



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

EFECTO AMBIENTAL Y ECONÓMICO-SOCIAL POR LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS DE ORIGEN URBANO COMO MEJORADORES DE SUELOS AGRÍCOLAS

EDUARDO GONZÁLEZ FLORES

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

PUEBLA, PUEBLA

2011



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CAMPUE- 43-2-03 ANEXO

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe **Eduardo González Flores** alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Mario Alberto Tornero Campante** por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Efecto ambiental y económico-social por la aplicación de biosólidos de origen urbano como mejoradores de suelos agrícolas** y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Puebla, Puebla, 1 de agosto de 2011.

Eduardo González Flores

Firma

Dr. Mario Alberto Tornero Campante

Vo. Bo. Profesor Consejero o Director de Tesis

La presente tesis, titulada: **Efecto ambiental y económico-social por la aplicación de biosólidos de origen urbano como mejoradores de suelos agrícolas**, realizada por el alumno: **Eduardo González Flores**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. MARIO ALBERTO TORNERO CAMPANTE

ASESOR:


DR. ENGELBERTO SANDOVAL CASTRO

ASESOR:


DR. ANDRÉS PÉREZ MAGAÑA

ASESOR:


DR. ALBERTO JOSÉ GORDILLO MARTÍNEZ

Puebla, Puebla, 1 de agosto de 2011

EFFECTO AMBIENTAL Y ECONÓMICO-SOCIAL POR LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS DE ORIGEN URBANO COMO MEJORADORES DE SUELOS AGRÍCOLAS

Eduardo González Flores, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

La generación y disposición final de los biosólidos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, es un grave problema ambiental. La aplicación en suelos agrícolas es una opción viable por su contenido de materia orgánica, N, P y micronutrientes. La principal restricción es su contenido de metales pesados. En la ciudad de Puebla de Zaragoza, México, los biosólidos generados se aplican en suelos agrícolas de comunidades rurales cercanas. Los suelos son delgados y de baja productividad y se cultiva principalmente maíz. El objetivo del presente trabajo fue evaluar los efectos ambientales, económicos y sociales producidos por la aplicación de biosólidos en los agroecosistemas de la comunidad La Paz Tlaxcolpan, Puebla. Se tomaron muestras de suelo y de tejido vegetal de la planta de maíz. Se determinó la biodisponibilidad y distribución de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en las diferentes fracciones del suelo. Se evaluó la fertilidad del suelo y las concentraciones de los metales pesados en raíz, tallo, hojas y grano de la planta. Para evaluar los efectos económicos y sociales se realizó una encuesta entre los productores de la comunidad que aplican biosólidos. La biodisponibilidad de los metales determinados no se incrementa en función del tiempo. Cu y Zn fueron encontrados en todas las partes de la planta en niveles adecuados. La fertilidad del suelo se incrementa de manera temporal. Los rendimientos aumentan en los suelos enmendados. Los efectos ambientales por la aplicación de biosólidos en los suelos agrícolas de La Paz Tlaxcolpan son positivos. Los beneficios económicos y sociales son mínimos.

Palabras clave: metabolismo social, biodisponibilidad, biosólidos, metales pesados, agroecosistema.

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC-SOCIAL EFFECT BY THE APPLICATION OF BIOSOLIDS FROM URBAN ORIGIN AS AGRICULTURAL SOIL IMPROVERS

Eduardo González Flores, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

The generation and final disposition of biosolids produced in the treatment plants wastewater, is a serious environmental problem. The application on agricultural soils is a viable option due to its content of organic matter, N, P and micronutrients. The main restriction is its content of heavy metals. In the city of Puebla de Zaragoza, México, the biosólidos generated are applied in agricultural soils of nearby rural communities. The soils are thin, and of low productivity and maize is cultivated mainly. The aim of present work was to assess the environmental, economic and social effects caused by the application of biosolids in agroecosystems of the community La Paz Tlaxcolpan, Puebla. Soil samples, and plant tissues were taken of the maize plant. It was determined the bioavailability and distribution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in different soil fractions. It was assessed soil fertility and concentrations of heavy metals in root, stem, leaf and grain of the plant. To evaluate the economic and social effects, a survey was conducted between the producers of the community that apply biosolids. The bioavailability of certain metals does not increase with time. Cu and Zn were found in all parts of the plant at adequate levels. Soil fertility is increased temporarily. Yields increased in the amended soils. The environmental effects from the application of biosolids on agricultural soils of La Paz Tlaxcolpan are positive. Economic and social benefits are minimal.

Keys words: social metabolism, bioavailability, biosolids, heavy metals, agroecosystem.

DEDICATORIA

A Dios por guiar mis pasos

A mis amados y queridos padres, **María Cristina y Fernando** por todo su amor, su confianza y su apoyo. Han sido la fuerza motriz que me ha alentado durante todo éste proceso; sin ustedes esto jamás hubiera sido posible.

A mi querida hermana, la **M. C. María Adriana** por su enorme apoyo en todos sentidos, has sido parte fundamental de este logro.

A mi querido amigo, el Ing. **Francisco Eligio García Mora**, por su apoyo desinteresado y por brindarme un tesoro invaluable: su generosa amistad.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios doctorales en el Colegio de Postgraduados Campus Puebla durante el período 2007-2011.

Al **Colegio de Postgraduados Campus Puebla**, por brindarme la oportunidad de continuar mi formación académica y humana.

Al **Colegio de Postgraduados**, por su apoyo financiero con el Fideicomiso Revocable de Fondos para la Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Centro Público de Investigación No. 167304-2009.

Al **Dr. Mario Alberto Tornero Campante**, por sus enseñanzas, consejos, orientación y apoyo incondicional durante todo el proceso de mi formación como futuro investigador. Además por su paciencia y su amistad.

Al **Dr. Engelberto Sandoval Castro**, por su apoyo, consejos y apreciables observaciones en este trabajo de investigación.

Al **Dr. Andrés Pérez Magaña**, por brindarme su conocimiento, sugerencias y apoyo para el desarrollo de esta investigación

Al **Dr. Alberto José Gordillo Martínez**, por su apoyo, comentarios y sugerencias durante la presente investigación.

Al **Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP)**, especialmente al **Ing. Jesús Contreras Méndez** y a la **Ing. Beatriz Torres Trucios**, de la **Gerencia de Biosólidos**, por las facilidades otorgadas y todo el apoyo recibido para la realización de este trabajo de investigación.

Al **Dr. Misael Murillo Murillo**, Profesor investigador del Instituto **Tecnológico de Puebla (ITP)**, por las facilidades otorgadas para la realización de parte del trabajo experimental en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de esa prestigiada institución.

A la **M. C. Noemí Bonilla y Fernández** por su apoyo con equipo de laboratorio con el cual se realizó parte del trabajo experimental de esta investigación.

A todos los **amigos y compañeros** con los que tuve la fortuna de convivir durante los cuatro años de mis estudios de Doctorado en el Colegio de Postgraduados. Gracias por los grandes momentos pasados a su lado.

