



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

CAMPUS II

Cambio en las propiedades del suelo en un
periodo de 20 años en una parcela regada con
agua residual del Valle del Mezquital.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGO

PRESENTA:
MARIO CAYETANO SALAZAR



Directora de tesis: Dra. Christina Siebe Grabach

Asesor interno: Biól. Elvia García Santos

MÉXICO D.F. 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a dios

Por haberme permitido cumplir una meta más en mi vida y permitir disfrutarlo con mis seres queridos.

A mis padres Ciro y Nicolasa

Por el gran amor que me han proporcionado, por la comprensión y los buenos consejos, ya que sin ellos no hubiera culminado con esta etapa de mi vida. Soy afortunado al contar con unos padres tan maravillosos, que siempre me han apoyado en todos los aspectos y ruego a Dios que me conceda estar junto a ellos mucho más.

A mis hermanas Lorena y Graciela

Por su comprensión y algunas veces sacrificio, ya que me apoyaron en todo momento, pero bueno me dejaron de soportar más de 5 años.

A mi directora Dra. Christina Siebe

Por haberme permitido ser parte de su grupo de trabajo, por haberme tenido paciencia durante más de un año, y haberme proporcionado los conocimientos necesarios para elaborar esta tesis. Sus consejos paciencia y opiniones me fueron de gran ayuda.

A la maestra Elvia García

Gracias por haber compartido sus conocimientos en clase y también por haberme brindado la gran oportunidad de conocer a la Dra. Siebe.

A todos los maestros

Por haber participado en mi desarrollo durante mi carrera, ya que sin su ayuda y conocimientos no hubiera logrado cumplir esta meta.

A mis amigos

Por haberme acompañado durante la estancia en la escuela. A la banda del Caracol que fue muy famosa y que nunca olvidare, a todos con los que haya compartido los salones de clase. A Cinthia por haberme brindado su amistad, comprensión durante el tiempo que estuve en la escuela y en la realización de mi tesis, juntos formamos un buen equipo de trabajo que siempre nos ayudamos y ayudaremos el uno al otro, sin su ayuda en los experimentos nunca hubiera terminado este trabajo.

A los compañeros con los que compartí el laboratorio de octavo y noveno semestre, nunca olvidare esas salidas al campo y mucho menos el viaje a Mérida, al Dr. Gerardo Cruz, por habernos proporcionado sus conocimientos y también por soportarnos durante ese año.

AI LEA

A Lucy, Kумы, Blanca Prado y a todos los que integran el grupo de trabajo por haberme ayudado en la fase experimental de esta tesis, sin su ayuda no se qué sería de mi.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por proporcionarme todo lo necesario en mi formación académica.

DEDICATORIA

MI TESIS LA DEDICO CON TODO MI AMOR A:

A MIS PADRES QUE ME DIERON LA VIDA Y AMOR INCONDICIONAL.

A MIS 2 HERMANAS POR HABERME BRINDADO TODO SU APOYO.

A CINTHIA QUE SIEMPRE ME BRINDO SU APOYO Y AYUDA.

A TODOS MIS MAESTROS QUE CONFIARON Y CREYERON EN MÍ.

A MIS AMIGOS QUE SIEMPRE ESTUVIERON CONMIGO EN TODOS LOS MOMENTOS.

Índice

	Página
1. Introducción-----	1
2. Marco teórico-----	3
2.1 Suelo-----	3
2.2 Definición de metales pesados-----	3
2.3 Origen geoquímico de los metales pesados-----	4
2.4 Concentraciones de metales pesados en suelos agrícolas-----	5
2.5 Actividades humanas que elevan la concentración de los metales en los suelos-----	5
2.6 Límites máximos permisibles de metales en suelos-----	6
2.7 Análisis estadístico para comparar métodos y detectar cambios en el tiempo-----	7
2.7.1 Comparación de dos métodos diferentes-----	7
2.7.2 Comparación de dos medias-----	8
3. Justificación-----	9
4. Objetivos-----	10
5. Hipótesis-----	10
6. Materiales y métodos-----	11
6.1 Descripción del área de estudio-----	11
6.1.1 Ubicación-----	11
6.1.2 Suelos y su material parental-----	12
6.1.3 Vegetación y uso de suelo-----	13
6.2 Obtención de las muestras-----	13
6.3 Preparación de las muestras-----	14
6.4 Análisis de laboratorio-----	14
6.4.1 pH-----	14
6.4.2 Conductividad eléctrica-----	14
6.4.3 Textura-----	15
6.4.4 Carbono y nitrógeno totales-----	15
6.4.5 Metales extractables con agua regia-----	15
6.5 Análisis estadístico-----	15
7. Resultados-----	17
7.1 Variabilidad asociada a las diferencias en los métodos utilizados--	17
7.1.1 pH-----	17
7.1.2 Conductividad eléctrica-----	18
7.1.3 Carbono-----	19
7.1.4 Plomo-----	20
7.1.5 Cadmio-----	21
7.1.6 Cobre-----	22
7.1.7 Zinc-----	23

7.2 Variación temporal de las propiedades del suelo-----	24
7.2.1 Estadísticos descriptivos-----	24
7.2.2 Distribuciones de frecuencia-----	25
7.2.3 Comparación entre las distribuciones de los datos obtenidos en 1990 y 2009-----	28
7.3 Variación espacial de las propiedades del suelo dentro de la parcela-----	31
8. Discusión de resultados-----	42
8.1 Diferencias entre los métodos-----	42
8.2 Variación con respecto al tiempo-----	44
9. Conclusiones-----	49
10. Recomendaciones para futuros monitoreos-----	49
11. Bibliografía-----	50
12. Anexos-----	53

Resumen

En el Valle del Mezquital se riega con aguas residuales desde hace más de un siglo, por lo cual se han acumulado metales pesados en la capa arable de los suelos. En el presente trabajo se compararon las concentraciones de los metales pesados (Pb, Cd, Cu y Zn) y de otras variables que influyen en la movilidad de éstos (pH, CE., C) en muestras colectadas en 1991 y 2009 en la misma parcela regada con agua residual del Valle del Mezquital. Esto se hizo con el objeto de encontrar la tasa de acumulación de los metales en el tiempo y de establecer las bases para monitoreos a mediano y largo plazo.

Se tomaron 36 muestras de suelo de 0-30 cm de profundidad distribuidas en toda la parcela siguiendo una retícula con distancias entre puntos de muestreo de 15 m. Este procedimiento se realizó en ambos muestreos. Se analizaron contenidos de metales extractables con agua regia, pH en CaCl_2 0.01M, conductividad eléctrica en un extracto suelo: agua destilada 1:5, y carbono orgánico (1990) y total (2009).

No se encontraron cambios en las concentraciones de los metales pesados durante los últimos 19 años. En ambos muestreos se encontró que la concentración de éstos es mayor a la entrada del agua de la parcela. Sin embargo, el gradiente de concentración entre la parte alta y la baja de la parcela es menor en el muestreo de 2009. Lo anterior se atribuye a la mezcla de suelo en la parcela provocada por la nivelación del terreno efectuada en los últimos años.

El pH se mantuvo constante en el tiempo. No fue posible concluir respecto a cambios en el tiempo de la conductividad eléctrica ni del carbono orgánico, debido a discrepancias en el momento del muestreo después del último riego y entre los métodos de laboratorio utilizados en 1990 y en 2009.

Para monitoreos a largo plazo se recomienda establecer un punto fijo en una esquina de la parcela para poder volver a establecer la retícula equidistante en exactamente los mismos puntos. También es recomendable aumentar el número de muestras para manejar mejor la gran variabilidad espacial en las concentraciones de metales dentro de la parcela. Es importante archivar las muestras de los muestreos anteriores para poder eliminar diferencias por concepto de cambio de métodos de análisis en el futuro.

1.- Introducción.

Para evitar las inundaciones frecuentes en la Ciudad de México se crearon tres conductos a finales del siglo XVIII, que permiten desalojar las aguas pluviales y residuales hacia la región conocida como el Valle del Mezquital (Emisor Central, Gran Canal y el Interceptor Poniente). Como en el Valle del Mezquital el agua es muy escasa, el agua residual empezó a ser utilizada para el riego agrícola. El aporte de agua rica en materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo ha aumentado la productividad agrícola en la zona, lo cual se logra sin o con baja aplicación de fertilizantes químicos (British Geological Survey, 1998).

El valle recibe $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas residuales predominantemente domésticas provenientes de la Ciudad de México, además de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de escurrimientos superficiales durante la época de lluvia. Durante el siglo pasado se construyeron varias presas de almacenamiento de agua como la Endhó, Requena y Taxhimay y varios cientos de kilómetros de canales de distribución en toda la zona (Jiménez, 2004).

El agua residual es una mezcla de aguas residuales municipales y de efluentes industriales. Esto es motivo de preocupación, porque las aguas residuales contienen trazas de sustancias potencialmente tóxicas, tanto orgánicas como inorgánicas, entre las que se encuentran grasas, aceites, detergentes, metales pesados, boro, sales, etc., que pueden afectar negativamente la productividad de los suelos y la salud humana y animal a largo plazo (Bahri, 1999). El impacto sobre el suelo se pone de manifiesto en parcelas que han sido regadas durante largos períodos de tiempo, que se caracterizan por presentar concentraciones altas de sal (Na, en particular), que provoca una pérdida de estructura de los suelos y reduce su productividad (Reyes, 2004). Además, se ha documentado un incremento en los contenidos de metales pesados en los suelos y las plantas (Siebe, 1994). Al momento de los muestreos realizados por Siebe en 1991, los contenidos no rebasaban aún umbrales de tolerancia establecidos en normativas vigentes en diferentes países del mundo; sin embargo el estudio evidenció claras tendencias de aumento, indicando que después de 120 a 150 años bajo riego podrían rebasarse los límites máximos permisibles de Cd en maíz. Lo anterior ha suscitado preocupación de que se introduzcan estos metales en los productos alimenticios si se continúa con esta práctica.

Palacio *et al* (1994) elaboraron mapas de distribución de diferentes propiedades del suelo a partir de concentraciones promedio reportadas en una base de datos de monitoreos anuales realizados en diferentes parcelas entre 1976 y 1985 por la gerencia del Distrito de Riego 03. Los suelos presentaban valores de pH de neutros a alcalinos, sus contenidos de materia orgánica fueron de medios a altos, al igual que la capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, al analizar dicha base de datos no se detectaron patrones claros de comportamiento de cambio de las propiedades a lo largo de los años de monitoreo. Los autores atribuyen esto a que los muestreos se realizaron en sitios puntuales dentro de las parcelas y que cada muestra colectada consistió únicamente de 4 submuestras tomadas a cortas distancias una de la otra dentro de la parcela. Lo anterior es insuficiente para caracterizar con certidumbre el valor promedio de las propiedades de suelo analizadas dentro de la parcela.

Siebe (1994) colectó 36 muestras distribuidas uniformemente en una parcela de 0.946 has a distancias entre muestras de 15 m aproximadamente en 1991 y determinó varias propiedades del suelo como valor de pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y metales pesados totales (Cd, Cu, Pb, Zn). Ese trabajo mostró que los contenidos de materia orgánica y de metales pesados son mucho mayores en la parte alta de la parcela, que en la parte baja. Lo anterior se atribuye a la distribución heterogénea del agua durante el riego, el cual se realiza por gravedad. Esta distribución espacial de las propiedades del suelo dentro de la parcela debe considerarse al momento de realizar monitoreos que permitan detectar cambios en el tiempo.

La presente tesis tiene como objetivo determinar cuál es el esfuerzo mínimo de muestreo que debe realizarse para poder detectar cambios en las propiedades del suelo con el tiempo. Para ello se volvieron a tomar muestras en la misma parcela muestreada por Siebe en 1994, siguiendo el mismo esquema de muestreo, es decir, colectando muestras individuales cada 15 m en una retícula imaginaria a lo largo y ancho de la parcela. Lo anterior es relevante para establecer un protocolo de monitoreo que permita detectar a tiempo si los contenidos de metales pesados rebasan umbrales considerados críticos para la productividad agrícola o para la introducción de estos elementos a la cadena trófica.

2.- Marco teórico

2.1. Suelo

El suelo puede ser definido como un cuerpo natural en donde interaccionan los cuatro componentes de la geosfera: biosfera, litosfera, atmósfera e hidrosfera (materia orgánica, material mineral, aire y agua). Contiene aproximadamente 50 % de espacio poroso ocupado por agua y aire. El espacio sólido está constituido por 5% de materia orgánica y 45% de material mineral, Figura 1 (Buckman y Brady, 1991).

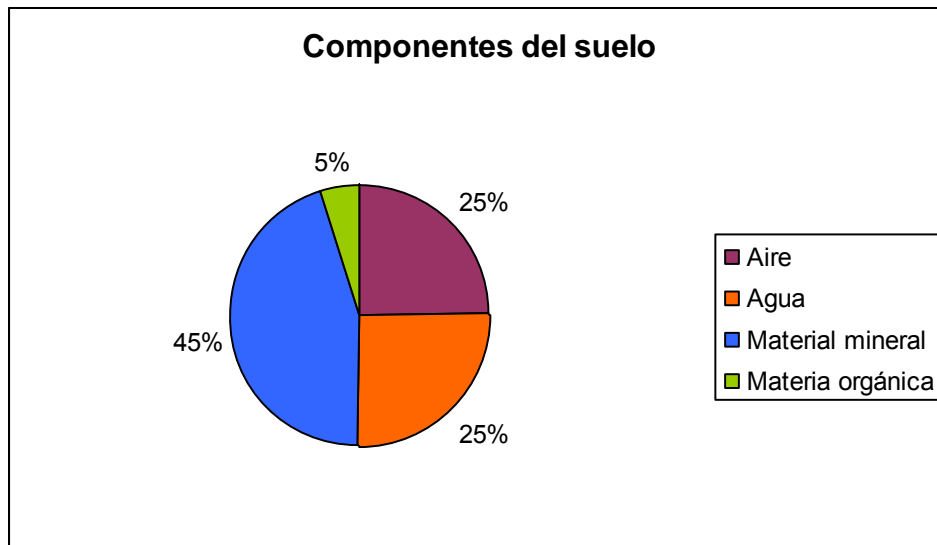


Figura 1: Composición en volumen de un suelo superficial.

Los cuatro componentes están íntimamente interrelacionados, lo cual favorece la ocurrencia de una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos de interacción entre los diferentes compartimentos geosféricos. Estos procesos determinan la capacidad del suelo de funcionar como medio en el que crecen y se desarrollan las plantas terrestres, de reciclaje de nutrientes y de regulación del ciclo hidrológico, mismas que dan soporte y apoyan la salud y habitación humana y animal (Buckman y Brady, 1991).

2.2. Definición de metales pesados

El término metales pesados es usado comúnmente para nombrar al grupo de metales y metaloides asociados con contaminación y toxicidad, pero también incluye a elementos que son esenciales para el desarrollo de organismos a bajas

concentraciones. Metales pesados son todos aquellos elementos metálicos que tienen una densidad real mayor a 5 g cm^{-3} (Alloway, 1990).

2.3. Origen geoquímico de los metales pesados

Los elementos O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti y P constituyen más del 99% del total de elementos contenidos en la corteza terrestre. El resto de los elementos en la tabla periódica son llamados elementos traza y sus concentraciones individuales no exceden a 1000 mg kg^{-1} (Alloway, 1990).

Los elementos traza son constituyentes de los minerales primarios de las rocas ígneas (Tabla 1). Éstos son incorporados en la estructura cristalina por sustitución isomórfica en el enrejado por iones de uno de los elementos en mayor concentración en el momento de la cristalización.

Los contenidos de elementos traza en rocas sedimentarias dependen de la mineralogía y de las propiedades de adsorción del material sedimentado, la matriz y la concentración de metales en el agua o en los sedimentos depositados. En general las arcillas adsorben iones metálicos en su superficie entre los que están: Ag, As, Cd, Cu, Pb, Mo, U, V y Zn (Rose *et al.*, 1979).

Tabla 1: Constituyentes traza de minerales (adaptada de Mitchell, 1964).

Mineral	Constituyentes traza	Susceptibilidad al intemperismo
Olivino	Ni, Co, Mn, Li, Zn, Cu, Mo	↑
Hornblenda	Ni, Co, Mn, Sc, Li, V, Zn, Cu, Ga	
Augita	Ni, Co, Mn, Sc, Li, V, Zn, Pb, Cu, Ga	
Biotita	Rb, Ba, Ni, Co, Sc, Li, Mn, V, Zn, Cu, Ga	
Apatita	Tierras raras, Pb, Sr	
Anortita	Sr, Cu, Ga, Mn	
Andesita	Sr, Cu, Ga, Mn	
Oligoclasa	Cu, Ga	
Albita	Cu, Ga	
Garnet	Mn, Cr, Ga	
Ortoclasa	Rb, Ba, Sr, Cu, Ga	
Moscovita	F, Rb, Ba, Sr, Cu, Ga, V	
Titanita	Tierras raras, V, Sn	
Ilmenita	Co, Ni, Cr, V	
Magnetita	Zn, Co, Ni, Cr, V	
Tourmalina	Li, F, Ga	
Circón	Hf, U	

Cuarzo -
(Alloway, 1990).

2.4. Concentraciones de metales pesados en suelos agrícolas.

El contenido total de un metal en el suelo (Tabla 2) es el resultado de la diferencia entre las entradas (material parental, deposición atmosférica, fertilizantes, agroquímicos, desperdicios orgánicos y otros contaminantes inorgánicos) menos las salidas (volatilización, cosecha removida, lixiviación) (Alloway, 1990).

Tabla 2: Rangos de concentración de metales en suelos agrícolas (mg kg^{-1}) de diferentes partes del mundo.

Elemento	Rango(mg kg^{-1})	Valor común
Ag	0.01-8	0.05
As	0.1-50	1-20
Au	0.001-0.02	-
Cd	0.01-2.4	0.2-1
Co	1-40	10
Cr	5-1500	70-100
Cu	2-250	20-30
Hg	0.01-0.3	0.03-0.06
Mn	20-10000	1000
Mo	0.2-5	1-2
Ni	2-1000	50
Pb	2-300	10-30 Rural 30-100 Urbano
Sb	0.05-260	2
Se	0.01-2	0.5
Sn	1-200	4
Tl	0.03-10	-
U	0.7-9	<2
V	3-500	90
W	0.5-83	1.5
Zn	100-300	50

(Bowen, 1979 y Webber *et al.*, 1984).

2.5. Actividades humanas que elevan la concentración de los metales pesados en los suelos.

Una proporción de los metales es depositada por actividades antropogénicas a través de las industrias que usan metales en sus procesos. Los niveles más altos de contaminación por metales pesados se presentan en las regiones industrializadas.

En suelos que se encuentran bajo uso agrícola, las principales entradas de metales pesados ocurren por: fertilizantes químicos, plaguicidas (entre los que se encuentran fungicidas (Cu, Hg, Mn, Zn)), biosólidos y compostas a base de residuos orgánicos domésticos y riego con aguas residuales.

En el Valle del Mezquital el agua residual usada para el riego agrícola contiene bajas concentraciones de metales pesados y no rebasa los límites establecidos en la normatividad mexicana para aguas de riego. Sin embargo, el riego adiciona anualmente pequeñas cantidades a los suelos que van de 0.15 a 0.28 g m⁻² de Pb, <0.009 a 0.011 g m⁻² de Cd, de 0.19 a 0.40 g m⁻² de Cu y 0.49 a 1.13 g m⁻² de Zn (Siebe, 1994).

En parcelas regadas con agua residual por más de 80 años se observa una acumulación en la capa arable que supera los niveles regionales de fondo de 3 a 6 veces. En el estudio que realizó Siebe en 1990 en la misma parcela de este trabajo de investigación encontró los siguientes valores (Tabla 3):

Tabla 3: Valores de pH, C.E., textura y metales pesados determinados en la parcela bajo estudio en 1991 por Siebe (1994).

