dosis recomendada, suelos con pH superiores a 6.5 y prácticas correctas de aplicación; la concentración de metales encontradas en porciones comestibles están por debajo del límite de tolerancia (U.S. Environmental Protection Agency, 1995; Cox *et al.*, 2002).

Se ha encontrado que la acumulación de metales pesados es diferente entre los órganos de las plantas; por ejemplo, se observó que la concentración de cadmio tuvo una fluctuación entre 10 y 25 mg kg^{-1} en acelga y espinaca cuyas porciones comestibles son las hojas, las cuales fueron superiores a betabel y zanahoria (raíces) con valores de 2 hasta 4 mg kg^{-1}; en tomate (fruto) se observaron concentraciones menores consistiendo entre 1 y 3 mg kg^{-1} y con la menor concentración se encontró el ejote (semilla) con valores menores a 1 mg kg^{-1}. En el caso del zinc se observó el mismo patrón con respecto al cadmio. Estos resultados muestran que deberá tenerse cuidado con la concentración de cadmio en aquellas especies en donde la parte comestible sean las hojas o raíces, por ejemplo, (Cox *et al.*, 2002) cuando se aplicaron 100 t ha^{-1}, las concentraciones de metales pesados en espinaca y acelga sobrepasaron el límite de tolerancia; mientras que para ejote, tomate y betabel permanecieron por debajo de este límite (Cox *et al.*, 2002).

Aplicaciones de altas dosis de lodo incrementan la concentración de metales pesados en la solución del suelo; sin embargo, a medida que pasa el tiempo esta concentración disminuye debido a que los metales pesados reaccionan con los minerales nativos en el suelo formando compuestos insolubles e inmovilizando los metales pesados. Estos resultados fueron comprobados en una investigación a largo plazo utilizando lodos con concentraciones de 200 a 300 mg kg^{-1} y 3,300 a 4,800 mg kg^{-1} de cadmio y zinc, respectivamente en dosis de 0, 20, 40, 80 y 100 t ha^{-1} anuales por un período de 5 años. Las concentraciones de cadmio y zinc en espinaca, acelga, betabel,

zanahoria, ejotes y tomate, fueron monitoreadas por un período de 15 años después de la aplicación de los lodos, encontrando que la concentración de cadmio y zinc en el tejido de los cultivos declinaron a medida que fue pasando el tiempo (Cox *et al*., 2002).

Los lodos contienen altos niveles de nutrimentos esenciales para las plantas, así como materia orgánica que mejora las características físicas y biológicas; además, la correcta aplicación de lodo no incrementa la concentración de metales pesados del tejido vegetal a niveles riesgosos.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el lodo en el cultivo de tomate en el primer ciclo de siembra, para ver su efecto en el desarrollo, y rendimiento de tomate. Así, como determinar el contenido de metales pesados en fruto y compararlo con los límites de tolerancia permitidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales localizada en Dulces Nombres municipio de Pesquería N.L. con coordenadas geográficas de 25° 47" de latitud norte y 100° 02" de longitud oeste. El suelo donde se desarrolló el experimento es calcáreo con textura franco-arcillosa con un pH de 7.8.

Los tratamientos que se evaluaron fueron los siguientes:

1.- Testigo (sin aplicación).

2.- Fertilizante inorgánico. Se aplicó una dosis total de 180-180-100 dividida en tres etapas de crecimiento del cultivo de tomate. En pretrasplante se utlizó la dosis de 100-180-50, al inicio de floración 40-00-50 y en primer corte 40-00-00.

3.- Lodo deshidratado en dosis de 4 t ha^{-1} base seca.

4.- Lodo deshidratado en dosis de 8 t ha^{-1} base seca.

5.- Lodo líquido en dosis de 8 t ha^{-1} base seca.

El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Las parcelas fueron de 9m (5 surcos de 1.8 m) de ancho por 24 m de longitud, utilizando los tres surcos centrales como útiles, eliminando 2 m de cada extremo de los surcos, con un área total del experimento de 4,500 m^2.

El lodo líquido utilizado provino de digestores anaerobios con 3% de sólidos, el cual se aplicó con una pipa con capacidad de 6,000 litros, sobre la superficie del suelo e incorporándolo al siguiente día con el uso de una rastra. El lodo deshidratado se obtuvo después de haber pasado por los filtros prensa con 20% de sólidos aproximadamente y

se aplicó por medio de una estercoladora comercial incorporándolo también mediante una rastra. El fertilizante se dividió en tres aplicaciones; la primera de pre-trasplante (100-180-50), la segunda al inicio de floración (40-00-50) y la tercera en el primer corte (40-00-00). La aplicación del lodo y la aplicación de pre-trasplante de fertilizante inorgánico se efectuó el 17 de Febrero de 1999.

El híbrido de tomate tipo saladette con crecimiento determinado que se utilizó fué "Yaqui", el cual ha demostrado ser un buen material para la zona. La semilla se sembró en charolas de poliestireno en invernadero en enero de 1999, para luego ser trasplantadas al campo definitivo en febrero del mismo año, utilizando la técnica de tutorado en el cultivo para evitar el contacto de los frutos con el suelo. Se efectuaron aplicaciones de pesticidas de acuerdo con las plagas y/o enfermedades que se presentaron.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo de acuerdo al diseño experimental planteado utilizando el paquete estadístico " Diseños Experimentales FAUANL" (Olivares, 1994). La comparación de medias se efectuó por medio de la prueba diferencia mínima significativa (DMS) cuando se encontró diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$). Las variables analizadas fueron las siguientes:

Altura de Planta. Esta variable se midió a los 22 y 42 días después del trasplante, seleccionando 10 plantas en forma aleatoria en cada unidad experimental.

Ancho de Planta. Se midió a los 42 días después del trasplante, seleccionando 10 plantas en forma aleatoria en cada unidad experimental.

Rendimiento. Se dividió en precoz (tres primeros cortes), tardío (dos últimos cortes) y total (suma de todos los cortes). La cosecha se efectuó cuando el fruto adquiría un color verde sazón.

Metales pesados en fruto: Para cada tratamiento se obtuvo una muestra compuesta formada de frutos de las cuatro repeticiones y los cinco cortes tomados aleatoriamente de cada unidad experimental. Los frutos se lavaron agregando 5 g de jabón en un litro de agua destilada; posteriormente, se enjuagaron en agua destilada, se cortaron en rodajas y colocaron en la estufa por 24 horas a una temperatura de 85°C. Finalmente, se introdujeron en bolsas de plástico herméticas para su almacenamiento temporal. De la muestra compuesta se envió a la Universidad Estatal de Pennsylvania una submuestra de 500 g.

La digestión se efectuó vía microondas en un recipiente cerrado sometido a presión y temperatura utilizando ácido nítrico como agente oxidante (Miller, 1998), el análisis de los metales pesados se realizó a través del método Dry Ash (Dahlquist y Knoll, 1978), utilizando "inductively coupled plasma atomic emission spectrometer", analizando los siguientes metales pesados; arsénico, cobre, zinc, plomo, cadmio, cromo, molibdeno y níquel, presentándose los resultados en mg de metal pesado por kilogramo de fruto.

RESULTADOS

Altura de Planta. No se encontró diferencia estadística a los 22 y 42 días del trasplante entre los tratamientos. Sin embargo se observó mayor vigor de las plantas en los tratamientos donde se aplicó lodo y fertilizante inorgánico.

Ancho de Planta. Se analizó estadísticamente encontrándose diferencia significativa. El mayor ancho de planta se obtuvo con aplicación de lodo líquido (8 t ha^{-1}), seguido por deshidratado (8 t ha^{-1}), el cual fue igual estadísticamente a fertilización inorgánica. A su vez, la fertilización inorgánica fue igual estadísticamente a lodo deshidratado 4 t ha^{-1} y éste último igual al testigo (Cuadro 5.1).

Rendimiento Precoz. Al efectuar el análisis de varianza se observó diferencia significativa por lo que se procedió a realizar las comparaciones de medias. Los resultados indicaron que el tratamiento con lodo líquido (8 t ha^{-1}) obtuvo los rendimientos más altos, seguido por lodo deshidratado en las dos dosis (8 t ha^{-1} y 4 t ha^{-1}) y fertilización química. Además se observó que fertilización y testigo fueron iguales estadísticamente (Cuadro 5.1).

Rendimiento Tardío. Después de efectuar el análisis de varianza no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos (Cuadro 5.1).

Rendimiento Total. El análisis de varianza mostró diferencia estadística entre los tratamientos. Los valores más altos se obtuvieron con lodo líquido (8 t ha^{-1}), el resto de los tratamientos fueron iguales estadísticamente (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Ancho de planta, rendimiento precoz y total en el cultivo de tomate comparando el uso de lodo vs fertilización inorgánica y testigo.

Tratamiento	Ancho planta (cm)	Rendimiento precoz (t ha^{-1})	Rendimiento total (t ha^{-1})
Testigo	27 80 D	1 58 C	9 99 B
Fertilizacion (180-180-100)	36.00 BC	5.48 BC	14.24 B
Lodo deshidratado 4 t ha^{-1}	31.73 CD	7.86 B	15.60 B
Lodo deshidratado 8 t ha^{-1}	38.68 B	9.85 B	18 65 B
Lodo líquido 8 t ha^{-1}	47.32 A	19 98 A	33 12 A
D.M.S (0.05)	5.07	5 31	9 23

Concentración de Metales Pesados en Fruto. Los resultados se muestran en la Cuadro 5.2, donde se aprecia que todos los elementos están por debajo de los límites de tolerancia permitidos para cultivos agrícolas (Sopper, 1993). Además, se observó que para arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, selenio y molibdeno, en todos los tratamientos donde se aplicó lodo y fertilizante inorgánico los valores obtenidos están por debajo de los límites de detección del equipo. En lo que respecta a cobre, se aprecia que los valores más altos se encontraron al aplicar lodo deshidratado 8 y 4 t ha^{-1}. y en zinc la menor concentración se obtuvo en frutos utilizando fertilizante inorgánico, pero con mayor concentración se encontró el testigo y lodo en forma líquida ó deshidratada en ambas dosis (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Concentración de metales pesados en frutos de tomate desarrollados en suelos normales(testigo), fertilización inorgánica, lodo líquido y deshidratado (mg kg^{-1}).