A todo el **personal de académico** del Colegio de Postgraduados.

A todo el **personal administrativo y trabajadores** del Colegio de Postgraduados.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema.....	2
2. Objetivos.....	4
3. Hipótesis.....	4
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	6
1.1. El enfoque agroecológico.....	6
1.2. La agroecología.....	7
1.3. Ecosistemas y agroecosistemas.....	8
1.4. La relación sociedad-naturaleza.....	9
1.5. Los conflictos ambientales.....	11
1.6. El metabolismo social y la generación de residuos.....	11
1.7. La generación de aguas residuales urbanas.....	16
1.8. La generación de aguas residuales en la ciudad de Puebla, México.....	17
1.9. Los biosólidos.....	19
1.10. La generación de biosólidos.....	19
1.11. Estabilización de biosólidos: digestión anaerobia.....	22
1.12. Marco legal sobre el uso de biosólidos.....	24
1.13. Aplicación de biosólidos en la agricultura.....	26
1.14. Efectos ambientales por el uso de biosólidos en la agricultura.....	31
1.15. Beneficios económicos y sociales por la aplicación de biosólidos.....	32
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA GENERAL	34
2.1. Plan general del proyecto.....	34
2.2. Descripción de la zona de estudio.....	37
2.2.1. Medio físico.....	37
2.2.2. Perfil sociodemográfico.....	38
2.3. Efecto ambiental producido por la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas.....	39
2.3.1. Biodisponibilidad de metales pesados en suelos con biosólidos.....	39
2.3.2. Operacionalización de variables.....	40

2.3.3. Efecto de los biosólidos en la fertilidad del suelo y la planta de maíz..	40
2.3.4. Operacionalización de variables.....	41
2.4. Efecto económico y social producido por la aplicación de biosólidos.....	42
2.4.1. Operacionalización de variables.....	44
2.5. Desarrollo de la estrategia.....	44

CAPÍTULO III. BIODISPONIBILIDAD Y FRACCIONAMIENTO DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS ENMENDADOS CON BIOSÓLIDOS..... 46

Resumen.....	46
Abstract.....	47
Introducción.....	47
Materiales y métodos.....	50
Resultados.....	53
Discusión.....	59
Conclusiones.....	62
Literatura citada.....	63

CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN CULTIVO DE MAÍZ: EFECTO A MEDIANO PLAZO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y EL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN LA PLANTA..... 66

Resumen.....	66
Abstract.....	67
Introducción.....	67
Materiales y métodos.....	70
Resultados.....	72
Discusión.....	79
Conclusiones.....	83
Literatura citada.....	84

CAPÍTULO V. EL USO DE BIOSÓLIDOS COMO MEJORADORES DE SUELOS AGRÍCOLAS Y SUS EFECTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES EN LA COMUNIDAD DE LA PAZ TLAXCOLPAN, PUEBLA.....	88
Resumen.....	88
Abstract.....	89
Introducción.....	90
Materiales y métodos.....	95
Resultados.....	96
Discusión.....	109
Conclusiones.....	117
Literatura citada.....	118
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN GENERAL.....	121
CONCLUSIONES GENERALES.....	131
ESTRATEGIA PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL, EFICIENTE Y SIN RIESGOS AMBIENTALES DE BIOSÓLIDOS EN SUELOS AGRÍCOLAS EN LAS COMUNIDADES RURALES DEL SUR DEL MUNICIPIO DE PUEBLA.....	134
Causas y efectos del manejo inadecuado, ineficiente y riesgoso.....	135
Medios y fines para lograr un manejo integral, eficiente y sin riesgos de los biosólidos.....	135
Definición de objetivos.....	135
Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA).....	136
Estrategia propuesta para el manejo integral, eficiente y sin riesgos ambientales de biosólidos en la zona de estudio.....	136
BIBLIOGRAFÍA GENERAL.....	141

LISTA DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.1	Métodos de tratamiento y disposición final de lodos residuales y biosólidos.....	21
Cuadro 1.2	Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.....	25
Cuadro 1.3	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos residuales y biosólidos.....	25
Cuadro 1.4	Aprovechamiento de biosólidos.....	26
Cuadro 2.1	Operacionalización de la variable “biodisponibilidad de metales pesados en suelos enmendados con biosólidos”..	40
Cuadro 2.2	Operacionalización de la variable “fertilidad de los suelos mejorados con biosólidos”.....	41
Cuadro 2.3	Operacionalización de la variable “beneficio económico y social obtenido por los productores”.....	44
Cuadro 3.1	Condiciones de operación del equipo de ICP-AES.....	53
Cuadro 3.2	Valores de la concentración total y de la concentración en la fracción intercambiable (media \pm S, n = 3) de Cu, Ni, Pb y Zn en muestras de suelos con diferente antigüedad de aplicación de biosólidos.....	58
Cuadro 4.1	Condiciones de operación del equipo de ICP-AES.....	72
Cuadro 4.2	Parámetros agronómicos de suelos enmendados con biosólidos y su variación con la antigüedad de aplicación.	74
Cuadro 4.3	Matriz de correlación de Pearson para los parámetros agronómicos.....	75
Cuadro 4.4	Matriz de correlación de Pearson para los parámetros agronómicos y los metales pesados extraíbles con DTPA..	76
Cuadro 4.5	Concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en las diferentes partes de la planta de maíz (mgkg ⁻¹).....	77
Cuadro 4.6	Matriz de correlación de Pearson para Cu, Ni y Zn extraíbles con DTPA y su contenido en la planta.....	78
Cuadro 5.1	Edades de los productores.....	96
Cuadro 5.2	Escolaridad de los productores.....	97
Cuadro 5.3	Número de parcelas que poseen los productores.....	97
Cuadro 5.4	Superficie total que poseen los productores.....	97
Cuadro 5.5	Fertilización.....	99

Cuadro 5.6	Tracción empleada por los productores.....	99
Cuadro 5.7	Motivos expresados por los productores, que los convencieron para usar biosólidos.....	100
Cuadro 5.8	Superficie en la cual los productores aplican biosólidos.....	100
Cuadro 5.9	Incorporación de biosólidos al suelo después de la aplicación.....	101
Cuadro 5.10	Motivo por la cual incorpora los biosólidos hasta esa fecha.....	101
Cuadro 5.11	Cambios notados por el productor en suelos con biosólidos.....	102
Cuadro 5.12	Cambios notados por el productor en la planta de maíz en suelos con biosólidos.....	102
Cuadro 5.13	Principales desventajas encontradas por el productor en el uso de biosólidos.....	103
Cuadro 5.14	Porcentaje de incremento en los rendimientos de las parcelas con biosólidos.....	104
Cuadro 5.15	Porcentaje de la cosecha que el productor destina a la alimentación de su familia.....	104
Cuadro 5.16	Porcentaje de la cosecha que el productor destina a la venta.....	105
Cuadro 5.17	Porcentaje de la cosecha que el productor destina para alimentación de animales.....	105
Cuadro 5.18	Porcentaje de la cosecha que el productor destina para semilla.....	106
Cuadro 5.19	Incremento de la producción de rastrojo después de la aplicación de biosólidos.....	106
Cuadro 5.20	Fuente de ingresos económicos que utilizan los productores para cubrir servicios de salud privados.....	108
Cuadro 5.21	Estimación del beneficio general proporcionado por aplicar biosólidos, de acuerdo a los productores.....	108
Cuadro E.1	Matriz de objetivos y estrategias.....	137