	Pb	Cd	Cu	Zn	pH	C. E.	C _{org}
	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	Mg kg ⁻¹		μS cm ⁻¹	%
Promedio	68.05	1.02	66.28	208.22	7.33	317.13	2.45
S	7.01	0.43	11.76	37.58	0.07	35.59	0.18
S ²	49.08	0.18	138.28	1412.06	0.01	1266.70	0.03
Min	55.02	0.43	46.60	151.60	7.18	256.82	2.16
Max	81.65	2.38	94.01	316.96	7.51	398.04	3.08
R	26.62	1.95	47.42	165.36	0.33	141.22	0.92

Los metales pesados se encuentran disponibles para las plantas en cantidades moderadas. El Cd es el que permanece más disponible, mientras que el Cu lo es menos, ya que es inmovilizado por la materia orgánica (Siebe, 1994).

2.6. Límites máximos permisibles de metales en suelos.

Los metales pesados tienden a acumularse en los suelos. Al acumularse, una fracción de ellos puede encontrarse disponible para las plantas. Esto representa

un riesgo para la salud, ya que muchas de estas plantas son consumidas tanto por animales como por humanos.

Por ello en muchos países europeos y en los Estados Unidos de América se han establecido límites máximos permisibles para los metales pesados en los suelos (Tabla 4). En México no hay una norma sobre la concentración de estos contaminantes del suelo.

Tabla 4: Límites máximos permisibles para metales pesados en suelos agrícolas con valores pH entre 6 y 7 (Commission of the European Communities, 1986).

Metal Pesado	Máxima concentración permitida mg kg ⁻¹
Cd	1-3
Cr	100-150
Cu	140-150
Hg	1-1.5
Pb	50-300
Ni	30-75
Zn	150-300

2.7 Análisis estadístico para comparar métodos y detectar cambios en el tiempo

2.7.1 Comparación de dos métodos diferentes.

Cuando se desarrolla un nuevo método analítico, éste debe ser validado y para esto se necesitan comparar los resultados obtenidos con aquellos generados por medio de otro método ya establecido y reconocido. Para la comparación se pueden usar funciones de regresión lineal. Debe hacerse una gráfica de tipo X, Y, en donde uno de los ejes del gráfico se usa para los datos obtenidos por un método y en el otro eje los obtenidos por el segundo método (Figura 2).

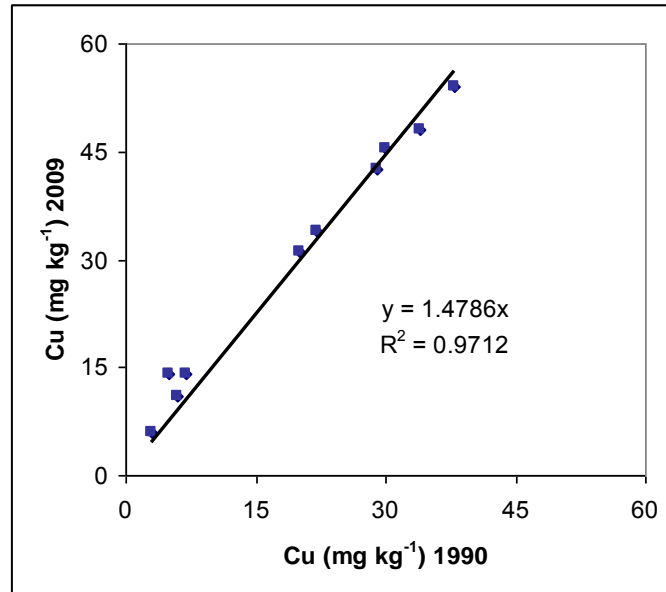


Figura 2: Uso de funciones de regresión para la comparación de dos métodos diferentes.

Si los dos métodos conducen a un mismo valor, la gráfica tendrá una pendiente de 1, una ordenada al origen de 0 y un coeficiente de correlación de 1. Sin embargo, en la realidad esto nunca ocurre, porque siempre hay errores en las mediciones por más cuidadosos que seamos (Miller y Miller, 2002). Es por ello que se considera que los métodos son comparables, mientras mejor se ajusten los datos obtenidos por medio de ambos métodos a una regresión lineal con pendiente cercana a 1 y ordenada al origen cercana a 0.

2.7.2 Comparación de dos medias

Para comparar dos medias de poblaciones y saber si éstas son significativamente diferentes se puede usar la prueba de t de Student, la cual compara las medias para conocer si son diferentes o si son iguales. Con la prueba t se comparan las medias y las desviaciones estándar de dos grupos de datos y se determina a través de esos parámetros si las diferencias son estadísticamente significativas o si sólo son diferencias aleatorias (Miller y Miller, 2002).

Para considerar como válido el resultado de la prueba se deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1.- La distribución estadística de los datos se asemeja a la curva Normal.
- 2.- Existe una equivalencia entre las desviaciones estándar de la muestra.

3.- Las muestras pueden ser dependientes o independientes, dependiendo de la hipótesis o los tipos de muestra. Las muestras independientes involucran trabajar con dos grupos seleccionados aleatoriamente. En las muestras dependientes se busca que encajen ciertas variables o que los grupos sean virtualmente "gemelos".

3.- Justificación

Los metales pesados están considerados entre los más peligrosos contaminantes del medio ambiente, porque tienden a acumularse en los diferentes compartimentos, sobre todo en el suelo. Afectan a los ciclos biogeoquímicos y se acumulan en los organismos vivos. Con el tiempo pasan a los seres humanos a través de la cadena alimenticia, donde pueden causar perturbación de las reacciones biológicas y a largo plazo causan daños a órganos vitales o incluso la muerte (Tiller, 1989).

La contaminación por metales pesados afecta a la producción, la calidad de los cultivos, la atmósfera y los cuerpos de agua, pone en peligro la salud y la vida de los animales e incluso la de los seres humanos.

La ingestión, la inhalación y el contacto con la piel son las principales rutas de exposición humana a los metales. El suelo es el principal sumidero de metales.

El presente trabajo tiene la finalidad de comparar las concentraciones determinadas en un muestreo hace 19 años por la Dra. Christina Siebe en una parcela regada con agua residual con las concentraciones actuales y así encontrar la tasa de acumulación en el tiempo en este agroecosistema. Además se analizan otras propiedades del suelo que influyen en la movilidad de los metales, como los son el valor de pH, el contenido de materia orgánica, la conductividad eléctrica y la textura del suelo.

4.- Objetivos

General

- Determinar cómo cambian las concentraciones de los metales pesados en el suelo superficial de la parcela en el tiempo, así como otras propiedades del suelo que afectan su movilidad.

Específicos

- Determinar la variabilidad espacial de los metales pesados (Pb, Cd, Cu y Zn) en dos muestreos realizados en tiempos distintos.
- Determinar la contribución a la variabilidad debida a diferencias en los procedimientos de laboratorio.
- Conocer los valores de pH, CE y C en suelo y compararlos con los datos obtenidos en 1990.

5.- Hipótesis

Las concentraciones de metales se incrementan con el tiempo por su adición a través del riego con agua residual y su retención en el suelo. Los cambios ocurridos por efecto del riego con agua residual durante 19 años son mayores que la variabilidad espacial dentro de la parcela y que la variación atribuible a diferencias en las prácticas de laboratorio.

6. Materiales y métodos

6.1. Descripción del área de estudio.

6.1.1. Ubicación

La parcela de estudio se encuentra dentro de la región denominada Valle del Mezquital al sur del Estado de Hidalgo, aproximadamente a 100 km al norte de la Ciudad de México, en las coordenadas UTM X= 0480057 Y= 2228388 a una altitud de 2033 msnm. El predio se ubica al oeste de la localidad de Juandhó (Figura 3). Se localiza dentro del Distrito de Riego 03 (DR03), el cual tiene una superficie de 52,270 hectáreas, y una superficie total regable de 34,970 hectáreas. En él habitan 500, 000 personas, entre las cuales están 27, 500 agricultores (Jiménez, 2004).

En el DR03 el riego se realiza por gravedad y las cantidades aplicadas oscilan entre 80 y 140 cm año⁻¹ (British Geological Survey, 1998), aunque se ha informado de aplicaciones de hasta 200 cm año⁻¹ para alfalfa (Siebe y Cifuentes, 1995).

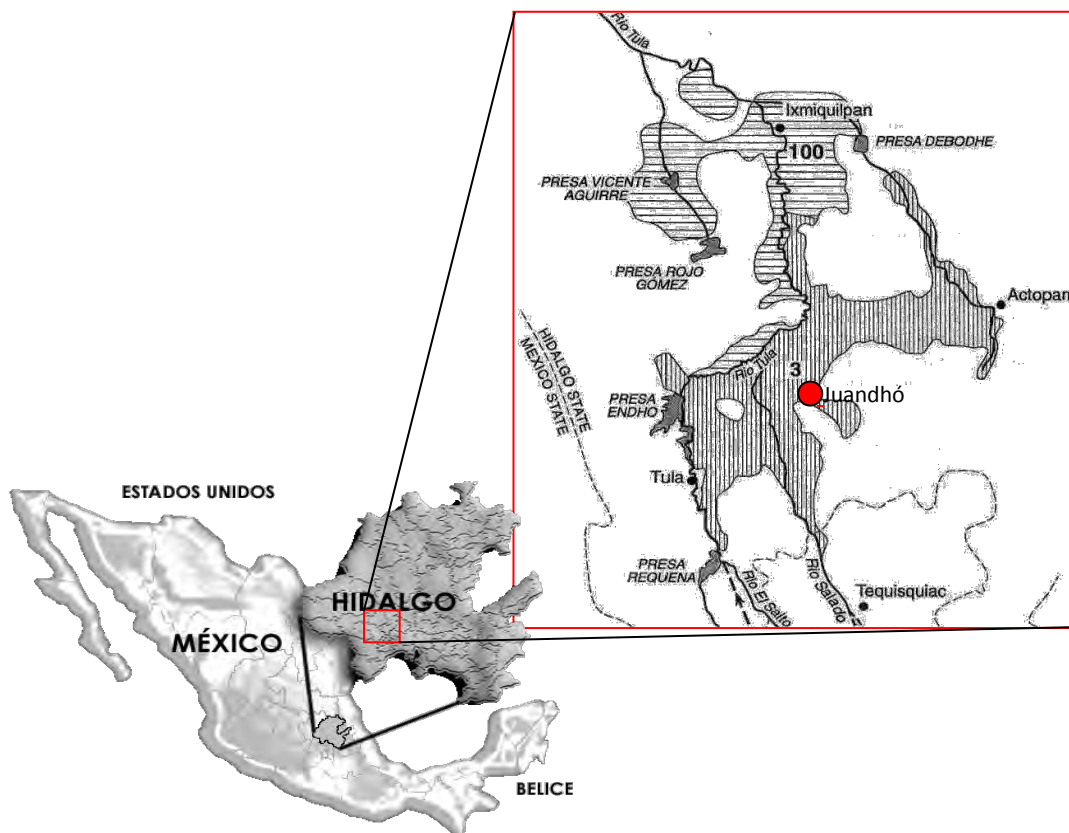


Figura 3: Localización de la parcela dentro del Valle del Mezquital.

6.1.2. Suelos y su material parental

Los suelos en la zona agrícola del Valle del Mezquital se clasifican como Leptosoles, Feozems y Vertisoles. Los Leptosoles son suelos poco profundos (de 0-30 cm), esto limita el desarrollo de las raíces, la capacidad de retener el agua y los nutrientes, por lo que su capacidad productiva es baja. Los Feozems son suelos de profundidad media, ricos en materia orgánica, su capacidad productiva es de media a alta. Los Vertisoles son suelos profundos, arcillosos, tienen contenidos de materia orgánica altos y son los suelos más productivos. Los Leptosoles se encuentran en la parte alta de los piedemontes volcánicos, los Feozem en las partes medias y los Vertisoles en la parte más baja del piedemonte (Figura 4) y en algunas partes de la planicie aluvial. También hay Leptosoles en algunas partes de la planicie, en las que anteriormente se desarrolló probablemente un lago somero dentro del cual se precipitaron carbonatos de calcio secundarios originando una capa de caliche.

El material parental de los suelos de la zona son rocas de tipo sedimentario e ígneo. Las rocas sedimentarias que afloran en las montañas y lomeríos que circundan el valle son calizas, lutitas, areniscas, conglomerados, limonitas y depósitos aluviales. Las rocas ígneas que afloran en las montañas circundantes son flujos de lava y cenizas de tipo basálticas y andesíticas, sienita, monzonita y granodiorita (British Geological Survey, 1998).

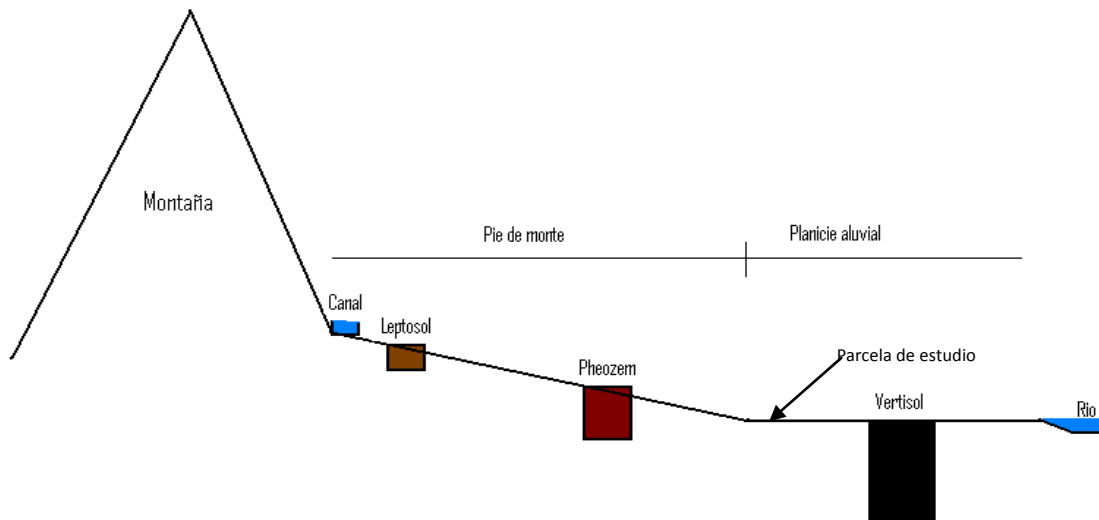


Figura 4: Esquema que muestra la distribución de los tipos de suelo dominantes en la zona de estudio.

La parcela tiene un área de 0.946 ha. El tipo de suelo corresponde a un Vertisol pélico, tiene una profundidad de 90 cm, un contenido de CaCO₃ entre 0 y 2 %, una textura franco-arcillo-limosa (Siebe, 1994). Todas las características del perfil se presentan en el Anexo I.

El sitio de estudio es una parcela tecnificada, ya que la tierra es arada, sembrada y cosechada con maquinaria especializada.

Existe una rotación en los cultivos de maíz, pasto forrajero, diversas hortalizas y alfalfa. La alfalfa se siembra entre los meses de febrero a marzo y se mantiene entre 2 y 4 años, se corta toda la planta superficial en promedio 10 veces por año. El pasto se siembra en septiembre, después de roturar el cultivo de alfalfa, se corta una vez al mes y se deja hasta marzo o abril. El maíz se siembra después de roturar el pasto y se cosecha en el mes de agosto a septiembre, después se vuelve a sembrar pasto, o alguna otra hortaliza para después volver a sembrar maíz. Después de sembrar el maíz por segunda ocasión se vuelve a instalar el cultivo de alfalfa. Entre cada cultivo se da un mes para preparar el terreno.

Se aplican plaguicidas comerciales para combatir pulgones, gusanos, arañas, mosca blanca, hongos, entre otros.

El riego se realiza por inundación (por efecto de gravedad) en periodos de 4 a 6 horas con una lámina de aproximadamente 20 cm.

6.1.3 Vegetación y uso del suelo

La vegetación natural se limita a las partes altas de las montañas y se compone de matorrales xerófilos. Las especies dominantes son mezquites (*Prosopis juliflora*), huizaches (*Acacia farneciana*), yucas (*Yucas*, sp.) y una gran diversidad de cactáceas (González, 1968).

Los valles están dedicados a la agricultura donde se cultiva maíz y alfalfa del 60 al 80% de la superficie. También se cultiva avena, cebada, frijol, y en menor proporción trigo y hortalizas.

6.2. Obtención de las muestras

Se tomaron 36 muestras de 0-30 cm de profundidad distribuidas en toda la parcela siguiendo una retícula con distancias entre puntos de muestreo de 15 m en dirección E-W y 16 m en dirección N-S. Las muestras se tomaron con una

barrena de 30 cm de profundidad y 4 cm de diámetro (Figura 5). El esquema de muestreo fue el mismo que el del estudio anterior realizado en 1990.

Las muestras se colocaron en bolsas de plástico previamente etiquetadas con los datos de proyecto, localidad, horizonte, profundidad, número de muestra y se trasladaron al Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM.

Adicionalmente se volvieron a analizar 10 muestras compuestas correspondientes al estudio de Siebe (1994). Estas muestras fueron colectadas en 1990 en distintas parcelas del Valle del Mezquital y fueron analizadas por Siebe con los mismos métodos que las muestras de la retícula muestreada en la parcela bajo estudio en 1990. Se volvieron a analizar junto con las muestras de la retícula recolectada para este estudio con el fin de detectar la variación relacionada con cambios ocasionados por diferencias en los métodos analíticos usados en ambas fechas. Estas muestras se encontraban archivadas en el Instituto de Geología. No fue posible analizar nuevamente a las muestras de la retícula muestreada en 1990, dado que estas muestras fueron consumidas por los análisis que se les realizaron.

6.3. Preparación de las muestras

Las muestras se secaron a temperatura ambiente en charolas de plástico en el cuarto de preparación de muestras del Instituto de Geología.

Una vez secas se trasladaron al cuarto de molienda en donde se tamizaron con un tamiz de malla de 2mm. Una alícuota de cada muestra se molió en un molino de ágata marca FRITSCH hasta obtener una muestra con partículas menores a 20 μm .

6.4 Análisis de laboratorio

A las muestras tamizadas < 2mm se les hicieron los siguientes análisis:

6.4.1. pH con un potenciómetro en una suspensión suelo-CaCl₂ 0.01 M relación 1:2.5 (Schlichting, et al., 1995) después de agitar durante 18 horas y 1 hora de reposo.

6.4.2. Conductividad eléctrica en un extracto suelo-agua desionizada relación 1:5 con un conductímetro marca Aqua Lytic Cd 19 (Richards, 1984).

6.4.3. *Textura por el método combinado de tamices y pipeta, después de haber destruido la materia orgánica con peróxido de hidrógeno y agregando hexametáfosfato de sodio como dispersante* (Schlichting, et al., 1995).

6.4.4. C y N totales

Estos análisis se realizaron en las muestras molidas. Para ello se usó un autoanalizador CNHS marca Perkin Elmer 2400 series II en el modo CHN bajo las siguientes condiciones: Helio como gas acarreador, temperatura de combustión de 980 °C y de reducción de 640 °C, un detector de temperatura térmica y acetanilida como gas acarreador.