Tratamiento	Cadmio	Cobre	Arsenico	Níquel	Plomo	Zinc	Molibdeno
Testigo	≤0.78	8.63	2 03	≤0 78	≤1 25	27 86	≤39 06
Fertilizante (180-180-100)	≤0.78	6.21	≤1 56	≤0.78	<1 25	14 58	≤39 06
Lodo deshidratado 4 ton ha^{-1}	≤0.78	9 95	≤1.56	≤0.78	≤1.25	25.42	≤39 06
Lodo deshidratado 8 ton ha^{-1}	≤0.78	10.40	≤1 56	≤0 78	≤1 25	31 39	≤39 06
Lodo líquido 8 ton ha^{-1}	≤0.78	8.78	≤1.56	≤0 78	≤1 25	28.78	≤39 06
Límite tolerancia *	3	150	nd	50 00	10	300	nd

- * Límites de tolerancia para cultivos agrícolas (Sopper, 1993)
- nd No disponible

DISCUSIÓN

Características de Planta y Rendimiento. No se encontró diferencia en lo que respecta a altura de planta debido a que la planta de tomate es semi-erecta; es decir, al llegar a determinada altura se torna postrada. Sin embargo, en otras investigaciones se ha reportado mayor altura de planta en cultivos de trigo, maíz, cebada y choi sum, con la aplicación de lodo atribuído principalmente a la mayor cantidad de nitrógeno disponible en el suelo (Sopper, 1993; Cuningham *et al*, 1975; U.S Environmental Protection Agency, 1995). El lodo tuvo un efecto importante en el ancho de la planta; en las parcelas con lodo se observaron plantas muy desarrolladas con una gran cantidad de hojas, lo que sugiere una mayor área foliar y una mayor actividad fotosintética. El mayor desarrollo de planta en las parcelas con lodo, se debe principalmente al nitrógeno y fósforo que se liberan lentamente y que son aprovechados por el cultivo muy eficientemente.

El mayor crecimiento de planta con la aplicación de lodo en este experimento se mostró en el ancho de planta, incrementando el área foliar indispensable para un buen rendimiento; por lo que es recomendable que en futuras investigaciones se tome el parámetro de ancho de planta en lugar de altura en el cultivo del tomate.

Los resultados de otras investigaciones indican que al aplicar lodo líquido se incrementa el rendimiento desde el primer ciclo de siembra comparado con el lodo deshidratado, debido a que en el lodo líquido las partículas orgánicas son más pequeñas que en el lodo deshidratado, teniendo una mayor área de exposición en el suelo y los

microorganismos tienen un mejor acceso a la materia orgánica, por lo que el ciclo del nitrógeno se lleva a cabo más rápidamente liberando los iones NH_4^+ y NO_3^-. En algunas investigaciones se han encontrado mayores rendimientos con lodo líquido que con el deshidratado en el primer ciclo en cultivos tales como maíz, sorgo y trigo, en donde se menciona que se debe a un alto contenido de nitrógeno disponible después de la aplicación (U.S. Environmental Protection Agency, 1995; Okamoto *et al.*, 1990; Preer *et al*; 1995, Falahi *et al.*, 1988; Trinidade *et al.*, 1993). Resultados semejantes fueron obtenidos en esta investigación. En lo que respecta al fósforo, aproximadamente el 50% está disponible el primer año, por lo que al aplicar lodo líquido se agrega una cantidad de nitrógeno y fósforo disponible el primer año de 135 y 168 kg ha^{-1}, respectivamente (Sopper, 1993) considerado como muy buena cantidad para obtener altos rendimientos en tomate. Con el lodo deshidratado (8 t ha^{-1}) se obtuvieron rendimientos similares al de fertilización inorgánica, debido a que la cantidad de nitrógeno disponible para la planta en el primer año es tan sólo de un 20%, equivalente a 90 kg ha^{-1}, lo cual es considerado como bajo para el cultivo de tomate. Sin embargo, debido a que la proporción no está balanceada los efectos no son tan evidentes como en el caso de lodo líquido. De acuerdo con la literatura (Outwater, 1994), se espera que para el próximo ciclo los resultados sean más favorables para el lodo deshidratado debido a que la liberación de los nutrimentos es lenta conforme ocurre la degradación de la materia orgánica y como consecuencia se encontrará mayor nitrógeno disponible. A pesar de que el fertilizante inorgánico (180-180-100) es una fórmula adecuada y con mayor cantidad de nitrógeno y fósforo, comparado con el lodo deshidratado (8 y 4 t ha^{-1}); éste se comportó igual debido a que una proporción de este fertilizante se pierde por lixiviación y desnitrificación en el caso del nitrógeno y precipitación del fósforo, lo que hace que sólo

una parte se encuentre disponible para la absorción de la planta (U.S. Environmental Protection Agency, 1995; Outwater, 1994).

En lo que respecta al testigo, el crecimiento de la planta fue lento, lo que ocasionó un rendimiento precoz muy bajo comparado con los demás tratamientos; por lo tanto, es recomendable agregar lodo para obtener un nivel óptimo de nutrimentos disponibles y obtener una buena producción adelantada de tomate (Outwater, 1994).

No se encontró diferencia en el rendimiento tardío, debido a que en cultivos donde se efectúan varios cortes, como es el caso del tomate, las plantas que obtienen mayor producción precoz envejecen más rápido, por lo que su rendimiento declina, mientras que las plantas que han producido poco en el primer corte incrementan su producción en los cortes subsecuentes, lo que explica que el testigo, cuya producción fue muy baja en los primeros tres cortes, igualó a los demás tratamientos en el rendimiento tardío. Sin embargo, los mejores precios en tomate en Nuevo León se obtienen en cosechas precoces, por lo que la aplicación de lodo puede traer ventajas al obtener mayor precio en la venta del producto.

Concentración de Metales Pesados en Frutos. A pesar de que las concentraciones de metales pesados en todos los tratamientos se encontraron por debajo del límite de tolerancia (Cuadro 5.2), la literatura indica que el cadmio, níquel, zinc y cobre normalmente tienen mayor disponibilidad para la absorción por las raíces; y por lo tanto, mayor potencial de ser peligrosos en suelos tratados con lodo comparado con el plomo. En este caso coincide en lo que respecta al zinc y cobre, pero no para cadmio y níquel debido a que las concentraciones en todos los tratamientos se encontraron por debajo del límite de detección del equipo utilizado en el laboratorio. Se ha determinado que los elementos con mayor movilidad en el suelo, tienen una absorción anual por los

cultivos menor a 0.05% del metal agregado al suelo; siendo menor cuando el pH es alto (>6.5) (Davis, 1984), como es el caso de la mayoría de los suelos alcalinos del Norte de México que provoca que los metales precipiten en el suelo, por lo tanto su disponibilidad se reduce (Sopper, 1993). Cuando el pH es menor de 6.5, se recomienda encalar el suelo con la finalidad de incrementar el pH antes de agregar lodo , debido a que a niveles bajos de pH, los metales se encuentran en la solución del suelo en cantidades que pueden incrementar la concentración de metales en la porción comestible de la planta o pudieran lixiviarse con riesgo de contaminar acuíferos (Schauer *et al*, 1980; Sopper, 1993; Sposito *et al.*, 1983; Granato *et al.*, 1991; Sauerbeck, 1991; Shata *et al.*, 1990; Okamoto *et al.*, 1990). Sin embargo, existen investigaciones que indican que la concentración del cadmio en fruto no se afectó en un rango de pH entre 3.4 y 7.2 (Falahi *et al.*, 1988). Otros en cambio, han demostrado que en suelos ácidos con la aplicación de 225 t ha^{-1}, presentaron efectos negativos en el crecimiento de las plantas ocasionado por altas concentraciones de metales pesados (Sopper, 1993).

La mayor preocupación de la aplicación de lodo está relacionada con metales pesados tales como el cadmio, que se caracteriza de ser tóxico al humano pero no fitotóxico. Sin embargo, esto sucede solamente en caso de que el suelo esté deficiente de calcio y zinc, ya que se ha encontrado que cuando la concentración de estos elementos se encuentra en abundancia en el lodo o el suelo, se reduce la absorción del cadmio (Dowdy *et al*, 1975; Jones *et al*, 1973; Bingham *et al*, 1975; Haghiri, 1973; Preer *et al*; 1995, Falahi *et al.*, 1988; Trinidade *et al.*, 1993). Debido a que el lodo que se aplicó tuvo una mayor proporción de Zn/Cd, explica el porqué la concentración de cadmio en los frutos de tomate se encontró incluso por debajo del límite de detección del equipo, aunado a las características alcalinas del suelo (pH = 7.8). En el cultivo de pepino se ha

comprobado que se pueden desarrollar plantas exitosamente en medios que contienen hasta el 50% de lodo composteado, bajo en metales pesados y amplio rango de pH, sin la acumulación de cadmio a niveles peligrosos en frutos (Falahi *et al.*, 1988). Investigaciones realizadas en tejido de tomate en tres ciclos consecutivos durante un periodo de 15 meses en suelos con aplicación de lodo para determinar la acumulación de cadmio y zinc, indicaron que cuando la dosis aplicada estuvo dentro de la norma, las plantas no extrajeron cantidades apreciables de cadmio y zinc. Además, se observó un incremento en la concentración de cadmio y zinc, pero con aplicaciones subsecuentes no incrementó la concentración en el fruto (Chang *et al.*, 1982).