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Principales procesos del metabolismo entre la sociedad y la naturaleza.....	13
Figura 1.2	El proceso de excreción dentro del metabolismo social....	16
Figura 1.3	Localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Puebla.....	18
Figura 1.4	Esquema de las reacciones llevadas a cabo durante el proceso de digestión anaerobia. Los números indican la población bacteriana responsable de cada etapa del proceso. 1. Bacterias fermentativas; 2. Bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3. Bacterias homoacetogénicas; 4. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas.....	23
Figura 1.5	Marco legislativo para el manejo y reúso de biosólidos en México.....	27
Figura 1.6	Aplicación de biosólidos en suelos agrícolas de La Paz Tlaxcolpan, Puebla.....	28
Figura 2.1	Plan general del proyecto de investigación.....	36
Figura 2.2	Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	37
Figura 3.1	Variación de la biodisponibilidad de Cu, Ni, Pb y Zn en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos (0 = Testigo).....	54
Figura 3.2	Distribución porcentual de cobre en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.....	56
Figura 3.3	Distribución porcentual de níquel en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.....	56
Figura 3.4	Distribución porcentual de plomo en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.....	57

Figura 3.5	Distribución porcentual de zinc en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.....	57
Figura 4.1	Variación temporal del pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y nitrógeno de nitratos en el suelo después de la aplicación de biosólidos.....	73
Figura 4.2	Metales pesados extraíbles con DTPA y su variación con la antigüedad de aplicación de biosólidos al suelo.....	76
Figura 5.1	Ciclo del agua en el ámbito urbano.....	92
Figura E.1	Causas y efectos del problema central identificado.....	138
Figura E.2	Definición de objetivos.....	139
Figura E.3	Matriz de análisis FODA.....	140

INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es el recurso natural más esencial en la Tierra, sin el cual la vida sería imposible. En un gran porcentaje las fuentes de agua del planeta están contaminadas debido a las actividades antropogénicas. La mayoría de las aguas residuales generadas por los grandes centros urbanos e industriales son descargadas en los cuerpos receptores (ríos, lagos o lagunas), ocasionando su degradación y haciéndolos prácticamente inutilizables para el aprovechamiento humano.

Una cada vez más estricta regulación ambiental en todo el mundo, respecto a las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, ha propiciado un notable incremento en la instalación de plantas para tratar los efluentes producidos por las actividades humanas. Los procesos de tratamiento de aguas residuales van encaminados a reducir la concentración de materiales orgánicos de fácil descomposición. Los residuos sólidos insolubles que permanecen después del tratamiento del agua, son conocidos como lodos residuales o biosólidos.

La gran cantidad de biosólidos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales hace que su disposición final se haya convertido en un problema ambiental y económico. La incineración, su colocación en rellenos sanitarios y su aplicación al suelo son las opciones que se tienen para la disposición final de los biosólidos. La disposición en rellenos sanitarios y el uso en suelos son las opciones más viables económicamente (Metcalf y Eddy 2003).

El uso de los biosólidos en suelos agrícolas tiene un gran incentivo en vista de su potencial como mejoradores de las condiciones de fertilidad. Generalmente los biosólidos contienen compuestos orgánicos, macronutrientes, una gran cantidad de micronutrientes, metales traza no esenciales para los cultivos y microorganismos (O'Connor *et al.* 2005). La aplicación en suelos agrícolas presenta beneficios y riesgos potenciales.

En la ciudad de Puebla de Zaragoza, México, la disposición final de los biosólidos generados en sus plantas de tratamiento de aguas residuales también se ha convertido en un problema económico y ambiental. Actualmente se están usando

como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas de comunidades rurales al sur de la ciudad en donde se cultiva maíz principalmente. El efecto, positivo y negativo a través del tiempo, que los biosólidos proporcionan a los agrosistemas de esta zona, es una situación no estudiada todavía.

Por esta razón, el propósito de esta investigación fue evaluar los posibles efectos benéficos en la fertilidad de los suelos, los riesgos de contaminación y los potenciales beneficios económicos proporcionados a los productores.

Se evaluó el comportamiento de las características de fertilidad de suelos tratados con biosólidos a través del tiempo, a partir de la aplicación de los biosólidos y la presencia de elementos potencialmente tóxicos disponibles tanto en suelo como en el tejido vegetal de la planta de maíz. La información obtenida puede proporcionar las bases para establecer una estrategia, para un uso sustentable de estos residuos, que beneficie a los productores de la zona. El objetivo de tal estrategia es aumentar la productividad de los suelos, disminuir los riesgos de contaminación y beneficiar económicamente a los productores. Todo lo anterior basado en un manejo integral, sistémico y eficiente de los biosólidos en la zona de estudio.

1. Planteamiento del Problema

Puebla de Zaragoza, una de las ciudades más importantes de México, tanto por su creciente población como por su desarrollo urbano e industrial, presenta una situación cada día más crítica en cuanto a la disponibilidad de agua para uso humano. En el año 2000 el gobierno estatal comenzó un programa para tratar de recuperar los ríos Atoyac y Alseseca, que cruzan la ciudad y que están altamente contaminados por las descargas de tipo urbano e industrial que sufren a su paso por la ciudad. Se construyeron cinco plantas de tratamiento de aguas residuales destinadas a depurar las aguas de tipo urbano o doméstico generadas por la población, las cuales una vez tratadas son vertidas a los ríos Atoyac y Alseseca, los cuales a su vez desembocan en la Presa Manuel Ávila Camacho, cuyas aguas son destinadas al Distrito de Riego 030, el cual suministra agua para cultivos de maíz y alfalfa en municipios como Tecamachalco, Tlacotepec y Tepanco.

Si bien el problema de las aguas de desecho se ha solucionado parcialmente mediante las plantas de tratamiento, en éstas y como parte del proceso de tratamiento, se generan residuos sólidos, llamados lodos residuales o biosólidos (SEMARNAT 2002). Anualmente se producen aproximadamente 80,000 m³ de biosólidos y por lo tanto se ha creado otro problema: la acumulación y la disposición final. Para tratar de solucionar esta situación el gobierno del estado de Puebla ha puesto en marcha una iniciativa, a través del Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP), que consiste en incorporar los biosólidos a los suelos agrícolas de comunidades rurales del sur del municipio de Puebla, en donde existen suelos con características que los hacen adecuados para el propósito de enmienda. Estos suelos son delgados, de baja fertilidad y cuyos rendimientos en la producción de maíz oscila entre 400-500 kg ha⁻¹.