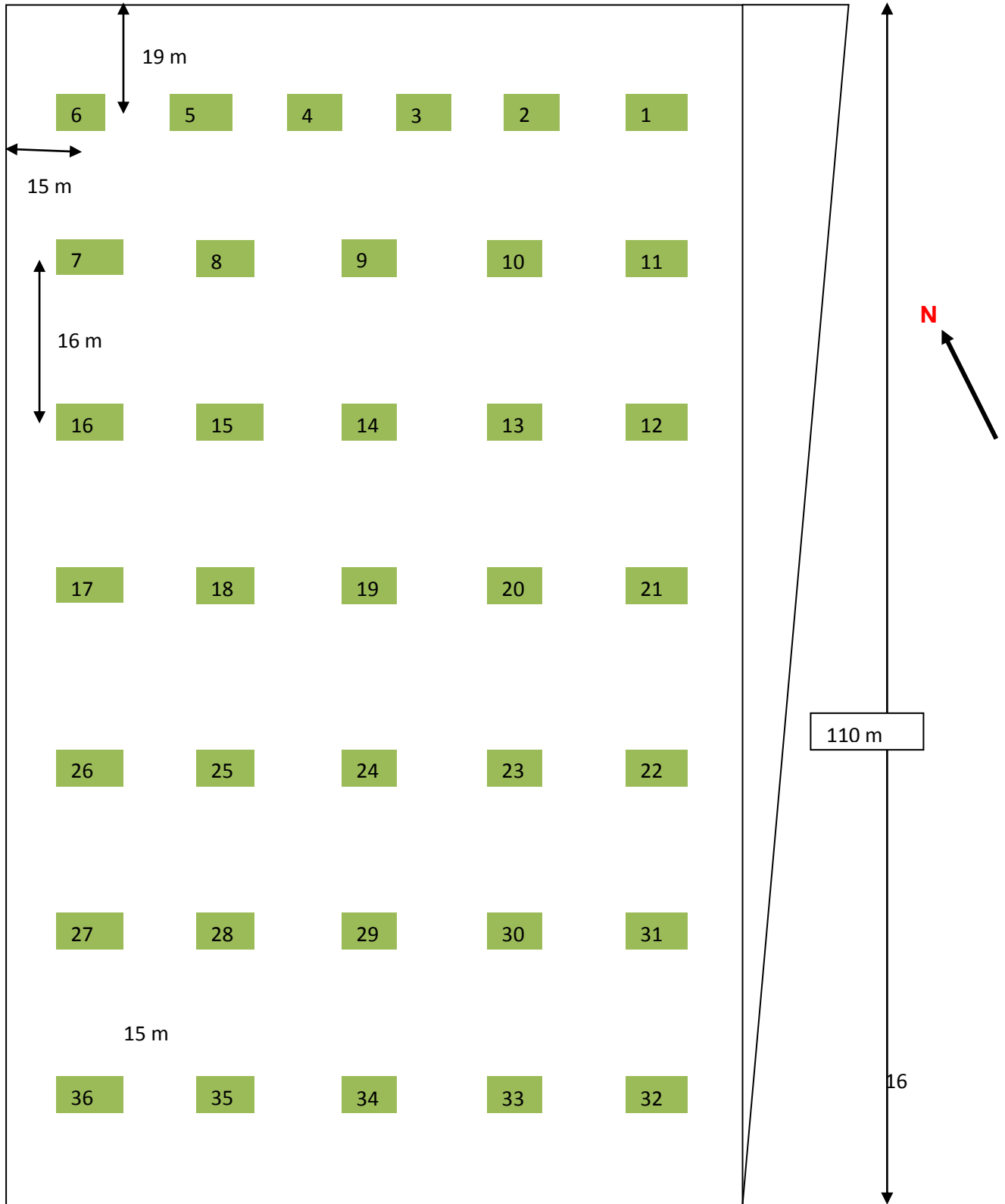
6.4.5 *Metales extractables con agua regia (HCl y HNO₃ relación 3:1)* (Schlichting, et al., 1995). Digestión en horno de microondas marca MARS 5, cuantificados por espectroscopía de absorción atómica en un espectrofotómetro de absorción atómica de flama marca Perkin Elmer 3110. Estos análisis también se realizaron en las muestras molidas.

6.5 Análisis estadístico

Se calcularon los estadísticos descriptivos de los datos de 1990 y de los datos de 2009 por variable. También se realizaron histogramas y se calcularon los valores de sesgo y kurtosis para analizar la distribución de los datos.

Para poder detectar la variación con respecto al tiempo se realizó una comparación de medias de las diferentes variables analizadas en 1990 y en 2009 por medio de una prueba de t de Student. Esta prueba permitió conocer las diferencias significativas entre las medias de los dos muestreos.

Para analizar si los resultados obtenidos aplicando los métodos y equipamientos de medición utilizados en 1990 eran comparables con aquellos utilizados en 2009 se ajustaron regresiones lineales forzadas a través del origen para todas las variables analizadas con excepción del pH, a los pares de datos de las 10 muestras archivadas analizadas tanto en 1990 como en 2009.



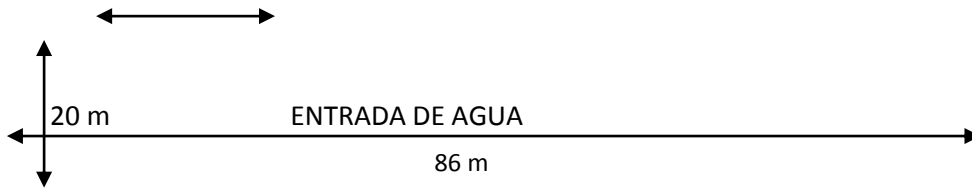


Figura 5: Esquema de la ubicación de los puntos de muestreo dentro de la parcela.

7. Resultados

7.1 Variabilidad asociada a las diferencias en los métodos utilizados.

Los resultados obtenidos del análisis repetido de las 10 muestras archivadas del estudio de 1990 se compilaron en el Anexo II. A continuación se grafican los datos de las variables estudiadas en 1990 y se comparan con las determinaciones obtenidas con los métodos utilizados en este estudio. Igualmente se inserta en cada gráfica la ecuación de regresión calculada.

7.1.1 pH

En la Figura 6 se grafican los datos obtenidos en las determinaciones de pH. La regresión ajustada tiene una pendiente de 1.0336, una ordenada al origen de -0.05435 y un coeficiente de correlación de 0.9441. Esto indica que con los dos métodos utilizados en diferentes tiempos se obtienen valores muy similares y los resultados obtenidos en la parcela bajo estudio pueden compararse directamente.

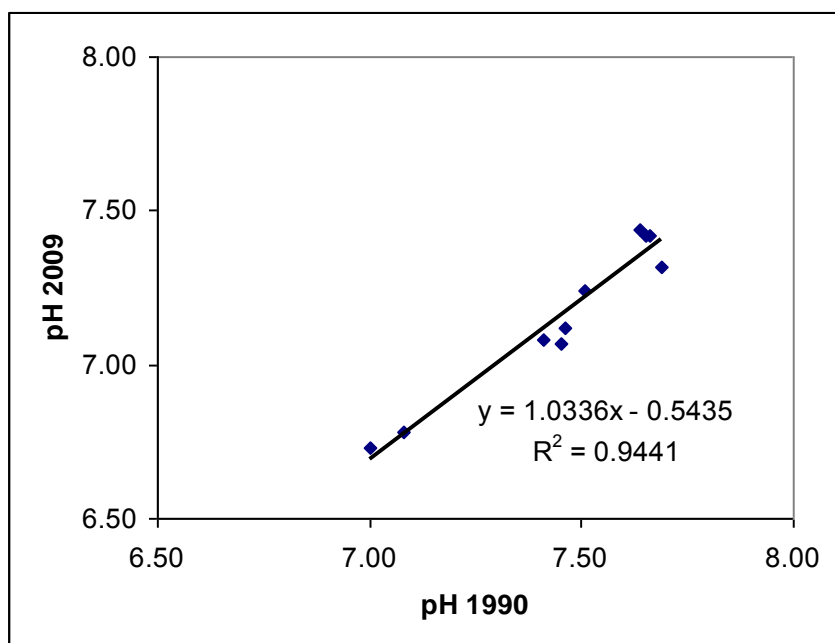


Figura 6: Comparación entre las mediciones de pH obtenidas en suspensiones suelo: agua destilada relación 1: 2.5 con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.1.2 Conductividad eléctrica

En la Figura 7 se presentan los datos obtenidos en las determinaciones de conductividad eléctrica (CE). La pendiente de la regresión calculada para la comparación de métodos de CE es de 1.7517, y el coeficiente de correlación es de 0.7977. La pendiente mayor a 1 indica que el equipo utilizado en el 2009 reporta una mayor CE, que el utilizado en 1990. Además hay una importante dispersión de los datos; la regresión sólo puede explicar el 79% de la varianza entre las 10 determinaciones. En este caso sí se necesita hacer correcciones a los datos antes de compararlos, para eliminar la variación con respecto al instrumento de medición utilizado. No obstante, aunque se realice esta corrección, los cambios que se detecten deben interpretarse con cautela, ya que aparentemente existen otras fuentes de variación atribuibles al método, que no pueden controlarse.

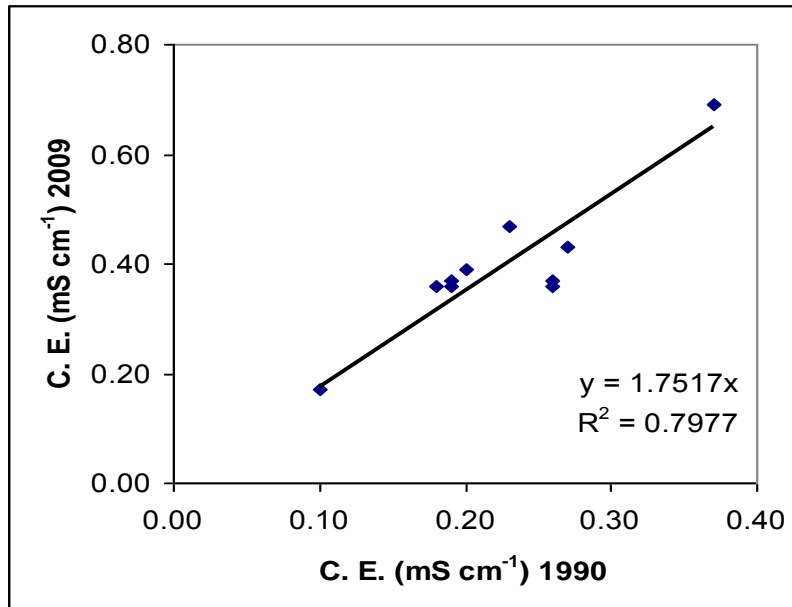


Figura 7: Comparación entre las mediciones de conductividad eléctrica (CE) en extracto 1: 2.5 obtenidas con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.1.3 Carbono

En la Figura 8 se presentan los datos obtenidos en las determinaciones de carbono (C). Los datos obtenidos con ambos métodos muestran una dispersión importante: el coeficiente de correlación es relativamente bajo (0.3807), y la pendiente es muy cercana a uno. Esto indica que la cantidad reportada por cada método es muy variable y parece depender de las propiedades de cada muestra. En este caso no se pueden hacer correcciones a los datos para eliminar la variación de los métodos. Una posible razón de esta discrepancia en los resultados obtenidos por ambos métodos puede radicar en el hecho de que el método utilizado en 1990 cuantifica únicamente el carbono orgánico, mientras que el método utilizado en 2009 cuantifica el carbono total, es decir, el orgánico y el inorgánico en forma de carbonatos de calcio. Es muy probable que las muestras contengan carbonato de calcio secundario entre 0.5 y hasta 2 % (Anexo 1). Para la comparación entre los resultados obtenidos en 1990 y 2009 debería por lo tanto cuantificarse únicamente carbono orgánico. En este trabajo no dio tiempo para hacer estas determinaciones, por lo que no se realizó el análisis de cambio en el tiempo para esta variable.

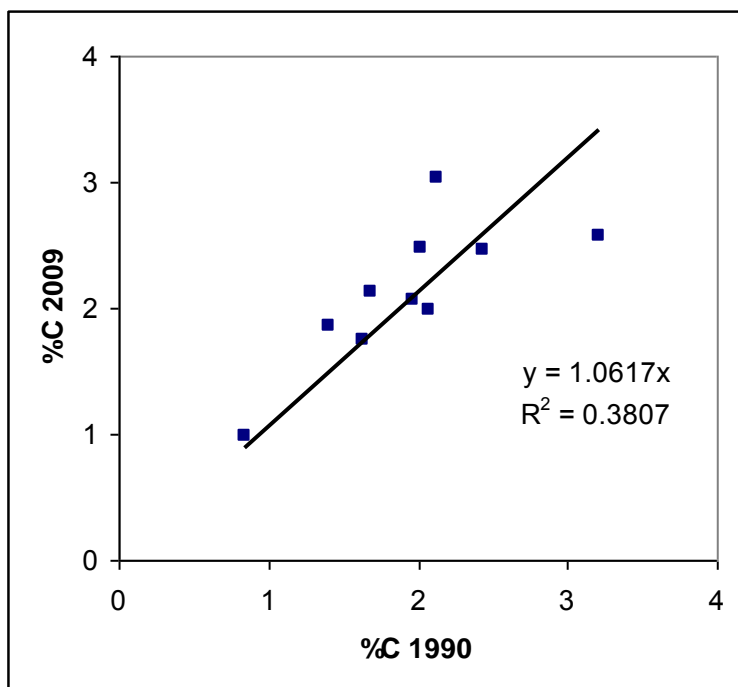


Figura 8: Comparación entre los resultados obtenidos en las mediciones de C con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.1.4 Plomo

En la Figura 9 se grafican los datos obtenidos en las determinaciones de Pb extractable con agua regia. La regresión calculada muestra un coeficiente de determinación alto igual a 0.9909. Sin embargo, esta regresión no tiene un comportamiento lineal, sino más bien se ajusta a un modelo logarítmico. El método utilizado en 2009 cuantifica más Pb que el usado en 1990 y esto es más acentuado en muestras que contienen poco Pb ($<25 \text{ mg kg}^{-1}$), que en aquellas que contienen concentraciones de Pb superiores a 50 mg kg^{-1} . Los métodos no son comparables, pero las diferencias entre ellos parecen ser constantes, lo cual permite transformar los datos obtenidos en 1990 utilizando la ecuación de regresión ajustada.

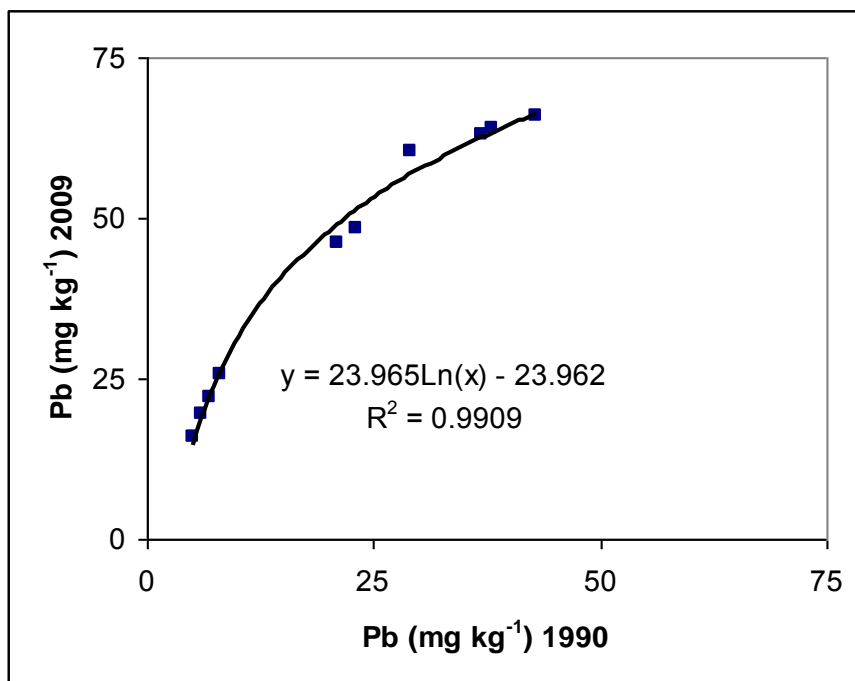


Figura 9: Comparación entre las determinaciones de Pb extractable con agua regia obtenidas con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.1.5 Cadmio

En la Figura 10 se reportan los datos obtenidos en las determinaciones de Cd extractable con agua regia. La regresión calculada tiene una pendiente ligeramente mayor a uno (1.0347), lo que significa que se extrae 3% más con el método de 2009 que con el utilizado en 1990. La ordenada al origen es de cero y los datos muestran un coeficiente de determinación de 0.911, lo que indica que es factible predecir cuál hubiera sido el resultado en 1990, de haberse aplicado el método usado en este estudio. Las predicciones merecen mayor confianza, si las concentraciones de Cd en la muestra son superiores a 0.7 mg kg^{-1} , ya que a partir de éstas, las desviaciones del modelo son menores.

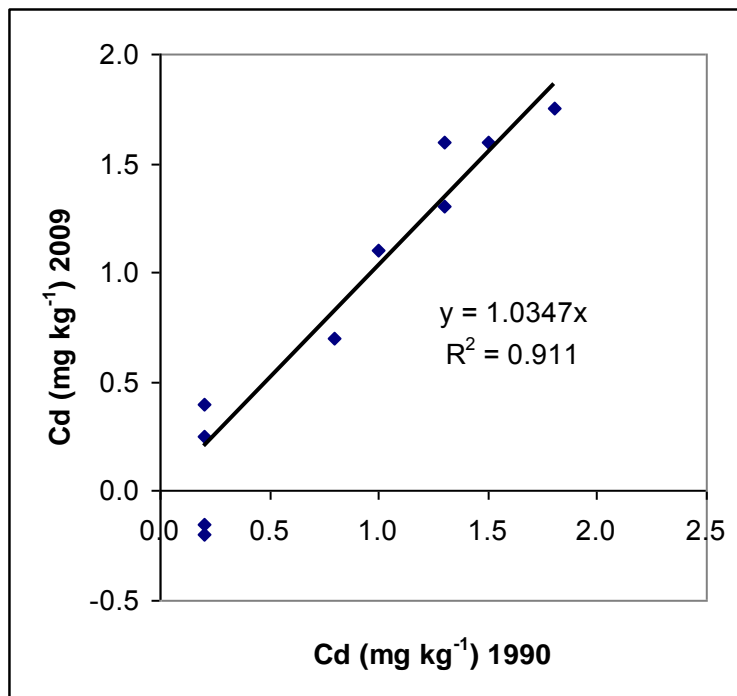


Figura 10: Comparación entre las determinaciones de Cd extractable con agua regia obtenidas con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.1.6 Cobre

En la Figura 11 se presentan los datos obtenidos en las determinaciones de Cu extractable con agua regia. El método del 2009 extrae 47% más Cu que el del 1990. La ordenada al origen es de cero. El coeficiente de determinación es de 0.9712 lo que indica que los métodos están fuertemente relacionados aunque un método extraiga más que el otro. Por lo tanto es posible predecir las determinaciones de Cu que se hubiesen obtenido en las muestras de 1990, si se les aplicara el método usado en 2009 con base en la ecuación de regresión ajustada.

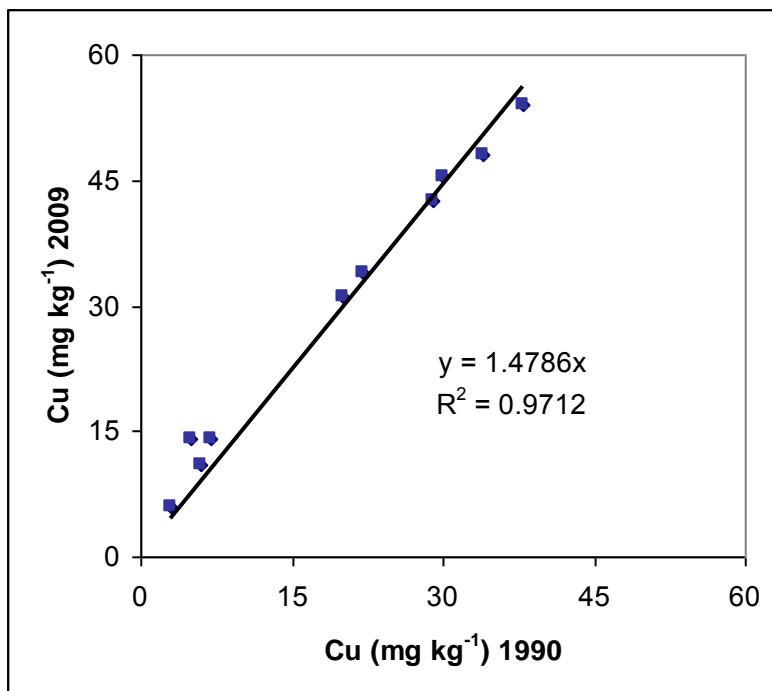


Figura 11: Comparación entre las determinaciones de Cu extractable con agua regia obtenidas con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.1.7 Zinc

En la Figura 12 se grafican los datos obtenidos en las determinaciones de Zn extractable con agua regia. La regresión calculada tiene una pendiente de 1.3239 y una ordenada al origen de cero, lo que indica que el método usado en el 2009 extrae 32% más de este elemento. Pero el coeficiente de determinación es muy alto (0.9677), con lo cual, igual que para el Cu, es posible predecir las determinaciones de Zn que se hubiesen obtenido en las muestras de 1990, si se les aplicara el método usado en 2009 con base en la ecuación de regresión ajustada.