Otro grupo de metales pesados que se comporta en cierta forma de una manera similar entre sí, incluye el zinc, cobre y níquel. Estos metales son fitotóxicos en altas concentraciones y al ser absorbidos por las raíces la planta sufre daños severos o incluso la muerte, por lo que normalmente no se obtienen frutos de dichas plantas. Debido a que no se manifestó ninguna fitotoxicidad, se comprueba que la disponibilidad de estos metales en el suelo fue baja (Richards *et al*, 1998; Diez, 1992; Preer *et al.*, 1995; Sposito *et al.*, 1983). Sin embargo, el cobre y zinc están considerados como elementos esenciales, por lo que alguna aportación de estos elementos por el lodo sería benéfica en los suelos calcáreos del noreste de México, en donde son frecuentes las deficiencias, principalmente de zinc (Mengel y Kirby, 1982).

Metales tales como el plomo y mercurio no son de gran preocupación en cultivos con la aplicación de lodo, debido a que se adsorben o precipitan en suelo alcalino o simplemente no se transporta hacia la porción comestible (Richards *et al*, 1998; Preer *et al*; 1995, Falahi *et al.*, 1988; Trinidade *et al.*, 1993). Esto explica la baja concentración del plomo encontrado en el fruto de tomate. Sin embargo, sólo debe aplicarse lodo que

cumpla con la norma para evitar una acumulación total de estos metales en el suelo, debido a que pueden afectar los microorganismos del suelo. A pesar de ser elementos considerados muy peligrosos, en el caso del lodo tienen menor riesgo debido a su baja movilidad en el suelo, ya que su principal forma de afectar la salud es a través del agua y aire (Outwater, 1994).

Se han efectuado varias investigaciones con dosis de lodo de hasta 100 t ha^{-1} sin encontrar una concentración de metales pesados por encima del límite de tolerancia, lo que indica que la posibilidad de encontrar altas concentraciones en nuestro estudio, incluso en ciclos de siembra posteriores, es remota debido a que la mayor dosis de lodo aplicada fue de 8 t ha^{-1}. Otro factor de gran relevancia es que el suelo utilizado en el experimento posee un pH de 7.8, ocasionando que los metales pesados precipiten y no estén disponibles para las raíces.

CONCLUSIONES

1.- Se obtuvo un mayor ancho de planta con la aplicación de lodo líquido y deshidratado (8 t ha^{-1}).

2.- La aplicación de lodo adelantó la cosecha de tomate significativamente comparado con la aplicación de fertilizante inorgánico y el testigo.

3.- El lodo líquido tuvo un mejor efecto sobre el rendimiento precoz, que el lodo deshidratado.

4.- Aplicando lodo (8 t ha^{-1}) en forma líquida se obtuvo mayor rendimiento precoz y total.

5.- La concentración de metales pesados en frutos de tomate estuvo por debajo de los límites de tolerancia en todos los tratamientos.

6.- Se cumple la hipótesis planteada debido a que se incrementa el rendimiento con la aplicación del lodo sin alterar significativamente el nivel de metales pesados.

BIBLIOGRAFÍA

Bingham, F.L; R.J. Mahler. and T.J. Ganje. 1975. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. J. Environ. Qual., Vol. 4, No. 2, 1975. pp 207-211.

Chang, A.C.; A.L. Page; J.E. Warneke and J.B. Johanson. 1982. Effects of sludge application on the Cd, Pb and Zn levels of selected vegetable plants. Hilgardia. 1982, 50: 7, 14 pp 16 ref.

Cox, A.; T. Granato; R. Pites and P. Tata. 2002. Uptake of Cd and Zn by garden vegetables grown in nuearth biosolids amended soil. 16th Annual Residual and Biosolid Management Conference. Austin, Tx U.S.A.

Cuningham, J.P.; D.R. Keeney and J.A. Ryan. 1975. Yield and metal composition of corn and rye grown on sewage sludge-amended soil. J. Environ. Qual., Vol. 4, no 4, 1975. pp 448-454.

Dahlquist, R.L. and J.W. Knoll. 1978. Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer: analysis of biological materials and major, trace and ultra-trace elements. Applied Spectroscopy. 32 (1): 1-29.

Davis, R.D. 1984. Crop uptake of metals (cadmium, lead, mercury, copper, nickel, zinc and chromium) from sludge-treated soil an its implications for soil fetility and for human diet. Proccessing and use of sewage sludge, 349-357; Review, 30 ref., 4.

Diez, T.; M. Kraus; A. Wurzinger E. Bilher and D. Nast. 1992. Heavy metal uptake and transfer from heavily contaminated soils used for arable crops. Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch. 69: 1, 51-71; 15 ref.

Dowdy, R.H., and W.E. Larson. 1975. The availability of sludge-borne metals to various vegetable crops. J. Environ. Qual., vol. 4,no.2 1975. pp 278-282.

Epstein. E.; J.M. Taylor and R.L. Chaney. 1976. Effects of sewage sludge and sludge compost aplied to soil on some soil physical and chemical properties. J. Environ. Qual., Vol. 5, no. 4, 1976. pp 422-426.

Falahi, A.A.; K.A. Corey and F.R. Gouin. 1988. Influence of pH on cadmium and zinc concentration of cucumber grown in sewage sludge. Hortscience. 1988, 23 6 I, 1015-1017; 16 ref.

Fresquez,-PR; R. Aguilar; R.E. Francis and E.F. Aldon. 1991. Heavy metal uptake by blue grama growing in a degraded semiarid soil amended with sewage sludge. USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Albuquerque, NM 87106, USA. Water,-Air,-and-Soil-Pollution. 1991, 57-58, 903-912; 25 ref.

Granato,T.C.; G.R. Richardson; R.I. Pietz and C. Lue-Hing. 1991. Prediction of phytotoxicity and uptake of metals by models in proposed USEPA 40 CFR Part 503 sludge regulations: comparison with field data for corn and wheat. Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago Research and Development Laboratory, Cicero, IL 60650, USA. Water,-Air,-and-Soil-Pollution. 1991, 57-58, 891-902; 12 ref.

Haghiri, F. 1973. Cadmium uptake by plants. J. Environ. Qual. Vol 2, no 1,1973. pp 93-95.

Jones, R.L;T.D. Hinesly and E.L. Ziegler.1973. Cadmiun content of soybeans grown in sewage-sludge amended soil. J. Environ. Quality, vol. 2, no 3. Pp 351-353

Keefer, R.F.; R.N. Singh and D.J. Horvath, D.J. 1984. Chemical composition of vegetables grown on an agricultural soil amended w ith sewage sludges. Journal of environmental Quality. 15: 2, 146-152; 25 ref. ,12 tab.

Lubben, S. and D. Sauerbeck. 1991. The uptake and distribution of heavy metals by spring wheat. Institute of Plant Nutrition and Soil Science, German Federal Research Centre of Agriculture, D-3300 Brunswick, Germany. Water,-Air,-and-Soil-Pollution. 1991, 57-58, 239-247; 11 ref.

Mengel, K. and E.A. Kirby.1982. Principles of plant nutrition. 3rd Edition. International Potash Institute. Worblaufen-Bern/Switzerland.

Miller, R.O. 1998.Microwave digestion of plant tissue in a closed vessel. In Y.P. Kalra (ed.) Handbook and reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, New York.

Okamoto,T.; M. Hirobe; K. Wachi and T. Matsuzaki. 1990. Changes in form, mobility and availability of some heavy metals in a soil with long-term applications of sewage sludge. Agricultural Research Institute of Kanagawa Prefecture, Hiratsuka, Japan. Transactions 14th International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan, August 1990, Volume IV. 1990, 216-221; 4 ref.

Olivares, S. E. 1994. Paquete de diseños experimentales. Versión 2.5. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L.

Outwater, A.B. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Lewis Publishers. Boca Rat, Florida, U.S.A. pp 67-76.

Preer, J.R.; A.N. Abdi; H.S. Sekhon and G.B. Jr. Murchison. 1995. Metals in urban gardens: effect of lime and sludge. Journal of Environmental Science and Health. Part A, environmental science and engineering and toxic and hazardous substance control. 1995, 30: 9, 2041-2056; 22 ref.

Richards, B.K; T.S. Steenhuis; J.H. Peverly and M.B. McBride. 1998. Metal mobiility at an old, heavily loaded sludge application site. Elsevier Science Ltd. Environmental Pollution 99 (1998). pp 365-377.

Sauerbeck, D.R. 1991. Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. Institute of Plant Nutrition and Soil Science, German Federal Agricultural Research Centre, 3300 Braunschweig, Germany. Water,-Air,-and-Soil-Pollution. 1991, 57-58, 227-237; 11 ref.

Schauer, P.S.; W.R. Wright, and J. Pelchat. 1980. Sludge-borne heavy metal availavility and uptake by vegetable crops under field conditions. J. Environ.,Qual. Vol 9, no 1, 1980. pp 69-73.

Seaker, E.M. 1991. Zinc, copper, cadmium, and lead in minespoil, water, and plants from reclaimed mine land amended with sewage sludge. Environmental Consultant, 1917 E. Branch Road, State College, Pennsylvania 16801 USA. Water,-Air,-and-Soil-Pollution. 1991, 57-58, 849-859; 28 ref.

Shata, S.M.; M.H. Rabie and E.A. Abdel-Latif. 1990. The content of heavy metals in dried sludge and its relation to agricultural uses in sandy soils. Dep. Soils & Water Use, National Res. Cent., Cairo, Egypt. Egyptian Journal of Soil Science.. 30: 1-2, 379-387; 7 ref.

Sposito, G.; C.S. Levesque; J.P. LeClaire and A.C. Chang. 1983. Trace metal chemistry in arid-zone filed soils amended with sewage sludge. Soil Science Society of America Journal. 47: 5, 898-902; 10 ref.

Sopper, W.E. 1993. Municipal sludge use in land reclamation. Lewis Publishers. Washingt, D.C. USA.

