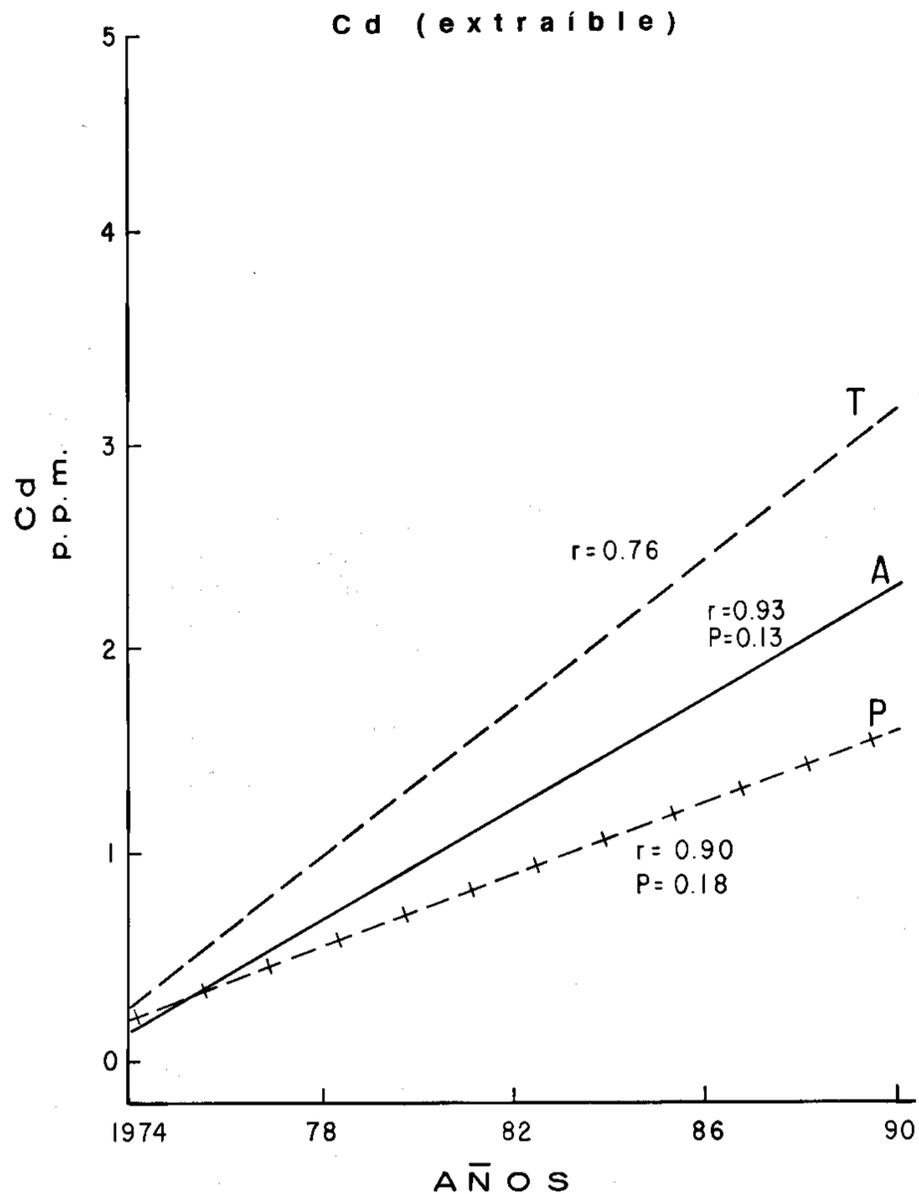


Figura 17.- Comportamiento del Cd susceptible de ser extraído en las tres series.

dróxidos insolubles, lo que a su vez se traduce en baja disponibilidad relativa del Pb y Cr para las plantas. La presencia de un horizonte de iluviación y la tendencia a un mayor descenso en el pH con el transcurso del tiempo, en la serie Tepatepec, muestran que el Pb y el Cr han sufrido un incremento en su contenido. En cambio, para la serie Actopan, el Cr muestra un descenso, debido a una más fácil lixiviación a través del perfil.

La naturaleza alcalina de las tres series estudiadas —especialmente Progreso— y el poder amortiguador de la materia orgánica de los suelos del distrito de riego, son las causas fundamentales por las que hay niveles menores de metales pesados totales de lo que pudiera esperarse. No obstante, hay que vigilar de cerca la tendencia del comportamiento del pH, especialmente en las series Tepatepec y Actopan.