Desde el año 2003 los biosólidos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de la ciudad de Puebla de Zaragoza (Atoyac Sur y Alseseca Sur), son depositados en suelos agrícolas que se localizan en comunidades rurales como: La Paz Tlaxcolpan, Guadalupe Tecola, San Andrés Azumiatla, Santa Clara Ocoyucan y San Francisco Totimehuacan entre otras, ubicadas al sur de la ciudad y que se destinan a la producción de cultivos de temporal. Actualmente SOAPAP está aplicando 400 m³ha⁻¹ de biosólidos cada cuatro años en suelos en donde se cultiva exclusivamente maíz.

Algunos trabajos de investigación (Ortiz-Hernández *et al.* 1999, Hernández-Herrera *et al.* 2005) mencionan incremento en los rendimientos, pero es necesario y prioritario conocer los efectos ambientales que la aplicación de biosólidos ocasiona en los agroecosistemas de la zona y evaluar los impactos potenciales económicos y sociales a los productores. De acuerdo a la situación planteada anteriormente, es necesario responder a las siguientes interrogantes con el fin de determinar la pertinencia o no de continuar con esta práctica.

¿Aumenta la disponibilidad de metales pesados y en consecuencia el riesgo de su ingreso a las redes tróficas a través de los cultivos?

¿Cuál es el efecto de los biosólidos aplicados a suelos agrícolas sobre la fertilidad, a en función del tiempo?

¿La aplicación de biosólidos como enmiendas agrícolas, proporciona algún beneficio económico o social a los productores?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinar los efectos ambientales en suelos agrícolas de temporal del sur del municipio de Puebla que han sido enmendados con biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y evaluar el beneficio económico-social que esta práctica ofrece a los productores.

2.2. Objetivos específicos

1. Conocer el comportamiento de los elementos: Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en cuanto a su biodisponibilidad y su contenido en las diferentes fracciones del suelo enmendado con biosólidos.
2. Evaluar los efectos producidos por la aplicación de biosólidos, en las propiedades que determinan la fertilidad del suelo y el contenido de Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en la planta de maíz.
3. Evaluar el potencial beneficio económico y social ocasionado a los productores por la aplicación de biosólidos en sus parcelas.

3. Hipótesis

3.1. Hipótesis general

La aplicación de biosólidos en suelos agrícolas impacta positivamente el agroecosistema y beneficia económicamente a los productores de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan.

3.2. Hipótesis específicas

1. La biodisponibilidad de metales pesados y el riesgo de su ingreso a las redes tróficas por la aplicación de biosólidos al suelo, se incrementan en función del tiempo.
2. La fertilidad de los suelos aumenta por la aplicación de biosólidos.
3. Existe un incremento en el rendimiento de las cosechas en suelos con biosólidos y en consecuencia beneficio económico y social para los productores.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan los referentes teóricos y conceptuales que ayudaron a explicar y fundamentar el efecto ambiental y socio-económico por la aplicación de los biosólidos de origen urbano, como mejoradores de suelos agrícolas en la localidad de La Paz Tlaxcolpan, Puebla. Considerando la naturaleza del problema de investigación, es decir su carácter socio-ambiental, se hizo necesario abordarlo desde una perspectiva ecológica pero también social. Por esta razón se empleó el enfoque agroecológico.

La relación sociedad-naturaleza es otro concepto que se utilizó para fundamentar el origen eminentemente social de la generación de residuos y su descarga en los ecosistemas. Debido a que al interactuar con la naturaleza el hombre influye en los fenómenos naturales e interfiere en su desarrollo espontáneo, esta relación ha llevado a modificaciones de los sistemas naturales y a su vez a modificaciones adaptativas del hombre y la sociedad. Por lo tanto, la herramienta teórico-metodológica empleada para abordar la relación sociedad-naturaleza y el problema de investigación desde una perspectiva integral (social y ambiental) fue el metabolismo social. Los conceptos antes mencionados se desarrollan más adelante.

1.1. El enfoque agroecológico

El enfoque agroecológico proporciona elementos para analizar la aplicación de biosólidos de origen urbano en los agroecosistemas, no únicamente desde una dimensión ambiental sino también desde la social y económica. A partir de una perspectiva sistémica y compleja, este enfoque delinea los principios básicos para la evaluación de los agroecosistemas de manera integral, incorporando elementos ambientales, sociales, económicos, políticos y culturales (Altieri y Nicholls 2000).

La aplicación de biosólidos en suelos agrícolas de La Paz Tlaxcolpan presenta repercusiones ambientales en la calidad del recurso suelo, en la atmósfera, en el paisaje, etc. Efectos en la economía de los productores. Tiene implicaciones políticas debidas a la decisión institucional (por parte de SOAPAP) de aplicar los residuos en

comunidades rurales. Y el componente cultural está presente en la aceptación de los productores de la localidad para aplicar biosólidos en sus terrenos.

El enfoque agroecológico presenta un modo alternativo de análisis del proceso de producción agrícola al tomar en cuenta los aspectos culturales, sociales, económicos y ambientales que se interrelacionan e influyen en la producción de alimentos.

1.2. La agroecología

La agroecología científica estudia los principios ecológicos básicos para caracterizar, usar y manejar los ecosistemas terrestres de forma que protejan al medio ambiente, y sean económicamente productivos, socialmente justos y culturalmente sensibles (De la Rosa 2008). En otras palabras, la esencia de la agroecología radica en explicar cómo se aplican los principios y conceptos ecológicos en el desarrollo rural y en la forma de hacer agricultura.

La agroecología surge como un nuevo campo de conocimiento científico con diferentes implicaciones epistemológicas, metodológicas y prácticas (Toledo 1995). La base epistemológica de la agroecología la constituye el concepto de coevolución entre los sistemas sociales y ecológicos. Desde esta perspectiva, la producción agraria es ante todo el resultado de las presiones socioeconómicas que realiza la sociedad sobre los agroecosistemas en el tiempo. La agroecología pretende no solo la maximización de la producción de un componente particular; sino la optimización del agroecosistema en lo económico, social y ecológico (Altieri 1999). La agroecología como alternativa incorpora un enfoque de la agricultura más ligado al entorno natural y más sensible socialmente, centrada en una producción sustentable ecológicamente.

A diferencia del enfoque agroindustrial, basado en la difusión de paquetes uniformes de tecnologías, con objetivos netamente mercantiles; la agroecología se centra en principios como la biodiversidad, el reciclaje de nutrientes, la sinergia e interacción entre los diversos cultivos, animales y suelo; además de la regeneración y conservación de los ecosistemas. Este enfoque parte de las técnicas y posibilidades locales, adaptándolas a sus condiciones agroecológicas y socio-económicas.