Trindade, A.V.; C.A. Vildoso; L.M. Costa; R.C. Muchovej and J.F. Gallardo. 1993. Effect of sewage effluent on the content of heavy metals in soil, the growth and nutrition of maize. Departamento de Microbiología, Universidade Federal de Vicosa, Vicosa, Brazil. El estudio del suelo y de su degradación en relación con la desertificación. Actas del 12 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Salamanca, Sevilla (España) 19 a 26 de Septiembre de 1993.

U.S. Environmental Protection Agency. 1995. Land application of biosolids (Process Design Manual). Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster, Pennsylvania, U.S.A.

Vajiala, M; R. Ciofu; V. Poescu; N. Dumitru and E. Rusu. 1987.An investigaction on the feasibility of using sewage sludge as a fertilizer for growing of vegetables. Lucrari-Stiintifice, Institutul Agronomic "Nicolae Balcescu" B Horticultura.

Capítulo 6

EFECTO DE LODO RESIDUAL EN RENDIMIENTO DE COLIFLOR (*Brassica oleracea* var. botrytis) Y CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL SUELO*

RESUMEN

El trabajo de investigación se llevó a cabo en la Planta de Tratamiento de Agua Residual en Dulces Nombres municipio de Pesquería, N. L. México. El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en la aplicación de lodo líquido (8 t ha^{-1}) y deshidratado (8 t ha^{-1} y 4 t ha^{-1}) vs. fertilización inorgánica (180-120-100) y testigo en el cultivo de coliflor. Los resultados indicaron que la mayor altura de planta se obtuvo con la aplicación de lodo líquido 8 t ha^{-1}, lodo deshidratado 8 t ha^{-1} y fertilizante inorgánico (180-120-100). El mayor número de pellas precoces se obtuvo con lodo líquido y deshidratado 8 t ha^{-1} y el mayor número de pellas totales se obtuvo con aplicación de lodo 8 t ha^{-1} en forma líquida. El comportamiento en altura de planta y número de pellas comerciales fue similar aplicando lodo 4 t ha^{-1} y fertilizante inorgánico. Los análisis de suelo con respecto a cobre, cadmio, plomo, niquel y zinc disponibles; y cobre, zinc, plomo, níquel, zinc y cromo total adsorbido, indicaron que las concentraciones se

* Artículo publicado en el Water Intelligence Online Journal de la IWA.
http://www.iwaonline.com/wio/200206009.htm

encontraron por debajo del límite de tolerancia. Se observaron incrementos en zinc disponible y total con la aplicación de lodo en dosis de 8 t ha^{-1}.

Palabras clave: *Absorción, precipitado, disponible, pella*

EFFECT OF RESIDUAL SEWAGE SLUDGE IN CAULIFLOWER (*Brassica oleracea* var. botrytis) YIELD AND HEAVY METAL CONCENTRATION IN SOIL

SUMMARY

The survey was conducted in the wastewater treatment plant of Dulces Nombres located in the municipality of Pesqueria, Nuevo Leon Mexico. The experimental design was a complete randomized block with five treatments and four replications, treatments consisted of the application of liquid (8 t ha^{-1}) and dewatered sewage sludge (4 and 8 t ha^{-1}) vs. inorganic fertilizer (180-120-100) and negative. Results indicated that plant height was enhanced when liquid sewage sludge (8 t ha^{-}), dewatered sewage sludge 8 t ha^{-1} and inorganic fertilizer. Highest number of early heads were observed when liquid and dewatered sewage sludge 8 t ha^{-1} was amended and highest number of total heads were obtained when liquid sewage sludge 8 t ha^{-1} was amended. Similar results in plant height and commercial cauliflower heads were observed when dewatered sewage sludge 4 t ha^{-1} and inorganic fertilizer was applied. Soil analysis regarding available copper, cadmium, lead, nickel and zinc and total adsorbed copper, cadmium, lead, nickel, zinc and chromium indicated that levels were below tolerance limit. Slight increase in levels of available and total zinc were observed when sewage sludge 8 t ha^{-1} was amended.

Index Words: *Absorption, precipitation, available, cauliflower heads.*

INTRODUCCIÓN

Por más de 2,000 años, los agricultores han aplicado materia orgánica a los suelos para incrementar los rendimientos de los cultivos. La mayor parte de este tiempo, utilizando estiércol para proveer de nutrimentos a las plantas y enriquecer el suelo. El lodo, un producto similar al estiércol que se obtiene como subproducto del tratamiento del agua residual, se ha utilizado por agricultores desde principios de 1900. Sin embargo, a partir de 1940, el uso de fertilizantes inorgánicos sustituyó casi por completo a la aplicación de lodo y estiércol. En la actualidad en los Estados Unidos de América más de 50 millones de toneladas de fertilizantes se utilizan anualmente, agregando cerca de 20 millones de toneladas de nutrimentos al suelo. El lodo comparado con fertilizantes químicos, es aplicado en menos del 1% de la superficie agrícola y se estima que 6.9 millones de toneladas en base seca se generaron en 1998, de las cuales se aplicaron cerca del 49% (Cox *et al.*, 2002). En cambio, el lodo es relativamente nuevo en México, debido a que el tratamiento de agua residual del gobierno estatal inició en 1995 con una producción aproximada de 150 t diarias base seca, las cuales son confinadas en un relleno sanitario ubicado en la Planta de Tratamiento de Agua Residual en Dulces Nombres, en el municipio de Pesquería, N.L.

Los agricultores están conscientes de los beneficios de la aplicación de productos orgánicos, especialmente en términos de incrementos en el rendimiento, fertilidad del suelo, reducción de costo de fertilizantes y sobretodo la contribución a la sustentabilidad agrícola. Numerosos estudios han enfatizado y reforzado la importancia de la aplicación

del lodo. Por ejemplo, el alto contenido de materia orgánica mejora la estructura del suelo, reduce el potencial de la erosión, incrementa la retención de humedad, incrementa la capacidad de intercambio catiónico y corrige deficiencias de elementos secundarios tales como calcio, magnesio y azufre y microelementos tales como boro, cloro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno y fierro considerados como esenciales para los cultivos (Cox *et al.*, 2002).

Se han reportado incrementos en rendimiento en diferentes cultivos hortícolas con la aplicación de lodo, entre los que se encuentran: tubérculo de papa (Zabulene *et al.*, 1984); acelga (Valadares *et al.*, 1983); crucíferas (Narwall *et al.*, 1983), tomate (Vajiala *et al.*, 1987), cebolla, okra y amaranthus en el primer ciclo de siembra y con marcados incrementos en el segundo ciclo en okra, rábano y amaranthus (Haroon y Ramulu, 1990).

La preocupación con el uso de lodo en la agricultura es con respecto a la acumulación de metales pesados en suelo y plantas, toxicidad de plantas y transferencia de metales a la cadena alimenticia. La acumulación de metales en cultivos desarrollados en suelos que han recibido altas y continuas dosis de lodo están bien documentadas. El potencial de acumulación de los metales pesados en el tejido vegetal varía; es decir, la absorción depende de la carga de metales, características del lodo, propiedades del suelo y cultivo. Además, el impacto de la aplicación de lodo en la acumulación de metales en cultivos no sólo depende de la disponibilidad a corto plazo (de hasta 5 años), sino que también a largo plazo (más de 5 años después de la aplicación). A pesar de que en Estados Unidos hay una mayor preocupación del lodo, datos de Europa y Australia indican que el fertilizante inorgánico y estiércol son fuentes significativas de metales pesados, especialmente cadmio en suelos agrícolas. Por ejemplo el 50% del cadmio en el

suelo en la Unión Europea fue contribuído por fertilizante inorgánico, 14% por depósitos de la atmósfera, 18% por estiércol y tan sólo el 3% por lodo (Lynne, *et al.*, 2001).

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto residual del lodo en el segundo ciclo de siembra en el cultivo de coliflor, para observar su efecto en altura de planta, número y calidad de pellas. Así, como el comportamiento de elementos esenciales y metales pesados en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el otoño de 1999 en la planta de tratamiento de agua residual localizada en Dulces Nombres municipio de Pesquería, N.L, con coordenadas geográficas de 25° 47" de latitud norte y 100° 02" de longitud oeste. El suelo donde se desarrolló el experimento es calcáreo con textura franco-arcillosa con un pH de 7.8.

El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones; los tratamientos consistieron en:

1.- Testigo (sin aplicación)

2.- Fertilizante inorgánico: Su aplicación inicial se efectuó un día antes del trasplante con dosis de 100-120-50 (23 de septiembre de 1999) y al mes la segunda aplicación con dosis de 80-00-50.

3.- Lodo deshidratado en dosis de 4 t ha^{-1} base seca.- Su aplicación fué el 17 de Febrero de 1999.

4.- Lodo deshidratado en dosis de 8 t ha^{-1} base seca.- Su aplicación fué el 17 de Febrero de 1999.

5.- Lodo líquido en dosis de 8 t ha^{-1} base seca.- Su aplicación fué el 17 de Febrero de 1999.

La aplicación de lodo deshidratado y líquido se llevó a cabo el 17 de febrero de 1999, posteriormente se sembró tomate, el cual se cosechó en mayo — julio del mismo

año. El lodo líquido utilizado procedió de digestores anaerobios con 3% de sólidos, su aplicación se efectuó utilizando una pipa colocando el lodo en la superficie del suelo e incorporando al siguiente día con rastra. El lodo en forma deshidratada se obtuvo después de haber pasado por filtros prensa con 20% de sólidos y se aplicó a través de estercoladora, incorporándolo mediante una rastra el mismo día.

La fertilización inorgánica aplicada al tomate el 17 de febrero de 1999 fue de 180-180-100 y posteriormente, previo a la siembra de coliflor, las parcelas en este tratamiento se fertilizaron con dos aplicaciones; la primera de pre-trasplante (100-120-50) el día 23 de septiembre de 1999 y la segunda (80-00-50) a los 30 días después del trasplante.