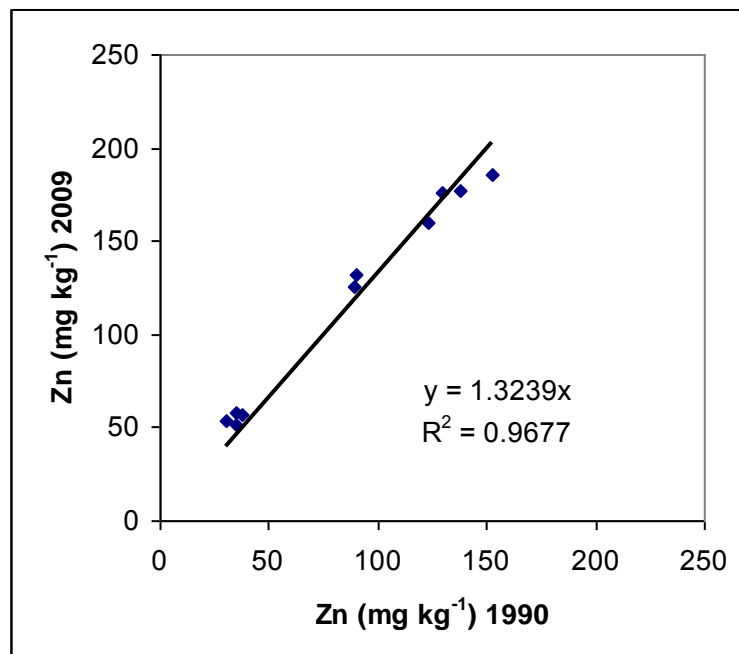


Figura 12: Comparación entre las determinaciones de Zn extractable con agua regia obtenidas con los métodos y aparatos utilizados en 1990 y en 2009.

7.2 Variación temporal de las propiedades del suelo.

7.2.1 Estadísticos descriptivos

Previo al análisis de cambios en el tiempo de las variables determinadas, se recalcularon las concentraciones de Pb, Cu, Zn, Cd y C. E. en las muestras del estudio de 1990, utilizando las ecuaciones de regresión encontradas en el punto 7.1. Todos los datos determinados y recalculados de las muestras de la parcela bajo estudio se presentan en el Anexo III (Muestreo 1990) y anexo IV (muestreo de 2009).

En la Tabla 5 se presentan los estadísticos descriptivos calculados con los datos del muestreo de 1990, una vez realizadas las predicciones para la aplicación del método de 2009 para los metales Pb, Cu, Cd y Zn. En la Tabla 6 se presentan los del muestreo de 2009.

Tabla 5: Estadísticos descriptivos calculados con los datos del muestreo de 1990.

		C. E.	C	Pb	Cd	Cu	Zn
	pH	$\mu\text{S cm}^{-1}$	%	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
Promedio	7.33	346.11	2.45	68.05	1.05	69.41	216.16
S	0.07	38.85	0.18	7.01	0.39	13.20	42.42
S ²	0.01	1509.22	0.03	49.08	0.15	174.27	1799.34
Min	7.18	280.27	2.16	55.02	0.52	47.32	152.25
Max	7.51	434.42	3.08	81.65	2.28	100.54	338.92
Rango	0.33	154.15	0.92	26.62	1.76	53.23	186.67

Los valores promedio obtenidos en ambos muestreos son muy similares para pH; también las desviaciones estándar y los rangos.

La conductividad eléctrica promedio es sustancialmente mayor en el muestreo de 2009, comparada con el de 1990; pasó de una media en 1990 de $346 \mu\text{S cm}^{-1}$ a una de $540 \mu\text{S cm}^{-1}$ en 2009. El rango en el que se encontraban los datos en 1990 es más estrecho; el valor mínimo fue de 280 y el máximo de 434, mientras que en el muestreo de 2009 el rango se incrementó, hallándose valores máximos de 940 y mínimos de $390 \mu\text{S cm}^{-1}$, por lo que la desviación estándar es mayor también.

Tabla 6: Estadísticos descriptivos calculados con los datos del muestreo de 2009.

		C. E.	C	Pb	Cd	Cu	Zn
	pH	$\mu\text{S cm}^{-1}$	%	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
X	7.35	540.56	2.27	67.79	1.25	55.48	200.01
S	0.11	103.31	0.12	6.87	0.28	4.96	20.25
S2	0.01	10673.97	0.01	47.18	0.08	24.60	410.01
Min	7.05	390.00	2.11	55.50	0.75	47.00	157.50
Max	7.53	940.00	2.66	82.50	1.75	68.00	244.50
Rango	0.48	550.00	0.55	27.00	1.00	21.00	87.00

La concentración promedio de plomo en la parcela es muy similar en ambos muestreos (67 y 68 mg kg^{-1}), también las desviaciones estándar y los rangos son muy similares. Los valores mínimos en los dos muestreos son de alrededor de 50 mg kg^{-1} y los máximos de 80 mg kg^{-1} .

La concentración promedio de Cd es ligeramente mayor en el muestreo de 2009 que en el de 1990; en 1990 la media fue de 1.05 mg kg^{-1} y en el 2009 es de 1.25 mg kg^{-1} . El valor máximo es de 2.38 mg kg^{-1} en el muestreo de 2009, mientras que en el de 1990 es de 2.28 mg kg^{-1} .

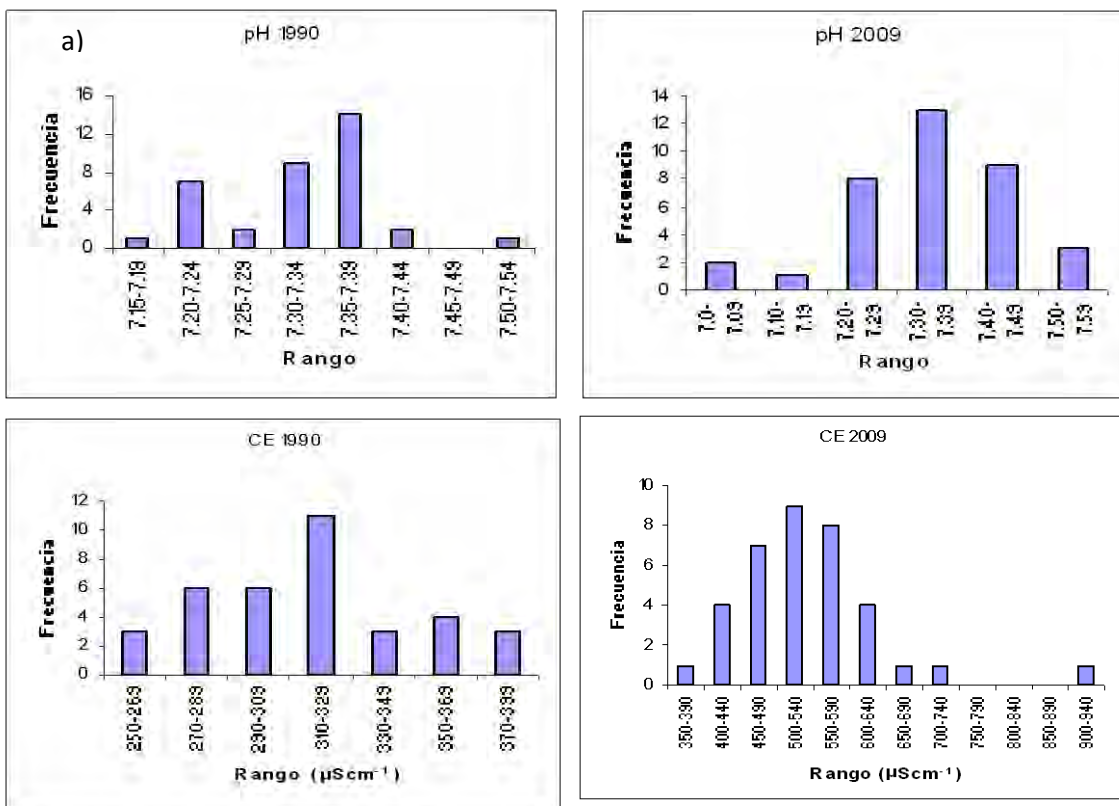
En las concentraciones promedio de Cu se observa un comportamiento contrario: el valor promedio del muestreo de 2009 es menor al del muestreo de 1990: la media pasó de 69 mg kg^{-1} en 1990 a 55 mg kg^{-1} en 2009. El rango en el muestreo de 1990 era de 47 a 100 mg kg^{-1} y en 2009 de 47 a 68 mg kg^{-1} .

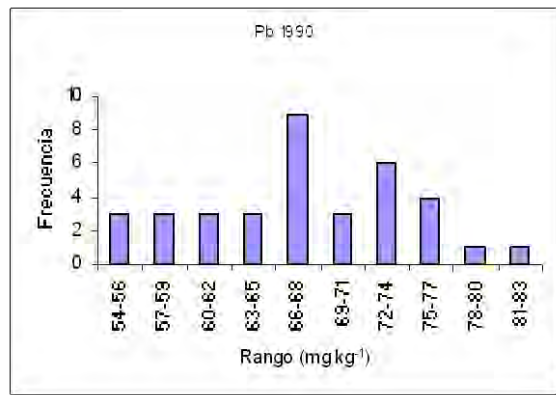
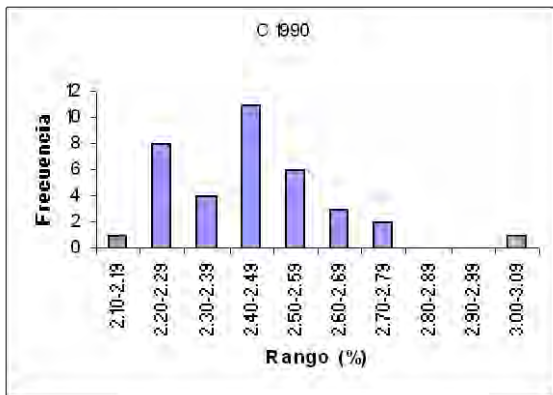
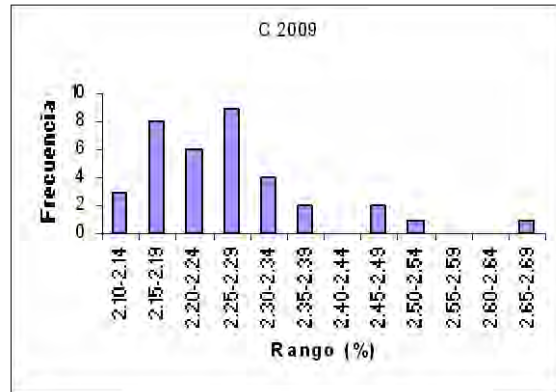
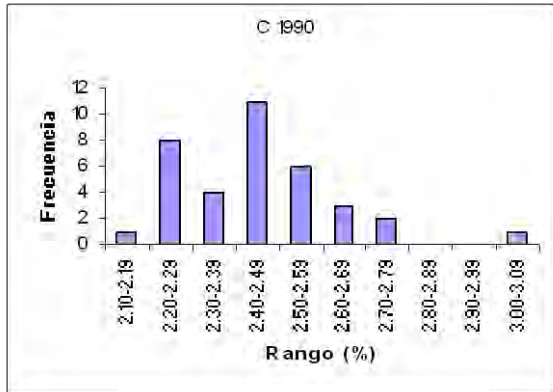
El valor promedio de la concentración de Zn es ligeramente menor en el muestreo de 2009, que en el muestreo de 1990 (200 y 216 mg kg^{-1} en 2009 y 1990, respectivamente), pero los rangos de concentración son más amplios en el

muestreo de 1990, que en el de 2009: 152 a 338 mg kg⁻¹ y 157 a 244 mg kg⁻¹, respectivamente.

7.2.2 Distribuciones de frecuencia

En las gráficas de la figura 13 se muestran los histogramas (distribuciones de frecuencia) de todas las variables determinadas en cada uno de los muestreos.





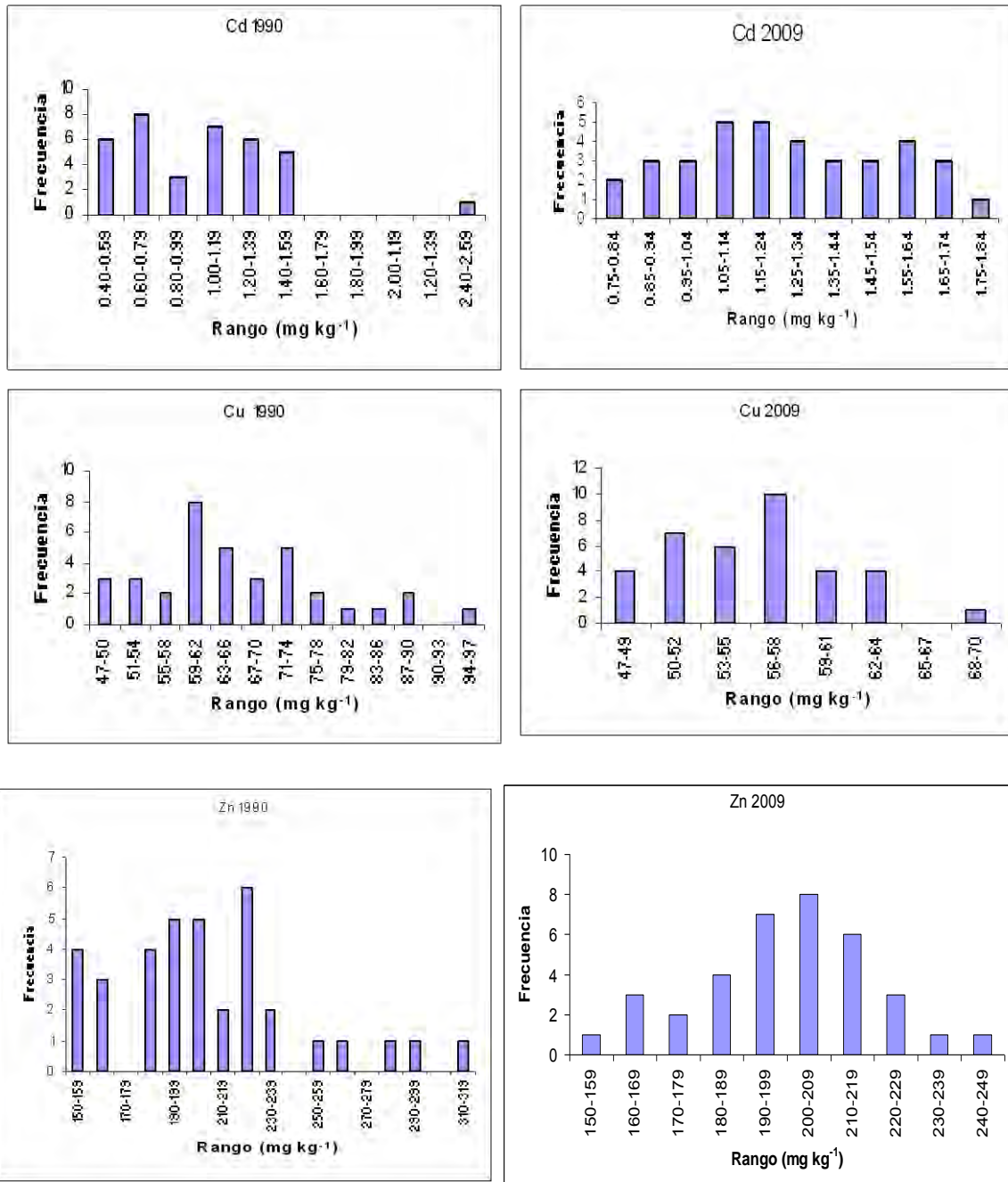


Figura 13: Gráficas de distribución de frecuencias (histogramas) de todas las variables analizadas en ambos muestreos.

Todos los datos presentan una distribución que se asemeja a la Normal. Únicamente los datos de Zn, Cd y Cu de 1990, y los de C de 2009, muestran una distribución ligeramente sesgada. Los valores de kurtosis y sesgo se muestran en

la Tabla 7a. Como puede observarse, ambos valores son relativamente bajos (menores 2) para todas las variables, excepto para C 1990, C. E. y C 2009. Por lo anterior, se consideró realizar una transformación de estos datos (transformándolos a logaritmo) antes de aplicar la prueba de t de Student para conocer si las medias son estadísticamente diferentes y así poder hacer la comparación entre los dos muestreos (Tabla 7b).

Tabla 7a: Coeficiente de kurtosis y sesgo para las variables de 1990 y 2009.

	Kurtosis	Sesgo
pH 1990	0.00	-0.22
C. E. 1990	-0.19	0.46
C 1990	2.93	1.20
Pb 1990	-0.55	-0.20
Cd 1990	1.48	0.88
Cu 1990	-0.17	0.45
Zn 1990	0.91	0.83
pH 2009	0.81	-0.83
C. E. 2009	5.44	1.77
C 2009	2.91	1.56
Pb 2009	-0.80	0.28
Cd 2009	-1.03	0.07
Cu 2009	-0.29	0.39
Zn 2009	-0.17	-0.28

Tabla 7b: Coeficiente de kurtosis y sesgo para las variables transformadas a logaritmos.

Variable	Kurtosis	Sesgo
C 1990	1.85	0.89
C. E. 1990	-0.39	0.21
C 2009	2.32	1.4
C. E. 2009	2.15	0.9

7.2.3 Comparación entre las distribuciones de los datos de 1990 y 2009.

La distribución de los valores de pH en el 2009 es más heterogénea dentro de la parcela; los valores abarcan un rango de 7.05 a 7.53. En 1990 el rango es un poco más estrecho de 7.18 a 7.51. De acuerdo a la prueba de t de Student no se encontraron diferencias significativas entre las medias con un $\alpha=0.05$ (Figura 14 a).

La conductividad eléctrica muestra valores más altos en 2009 en comparación con 1990. En 1990 se obtuvo una media de $346 \mu\text{S cm}^{-1}$ y en el 2009 ésta fue de $540 \mu\text{S cm}^{-1}$. La dispersión de los datos es mayor en el muestreo de 2009; el rango abarca de 390 a $940 \mu\text{S cm}^{-1}$. De acuerdo a la prueba de t de Student, las medias pertenecen a dos poblaciones diferentes con un $\alpha=0.05$.