1.3. Ecosistemas y agroecosistemas

La palabra ecosistema es la contracción de los vocablos “sistema ecológico”, los ecosistemas son sistemas; es decir, un conjunto de elementos, componentes o unidades relacionadas entre sí; en esto consiste su carácter sistémico. Los ecosistemas se caracterizan por ser sistemas abiertos a la entrada y salida de materia y energía. Lo que constituye una salida para un ecosistema dado, representa una entrada para otro ecosistema colindante (Odum 1980).

Los elementos que conforman los ecosistemas son tanto de origen biótico como abiótico. Los primeros incluyen a todos los seres vivos, los componentes abióticos son entidades tales como el agua, los suelos, la atmósfera, la roca madre; estos pueden tener origen orgánico, como el humus o la capa de hojarasca sobre la superficie del suelo, u origen inorgánico como los minerales y arcillas que constituyen el suelo. Los ecosistemas poseen componentes que interaccionan estableciendo mecanismos de retroalimentación. Cada componente o unidad de un sistema puede existir en diferentes estados, de tal forma que el estado seleccionado se determina basándose en las interacciones con los demás elementos del sistema. Los ecosistemas presentan características tales como el flujo de energía y de nutrimentos, mecanismos de regulación de poblaciones, estabilidad y resiliencia (Common y Stagl 2008).

Los agroecosistemas son ecosistemas naturales transformados por el hombre mediante procesos para obtener productos animales, agrícolas y forestales. Son sistemas abiertos que reciben insumos del exterior y brindan productos que entran en otros sistemas externos. La manipulación y la alteración que el ser humano hace de los ecosistemas con el propósito de producir alimentos, ocasiona que los agroecosistemas sean muy diferentes a los ecosistemas naturales. Sin embargo, al mismo tiempo es posible observar en los agroecosistemas los procesos, la estructura y otras características de un ecosistema natural (Glissman 2002).

La principal diferencia entre los ecosistemas naturales y los manipulados por el hombre, es que los primeros tienen la capacidad de automantenimiento,

autoreparación, y autoreproducción. Los ecosistemas transformados son sistemas intrínsecamente inestables, que requieren energía externa para el mantenimiento (Toledo 1993).

Para abordar el modelo de los agroecosistemas es necesario detallar primero lo que es un sistema. Un sistema se puede definir como un arreglo de componentes ó un conjunto de colección de elementos, unidas o relacionadas entre sí, de tal manera que forman y actúan como una unidad, una entidad o un todo. Los elementos de un sistema son sus componentes, la interacción entre ellos, las entradas, las salidas y los límites del sistema. En el caso de los agroecosistemas, los componentes pueden ser físicos, como el sustrato geológico, el suelo, el clima o la parcela de cultivo; biológicos, como plantas, animales y microorganismos; y socioeconómicos, como pueden ser la familia o la unidad de producción (Martínez 2004).

Además de proporcionar cultivos alimentarios y de fibra, y de constituirse en fuente de recursos genéticos de cultivos y suministrar empleo, los agroecosistemas mantienen algunas funciones biológicas muy importantes, tales como la infiltración y el control de flujo de agua y la protección parcial de los suelos; proveen hábitats para aves, polinizadores y organismos del suelo importantes a la agricultura; producen materia orgánica para el suelo; y fijan carbono de la atmósfera (Common y Stagl 2008).

1.4. La relación sociedad-naturaleza

El surgimiento de los grandes problemas ambientales actuales de escala planetaria, es una manifestación concreta de la compleja relación que siempre ha existido entre el ser humano (organizado en sociedad) y la naturaleza en donde habita y a partir de la cual genera sus satisfactores a través de los procesos de producción que implementa. La alteración del clima, la desaparición de la biodiversidad, la acumulación de enormes cantidades de de desechos industriales y domésticos, señalan las características propias de la sociedad actual que los genera (Tomassino *et al.* 2005).

Los intercambios materiales que realizan los seres humanos con la naturaleza y entre ellos mismos, y que a su vez generan la problemática ambiental inherente a la articulación sociedad-naturaleza, han sido abordados tradicionalmente a partir de dos esferas: las ciencias sociales por un lado y las ciencias naturales por el otro. Las ciencias sociales se han encargado de estudiar los intercambios que los seres humanos realizan entre ellos mismos, más allá del ámbito de lo biológico. Las ciencias naturales realizan el estudio de los intercambios considerando al ser humano como especie biológica, formando parte de la naturaleza (Galafassi 2004).

Esta disociación en la perspectiva del estudio de la relación sociedad-naturaleza ha obstaculizado el determinar que los grandes problemas ambientales, en su origen, son una cuestión eminentemente social, debido a que estos surgen de la manera en que la sociedad se vincula con la naturaleza para construir su hábitat y desarrollar los procesos necesarios para su subsistencia y reproducción.

La incorporación de la naturaleza al ámbito de lo social, la realiza el hombre a través de procesos de apropiación y transformación. Es lo que se denomina la mediación social de la naturaleza. Lo cual significa que la naturaleza es apropiada de acuerdo a formas materiales e ideológicas que son generadas por la dinámica de la sociedad. De esta manera el ambiente es construido socialmente y se genera como resultado de la articulación sociedad-naturaleza (Hendel 2009).

Uno de los procesos de mediación social de la naturaleza es el “proceso de producción”, en el cual los hombres por medio determinadas relaciones, se organizan para apropiarse y transformar porciones de la naturaleza. La producción para generar productos que satisfagan las necesidades individuales y colectivas, implica trabajo humano. Y este trabajo humano es la herramienta mediante la cual la humanidad consigue afirmarse sobre la naturaleza, estableciendo un proceso de dominación social sobre ella y que influirá en la relación sociedad-naturaleza. Es decir que los seres humanos se articulan materialmente a la naturaleza a través del proceso del trabajo (Galafassi 1998, Toledo 2008).

Dentro de las nuevas aportaciones teóricas y metodológicas, que han aparecido como alternativas para abordar desde una perspectiva integral la relación sociedad-naturaleza, el concepto de metabolismo social es una herramienta que propone el reconocimiento de que los seres humanos organizados en sociedad no solamente responden exclusivamente a fenómenos de carácter social sino que también son afectados por los fenómenos de la naturaleza y a su vez la naturaleza responde a los fenómenos ocasionados por la sociedad (Toledo *et al.* 2002).

1.5. Los conflictos ambientales

Los problemas o conflictos ambientales, a los que se enfrenta la humanidad a escala mundial y que se dan en el marco de la compleja relación sociedad-naturaleza, surgen, de acuerdo con Tomassino *et al.* (2005), “de una contradicción entre el ritmo de los ciclos biogeoquímicos, y el ritmo de los ciclos de producción humana, para un nivel determinado de desarrollo de las fuerzas productivas”. Es decir que los problemas surgen cuando los recursos naturales (renovables y no renovables) son utilizados a un ritmo mayor a las capacidades de la naturaleza por reproducirlos; o cuando los desechos son generados a un ritmo también mayor a la capacidad de absorción de la naturaleza.