El híbrido de coliflor utilizado fue "Snowman", el cual ha demostrado ser un buen material para la zona. La semilla se sembró en charolas de poliestireno en invernadero para luego ser trasplantadas al campo definitivo el 24 de septiembre de 1999. El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Las parcelas consistieron en cinco surcos a doble hilera de 1.8 m de ancho por 24 m de largo. La parcela útil consistió de los tres surcos centrales, eliminando 2 m de cada extremo.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo de acuerdo al diseño experimental planteado utilizando el paquete estadístico " Diseños Experimentales FAUANL" (Olivares, 1994). La comparación de medias se efectuó por medio de la prueba diferencia mínima significativa (DMS) cuando se encontró diferencia significativa entre los tratamientos ($p< 0.05$). Las variables analizadas fueron las siguientes:

Altura Planta. Se eligieron al azar 10 plantas por unidad experimental a los 43 días del trasplante y se obtuvo un promedio.

Número de Pellas Precoces. Se obtuvo de la suma de los tres primeros cortes de pellas de la parcela útil cumpliendo con la característica de tener un tamaño comercial.

Número de Pellas Tardías. Se obtuvo de la suma de los dos últimos cortes de pellas de la parcela útil cumpliendo con la característica de tener un tamaño comercial.

Número de Pellas Totales. En total se efectuaron cinco cortes de los cuales se obtuvo la suma de coliflores comerciales de cada corte por unidad experimental para obtener el total.

Metales Pesados en Suelo. Se obtuvo una muestra compuesta para cada tratamiento proveniente de dos muestras simples por unidad experimental de un perfil de 0 a 15 cm, se secó al ambiente y en estufa a 85° C por 24 h. De cada muestra se obtuvo una submuestra de 500 gr, para su análisis en el laboratorio de Suelos de la Universidad Estatal de Pennsylvania. La disponibilidad de cobre, zinc, plomo, níquel y cadmio se analizó con el método Diagnostic Soil Test (Diagnostic Soil Test , Sin Año) y la adsorción total de cobre, zinc, plomo, níquel, cromo y cadmio a través del método EPA 3050/3051(EPA Method 3050/3051, 1986).

RESULTADOS Y DISCUSION

Altura de Planta. Se encontró diferencia significativa (Cuadro 6.1) respecto a la variable altura de planta. La comparación de medias mostró que los tratamientos lodo líquido (8 t ha^{-1}), lodo deshidratado (8 t ha^{-1}) y fertilización (180-120-100) obtuvieron la mayor altura y fueron similares entre sí; sin embargo, fertilización (180-120-100) fue igual a lodo deshidratado (4 t ha^{-1}); el tratamiento con la menor altura fue el testigo. Los tratamientos con lodo (8 t ha^{-1}) tuvieron una altura a los 43 días después del transplante de dos veces la del testigo, evidenciando una mayor disponibilidad de nutrimentos, principalmente nitrógeno. Estos resultados demuestran que el efecto residual del lodo es muy marcado en el segundo ciclo de siembra, debido a que en el primer ciclo únicamente se libera el 60% del nitrógeno en el lodo líquido y 20% en el deshidratado, sin embargo, de acuerdo con estos resultados, parte del nitrógeno liberado en el primer ciclo en el lodo líquido debió permanecer en el suelo en forma de NH_4 adsorbido a los coloides del suelo o en forma de NO_3.

El tener una buena altura de planta y un buen desarrollo foliar es importante en coliflor debido a que las hojas deben de estar bien desarrolladas y de buena altura para lograr cubrir la pella y protegerla de los rayos del sol y evitar con esto que se manche. La aplicación del lodo o una dosis alta de fertilizantes es necesaria en los suelos en donde se llevó a cabo la investigación con la finalidad de obtener un buen desarrollo de hojas para lograr cubrir las pellas.

Los resultados obtenidos coinciden con la hipótesis planteada en este trabajo y con lo reportado en otras investigaciónes en donde se menciona que se incrementaron todos los índices de crecimiento en maíz con dosis de lodo de 20 t ha^{-1} (Sergiento *et al.*, 1991) e incrementos en forraje de hasta 2 a 3 veces con dosis de 22.5 y 45 t ha^{-1} (Outwater, 1994).

Número de Pellas Precoces. Los tratamientos mostraron diferencia significativa, encontrando que el mayor número de pellas precoces cosechadas se obtuvo aplicando lodo líquido 8 t ha^{-1} igualando estadísticamente a lodo deshidratado 8 t ha^{-1}, a su vez este último fue similar a fertilización inorgánica (180-120-100). Fertilización inorgánica (180-120-100) a su vez fue igual a lodo deshidratado (4 t ha^{-1}) (Cuadro 6.1) y el testigo obtuvo el menor número de pellas precoces. Los resultados indicaron que con lodo en dosis de 8 t ha^{-1} se incrementaron las pellas precoces comerciales cosechadas; el lodo líquido tuvo 8 veces más de pellas comerciales comparado con el testigo. Este dramático efecto residual del lodo muestra que después del primer ciclo quedan disponibles dosis altas de nutrimentos, así como materia orgánica que sigue el proceso de descomposición en el segundo ciclo y por lo tanto la liberación de nutrimentos a la solución del suelo.

Por otra parte, el lodo tuvo un efecto residual tan importante que mejoró la precocidad del cultivo, lo cual es muy importante en hortalizas debido a que se obtienen precios más elevados por unidad. Además, en los tratamientos con dosis altas de lodo se observó que aproximadamente el 70% de las pellas se cosecharon en los primeros tres cortes lo que indica se puede acortar el ciclo del cultivo disminuyendo los costos de producción, principalmente en lo que se refiere a riegos, control de plagas y malezas.

A pesar de que aproximadamente el 68% de las pellas totales se cosecharon en los tres primeros cortes cuando se aplicó fertilización inorgánica y lodo deshidratado 4 t ha^{1}, el número total de pellas cosechadas en estos tratamientos fue inferior comparado con la aplicación de dosis altas de lodo, indicando que los nutrimentos aportados no son suficientes en estos tratamientos para tener un rendimiento óptimo del cultivo. Respecto al testigo se observó que el 50% se cosechó en los tres primero cortes. Sin embargo, muy pocas pellas comerciales se cosecharon en total comparado con el resto de los tratamientos, esto se debe a que el testigo tiene muy pocos nutrimentos disponibles para la planta, deduciendo que el suelo responde bien a la aplicación de fertilizante o lodo.

Número de Pellas Tardías. Después de realizar el análisis de varianza y encontrar diferencia significativa, se procedió a efectuar la comparación de medias. Se observó que lodo líquido (8 t ha^{-1}), lodo deshidratado (8 t ha^{-1}), fertilización inorgánica (180-120-100) y lodo deshidratado (4 t ha^{-1}) fueron iguales estadísticamente. Y que fertilización inorgánica, lodo deshidratado (4 t ha^{-1}) y testigo a su vez fueron iguales en lo que respecta a esta variable (Cuadro 6.1).

La diferencia entre los tratamientos en este caso no fue tan marcada como el caso de pellas precoces, debido a que los tratamientos con menor cantidad de pellas precoces se acumularon en la cosecha tardía, motivo por el cual el testigo igualó estadísticamente al tratamiento de fertilización y lodo deshidratado 4 t ha^{-1}. Aún así, se observó la tendencia de ser superior el número de pellas cosechadas cuando se aplicó lodo en dosis de 8 t ha^{-1}, lo que indica que aún después del segundo ciclo de siembra el efecto residual benéfico del lodo se manifestó.

Cuadro 6.1. Análisis estadístico de variables comparando lodo líquido y deshidratado vs. fertilizante inorgánico y testigo.

Tratamiento	Altura de Planta (cm)	Pellas Precoces (#)	Pellas Tardias (#)	Pellas Totales (#)
Testigo	11.73 C	20 D	22 B	42 D
Fertilización (180-120-100)	21.49 AB	110 BC	51 AB	161 C
Lodo deshidratado 4 t ha $^{-1}$	18.45 B	100 C	48 AB	148 C
Lodo deshidratado 8 t ha $^{-1}$	23.04 A	140 AB	57 A	197 B
Lodo líquido 8 t ha $^{-1}$	24.28 A	180 A	68 A	228 A
DMS (0.05)	3.11	35.54	28 72	28 72

Numero de Pellas Totales. Los resultados indicaron que el mayor número de coliflores totales se obtuvo con lodo líquido 8 t ha^{-1}, seguido por lodo deshidratado 8 t ha^{-1}, fertilizante inorgánico que es similar a lodo deshidratado 4 t ha^{-1} pero superior al testigo (Cuadro 6.1). Los resultados mostraron que aún después del segundo ciclo de siembra, el efecto residual del lodo líquido fue superior al deshidratado. En contraste con la literatura que indica mayor efecto inmediato con lodo líquido, pero mayor efecto residual con lodo deshidratado; por lo tanto, se espera que en próximas siembras el lodo deshidratado obtendrá mayor beneficio (Outwater, 1994). Incrementos en rendimientos se han reportado en el segundo ciclo con la aplicación de lodo deshidratado en okra, rábano y amaranthus (Haroon y Ramulu, 1990); incrementos en rendimiento de papa con dosis de 5 a 20 t ha^{-1} (Zabulene *et al.*, 1984); en acelga con aplicación de 1.5 a 4% de lodo (Valadares *et al.*, 1983) y en tomate obteniendo rendimientos de hasta 78.5 t ha^{-1} (Vajiala *et al.*, 1987).

Los resultados indicaron que el efecto residual de lodo en dosis de 4 t ha^{-1} fue semejante a la aplicación de fertilizante inorgánico en dosis de 180-120-100 en cuanto a número de pellas totales, a pesar de que el suelo en donde se llevó a cabo el experimento es muy pobre en nutrimentos, evidenciado por el número de pellas obtenidas en el

testigo, en donde muy pocas pellas llegaron a cumplir el tamaño y calidad para ser consideradas como comerciales.