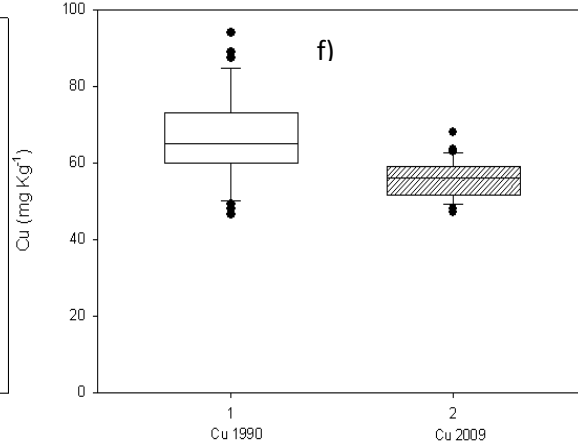
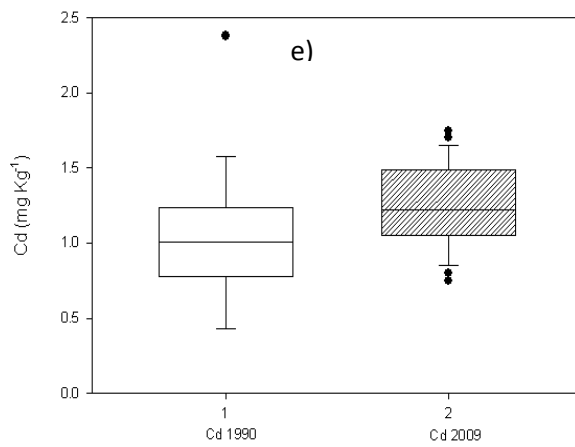
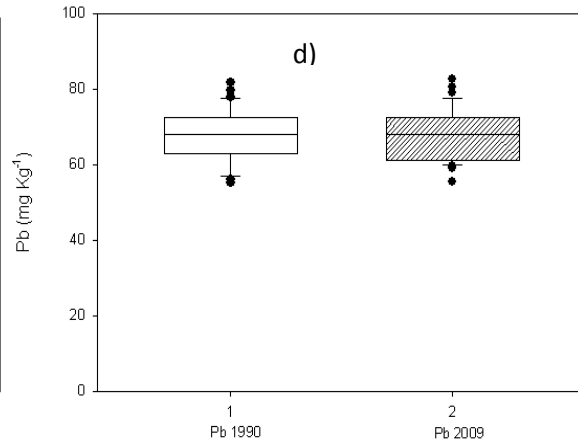
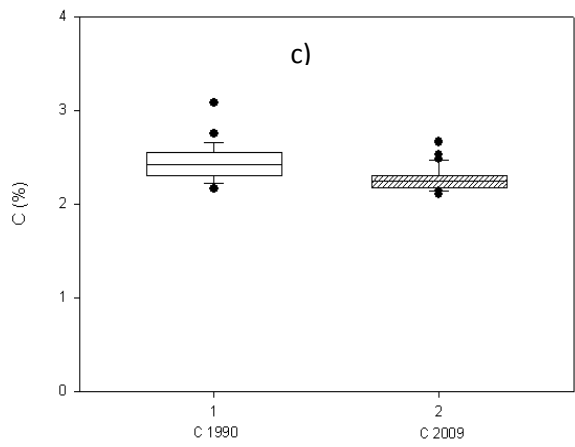
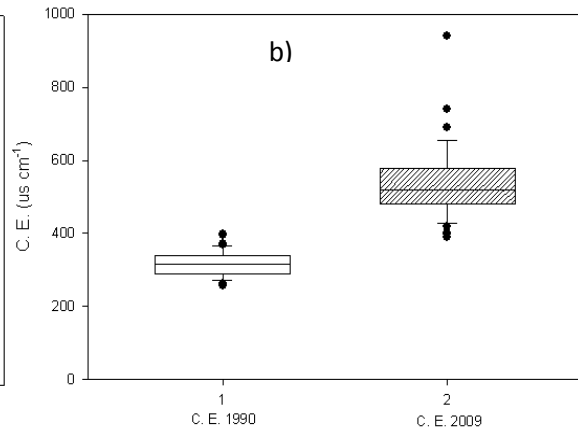
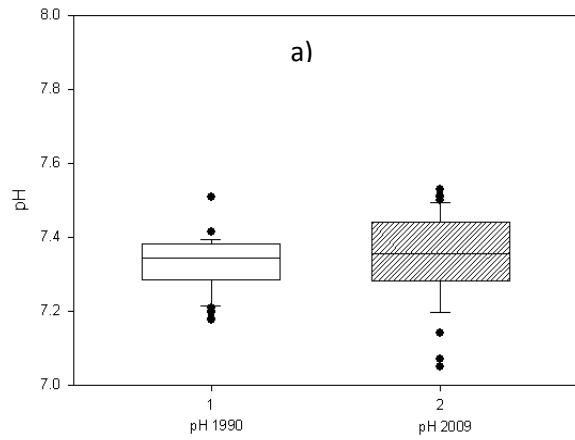
El contenido promedio de C en la parcela disminuyó ligeramente de 2.45 a 2.26% entre 1990 y 2009. Sin embargo, las diferencias se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que las discrepancias entre los dos métodos utilizados. Por lo anterior no se realizó la comparación de medias.

En el plomo no se encontró variación en la distribución de la concentración en ambos muestreos. Presentan la misma heterogeneidad en los datos de 1990 y 2009. La prueba de t de Student demuestra que las medias pertenecen a la misma población.

La concentración media de Cd es mayor en el muestreo de 2009 que en el de 1990; la media en el 2009 es de 1.25 mg kg^{-1} y en 1990 fue de 1.05 mg kg^{-1} . Los datos muestran una dispersión ligeramente mayor en 1990 que en 2009. La prueba de t de Student indica que las medias representan poblaciones diferentes con una probabilidad de error del 5 % ($\alpha = 0.05$).

La concentración media de Cu de la parcela es menor en el muestreo de 2009 que en el de 1990. En 1990 la media fue de 69.41 mg kg^{-1} y en el 2009 de 55.48 mg kg^{-1} . La prueba de t de Student indica que las medias son diferentes. En este parámetro ocurre lo contrario que en el de pH y C. E., ya que aquí la dispersión de los datos dentro de la parcela es menor en 2009 que en 1990.

La concentración media de Zn se mantuvo constante en los 20 años. En esta variable también se observa que la dispersión de la concentración de Zn dentro de la parcela disminuyó. La comparación de medias que se les realizó indica que no hay diferencias significativas en la concentración promedio de Zn entre ambos muestreos.



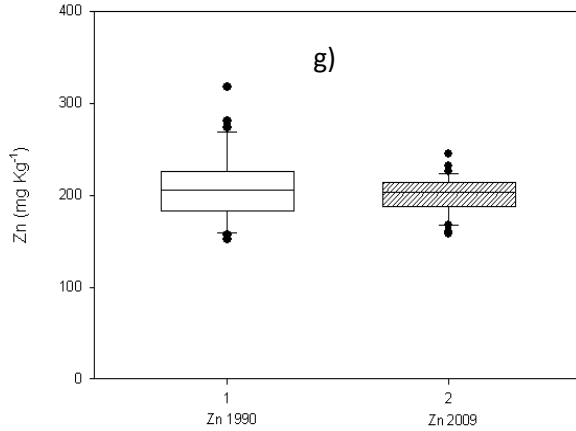


Figura 14: Comparación de las distribuciones (diagramas de cajas y bigotes) de los datos obtenidos en los muestreos de 1990 y 2009. a) pH, b) Conductividad eléctrica, c) Carbono, d) Plomo, e) Cadmio, f) Cobre y g) Zinc.

7.3 Variación espacial de las propiedades del suelo dentro de la parcela.

En las Figuras 15 a la 17 se presenta la distribución espacial de los valores de pH, C.E. y contenidos de C determinados en las muestras individuales tomadas en cada uno de los muestreos. Cada figura se compone de tres gráficas: la primera muestra la distribución de la variable en 1990 (a), la segunda la distribución de la variable en 2009 (b), y la tercera muestra la distribución de las diferencias entre los valores medidos entre ambos muestreos (c). En las Figuras 18 a la 21 se hace lo mismo con los contenidos de Pb, Cd, Cu y Zn determinados en las respectivas muestras.

pH

La distribución del pH en la parcela (Figura 15) es relativamente homogénea en 1990, los valores se encuentran en un rango de 7.5 a 7.7. En el 2009 hay mayor variación espacial, el rango es de 7.1 y 7.5. En el muestreo de 1990 los valores más altos se encuentran en tres pequeñas secciones de la parcela y los más bajos en la margen izquierda (Oeste) de la misma (Figura 15a). En 2009 los valores más altos se encuentran en la parte SSE de la parcela, mientras que los más bajos están en la parte central-baja (Centro Norte) y en la parte Norte (más baja) que es por donde sale el agua (Figura 15 b).

Para el 2009 los valores disminuyeron en la parte media baja de la parcela y se mantuvieron constantes en la parte central de la misma, mientras que aumentó en la parte N en la entrada del agua a la parcela (Figura 15 c).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica también muestra una distribución relativamente homogénea dentro de la parcela en 1990, mientras que en 2009 los valores aumentan en general y muestran mayores concentraciones en la parte central-baja (Figura 16).

La conductividad eléctrica aumentó en toda la parcela, sin embargo, la parte en donde hubo mayor aumento fue en el centro de la parcela, mientras que los valores más bajos se encuentran de la parte central hacia los costados (Figura 16 c).

Carbono

En la Figura 17 se muestra la distribución espacial de C dentro de la parcela. En 1990 se observa nuevamente la tendencia de que los contenidos más altos se encuentran en la zona de entrada de agua de riego y los más bajos en la salida del agua. Para el 2009 las concentraciones elevadas se encuentran en la salida del agua en un rango de 2.5 a 2.6 % y en la entrada los valores son menores (2.2 a 2.3 %).

En el 2009 hubo una disminución en la parte de la entrada del agua a la parcela, los valores se mantuvieron constantes en la parte Media-Este y en la parte media-baja, sólo se observa un ligero aumento en la parte NO de la parcela (Figura 17 c).

Plomo

La distribución espacial de Pb dentro de la parcela se muestra en la Figura 18. En ambas gráficas se aprecia que los contenidos más altos de Pb se localizan en la parte alta de la parcela (cerca de la entrada del agua), y disminuyen hacia la parte baja. Esta tendencia es ligeramente más pronunciada en el muestreo de 1990.

Se observa una disminución de la concentración en la parte de la entrada del agua a la parcela y en la parte media Este, los valores se mantuvieron en la parte media, mientras que aumentaron en la parte baja de la parcela (Figura 18 c).

Cadmio

Igualmente para el Cd se observa que las mayores concentraciones se encuentran en la entrada del agua en la parcela (Figura 19). Las concentraciones más bajas se encuentran en la salida del agua de la parcela. En la gráfica del 1990 las concentraciones elevadas sólo se observan en la parte más próxima a la entrada del agua de riego. En la del 2009 las concentraciones elevadas de Cd se pueden observar más hacia el centro de la parte alta de la parcela.

La concentración de Cd disminuyó en la parte de la entrada del agua a la parcela y también en la parte media Este, en la parte central los valores se mantuvieron y los valores aumentaron en la parte N o salida de la parcela y en la parte media-alta (Figura 19 c).

Cobre

En el cobre también se observa la tendencia a aumentar la concentración en la entrada del agua de riego a la parcela. Los valores más bajos se presentan en la salida del agua. En la gráfica del año de 1990 (Figura 20 b) en la entrada del agua se encontraron concentraciones de 90 mg kg^{-1} y en la salida de 48 mg kg^{-1} . La distribución de este elemento es más homogénea en el muestreo de 2009.

Hubo una disminución en la concentración en casi toda la parcela, pero fue mayor en la parte SO en la entrada del agua, mientras que en la parte NO (parte baja) no se presentaron cambios (Figura 20 c).

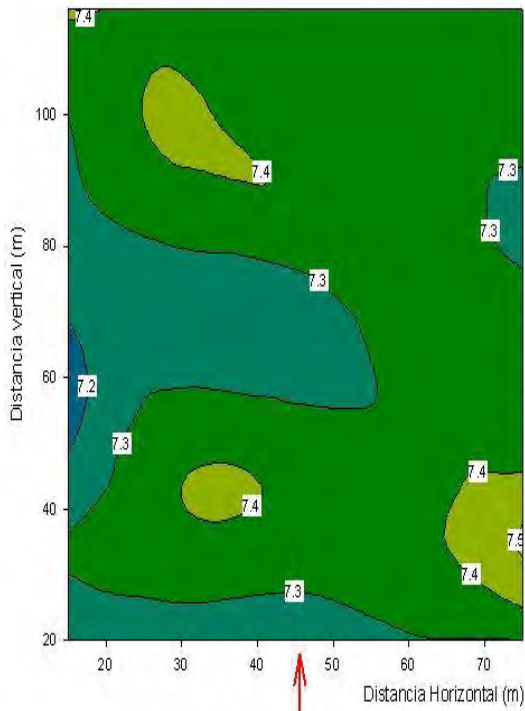
Zinc

La distribución espacial del Zn dentro de la parcela se muestra en la Figura 21. En 1990 la mayor concentración se observa en la zona de entrada del agua (300 mg kg^{-1}) y la menor a la salida del agua, donde se encuentra en un rango de 170 a 180 mg kg^{-1} .

En el 2009 esta tendencia es menos pronunciada; los valores encontrados se distribuyen con mayor homogeneidad en toda la parcela. Los valores más altos se encuentran sólo en una pequeña zona de la entrada de agua donde los valores son de 240 mg kg^{-1} y los valores más bajos se encuentran en la salida del agua de riego donde los valores son de 160 mg kg^{-1} .

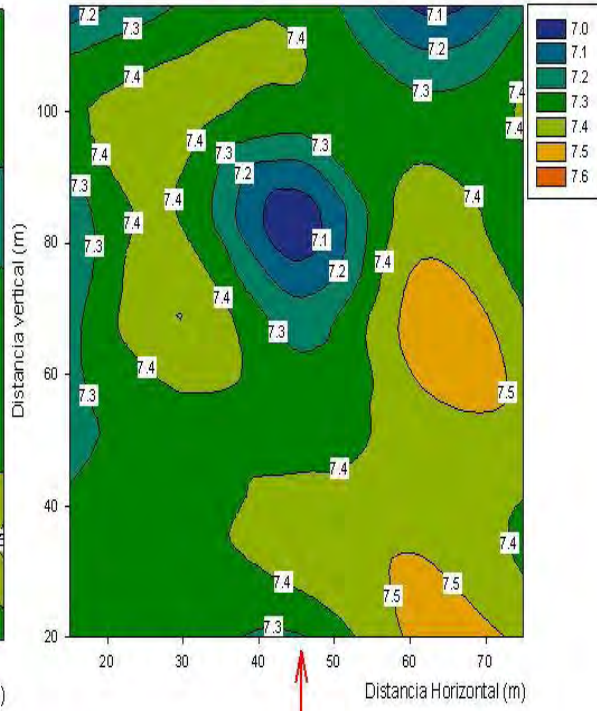
Los valores disminuyeron en la entrada del agua a la parcela y se mantuvieron constantes en la parte central de la parcela y en la salida (NO de la parcela) los valores aumentaron (Figura 21 c).

a) Concentración de pH en la superficie del suelo, 1990



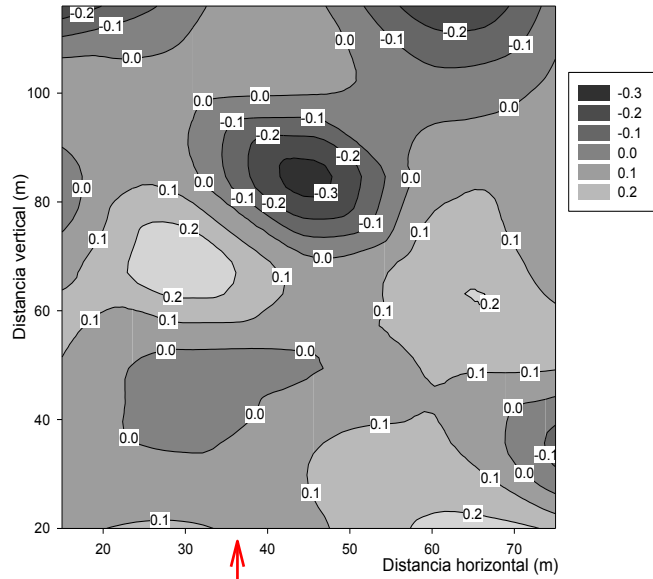
Entrada del agua de riego

b) Concentración de pH en la superficie del suelo, 2009



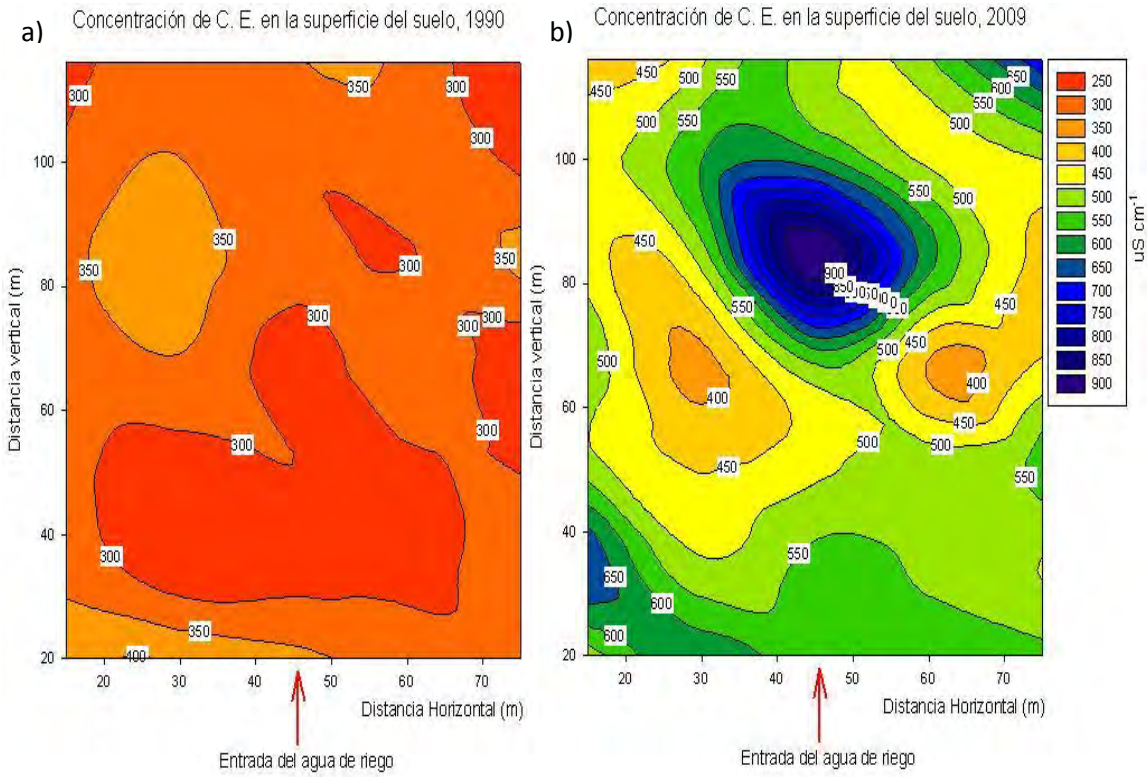
Entrada del agua de riego

c) pH 2009-1990



Entrada de agua

Figura 15: Comparación de la distribución espacial del pH entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).