El crecimiento poblacional y el aumento en la utilización de los recursos naturales se mantienen a través de actividades humanas como la agricultura, industria, pesca y comercio internacional. Estas actividades transforman la superficie de la tierra, alteran los ciclos biogeoquímicos y modifican la condición natural de los ecosistemas (Vitousek *et al.* 1997). Los principales resultados de esta situación son: el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, que conforman el gran conflicto o crisis ambiental contemporánea.

1.6. El metabolismo social y la generación de residuos

Básicamente, el metabolismo es un concepto biológico que se refiere a los procesos internos de un organismo vivo. Los organismos mantienen un intercambio continuo de materias y energía con su medio ambiente que permiten su funcionamiento, crecimiento y reproducción. De manera análoga, los sistemas sociales convierten en

una primera instancia, los elementos y componentes de la naturaleza a través de los ciclos de la materia y la energía, en biomasa o materias primas que después son manufacturadas para obtener otros productos. Durante todo el proceso anterior se generan desechos. Esta manera de referirse a la interacción sociedad-naturaleza como una cuestión de intercambios físicos se fundamenta en la consideración del sistema social como una parte más de los sistemas naturales (Bustillo-García y Martínez-Dávila 2008).

El concepto de metabolismo social establece que toda sociedad humana produce y reproduce sus condiciones materiales de existencia a partir de su metabolismo con la naturaleza. Dicho metabolismo comprende una serie de procesos a través de los cuales los seres humanos, organizados en sociedad, se apropian, circulan, transforman, consumen y excretan materiales y energías provenientes de la naturaleza (Toledo y González de Molina 2007).

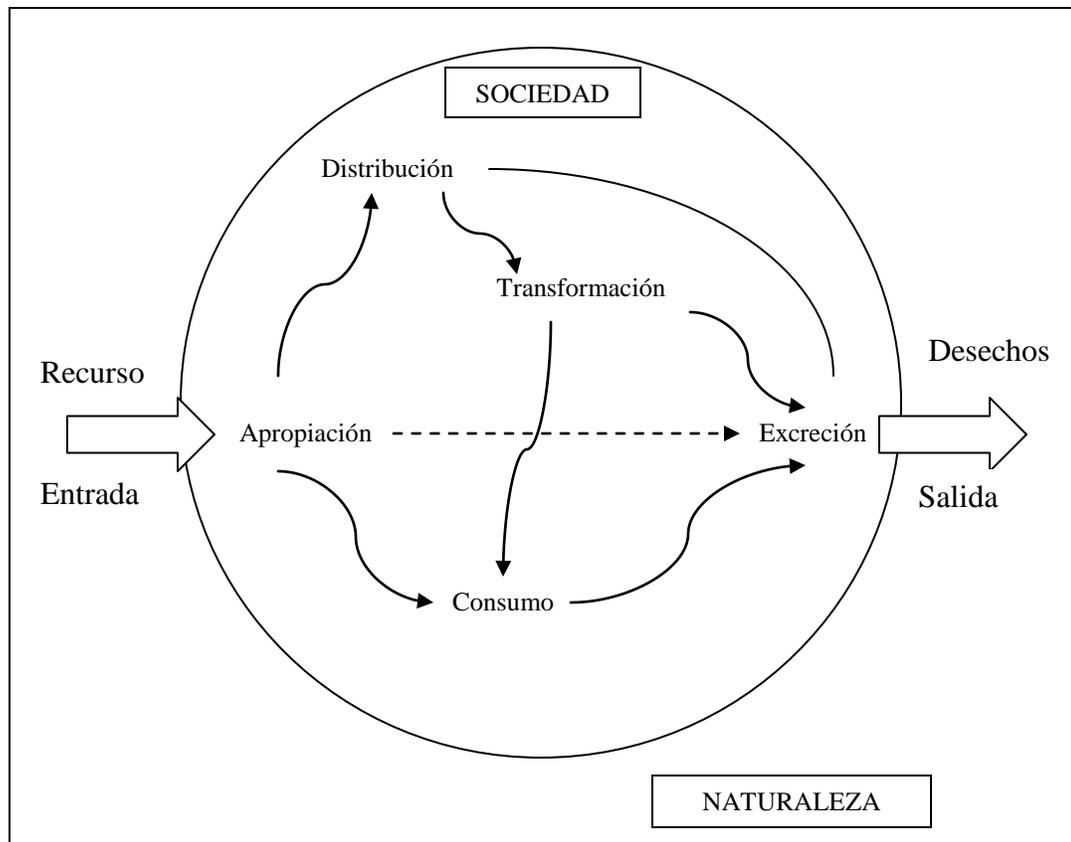
Los seres humanos establecen relaciones con la naturaleza de dos maneras: individuales o biológicas y colectivas o sociales. Para sobrevivir como organismos, de manera individual los seres humanos extraen de la naturaleza las cantidades necesarias de oxígeno, agua y alimentos y excretan calor, agua, bióxido de carbono y sustancias mineralizadas y orgánicas. De manera colectiva, los seres humanos se organizan en sociedad para garantizar su subsistencia y reproducción y extraen también materia y energía de la naturaleza a partir de estructuras meta-individuales o artefactos y excretan todo tipo de desechos.

Estos dos niveles de relación entre el hombre y la naturaleza (individual y social) corresponden a lo que se ha denominado “energía endosomática” y “energía exosomática” respectivamente. Y a su vez representan los flujos de energía “bio-metabólica” y “socio-metabólica” que juntos representan el proceso general de metabolismo entre la sociedad y la naturaleza (Toledo y González de Molina 2007).

El metabolismo entre la sociedad y la naturaleza comienza cuando los seres humanos a través de un conjunto de procesos exclusivamente sociales y económicos se apropia de materia y energía de la naturaleza (entrada) y la convierte en materia y

energía socialmente utilizable, y finaliza cuando esa materia y energía (transformada en desechos, residuos o emanaciones) se depositan en el ecosistema del cual fueron extraídos o bien son expulsados a otros (salida).

En general, el metabolismo social consta de cinco procesos: apropiación, transformación, distribución, consumo y excreción (**Figura 1.1**).



Fuente: Modificado de Toledo (2008)

Figura 1.1. Principales procesos del metabolismo entre la sociedad y la naturaleza

El acto de apropiación es la forma primaria de intercambio entre la sociedad humana y la naturaleza. Mediante la apropiación, la sociedad se nutre de todos aquellos materiales, energías y servicios que los seres humanos y sus artefactos requieren (de manera endosomática y exosomática) para mantenerse y reproducirse. Este

fenómeno es realizado por una unidad de apropiación, que puede ser una empresa, una cooperativa, una familia o un individuo (Toledo 2008).

El proceso de transformación implica, todos los cambios producidos sobre los productos extraídos de la naturaleza, los cuales ya no son consumidos en su forma original. Este proceso incluye desde los simples procesos de cocción de elementos vegetales y animales por fuego hasta actividades más complejas que emplean mayores cantidades de materiales y energía. Lo que implica una repercusión tanto a la sociedad como a la naturaleza a partir del proceso de excreción a tratar más adelante.