Metales pesados en suelo.

Cobre total adsorbido. Los resultados indicaron que no hubo incremento en lo que respecta a esta variable en ningún tratamiento. Todos valores obtenidos se encontraron por debajo del límite de tolerancia (Cuadro 6.2) y se encuentran aproximadamente al 50% del límite de tolerancia y se pudo observar que el testigo tuvo cobre por naturaleza. Resultados de investigaciones han encontrado incrementos en los niveles de cobre con aplicaciones de 10, 30, 50 y 80 t ha^{-1} (Trinidade *et al.*, 1993); 30 t ha^{-1} (Kirkham, 1983); 40 a 80 t ha^{-1} (Haroon y Ramulu, 1990); 40 a 160 t ha^{-1} (Mashhady, 1984); 184 t ha^{-1} (Seaker y Sopper, 1984) pero con niveles por debajo del límite de tolerancia para suelos agrícolas. Sin embargo, existen estudios que han encontrado niveles por encima del límite cuando se aplican dosis por arriba de 250 t ha^{-1} (Gasiunas *et al.*, 1995) y 500 t ha^{-1} (Turski, 1982).

Cobre disponible. Los resultados presentaron el mismo patrón que el cobre total y se encontró en el rango bajo; es decir, la concentración de cobre disponible no incrementó con dosis de 8 t ha^{-1} de lodo (Cuadro 6.2), lo que indica que no existe peligro de toxicidad para la producción de cultivos agrícolas. Además, se observó que sólo una pequeña fracción total del cobre está disponible y se debe a que se precipita con el suelo permaneciendo en la fase sólida como fracción orgánica de cobre (Seedq *et al.*, 1992). Se reporta que la disponibilidad del cobre es gobernada por el contenido total de cobre y dosis aplicada de lodo (Taylor *et al.*, 1995). Estudios indican que sólo el 10% (Lake *et al.*, 1984) y menos del 1% del total del cobre está disponible (Taylor *et al.*, 1995),

comparado con los resultados obtenidos en este experimento donde indicó que en promedio 4.2% del cobre total adsorbido, está en forma disponible.

Zinc total adsorbido. A pesar de que los niveles de zinc total adsorbido se incrementaron con dosis de 8 t ha^{-1} de lodo (Cuadro 6.2), éstos se encontraron por debajo del límite de tolerancia. Se observó que el zinc total adsorbido en todos los tratamientos está al 70% del límite de tolerancia, lo que indica que el suelo contiene zinc en altas concentraciones y con la aplicación de lodos 4 t ha^{-1} la cantidad agregada es muy poca, pero la aplicación de 8 t ha^{-1} incrementó en 13% el total de zinc en el suelo. Estudios similares indicaron incrementos en zinc con aplicaciones de lodos de 10, 30, 50 y 80 t ha^{-1} (Trinidade *et al.*, 1993); 30 t ha^{-1} (Kirkham, 1983); 40 a 80 t ha^{-1} (Haroon y Ramulu, 1990); 40 a 160 t ha^{-1} (Mashhady, 1984); 184 t ha^{-1} (Seaker y Sopper, 1984) pero en todos los casos los niveles se encontraron por debajo del límite de tolerancia para suelos agrícolas. Sin embargo, existen estudios que han encontrado niveles por encima del límite cuando se aplican dosis por arriba de 250 t ha^{-1} (Gasiunas *et al.*, 1995) y 500 t ha^{-1} (Turski, 1982). Resultados de investigaciones han determinado que con dosis de 25, 50 y 75 t ha^{-1} se agregaron 188, 374 y 564 kg ha^{-1} de zinc total, respectivamente. La forma predominante del zinc en suelos alcalinos es de carbonatos de zinc, que compone la fase sólida de zinc no disponible para los cultivos (Taylor *et al.*, 1995).

Zinc disponible. Se observó que la aplicación de lodo de 8 t ha^{-1} incrementó el nivel de zinc disponible hasta el rango medio, lo que significa que es el óptimo para los cultivos. Se puede apreciar que existe mayor disponibilidad con el lodo 8 t ha^{-1} (Cuadro 6.2), lo que coincide con la literatura en donde se menciona que el zinc disponible es el elemento que determina en muchas ocasiones el incremento en el rendimiento de los

cultivos, después del nitrógeno y fósforo cuando se aplica lodos (Trinidade *et al.*, 1993; Haroon y Ramulu, 1990; Fresquez *et al.*, 1991). Se observó que la proporción de zinc disponible es más alta en suelos con lodo 8 t ha^{-1} y que tiene un patrón proporcional con la concentración de zinc total adsorbido, lo que coincide con la literatura revisada (O'Riordan *et al.*, 1994; Yamada *et al.*, 1985). En cambio, el testigo y fertilizante inorgánico tienen muy baja disponibilidad encontrándose en los niveles bajos lo que indica que es deficiente. A pesar de que los resultados obtenidos en este experimento mostraron el efecto favorable del zinc con la aplicación de lodo, es necesario que cumpla con la norma y dosis recomendada debido a que se han encontrado suelos con altos niveles de zinc ocasionando toxicidad en cultivos con la aplicación de lodo (Diez, 1982). Se reporta que sólo el 10% (Lake *et al.*, 1984) y menor del 1% del zinc total está disponible (Taylor *et al.*, 1995). Sin embargo, los resultados obtenidos en este experimento indican que en promedio el 5.1% del zinc total adsorbido, está disponible.

Plomo total adsorbido. Se observaron ligeros incrementos con la aplicación de lodo deshidratado 8 t ha^{-1} comparado con el testigo según los resultados presentados en el Cuadro 6.2. Ligeros incrementos se observaron con la adición de lodo deshidratado en dosis de 4 t ha^{-1} y líquido 8 t ha^{-1} y se observó que el fertilizante inorgánico obtuvo el nivel más bajo. Sin embargo, todos los niveles de los tratamientos se encontraron por debajo del límite de tolerancia. Otras investigaciones han encontrado incrementos en plomo total al aplicar lodo en dosis de 40 a 80 t ha^{-1} (Haroon y Ramulu, 1990). Mientras que en otra investigación en donde se aplicaron dosis de 10, 30, 50 y 80 t ha^{-1} se presentó poca influencia en los niveles de plomo total (Trinidade *et al.*, 1993). Se ha reportado que con dosis de 25, 50 y 75 t ha^{-1} se agregaron 2.9, 5.9 y 8.8 kg ha^{-1} de plomo (O'Riordan *et al.*, 1994). Es importante tener en cuenta la dosis aplicada debido a

que a pesar de que el lodo cumpla con la norma se han encontrado concentraciones en suelo altas con dosis de 250 t ha^{-1} (Gasiunas *et al.*, 1995) y 1,000 t ha^{-1} (Turski, 1982). Los resultados de este experimento indicaron que el testigo contiene niveles de plomo total adsorbido de un 18% comparado con el límite de tolerancia, lo que indica que el suelo en forma natural contiene plomo y la forma predominante en el suelo es carbonato de plomo (Taylor *et al.*, 1995).

Plomo disponible. Todos los tratamientos se encontraron en el nivel intermedio (Cuadro 6.2), con ligero incremento cuando se aplicó lodo líquido en dosis de 8 t ha^{-1}. En este caso se observó que a pesar de que el plomo total fue superior con lodo deshidratado 8 t ha^{-1} la mayor disponibilidad se obtuvo en lodo líquido; lo que indicó que cuando se aplica en forma líquida la disponibilidad es mayor independientemente de la concentración total, esto coincide con la literatura revisada que indica que los elementos esenciales y no esenciales se encontraron con mayor disponibilidad inmediata con lodo líquido (Outwater, 1994; Sopper, 1993). Otros estudios han encontrado que en suelo monitoreado durante 10 años se incrementó el nivel de plomo en 4.1 veces con incrementos de 24 veces la dosis del lodo, lo que indica que la proporción disponible del plomo no sigue una proporción directa a la concentración de plomo total (Hargitai, 1990). Resultados de otros estudios indican que sólo el 10% del total está disponible (Lake *et al.*, 1984) y menos del 1% (Taylor *et al.*, 1995), mientras que los resultados de este experimento indicaron que en promedio el 13.7% del plomo total adsorbido se encontró disponible.

Níquel total adsorbido. No se encontraron incrementos de acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 6.2; además, se observó que los niveles encontrados en todos los tratamientos son aproximadamente el 50% del límite de tolerancia y que al

igual que los demás elementos, el suelo contiene níquel por naturaleza debido a que se encontró en el testigo. Existen estudios que indican que el nivel de níquel se incrementa con la aplicación de lodo en dosis de 40 a 80 t ha^{-1} (Haroon y Ramulu, 1990) y 32 t ha^{-1} (Kirkam, 1983), incluso en algunos casos por encima del límite de tolerancia; por lo que es necesario conocer la calidad del lodo y aplicar solamente dosis recomendadas (Diez, 1982).

Níquel disponible. La concentración se encontró en el nivel bajo y se comportó similar en todos los tratamientos (Cuadro 6.2), lo que indica que el uso de lodo es seguro con la calidad y dosis utilizados en este experimento. Se observó una gran diferencia entre el níquel total adsorbido y disponible, debido a que la mayor parte del níquel se encuentra en forma sólida como carbonatos de níquel no disponible para la absorción por las raíces (Taylor *et al.*, 1995). Monitoreando níquel durante 10 años, con la adición de 24 veces la dosis de lodo, se observó que solamente se incrementó la porción móvil en el suelo 4.1 veces (Hargitai, 1990), lo que indica que no existe una relación directa entre el níquel total y disponible. Resultados de otras investigaciones indican que sólo el 10% del total está disponible (Lake *et al.*, 1984) y menor del 1% (Taylor *et al.*, 1995), mientras que los resultados obtenidos en este experimento indicaron en promedio el 1.8% del total del níquel adsorbido, se encontró en forma disponible.