C. E. 2009-1990

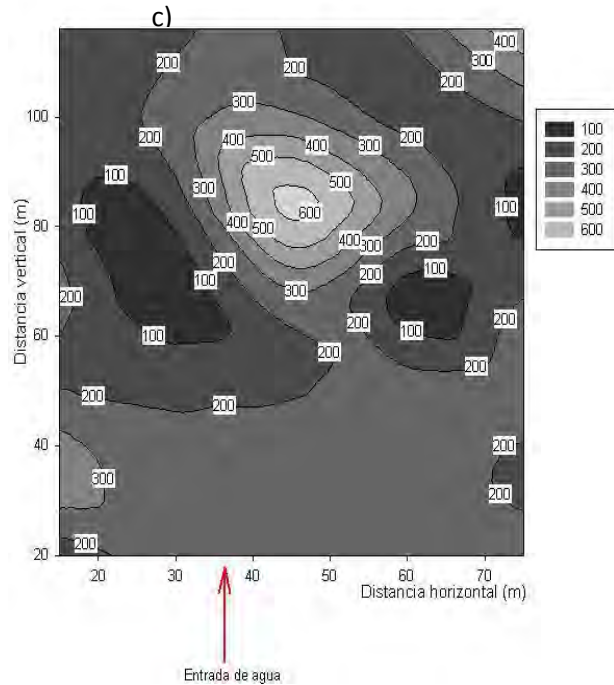
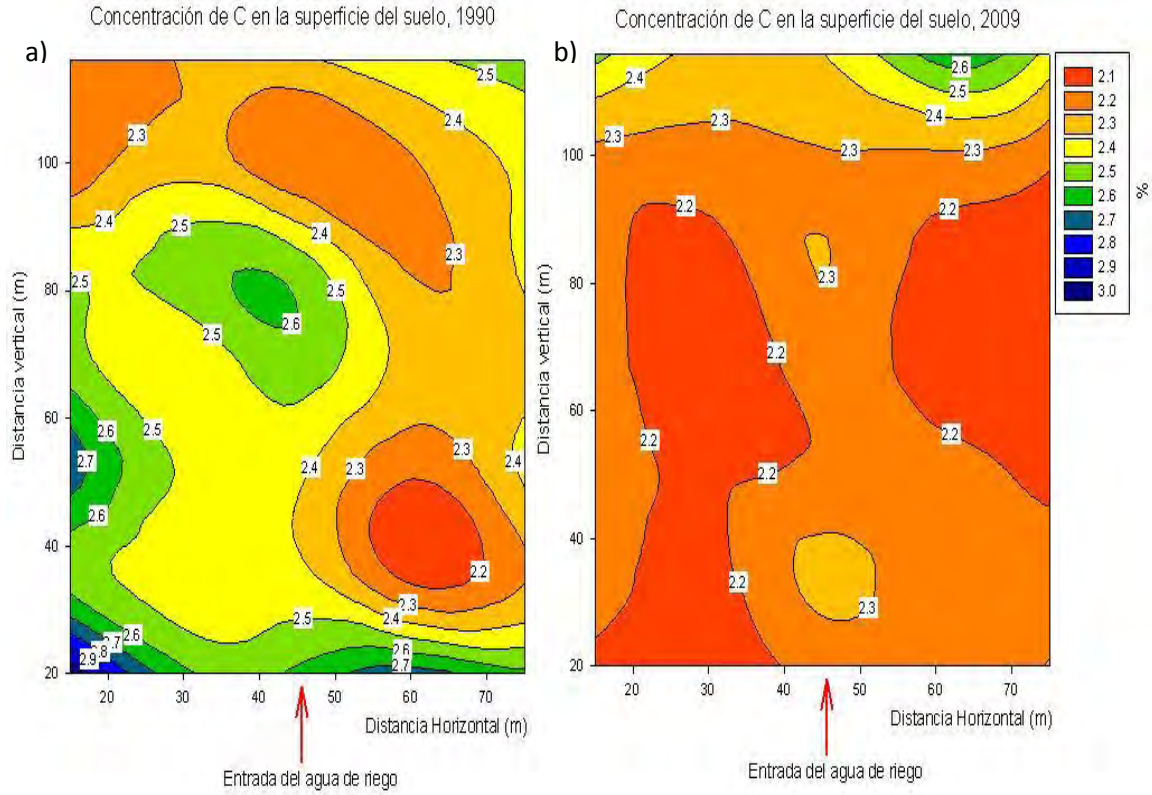


Figura 16: Comparación de la distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE) entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).



c)

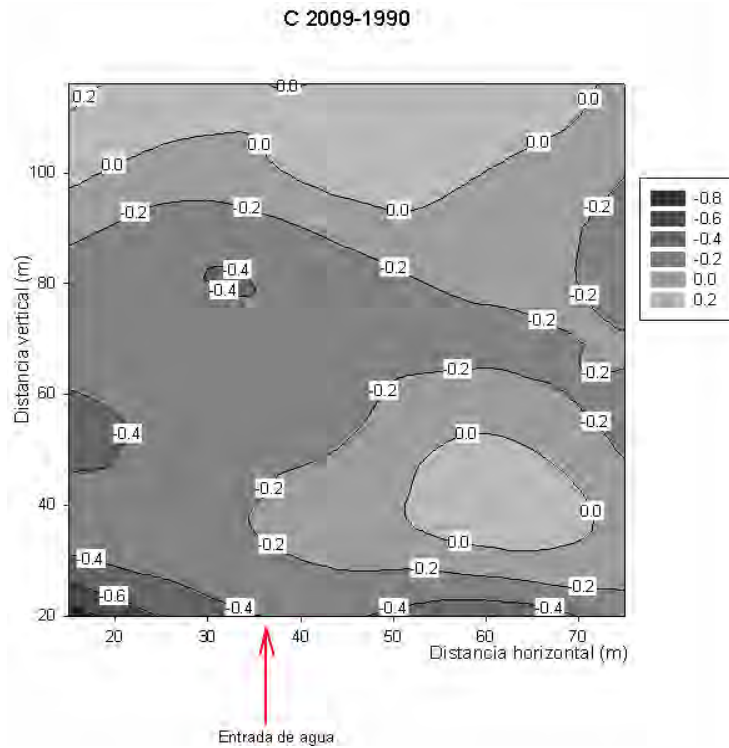


Figura 17: Comparación de la distribución espacial del C entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).

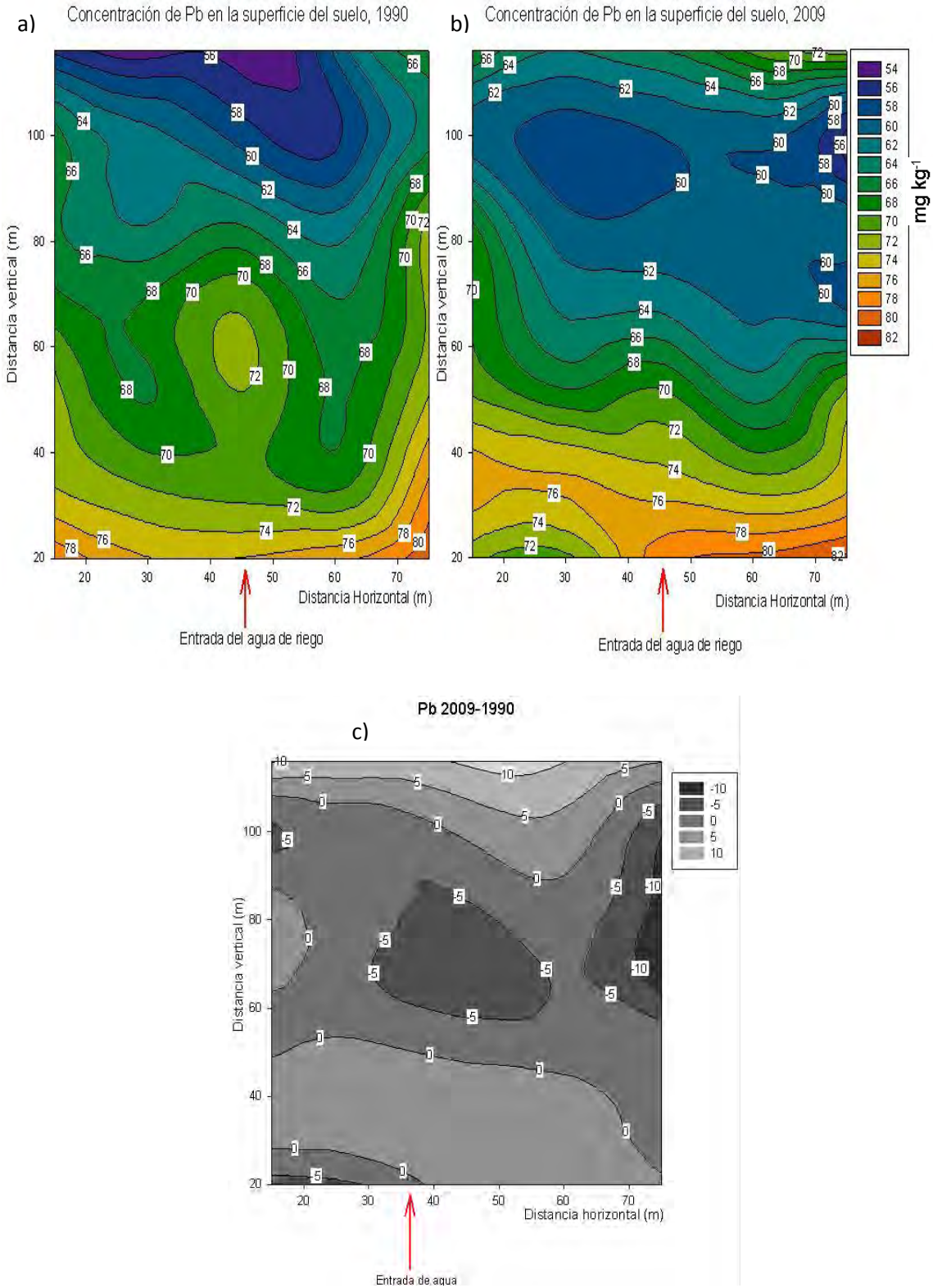


Figura 18: Comparación de la distribución espacial del Pb entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).

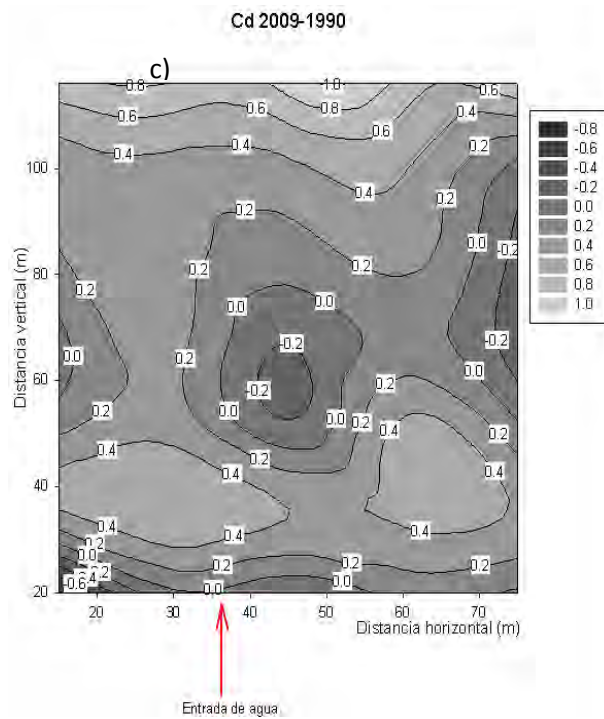
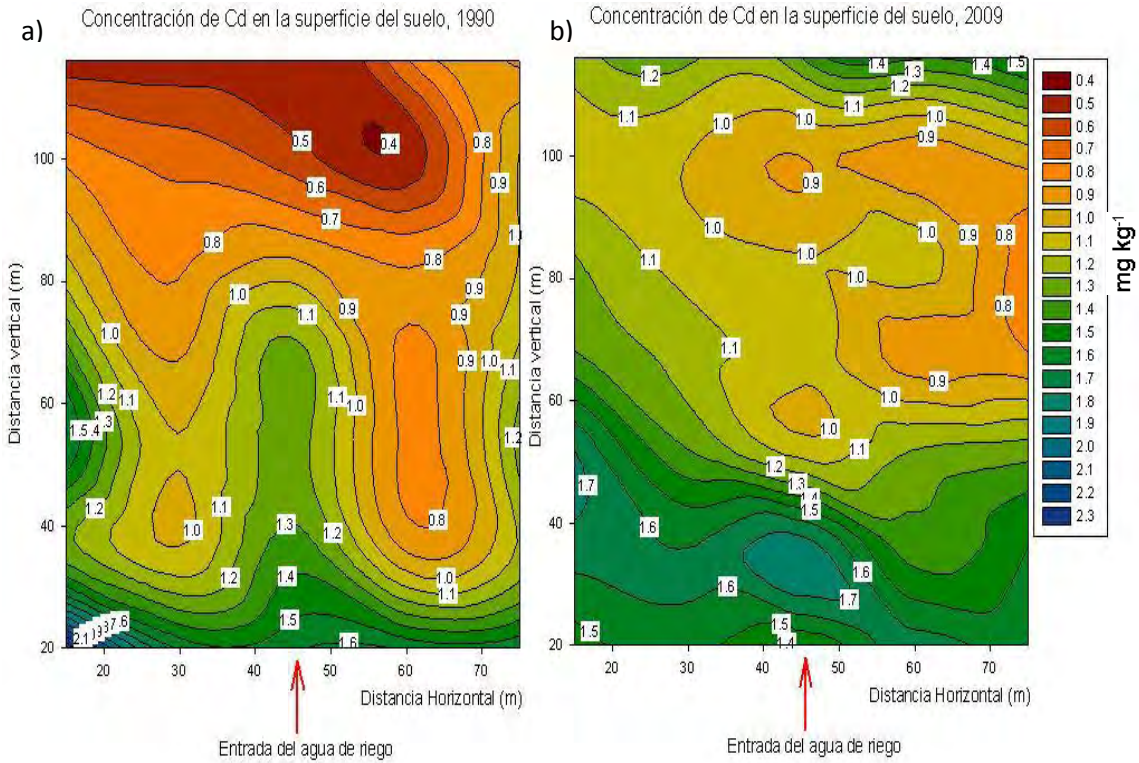
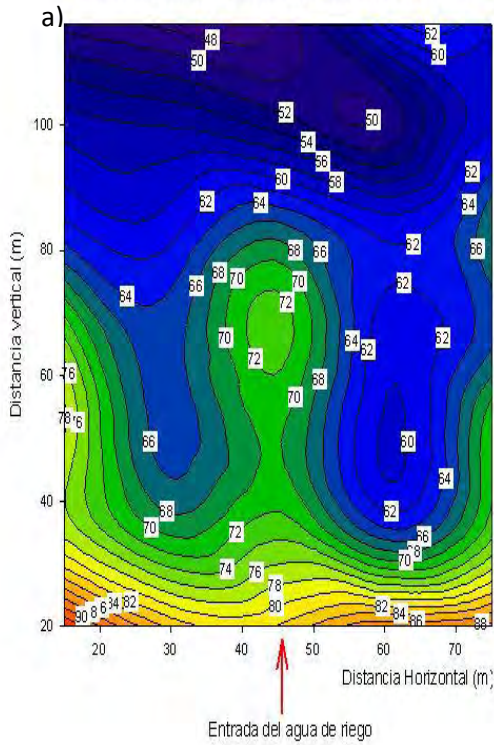
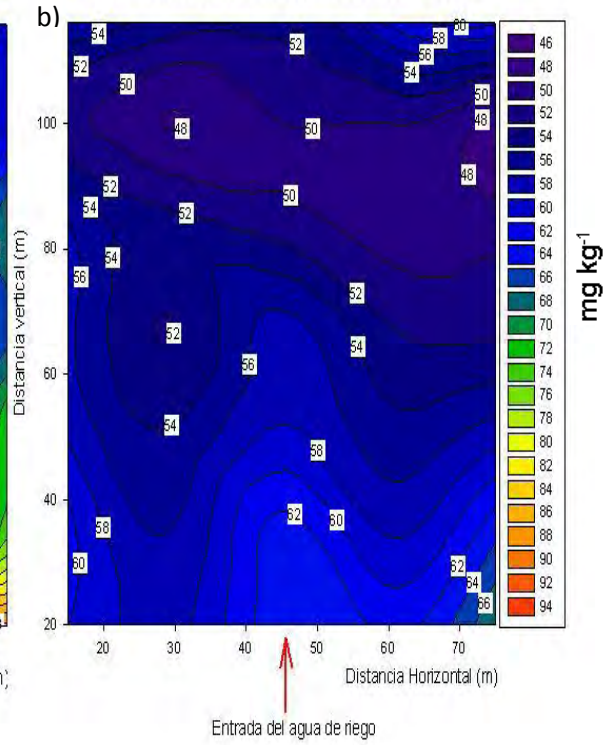


Figura 19: Comparación de la distribución espacial de Cd entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).

Concentración de Cu en la superficie del suelo, 1990



Concentración de Cu en la superficie del suelo, 2009



Cu 2009-1990

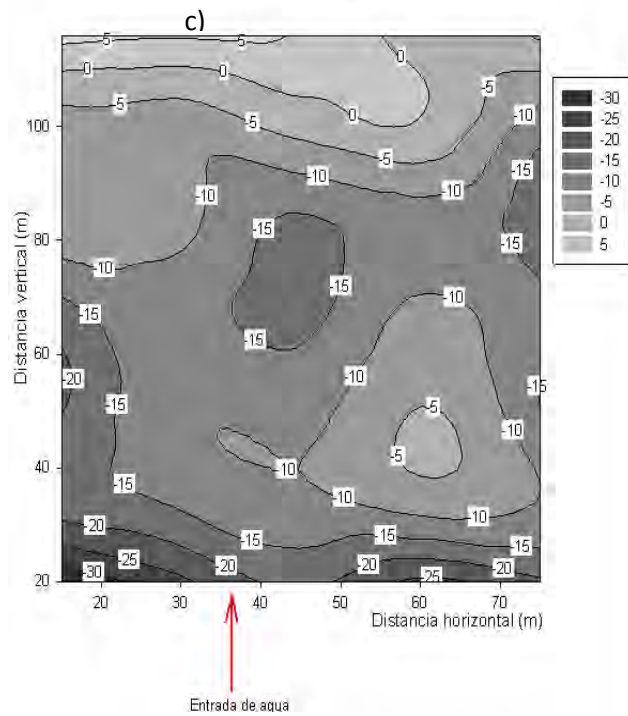
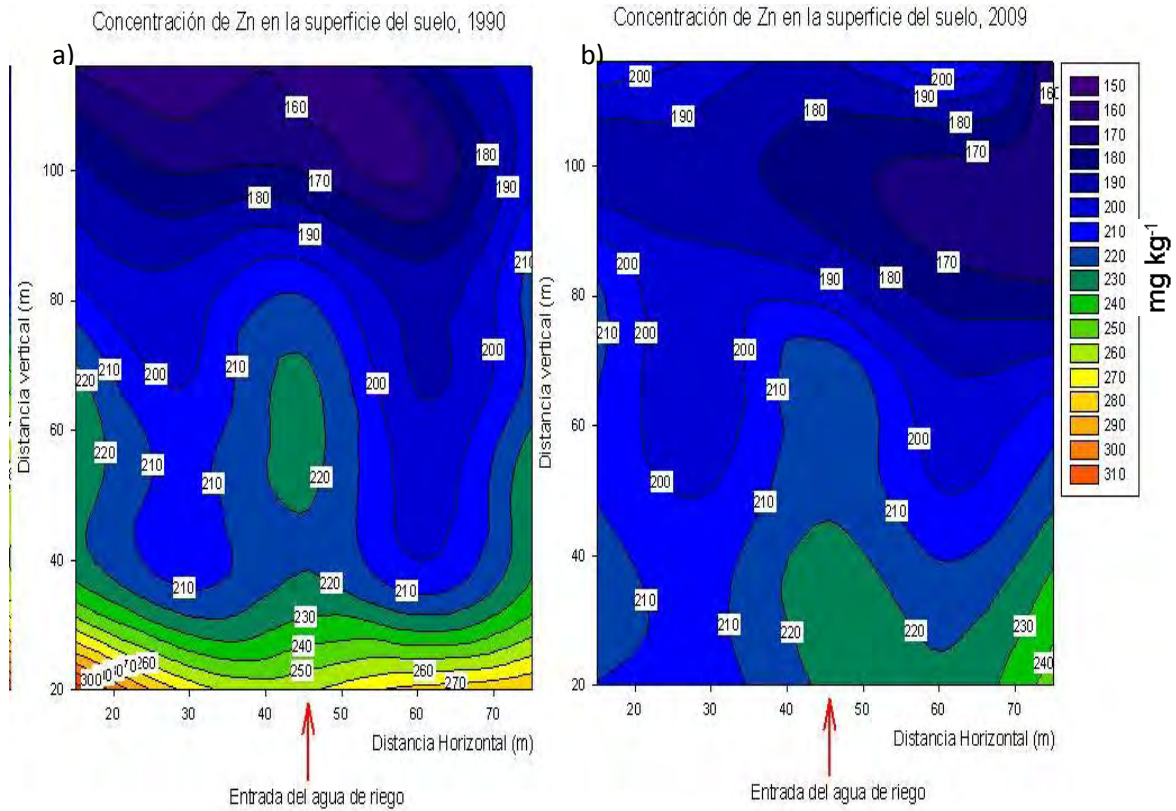


Figura 20: Comparación de la distribución espacial de Cu entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).



c)

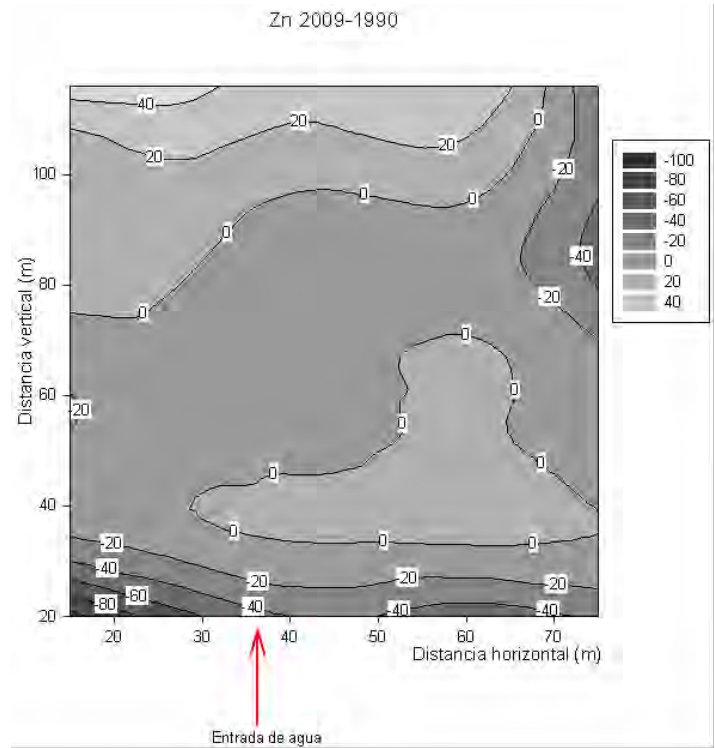


Figura 21: Comparación de la distribución espacial de Zn entre 1990 (a) y 2009 (b) de las diferencias entre ambos muestreos (c).