El proceso de distribución aparece en el momento en el que las unidades de apropiación dejan de consumir todo lo que producen y de producir todo lo que consumen. Los elementos extraídos de la naturaleza comienzan a circular a partir de este momento y se inaugura el fenómeno del intercambio económico. En el curso del desarrollo histórico de las sociedades primitivas a la sociedad industrial, los volúmenes de lo que circula, las distancias recorridas y los gastos energéticos subsecuentes se han incrementado considerablemente. Ello repercute también en la excreción (González de Molina 2010).

Otro de los procesos es el de consumo y en él está involucrada toda la sociedad. Este fenómeno puede ser entendido a partir de la relación que existe entre las necesidades del ser humano (de manera individual y como sociedad) y los satisfactores proporcionados por los tres procesos anteriores. En las sociedades industriales actuales, el consumo se ha disparado, en base a la capacidad de compra y no a las necesidades físicas y biológicas del consumidor, ni de la capacidad de regeneración de los elementos de apropiación de la naturaleza. En el modelo económico capitalista, la producción de bienes y servicios tiene como finalidad única y fundamental la obtención de ganancia económica y no la satisfacción de las necesidades humanas (Toledo *et al.* 2002).

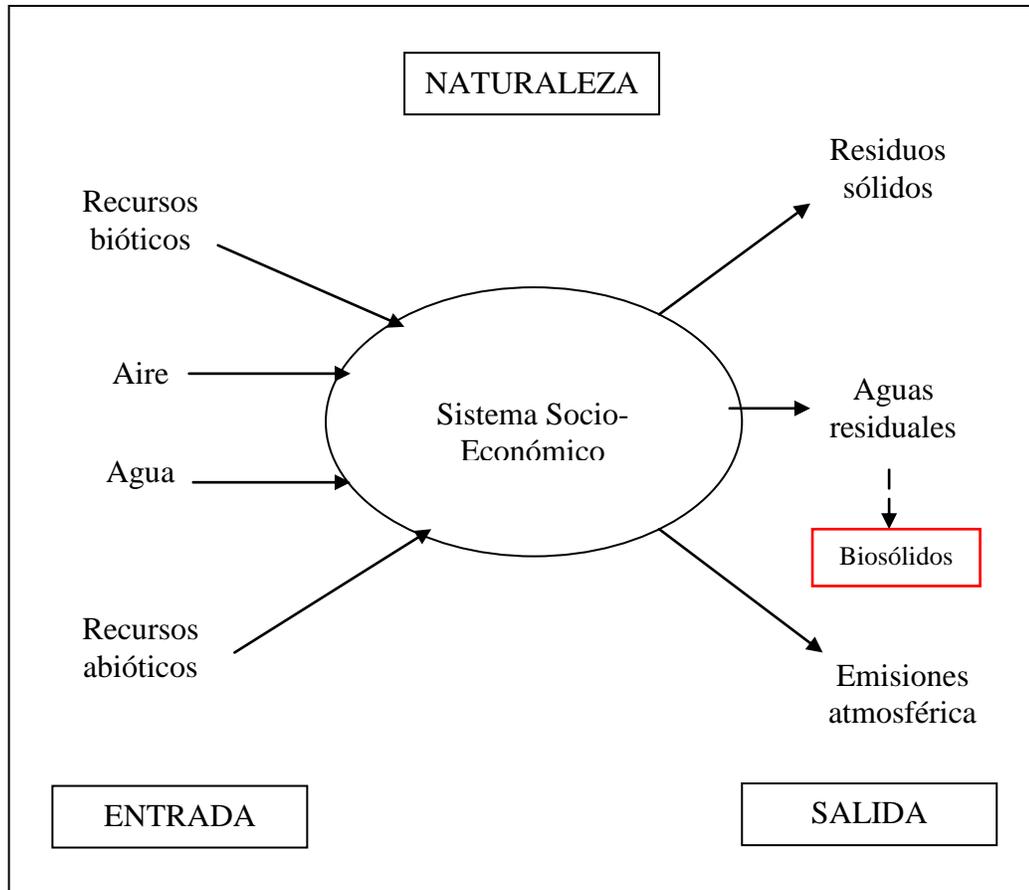
En las sociedades de hoy, el metabolismo social está en gran parte determinado por el consumo, el cual se ha transformado en un proceso masivo al que se entregan

cada vez más individuos y que como consecuencia obliga a una apropiación mayor de recursos naturales, a su transformación y distribución con el consecuente empleo de cantidades de energía cada vez más grandes. Como resultado de lo anterior, el último proceso del metabolismo social: el de excreción, ha alcanzado una gran dimensión que ha comenzado a causar enormes problemas ambientales de nivel planetario.

El proceso de excreción dentro del metabolismo social, es el acto por medio del cual los seres humanos, para cubrir sus necesidades generan materiales y energía degradados, los cuales se depositan en la naturaleza (**Figura 1.2**). En este proceso participa toda la sociedad. En el proceso de excreción existen dos cuestiones básicas: la calidad de los residuos (si son asimilables o no por los ecosistemas) y su cantidad (si rebasan o no la capacidad de reciclaje que tienen los ecosistemas). La cantidad y calidad de los desechos generados indican que se está convirtiendo en un fenómeno que requiere de nuevos procesos metabólicos para su tratamiento, incorporación a los ecosistemas, eliminación o almacenamiento. Estos nuevos procesos podrían ser la captación, la transformación, el transporte, almacenamiento y disposición final de los desechos (Martínez-Alier 2008).

De los tres campos que conforman de manera general el metabolismo social (el rural, el urbano y el industrial), es en el metabolismo urbano en donde se presentan en mucha mayor medida los procesos de consumo y excreción. En consecuencia la generación de desechos urbanos de todo tipo (emisiones atmosféricas, residuos sólidos, aguas residuales) en las grandes concentraciones humanas está produciendo enormes conflictos ambientales y la necesidad de tratar y disponer estos desechos (Toledo 2008).

De esta manera, la producción de grandes cantidades de lodos residuales, generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, aspecto tratado en esta investigación, forma parte de los procesos del metabolismo urbano en particular y del metabolismo social en general. Este último ocurre a partir de la interacción que realiza una unidad de producción con la naturaleza y con otros actores sociales a través de intercambios económicos y ecológicos (Toledo 1993).



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.2. El proceso de excreción dentro del metabolismo social

1.7. La generación de aguas residuales urbanas

El incremento en la urbanización e industrialización en las sociedades contemporáneas ha provocado un dramático crecimiento en el volumen de aguas residuales municipales e industriales en todo el mundo. Estas aguas residuales contienen todas las sustancias que entran en el metabolismo humano, tales como comida, bebidas, productos farmacéuticos, una gran variedad de productos químicos que se usan en las labores domésticas, y las sustancias descargadas por las industrias y el comercio a los sistemas de alcantarillado (Metcalf y Eddy 2003). Además el agua de lluvia y su contacto con diversos materiales contribuye a esta composición de las aguas residuales. Esto, da como resultado que los constituyentes de las aguas residuales municipales descargadas en los sistemas de alcantarillado sean un reflejo de nuestra civilización y del metabolismo humano y urbano.