Es preocupante que el Pb, Cd, Cr y Co susceptibles de ser extraídos muestren claramente un ascenso constante en las tres series, que pudiera deberse a que los metales pesados transportados por el agua sean parcialmente fijados por la materia orgánica y que al mineralizarse ésta sean liberados, quedando entonces disponibles para las plantas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Biól. Daniel Hernández-Santiago, al M. en C. Rubén Guajardo-Viera

y a Eduardo Celada-Tornel, por su participación en algunos de los análisis. La revisión crítica del manuscrito fue efectuada por el Prof. Raimundo Jiménez-Ballesta, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid, y por el Dr. Armando Báez-Pedrajo, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyos comentarios lo enriquecieron notablemente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blásquez-L., Luis, 1938, Contenido de la memoria de la Comisión Geológica del valle del Mezquital, Hgo.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Memoria de la Comisión del Valle del Mezquital, Hidalgo, México, D.F., Memoria, pte. 2, p. 13-63.
- Chang, A.C.; Page, A.L.; Warneke, J.E.; y Grgurevic, E., 1984, Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application: *Journal of Environmental Quality*, v. 13, p. 33-38.
- Chapman, H.D., y Pratt, P.F., 1973, Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas: México, D.F., Editorial Trillas, 195 p.
- DETENAL, 1982, Síntesis geográfica del Estado de Hidalgo: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, 134 p.
- Emmerich, W.E.; Lund, L.J.; Page, A.L.; y Chang, A.C., 1982, Movement of heavy metals in sewage sludge-treated soils: *Journal of Environmental Quality*, v. 11, p. 174-178.
- García, Enriqueta, 1980, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: México, D.F., Offset Larios e hijos, Impresores, S.A., 217 p.
- Gutiérrez-Ruiz, M.E., 1982, Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas de los DR03 y 88: México, D.F.,

- Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, tesis de maestría, 251 p. (inédita).
- Hernández-Hernández, Leobardo, 1988, Evolución de las características de los suelos del Distrito de Riego 03, Tula, por el uso de agua residual en el riego agrícola: México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Escuela de Ciencias Biológicas, tesis profesional, 112 p. (inédita).
- Hernández-Silva, Gilberto; Maples-Vermeersch, Mireya; Hernández-Santiago, Daniel; Solorio-Munguía, Gregorio; y Villarreal-Lizárraga, Gloria, 1990, Tendencias en la acumulación de metales pesados en los suelos del Distrito de Desarrollo Rural 063, Edo. de Hidalgo, por efecto del riego con aguas negras: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre Degradación de Suelos, 1, México, D.F., Memoria, p. 46-47.
- Jackson, M.L., 1970, Análisis químico de suelos: Barcelona, Omega, 662 p.
- Linn, C.H., y Jackson, M.L., 1982, Dissolution for total element analysis, in Page, A.L., ed. en jefe, Methods of soil analysis: Agronomy, v. 9, pte. 2, p. 1-11.
- Mascareño-Castro, Felisardo, 1974, Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y la producción agrícola en el DR03, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México: México, Universidad Autónoma de Chapingo, Colegio de Posgraduados, tesis de maestría, 114 p. (inédita).
- Méndez-García, Teodoro, 1982, Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del valle del Mezquital, Hgo. por ABS, boro y metales pesados por el uso de aguas negras de la Ciudad de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis profesional, 134 p. (inédita).
- Rappaport, B.D.; Martens, D.C.; Reneau, R.B., Jr.; y Simpson, T.W., 1987, Metal accumulation in corn and barley grown on a sludge amended Typic Ochraqualf: Journal of Environmental Quality, v. 16, p. 29-33.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973, Estudio agrológico del Distrito de Riego 03, Tula, Hgo.: México, D.F., Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección General de Agrología, 84 p.
- Viro, P.J., 1955, Use of ethylenediaminetetraacetic acid in soil analysis; I, Experimental: Soil Science, v. 79, p. 459-465.
- Walkley, A., y Black, T.A., 1934, An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method: Soil Science, v. 37, p. 29-38.
- Williams, D.E.; Vlamis, J.; Pukite, A.H.; y Corey, J.E., 1985, Metal movement in sludge-treated soils after six years of sludge addition; 2, Nickel, cobalt, iron, manganese, chromium and mercury: Soil Science, v. 140, p. 120-125.
- Manuscrito presentado: 21 de mayo de 1992.
Manuscrito corregido devuelto por el autor: 2 de febrero de 1993.
Manuscrito aceptado: 23 de marzo de 1993.