Cadmio total adsorbido. Los resultados obtenidos en todos los tratamientos se encontraron por debajo del límite de detección del equipo, indicando que la concentración de cadmio en el lodo y la dosis aplicada son seguros para los cultivos agrícolas (Cuadro 6.2). Sin embargo, debido a que se han reportado casos donde los niveles se encontraron por encima del límite de tolerancia (Mashhady, 1984; Adams y

Sanders, 1984), es necesario conocer la calidad del lodo y no sobrepasar la dosis recomendada.

Cuadro 6.2. Concentración de metales pesados totales y disponibles en suelo comparando lodo líquido y deshidratado vs fertilizante inorgánico y testigo.

	Tratamientos					Rango**		
Metal pesado	T1	T2	T3	T4	T5	Bajo	Intermedio	Alto
Cobre total* (kg ha^{-1})	3.98	3.16	3.34	3.73	3.50			7 7
Cobre disponible (kg ha^{-1})	0.15	0.12	0.14	0.15	0.19	0.0 - 0.7	0.7 – 14 7	14.7 – 25 7
Zinc total* (kg ha^{-1})	17.99	15.06	17.26	19.46	20.38			25 7
Zinc disponible (kg ha^{-1})	0.53	0.37	0.60	1.18	1.94	0.0 - 0.7	0.7 – 27.5	27 5 - 36.7
Plomo total* (kg ha^{-1})	3.15	2.97	3.33	4.46	3.54			19 3
Plomo disponible (kg ha^{-1})	0.40	0.46	0.41	0.45	0.67	0.0 – 0.2	0.2 – 7.3	7 3 – 18 7
Níquel total* (kg ha^{-1})	4.08	3.64	3.77	3.86	3.90			7 7
Níquel disponible (kg ha^{-1})	0.08	0.07	0.07	0.09	0.03	0.0 - 0.2	0.2 –1.8	1 8 – 9 2
Cadmio total* (kg ha^{-1})	≤0.07	≤0.07	≤0.07	≤0.07	≤0.07			0 13
Cadmio disponible (kg ha^{-1})	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.01	0.0 - 0 04	0 04 - 0 18	0 18 – 0 73
Cromo total* (kg ha^{-1})	4.16	2.98	3.61	3.94	3.78			6 43

* Adsorbido
** Rango de acuerdo con EPA mehod 3050/3051, 1986)
T1= testigo
T2= fertilización
T3= lodo deshidratado 4 t ha^{-1}
T4= lodo deshidratado 8 t ha^{-1}
T5= lodo líquido 8 t ha^{-1}

Cadmio disponible. Al igual que el cadmio total, la concentración disponible se encontró por debajo del límite de detección del equipo (Cuadro 6.2) indicando que su uso es seguro para cultivos agrícolas. Sin embargo, se ha reportado que con incrementos de 24 veces la dosis del lodo durante 10 años se incrementó el cadmio móvil en 12.1 veces (Hargitai, 1990) y el resto se encontró en forma de carbonatos de cadmio en la fase sólida no disponible para la absorción por las raíces (Taylor *et al.*, 1995). El cadmio es un elemento bien estudiado debido a que tiene la característica de ser toxico a

animales a niveles que no es fitotóxico, el caso típico es la enfermedad "Itai-Itai" provocada por consumos de arroz contaminado con cadmio sin presentar fitotoxicidad (Outwater, 1994). En este caso no fue posible calcular el porcentaje de cadmio disponible con respecto al total, debido a que los niveles encontrados están por debajo del límite de detección del equipo.

Cromo total. En este caso el testigo presentó niveles ligeramente superiores a los tratamientos con lodo y con menor concentración se encontró el fertilizante inorgánico (Cuadro 6.2). Los resultados obtenidos no coinciden con lo esperado, debido a que el tratamiento con fertilizante o con lodo debieron ser superiores, lo que nos indica que la precisión del equipo o la metodología utilizada no es suficiente para detectar el incremento de cromo total adsorbido. Además, la literatura revisada indica que los fertilizantes principalmente fosforados contienen mayor cantidad de cromo comparado con lodo y como consecuencia debiera ser mayor. El consejo nacional de investigación de Canadá ha reportado que los fertilizantes fosforados contienen de 30 hasta 3,000 mg kg^{-1} de cromo comparado con el estiércol con rangos de 6 a 56 mg kg^{-1} (Alloway, 1992). Otros estudios indican incrementos en cromo con aplicaciones de lodo en dosis de 32 t ha^{-1} (Kirkam, 1983) y de 40 a 80 t ha^{-1} (Haroon y Ramulu, 1990) pero dentro de los límites de tolerancia. Se debe recalcar que con la dosis de fertilizante fosforado, utilizando como fuente el 11-52-00 se agregaron solamente 230 kg ha^{-1} comparado con el lodo que se agregó 4,000 y 8,000 kg ha^{-1} base seca.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo mayor altura de plantas de coliflor al aplicar al suelo lodo líquido (8 t ha^{-1}), deshidratado (8 t ha^{-1}) y fertilizante inorgánico.
2. El comportamiento en altura de planta y rendimiento fue similar aplicando lodo (4 t ha^{-1}) y fertilizante inorgánico (180-120-100).
3. Aplicando 8 t ha^{-1} de lodo en forma líquida y deshidratada se obtuvo el mayor número de pellas comerciales precoces.
4. Aplicando 8 t ha^{-1} de lodo en forma líquida se obtuvo el mayor número de pellas comerciales totales.
5. Se observó un ligero incremento de zinc disponible y total adsorbido con dosis de 8 t ha^{-1} de lodo líquido y deshidratado.
6. Los resultados indicaron que los metales pesados disponibles y totales adsorbidos en todos los tratamientos estuvieron por debajo del límite de tolerancia.
7. Se cumple con la hipótesis planteada debido a que se incrementó el número de pellas comerciales, sin alterar significativamente los niveles de metales pesados.

BIBLIOGRAFIA

Adams, T.McM. and J.R. Sanders. 1984. The forms of zinc, copper and nickel in sludge treated soils and their relation to the composition of the soil solution. Environmental Contamination. 400-405; 6 ref. Edinburg, U.K:

Alloway. B.J. 1992. Heavy metals in soil. John wiley and Sons, Inc. New York, U.S.A.

Cox, A.; T. Granato; R. Pites and P. Tata. 2002. Uotake of Cd and Zn by garden vegetables grown in nuearth biosolids amended soil. 16th Annual Residual and Biosolid Management Conference. Austin, Tx U.S.A.

Diagnostic Soil Test. Sin Año. Standard Test Method for Diagnostic Soil Test for Plant Growth and Food Chain Protection. ASTM Designation: D5435-93. Annual Book of ASTM Standarsd, Vol. 14.02 American Society for Testign and Materials. 1916 Race St. Phila. PA, 19103.

Diez, T. 1982. Improvement and contamination os soils be very high levels of sewage sludge near a big city and possibilities for their future use and amelioration. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 33, 159-169; 12 ref.

EPA Method 3050/3051. 1986. Test Methods for Evaluating Solid Waste. Volume IA: 3 rd Edition. EPA/SW-846. National Technical Information Service. Springfield, Va.

Fresquez, P.R.; R. Aguilar; R.E. Francis and E.F. Aldon. 1991. Heavy metal uptake by blue grama growing in a degraded semiarid soil amended with sewage sludge. USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Albuquerque, NM 87106, USA. Water,-Air,-and-Soil-Pollution. 1991, 57-58, 903-912; 25 ref.

Gasiunas, V.; J. Fkeckenstein and E. Schug,. 1995. Effect of sewage sludge applications on heavy metal concentrations of Lithuanian soils. Landbauforschung Volkenrode. 45: 1, 1-3; 4 ref.

Hargitai, L. 1990. The mobility of toxic heavy metals as affected by the environment protectional capacity of soils. Transactions 14 th International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan. Volume II, 102-107; 3 ref.

Haroon, ARM and U.S. Ramulu. 1990. Trace behaviour of certain vegetables to trace metal additions through application of high rates of sewage sludge to soils. Volume IV. 1990, 192-197; 5 ref. Kyoto, Japan; International society of Soil Science.

Kirkham, M.B. 1983. Elemental content of soil, sorghum and wheat on sludge injected agricultural land. Agriculture, ecosystemscand Environment. 9: 3, 281-292; 25 ref.

Lake, D.L.; PWW. Kirk and J.N. Lester. 1984. Fractionation, Characterization, and speciation of heavy metals in sewage sludge and sludge amended soils. Journal of Enivronmental Quality. 13: 2, 175-183; 89 ref.

Lynne, H.M.; E. Epstein and T. Logan. 2001. Comparing the characteristics, risks and benefits of soil amendments and fertilizers used in agriculture. 16th Annual Residual and Biosolids Managemente Conference. San Diego, USA.

Mashhady, A.S. 1984. Heavy metals extractable from a calcareous soil treated with sewage sludge. Environmental Pollution, B. 8: 1, 51-62; 23 ref.

Narwall, R.P.; B.R. Singh and A.R. Panhwar.1983. Plant availability of heavy metals in a sludge treated soil: I. Effect of sewage sludge and soil pH on the yield and chemical composition of rape. Journal of Environmental Quality. 12: 3, 358-365; 29 ref.

O'Riordan, E.G; V.A. Dodd; G.A. Fleming and H. Tunney. 1994. Repeated applications of a metal rich sewage sludge to grassland: 1. Effects on metla levels in soil. Irish Journal of Agricultural and Food Research. 33: 1, 41-51; 38 ref.

Outwater, A.B. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, U.S.A. pp 67-76.

Seaker, E.M. and W.E. Sopper. 1984. Trace metal and nitrate-nitrogen concentrations in a mine spoil environment following reclamation with sewage sludge. Environmental Contamination 1984, 448-493; 9 ref., 4 tab. Edinburgh, UK.