8. Discusión de resultados

8.1. Diferencias entre los dos métodos.

A continuación se discute a qué se pueden deber las diferencias que se encontraron al repetir las determinaciones de conductividad eléctrica, carbono y de los metales pesados Cu, Pb y Zn en el mismo lote de muestras en 1990 y en 2009. Como en las determinaciones de pH se obtuvieron resultados similares, no se profundiza en la discusión de los mismos.

Conductividad Eléctrica

La C. E. determinada con el conductímetro usado en 2009 casi duplica a la medida en las mismas muestras en 1990. Una posible causa pudiera ser que el aparato usado en 1990 no tuviera el implemento para compensar las desviaciones de las lecturas atribuibles a que la temperatura fuera mayor o menor a 20 grados centígrados, o que éste no estuviera funcionando correctamente. Sin embargo, una desviación de la temperatura estándar (20 grados) sólo tiene un efecto de variación del 2% por cada grado centígrado que aumente la temperatura (Campbell, Bower y Richards. 1949). Por ello se debe asumir que el aparato usado en 1990 no estaba calibrado adecuadamente. Se trató de un puente de conductividad Wheatstone fabricado en los años 1960s, al cual se le adaptó una celda de otro equipo, dado que la celda original estaba averiada. En la actualidad ya no se tiene acceso a este equipo, por lo que no se puede verificar si esto explica las diferencias observadas.

Carbono

Como se mencionó en el apartado de resultados, las mediciones obtenidas con el método usado en 1990 no concuerdan con aquellas hechas en 2009 en algunas muestras, mientras que en otras sí lo hacen. Una posible razón de esta discrepancia en los resultados obtenidos por ambos métodos puede radicar en el hecho de que el método utilizado en 1990 cuantifica únicamente el carbono orgánico, mientras que el método utilizado en 2009 cuantifica el carbono total, es decir, el orgánico y el inorgánico en forma de carbonatos de calcio. Es muy probable que las muestras contengan carbonato de calcio secundario entre 0.5 y hasta 2 % (Anexo I). Para la comparación entre los resultados obtenidos en 1990 y 2009 debería por lo tanto cuantificarse únicamente carbono orgánico. En este

trabajo no dio tiempo para hacer estas determinaciones, por lo que no se realizó el análisis de cambio en el tiempo para esta variable.

Metales pesados

Los resultados obtenidos demuestran que la digestión en el horno de microondas logra extraer más metales pesados que aquella llevada a cabo en una placa de calentamiento. Cuando se usa un sistema abierto durante la digestión, las muestras quedan expuestas a contaminantes presentes en la atmósfera. Sin embargo, se puede excluir esta posibilidad, dado que las digestiones realizadas en la placa de calentamiento (sistema abierto) dieron menores concentraciones que las realizadas en el sistema cerrado (horno de microondas). Una explicación más factible es que en el sistema abierto ocurra una pérdida de compuestos metálicos volátiles durante la oxidación de sustancias orgánicas contenidas en las muestras (Kubrakova, 1997; Nieuwenhuize, *et al.*, 1991; Quevauviller *et al.*, 1993). En el horno de microondas además es factible que se logre extraer una mayor proporción de los metales, dado a que en él la extracción se realiza a una mayor presión con la que se fragmentan materiales sólidos que quedan expuestos al ataque del ácido (Nadkarni, 1984).

De acuerdo con un estudio comparativo entre ambos métodos realizado por Chen y Ma (2001), el horno de microondas extrae más que la placa de calentamiento, excepto para el Cd, del cual ambos métodos extraen la misma cantidad (Tabla 8). El presente estudio muestra el mismo resultado; el horno extrae una mayor cantidad de los metales pesados Cu, Pb y Zn que la placa de calentamiento, mientras que para el Cd las cantidades extraídas por ambos métodos son comparables. En ambos estudios se obtienen porcentajes de recuperación distintos, lo cual podría deberse a que los metales se encuentran asociados a diferentes fracciones en las muestras seleccionadas. En las muestras del Valle del Mezquital, Siebe (1994) determinó mediante un fraccionamiento secuencial que la mayor proporción de los metales pesados adicionados con el riego se asocia a la materia orgánica del suelo. En el estudio de Chen y Ma (2001) no se menciona nada respecto a las formas químicas en las cuales se encuentran los metales en las muestras.

Tabla 8: Comparación entre los métodos de extracción de placa de calentamiento y horno de microondas realizadas en este trabajo y en un estudio de Chen y Ma (2001).

	Placa de Horno Chen y Ma (2001)		%	Placa de Horno Estudio de 1990 y 2009		%
	-----mg kg ⁻¹ -----			-----mg kg ⁻¹ -----		
Pb	2.81	3.81	36	21.7	43.10	99
Cd	0.04	0.07	12	0.85	0.84	-1
Cu	0.92	2.36	157	19.40	30.00	55
Zn	2.66	4.65	75	86.10	117.70	37

8.2 Variación con respecto al tiempo.

pH

Los valores pH se han mantenido constantes en los últimos 19 años, lo cual puede explicarse debido a la gran capacidad amortiguadora de los suelos ya que los efectos del riego con agua residual no han rebasado a la misma.

Al no haber variación del pH se descarta que haya una variación de la concentración de los metales pesados biodisponibles por efecto de cambio de pH.

Conductividad Eléctrica

El aumento en la conductividad eléctrica en el 2009 no necesariamente es atribuible al efecto del tiempo bajo riego a largo plazo. Es muy bien conocido que la concentración de sales solubles es altamente variable en lapsos de tiempo muy cortos. Es mucho más factible que la gran diferencia encontrada entre el muestreo realizado en 1990 y en 2009 se deba a que en ambos muestreos las muestras se hayan colectado en momentos distintos respecto al último riego realizado en la parcela. Si la muestra en 1990 se tomó a pocos días después del riego, es de esperarse que la conductividad eléctrica sea relativamente baja, ya que las sales se lavan con el agua de riego. Pero si en 2009 la muestra se tomó después de varias semanas del último riego, las sales vuelven a emerger en superficie por efecto de la evaporación de agua. Para investigar si la conductividad eléctrica en estos suelos realmente está aumentando, es necesario coleccionar muestras en varios momentos entre riegos y así analizar si en la actualidad el contenido de sal es mayor en cualquier momento muestreado.

Metales pesados

La variación en la concentración de los metales no sólo se debe al efecto del tiempo. En el Valle del Mezquital la forma de riego es por gravedad; es decir que el agua fluye por efecto de una pendiente que hay en el terreno. Siebe (1994) encontró que dentro de una parcela de riego los metales pesados se acumulan en mayor cantidad en la entrada del agua a las parcelas que en la salida.

Este gradiente en la concentración de los metales dentro de la parcela también se encontró en el muestreo realizado en 2009 (Figuras 22 y 23).

En las Figuras 22 y 23 se grafica la correlación que hay entre la distancia del punto de muestreo a la entrada de agua a la parcela vs. la concentración de los elementos.

Para el pH y la C. E., tanto de 1990 y 2009 no se observa una tendencia a disminuir o aumentar mientras más lejos está el punto de muestreo de la entrada de agua. Los coeficientes de determinación son bajos y se encuentran entre 0.008 y 0.2 (Figura 22).

El carbono en 1990 tiende a disminuir su concentración a mayor distancia de la entrada de agua, con un coeficiente de determinación de 0.32, mientras que en el 2009 la tendencia fue al revés: la concentración aumenta con la distancia. Este cambio en la tendencia del C en 2009 se podría deber a que hace aproximadamente 19 años desplazaron el suelo de la parte alta de la parcela hacia la parte baja de la misma (Figura 22).

Para los metales pesados se observa que entre más lejano se encuentra el punto de muestreo de la entrada del agua, menor es su concentración. Esta tendencia se observa con mayor claridad en el muestreo realizado en 1990; los coeficientes de determinación se encuentran en un rango de 0.57 a 0.67. En el 2009 se sigue mostrando la misma tendencia, pero ésta es menos marcada; la variación que presentan los datos es mayor, por lo cual el rango de los valores de coeficientes de determinación se encuentra entre 0.27 y 0.34 (Figura 23).

Este gradiente en la parcela podría dificultar el análisis de los cambios en el tiempo por efecto del riego, ya que si en el muestreo del 2009 la rejilla de muestras se movió unos metros más hacia la entrada de la parcela los valores de los metales también aumentarían. Para estimar la importancia de la ubicación de la retícula dentro de la parcela con respecto a la entrada del agua, se realizó un ejercicio sobre el mapa de la distribución espacial de los metales desplazando la retícula 1, 2, 4 10 y 20 m al norte y sur de la parcela, respectivamente. Los valores

de este ejercicio se encuentran en el anexo III. En la tabla 8 se muestran los estadísticos descriptivos obtenidos con los datos del ejercicio de desplazamiento.

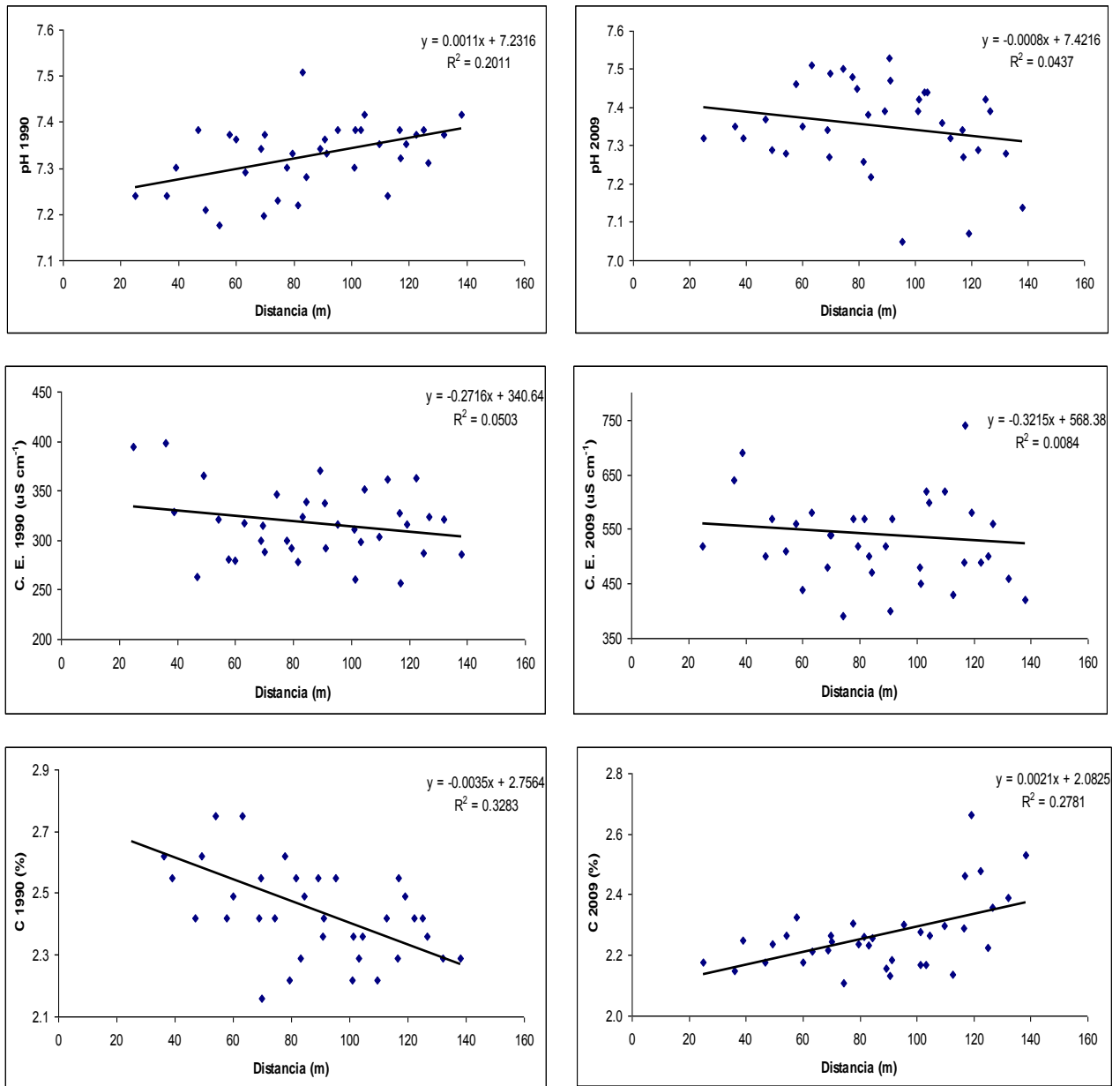


Figura 22: Gráficas de correlación entre la concentración y la distancia del punto de muestreo a la entrada de agua a la parcela.

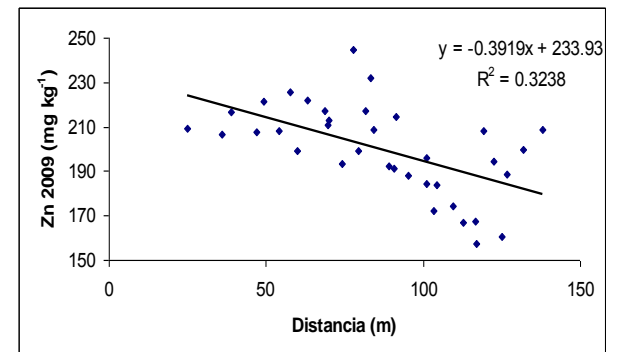
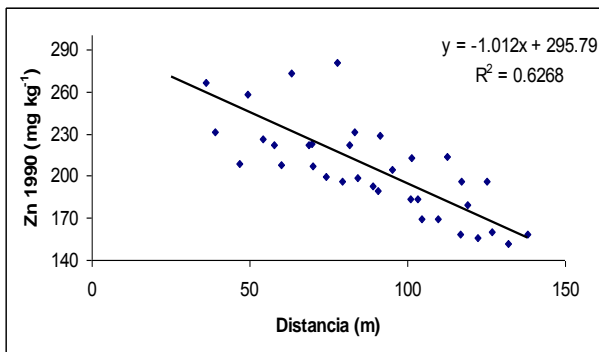
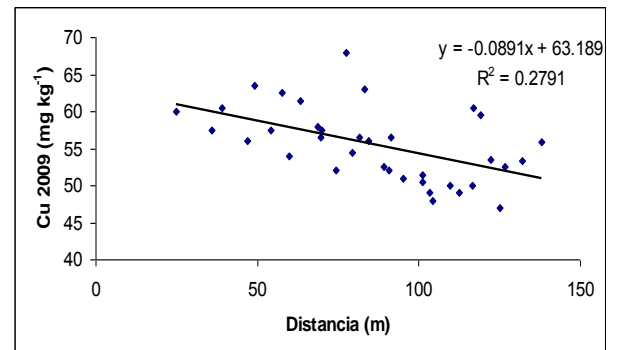
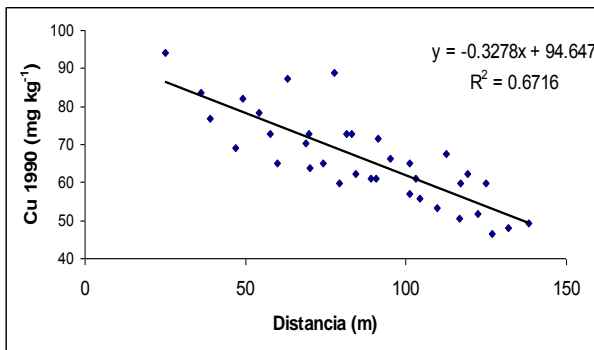
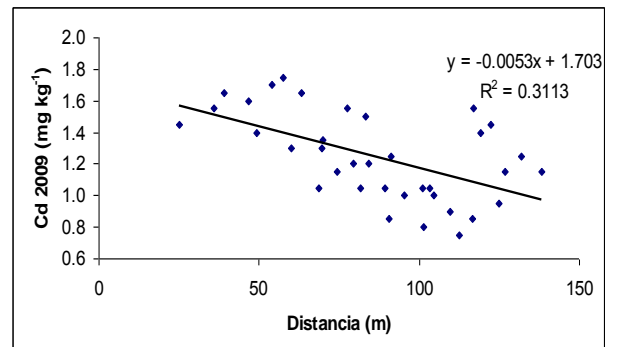
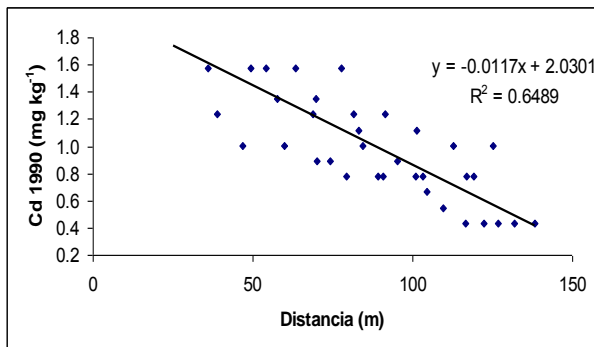
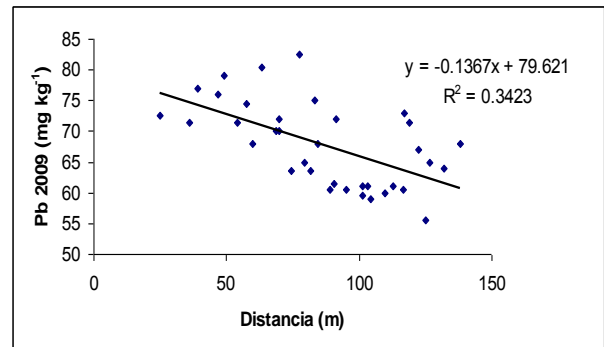
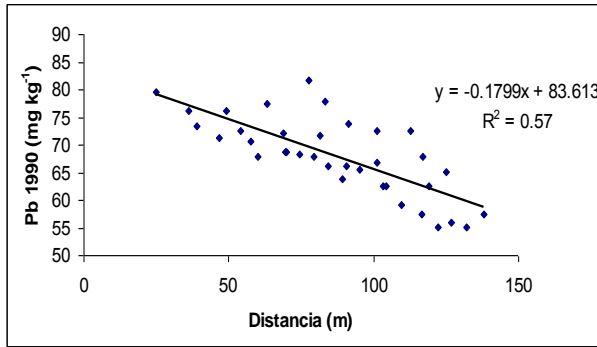


Figura 23: Comparación de la relación entre la distancia del punto de muestreo a la entrada del agua de riego y la concentración de los metales pesados en ambos muestreos.