Sergiento, L.I; N.A. Mosienko and V.P. Tyan. 1991. Content of heavy metals in ecosystems following use of sewage sludge as fertilizer. Doklady Vsesoyuznoi Ordena Lenina I Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Akademii Sel Skokhozyaistvennykh Nauk im. V.I. Lenina. No. 8, 56-58; 10 ref.

Seedq, M.A.; S. Soliman and N. Salem. 1992. Movement and distribution of Fe, Mo, Zn and Cu in sandy soil as affected by the application of sewage sludge. Egyptian Journal of Soil Science. 32: 3, 319-330; 12 ref.

Sopper, W.E. 1993. Municipal sludge use in land reclamation. Lewis Publishers. Washington, D.C. USA.

Taylor, R.W.; H. Xiu; A.A. Mehadi; J.W. Shuford and W. Tadesse. 1995. Fractionation of residual of cadmium, copper, nickel, lead, and zinc in previously sludge amended soil. Comunications in Soil Science and Plant Analysis. 26: 13-14, 2193-2204; 18 ref.

Trindade, A.V.; C.A. Vildoso; L.M. Costa; R.C. Muchovej and J.F. Gallardo. 1993. Effect of sewage effluent on the content of heavy metals in soil, the growth and nutrition of maize. Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Vicosa, Vicosa, Brazil. El estudio del suelo y de su degradación en relación con la desertificación. Actas del 12 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Salamanca, Sevilla (España) 19 a 26 de Septiembre de 1993. 1993, 1776-1783; 10 ref.

Turski, R. 1982. Heavy metal contents in sites after fertilization with sewage sludge. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 33, 171-175; 3 ref., 2 fig.

Valadares, J.M.; M. Gal; U. Mingelfrin and A.L. Page 1983. Some heavy metals in soils treated with sewage sludge: their effects on yiled, and their uptake by plants. Journal of Envirnmental Quality. 1, 49-57; 33 ref.

Vajiala, M.; R. Ciofu; V. Popescu; N. Dumitr and E. Rusu. 1987. An investigation on the feasibility of using sewage sludge as a fertilizer for growing vegetables. Lucrari Stiintifice, Institutul Agronomic "Nicolae Balcescu", B Horticulutura. 30, 15-26; 5 ref.

Yamada, M.; T. Ebihara; S. Matsumura and K. Yamada. 1985. Influence on soil and crops of cumulative applications od sludge. Gunma Journal of Agricultural Research, A. No. 2 43-52; 15 ref.

Zabulene, Y.U.; E. Lukoshyunene; V. Shivil' pene; A. Antanaitis and T. Tamulis. 1984. Application of sewage sludge as a fertilizer. Khimiya V Sel SKOM Khozyaistve. No. 12, 14-15.

Capítulo 7

RESUMEN GENERAL

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados se describen a continuación:

Crecimiento de Plantas. Se observó en general un mayor crecimiento de las plantas con la aplicación de lodos, comparado con fertilizante inorgánico y testigo. Este mayor crecimiento tiene una gran influencia que se manifiesta en precocidad y mayor rendimiento de los cultivos. Los elementos que aumentan su concentración al aplicar lodo como mejorador del suelo son nitrógeno, fósforo y zinc. Además de la materia orgánica incorporada que incrementa la actividad microbiana, la cual al degradar la materia orgánica hace que los nutrimentos de lenta liberación estén disponibles para las plantas, a diferencia del fertilizante inorgánico que solamente aporta nitrógeno, fósforo y potasio pero que un alto porcentaje se lixivia o precipita, de tal forma que solamente una porción del fertilizante que se aplicó, queda disponible para las plantas.

Precocidad de Cosecha. En esta variables se obtuvieron cosechas precoces en los cultivos de tomate y coliflor con la aplicación de lodo, lo que implica que el costo de producción se reduce debido a los gastos que implican los riegos, control de malezas y control de insectos y enfermedades. Además, normalmente los precios más altos en hortalizas están asociados a los primeros productos que salen al mercado lo cual puede ser una gran diferencia en la utilidad obtenida.

Rendimiento. Se observaron incrementos en rendimientos en los cultivos de tomate, coliflor, maíz y trigo. Se observó que con dosis de lodo de 8 t ha^{-1} se obtuvieron rendimientos superiores, comparado con dosis recomendadas de fertilizante inorgánico para los cultivos sembrados aún, y cuando la aplicación de lodo fue única a diferencia del fertilizante inorgánico cuya aplicación se efectuó en cada ciclo de siembra. Con la aplicación de lodo deshidratado en dosis de 4 t ha^{-1} se observó un comportamiento similar comparado con el fertilizante inorgánico.

Efecto Residual. Se encontró una marcada diferencia entre el lodo líquido y deshidratado en lo que respecta al efecto inmediato y residual. Se observó que el lodo líquido tiene un efecto inmediato después de su aplicación en los cultivos, pero su efecto residual a través de los ciclos de siembra es menor comparado con el deshidratado que tuvo un efecto residual positivo en el rendimiento incluso hasta el cuarto ciclo. Esto indica que el efecto residual del lodo es un aspecto muy importante a considerar al realizarse un estudio de viabilidad económica del uso del lodo en la agricultura.

Metales Pesados en Porciones Comestibles de Tomate, Maíz y Trigo. Los niveles de los metales pesados en las porciones comestibles de tomate, maíz y trigo se encontraron por debajo del límite permisible, lo que indica que la aplicación del lodo no es un factor de riesgo para la salud si se utiliza en las dosis y en los suelos en donde se llevaron a cabo las investigaciones. Es bien sabido que los factores que tienen mayor influencia en la absorción de metales pesados con el uso de lodos son: dosis aplicada, calidad del lodo, cultivo y pH del suelo. Lo que indica que estos factores han sido favorables en este caso, tanto en el ciclo inmediato a la aplicación del lodo, como en subsecuentes ciclos de siembra.

Plomo. Con respecto a la concentración del plomo en porciones comestibles no se detectó con el equipo utilizado, lo que indica que las porciones comestibles estudiadas no almacenan este metal o que la cantidad absorbida por las raíces es muy baja.

Níquel. En este caso los niveles no se detectaron en el caso del tomate y en el caso del trigo fue inferior a la concentración encontrada en el testigo. Solamente en el caso del maíz se observaron valores superiores al aplicar lodo en dosis 8 t ha^{-1}. Sin embargo, todos los niveles en las porciones comestibles estudiadas se encontraron por debajo de los límites permisibles para los cultivos agrícolas.

Cadmio. Su concentración en maíz y tomate se encontró por debajo del límite de detección del equipo utilizado. En el caso del trigo todos los tratamientos estuvieron por debajo del límite de detección o muy cerca, no habiendo diferencia con respecto al fertilizante inorgánico y testigo. En todos los casos las concentraciones encontradas están muy por debajo del límite permisible para cultivos agrícolas.

Cobre. Los resultados mostraron que los niveles de cobre en todos los casos estuvieron por debajo del límite permisible. Solamente se observó un ligero incremento en tomate con la aplicación de lodo comparado con el fertilizante inorgánico, no así con el testigo. En el caso de maíz y trigo no se observó diferencia entre los tratamientos.

Zinc. Respecto a este metal en el caso del trigo no se encontró diferencia entre los tratamientos. En el caso del tomate se observó un ligero incremento con la aplicación de lodo deshidratado 8 t ha^{-1} comparado con fertilizante inorgánico y en el caso del maíz se observaron diferencias notorias con lodo en dosis de 8 t ha^{-1} comparado con testigo, fertilizante inorgánico y lodo en dosis de 4 t ha^{-1}. Sin embargo, todas las porciones comestibles y en todos los tratamientos se encontraron niveles por debajo del permitido para cultivos agrícolas.

Metales Pesados en Suelo. Al igual que los metales pesados en porciones comestibles, los metales pesados en el suelo en todos los tratamientos de este estudio mostraron valores por debajo del límite de tolerancia. En este caso los factores con mayor influencia que dan la pauta del uso adecuado del lodo son: dosis aplicada, calidad del lodo y pH del suelo. Lo que indica que estos factores han sido favorables en este caso y que el uso del lodo en las dosis aplicadas no tiene ningún efecto negativo respecto a metales disponibles y total adsorbido. A continuación se describen los metales pesados analizados en el suelo.

Cadmio. Tanto el cadmio disponible como el total adsorbido se encontraron por debajo de los límites de detección del equipo utilizado en todos los tratamientos.

Níquel. Después del primer ciclo de siembra se observó un ligero incremento en el níquel disponible, pero sin rebasar el rango bajo. No se presentó esta diferencia en el segundo ciclo de siembra. Respecto al níquel total adsorbido, todos los tratamientos fueron similares en ambos ciclos de siembra.

Plomo. Se observó un ligero incremento en el plomo total adsorbido con dosis de lodo de 8 t ha^{-1} en ambos ciclos de siembra, pero por debajo del límite de tolerancia permitida. Lo mismo sucedió en el caso del plomo disponible encontrándose en ambos ciclos de siembra en el rango medio.

Cromo. Ligeros incrementos se observaron con la aplicación de lodo líquido y deshidratado, pero por debajo de límite de tolerancia.

Cobre. Se observaron ligeros incrementos en el cobre total adsorbido y disponible en el primer ciclo de siembra en los tratamiento de 8 t ha^{-1} de lodo , pero sin sobrepasar el rango bajo. En el segundo ciclo de siembra todos los tratamientos mostraron similitud.

Zinc. Este elemento fue el que mostró mayor incremento con dosis de lodo de 8 t ha^{-1}, incluso alcanzando el rango intermedio en el caso del zinc disponible a diferencia del fertilizante inorgánico, testigo y lodo 4 t ha^{-1} que se encontraron en el rango bajo en ambos ciclos de siembra. En el caso del zinc total adsorbido presentó la misma tendencia, encontrándose en todos los casos por debajo del límite de tolerancia.