Tabla 8: Contenidos de Pb estimados dentro de la parcela con base en la distribución espacial determinada en 2009 y desplazando la retícula del muestreo 1, 2, 5, 10 y 20 m en dirección norte, sur o este. Todos los datos de esta prueba se compilaron en el anexo V.

	0 m	1m S	2m S	5m S	10m S	20m S	5 m E	10m E	5m N	10m N
Promedio	66.56	66.83	66.22	66.94	67.28	68.67	66.50	66.44	66.00	65.67
S	6.50	6.72	8.01	6.95	7.56	8.18	7.05	7.30	6.25	5.57
Max	80.00	82.00	82.00	82.00	84.00	88.00	82.00	82.00	78.00	76.00
Min	56.00	58.00	42.00	56.00	58.00	56.00	54.00	54.00	58.00	56.00
R	24.00	24.00	40.00	26.00	26.00	32.00	28.00	28.00	20.00	20.00

Haciendo el ejercicio de desplazamiento de la rejilla a diferentes distancias se observa que el contenido de Pb sólo aumenta la concentración media del metal en la parcela si ésta se desplaza por más de 10 o 20 m hacia el sur (entrada de agua a la parcela); al desplazarlo hacia el norte (salida del agua de la parcela) la concentración disminuye ligeramente.

Con este ejercicio se descarta que haya un efecto por el desplazamiento de la rejilla de muestreo, ya que es poco probable que se haya movido más de 10 m entre un muestreo y otro, dado que la ubicación de la rejilla dentro de la parcela se estableció en ambos muestreos por medio de una medición con cinta métrica a partir de una de las esquinas de la parcela y el desplazamiento de una rejilla respecto a la otra sólo puede abarcar pocos metros.

En las gráficas de distribución de las diferencias entre los valores de los dos muestreos del apartado 7.3 se observa que disminuyó la concentración de los metales en la entrada del agua de la parcela, se mantuvo constante en la parte central y aumentó en la parte baja (salida del agua de la parcela).

Hace 20 años aproximadamente se les informó a los usuarios del agua residual que para poder seguirla usando deberían nivelar sus terrenos para que al regar sus parcelas necesitaran menos agua. Para nivelar sus parcelas movieron la tierra de la parte alta de la parcela y la trasladaron a la baja. Esto ocasionó que el suelo de la parcela se mezclara.

Esto podría explicar el aumento de la concentración de los metales pesados en la salida del agua de la parcela (parte baja) y la disminución en la parte alta de la misma.

9. Conclusiones

No se detectaron cambios en las concentraciones de los metales pesados durante los últimos 19 años.

Se encontró un gradiente en la concentración de los metales pesados; ésta tiende a incrementarse a medida que se acerca a la entrada de agua a la parcela. Este fenómeno se observa en ambos muestreos.

La concentración de metales pesados disminuyó en la entrada de agua a la parcela, no presentó cambios en la parte media y aumentó en la salida de agua de la parcela. Lo anterior se le atribuye a la mezcla de suelo en toda la parcela provocada por la nivelación del terreno.

El método de extracción de metales pesados utilizado en el 2009 (horno de microondas) extrae más que el utilizado en 1990 (placa de calentamiento).

El pH se mantuvo constante en los 20 años. No se puede llegar a una conclusión en la CE debido a que pueden influir otras fuentes de variación como el momento del muestreo (días después del último riego). Lo mismo sucedió con el carbono ya que los métodos utilizados extraen diferentes fracciones.

10. Recomendaciones para futuros monitoreos

Para poder determinar la variación temporal de los metales pesados es recomendable tener un punto de referencia fijo para poder localizar con exactitud el punto en el que fue tomada la muestra, para no tener duda si la rejilla se movió.

Es necesario aumentar el número de muestras para disminuir el efecto de la variación en espacio que hay dentro de la parcela.

Para poder comparar la variación en tiempo es necesario almacenar las muestras para que al realizar el nuevo estudio éstas sean analizadas por métodos y equipos similares, para no tener efecto de variación con respecto a los métodos utilizados.

11. Bibliografía

- ❖ Alloway, B. J. 1990. Heavy Metals in Soils. Blackie. New York
- ❖ Bowen, H. J. M. 1979. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, London.
- ❖ British Geological Survey, 1998. Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, México. En Final Report, British Geological Survey.
- ❖ Bahri, A., 1999. Agricultural reuse of wastewater and global water management. Water Sci. Technol. 40, 339–346.
- ❖ Buckman, H. y Brady, N. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Ed. Limusa. 4ª Edición. México.
- ❖ Campbell, R. B., Bower, C. A. y Richards, L. A. 1949. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soils extracts. Soil Science Soc. Amer. Proc. 13:66-69.
- ❖ Chen, M. y Ma, L. Q. 2001. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. Soil Science. Soc. Am. J., Vol 65:491-499.
- ❖ Commission of the European Communities. 1986. Council directive (86/278 EEC) on the protection of the environment and in particular of the soil when sewage sludge is used in agriculture. Off J. European Community L181 (Annex 1A). pp 6-12.
- ❖ González, L. 1968. Tipos de vegetación del Valle del Mezquital, Paleoecología 2. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México. 53 p.
- ❖ Jiménez, B. 2004. El agua en México Vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México D. F.
- ❖ Kubrakova, I. 1997. Microwave-assisted sample preparation and preconcentration for ETAAS. Spectrochim. Acta, B 52:1469-1481.
- ❖ Mitchell, R, L. 1964. Chemistry of the soil. 2ª edición. Ed. Bear, F. E. Reinhold, New York, 320-368.
- ❖ Miller, J. N. y Miller, J. C. 2002. Estadística y quimiometría para química analítica. 4ª Edición. Prentice Hall. Madrid, España.

- ❖ Nadkarni, R. A. 1984. Application of microwave oven sample dissolution in analysis. *Anal. Chem.* 56:2233:2237.
- ❖ Nieuwenhuize, J., C. H. Poley-Vos, A. H. van den Akker, y W. van Delf. 1991. Comparison of microwave and conventional extraction techniques for the determination of metals in soils, sediment, and sludge samples by atomic spectrometry. *Analyst* 116:347-351.
- ❖ Palacio-Prieto, C. Siebe y A. Cortez (1994). Variabilidad y distribución espacial de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el Distrito de Riego 03 Hidalgo, México. Parte 1: Semivariogramas. *Rev. Mex. Cien. Geol.* Vol 11 (1), pp 62-67.
- ❖ Quevauviller, P., J. Imbert, y M. Olle.1993. Evaluation of the use of microwave oven system for the digestion of environmental samples. *Microchim. Acta* 112:147-154.
- ❖ Reyes. 2004. Compartimentalización de Carbono en suelos regados con agua residual en el Valle del Mezquital, Hidalgo, BS Thesis, UNAM, México, D. F.
- ❖ Richards, L. A. 1984. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México.
- ❖ Rose, A. W., Hawkes, H. E. y Webb, J. S. 1979. *Geoquimistry in mineral exploration*, 2ª Edición, Academic Press, London.
- ❖ Schlichting, E. H. P. Blume y K. Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum*. 2ª ed. Verlag Paul Perey, Hamburg & Berlin.
- ❖ Siebe, Ch. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10, pp. 15-21.
- ❖ Siebe, Ch y Cifuentes, E. 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An Overview. *Int. J. Environ. Health Res.* Vol. 5, pp. 161-173.
- ❖ Tiller, K.G., 1989. *Advances in Soil Science*, vol. 9. Stewart, New York.
- ❖ Webber, M. D., Kloke, A and Tjell, J. C. 1984. Processing and Use of Sewage Sludge, eds. L'Hermite, P. and Ott, J. D. Reidel, Dordrecht. 371-386.

12. Anexos

Anexo 1. Tabla de descripción del perfil del suelo en la parcela bajo estudio. Descrita por Siebe (1994).

Horizonte	Profundidad	Color	CaCO ₃	Textura	Piedras	pH	CE 1:5	Ct	Corg	C-CO ₃	CIC
	Cm		%		Vol (%)		mS cm-1	%	%	%	meq kg-1
Ap	0-23	10YR2/2	0-0.5	CRL	0	7.7	0.26	2.6	2.4	0.19	369
Ah1	23-38	10YR2/2	0.5-2	CRL	0	7.66	0.25	2.4	2.2	0.22	362
Ah2	38-60	10YR2/2	0.5-2	CRL	0	7.73	0.26	1.6	1.3	0.28	369
Ah3	60-90	10YR2/2	0-0.5	CRL	0	7.68	0.24	1.5	1.4	0.06	331

Anexo II. Resultados de la comparación entre los métodos de 1990 y 2009.

CLAVE	Datos 2009							Datos 1990						
	pH 1:2.5	C.E 1:5 mS cm-1	C total %	Pb mg kg-1	Cd mg kg-1	Cu mg kg-1	Zn mg kg-1	pH	C.E mS cm-1	C total %	Pb mg kg-1	Cd mg kg-1	Cu mg kg-1	Zn mg kg-1
Ma-1	7.24	0.43	2.13	46	1.1	31	126	7.51	0.27	1.68	21	1	20	89
Ma-6	7.08	0.37	1.98	63	1.3	42.5	160	7.41	0.19	2.07	37	1.3	29	123
Ma-11	7.12	0.39	2.06	48.5	0.7	34	131.5	7.46	0.2	1.97	23	0.8	22	90
Ma-13	6.78	0.36	2.47	66	1.75	54	186	7.08	0.19	2.02	43	1.8	38	153
Ma-16	6.73	0.36	2.46	64	1.6	48	177	7	0.18	2.43	38	1.5	34	138
Ma-18	7.07	0.47	2.57	60.5	1.6	45.5	176.5	7.45	0.23	3.21	29	1.3	30	130
Ma-22	7.44	0.36	1.86	25.5	0.25	14	58	7.64	0.26	1.41	8	0.2	5	35
Ma-24	7.42	0.37	1.74	22	0.4	14	57	7.65	0.26	1.63	7	0.2	7	38
Ma-45	7.32	0.69	3.03	19.5	-0.2	11	53.5	7.69	0.37	2.13	6	0.2	6	30
Ma-50	7.42	0.17	0.99	16	-0.15	6	51.5	7.66	0.1	0.84	5	0.2	3	35
Media	7.16	0.4	2.13	43.1	0.84	30	117.7	7.46	0.23	1.94	21.7	0.85	19.4	86.1
Desv Est	0.26	0.13	0.56	20.4	0.74	17.52	57.19	0.24	0.07	0.63	14.67	0.62	13.25	48.49
Varianza	0.07	0.02	0.31	415.99	0.54	306.94	3271.12	0.06	0.01	0.4	215.34	0.38	175.6	2351.66
Mínimo	6.73	0.17	0.99	16	-0.2	6	51.5	7	0.1	0.84	5	0.2	3	30
Máximo	7.44	0.69	3.03	66	1.75	4	186	7.69	0.37	3.21	43	1.8	38	153
Rango	0.71	0.52	2.04	50	1.95	48	134.5	0.69	0.27	2.37	38	1.6	35	123

Anexo III. Resultados de los análisis muestreo de 1991 (Siebe, 1994).

Muestra	Pb	Cd	Cu	Zn	pH	C.E	Corg	Arena	Limo	Arcilla
	mg kg ⁻¹				01:2.5	µScm ⁻¹		%		
1	68	0.8	62	203	7.32	280	2.55	8.4	43.4	48.2
2	63	0.8	65	184	7.35	345	2.49			
3	55	0.5	53	158	7.37	496	2.42	6.8	43.9	49.4
4	56	0.5	47	162	7.31	354	2.36			
5	55	0.5	49	152	7.37	350	2.29			
6	58	0.5	50	160	7.42	312	2.29	6.6	44.4	48.9
7	67	0.8	59	188	7.3	340	2.22			
8	63	0.7	58	172	7.42	384	2.36			
9	59	0.6	55	172	7.35	331	2.22			
10	58	0.5	52	160	7.38	357	2.29			
11	65	1	62	203	7.38	314	2.42			
12	73	1	71	222	7.24	394	2.42	8.2	44.8	47
13	63	0.8	64	188	7.38	326	2.29			
14	66	0.9	70	212	7.38	345	2.55	6.7	46.4	47
15	64	0.8	64	199	7.34	405	2.55			
16	66	1	65	205	7.28	370	2.49	9.3	42.8	47.9
17	69	1.4	77	233	7.2	343	2.55			
18	68	0.9	68	207	7.23	378	2.42			
19	72	1.2	77	232	7.22	303	2.55			
20	66	0.8	64	195	7.36	368	2.36			
21	73	1.1	68	221	7.38	284	2.36			
22	74	1.2	75	240	7.33	319	2.42	9.5	44.4	46.1
23	68	0.8	62	203	7.33	319	2.22			
24	72	1.2	74	232	7.34	328	2.42	12.3	41.1	46.6
25	68	1	68	216	7.36	305	2.49			
26	73	1.6	83	237	7.18	350	2.75	12.5	40.9	46.6
27	73	1.2	81	242	7.3	359	2.55			
28	71	1	73	217	7.38	287	2.42			
29	71	1.4	77	232	7.37	307	2.42			
30	69	0.9	67	215	7.37	315	2.16			
31	78	1.1	77	242	7.51	358	2.29			
32	82	1.6	95	298	7.3	328	2.62	16.2	40.2	43.6
33	78	1.6	93	290	7.29	347	2.75			
34	76	1.6	87	273	7.21	399	2.62	16	37.5	46.5
35	76	1.6	89	282	7.24	434	2.62			
36	80	2.3	101	339	7.24	431	3.08	16.1	39.4	44.5
Promedio	68.1	1.1	69.4	216.2	7.33	346.11	2.45	10.72	42.43	46.86
S	7.01	0.4	13.2	42.4	0.07	38.85	0.18	3.77	2.61	1.67
S ²	49.1	0.2	174	1799	0.01	1509.2	0.03	14.21	6.81	2.78
Máx.	55	0.5	47.3	152.2	7.17	280	2.16	6.6	37.5	43.6
Min	81.6	2.3	101	338.9	7.5	434	3.08	16.2	46.4	49.4
Rango	26.6	1.8	53.2	186.7	0.33	154	0.92	9.6	8.9	5.8

Anexo IV. Resultados de los análisis del muestreo del 2009.

Muestra	Pb	Cd	Cu	Zn	pH	C.E.	Corg	Arena	Limo	Arcilla
	mg kg ⁻¹				½.5	µS cm ⁻¹		%		
1	73	1.55	61	158	7.27	740	2.46	6.1	48.8	45.1
2	72	1.4	60	208	7.07	580	2.66			
3	67	1.45	54	195	7.29	490	2.48	4.8	52.1	43.2
4	65	1.15	53	189	7.39	560	2.36			
5	64	1.25	53	200	7.28	460	2.39			
6	68	1.15	56	209	7.14	420	2.53	5.2	43.3	51.5
7	61	1.05	50	185	7.39	480	2.28			
8	59	1	48	184	7.44	600	2.27			
9	60	0.9	50	175	7.36	620	2.3			
10	61	0.85	50	168	7.34	490	2.29			
11	56	0.95	47	161	7.42	500	2.23			
12	61	0.75	49	167	7.32	430	2.14	8.4	47.6	44.0
13	61	1.05	49	172	7.44	620	2.17			
14	61	1	51	188	7.05	940	2.3	7.4	55.5	37.1
15	61	1.05	53	193	7.39	520	2.16			
16	68	1.2	56	209	7.22	470	2.26	7.9	52.0	40.2
17	70	1.3	57	211	7.27	540	2.26			
18	64	1.15	52	194	7.5	390	2.11			
19	64	1.05	57	217	7.26	570	2.26			
20	62	0.85	52	192	7.53	400	2.13			
21	60	0.8	52	196	7.42	450	2.17			
22	72	1.25	57	215	7.47	570	2.18	11.6	46.3	42.1
23	65	1.2	55	199	7.45	520	2.24			
24	70	1.05	58	217	7.34	480	2.22	10.7	43.9	45.4
25	68	1.3	54	199	7.35	440	2.18			
26	72	1.7	58	208	7.28	510	2.27	10.6	40.5	48.9
27	77	1.65	61	217	7.32	690	2.25			
28	76	1.6	56	208	7.37	500	2.18			
29	75	1.75	63	226	7.46	560	2.33			
30	72	1.35	58	213	7.49	540	2.25			
31	75	1.5	63	232	7.38	500	2.23			
32	83	1.55	68	245	7.48	570	2.31	18.7	52.5	28.8
33	81	1.65	62	222	7.51	580	2.21			
34	79	1.4	64	222	7.29	570	2.24	17.2	50.5	32.3
35	72	1.55	58	207	7.35	640	2.15			
36	73	1.45	60	210	7.32	520	2.18	15.1	44.3	40.6
Promedio	67.79	1.25	55.48	200.01	7.35	540.56	2.27	10.3	48.11	41.59
S	6.87	0.28	4.96	20.25	0.11	103.31	0.12	4.62	4.54	6.46
S ²	47.18	0.08	24.6	410.01	0.01	10673.97	0.01	21.3	20.61	41.69
Máx.	55.5	0.75	47	157.5	7.05	390	2.11	4.76	40.51	28.83
Min.	82.5	1.75	68	244.5	7.53	940	2.66	18.65	55.46	51.47
Rango	27	1	21	87	0.48	550	0.55	13.9	14.95	22.65

Anexo V. Contenidos de Pb estimados dentro de la parcela con base en la distribución espacial determinada en 2009 y desplazando la retícula del muestreo 1, 2, 5, 10 y 20 m en dirección norte o sur.

Muestra	0 m	1m S	2m S	5m S	10m S	20m S	5 m E	10m E	5m N	10m N
1	72	70	68	64	58	56	68	64	72	72
2	70	70	68	66	62	58	76	72	72	72
3	66	66	64	64	62	60	68	68	68	68
4	64	64	64	62	60	58	64	66	66	66
5	64	62	42	62	60	58	62	64	64	64
6	66	66	64	64	62	60	64	62	66	66
7	60	60	60	62	64	68	60	58	60	62
8	58	58	58	58	58	60	58	58	58	60
9	60	58	58	58	58	60	60	60	60	68
10	60	60	60	58	60	60	60	58	62	64
11	56	58	56	56	58	60	54	54	58	62
12	60	60	60	60	58	62	58	60	58	56
13	60	60	60	60	60	62	60	60	60	58
14	60	60	60	60	60	64	60	60	58	58
15	60	60	60	60	62	64	60	60	58	58
16	66	68	68	68	68	68	64	62	64	62
17	68	68	68	68	70	72	66	64	68	68
18	62	62	62	64	64	68	62	62	62	60
19	62	62	64	64	66	70	62	62	60	60
20	60	60	60	62	62	66	60	60	60	60
21	58	60	60	62	66	72	58	58	58	60
22	70	70	72	72	74	74	72	74	66	62
23	64	64	64	66	68	72	64	68	62	62
24	68	70	70	70	72	74	68	66	66	64
25	66	68	68	70	72	76	68	68	64	64
26	70	70	72	72	74	76	70	68	70	68
27	76	76	76	76	74	72	76	74	74	72
28	74	74	76	76	74	70	74	74	72	70
29	72	74	74	74	76	78	72	72	72	70
30	70	72	72	74	76	80	70	72	68	66
31	74	74	74	76	78	82	74	76	72	72
32	80	82	82	82	84	88	82	82	78	72
33	78	80	80	80	82	82	80	80	76	74
34	78	78	78	78	78	76	78	80	76	74
35	72	70	70	70	70	74	72	76	74	74
36	72	72	72	72	72	72	70	70	74	76
Promedio	66.56	66.83	66.22	66.94	67.28	68.67	66.50	66.44	66.00	65.67
Desv Est	6.50	6.72	8.01	6.95	7.56	8.18	7.05	7.30	6.25	5.57
Max	80.00	82.00	82.00	82.00	84.00	88.00	82.00	82.00	78.00	76.00
Min	56.00	58.00	42.00	56.00	58.00	56.00	54.00	54.00	58.00	56.00
Rango	24.00	24.00	40.00	26.00	26.00	32.00	28.00	28.00	20.00	20.00