Los niveles de tratamiento de las aguas residuales municipales se clasifican en:

- Tratamiento preliminar. Se define como el proceso por medio del cual se eliminan constituyentes del agua cuya presencia pueda provocar problemas de funcionamiento y mantenimiento en los procesos posteriores.
- Tratamiento primario. En este tratamiento se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual por medio de una operación física como la sedimentación.
- Tratamiento secundario. El objetivo de este tratamiento es la remoción de la materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos por procesos biológicos. A menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario.
- Control y eliminación de nutrientes. Remoción de nitrógeno y fósforo por tratamiento biológico o químico.
- Tratamiento terciario. Remoción de residuos sólidos suspendidos (después del tratamiento secundario), normalmente por medio de un filtro granular.
- Desinfección y remoción de nutrientes también son incluidos a menudo en este tratamiento (Metcalf y Eddy 2003).

1.8. La generación de aguas residuales en la ciudad de Puebla, México.

Con el propósito de atender el grave problema de contaminación de ríos, barrancas y cauces que cruzan la ciudad (Alseseca, Atoyac y San Francisco), originada por las descargas de aguas residuales de uso doméstico y que pueden provocar problemas de salud a los habitantes de la zona, se puso en marcha en el año 2000, el Programa de Saneamiento Integral, consistente en la construcción de 120 kilómetros de colectores marginales y 5 plantas de tratamiento de aguas residuales.

El caudal de aguas residuales generadas en la ciudad de Puebla es de $2,943.82 \text{ Ls}^{-1}$ de los cuales $2,723.89 \text{ Ls}^{-1}$ son tratados en las cinco plantas de tratamiento, localizadas en diferentes puntos de la ciudad de Puebla (**Figura 1.3**).

La planta de tratamiento del Parque Ecológico está a cargo del SOAPAP y opera a 60 Ls^{-1} , es de tratamiento secundario y desinfección con cloro. Otras cuatro plantas se

encuentran concesionadas a la empresa francesa Degremont, y sus capacidades son: Planta Barranca del Conde opera a 200 L s^{-1} ; Planta San Francisco opera a 990 L s^{-1} ; la Planta Atoyac Sur opera a 270 L s^{-1} y la Planta de Alseseca Sur opera a 628 L s^{-1} y son de tratamiento primario avanzado (SOAPAP 2011).

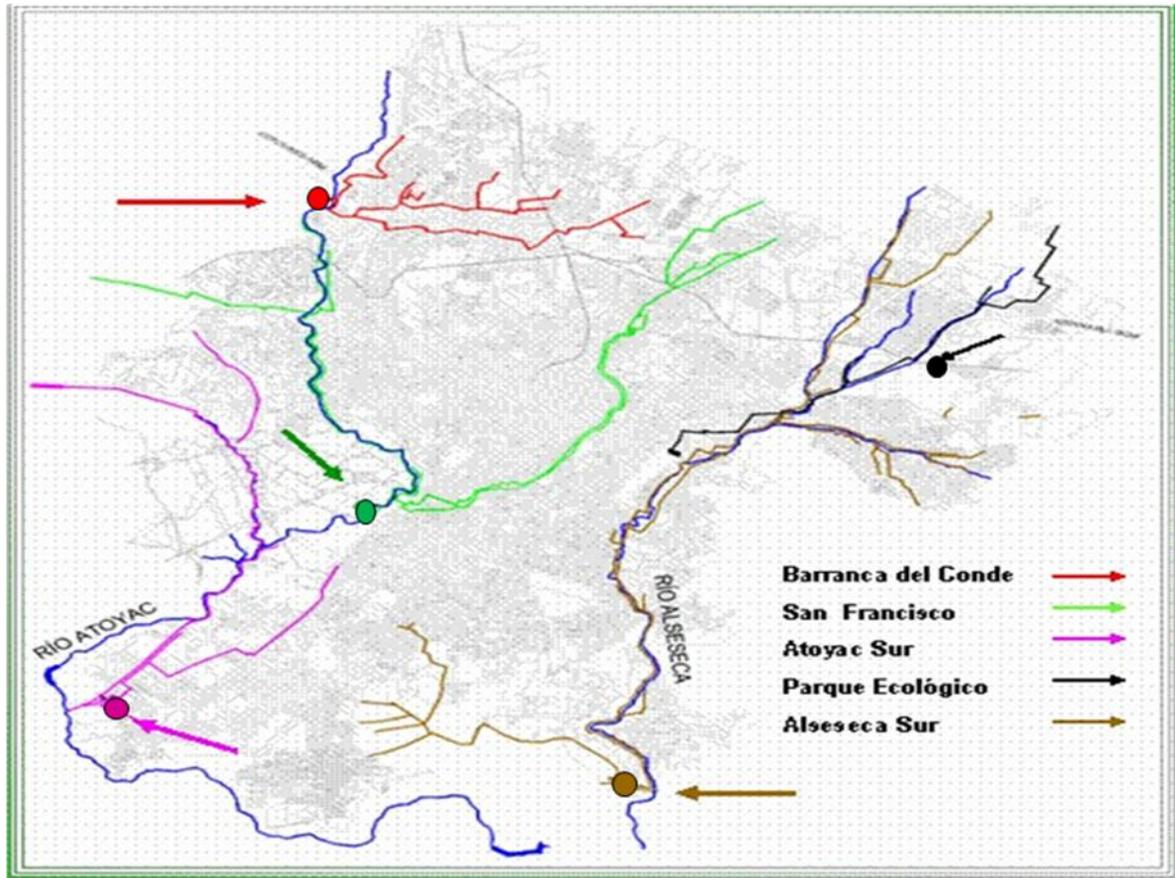


Figura 1.3. Localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Puebla

Además de la producción de gases (por ejemplo dióxido de carbono y metano), el tratamiento de las aguas residuales municipales genera dos productos, los cuales están estrechamente relacionados en su composición química (Kroiss 2003):

- Agua residual tratada para ser descargada en algún cuerpo receptor de agua.
- Lodo del agua residual que debe ser tratado, dispuesto o reutilizado sin causar nuevos problemas ambientales.

1.9. Los biosólidos

Los lodos residuales son subproductos de los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales o industriales. Estos residuos generalmente son sometidos a procesos de estabilización, físicos, químicos o biológicos, con el objetivo de acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final, y reducir sus efectos ambientales. Una vez que los lodos residuales han sido estabilizados se les denomina **biosólidos** (SEMARNAT 2002).

1.10. La generación de biosólidos

El principal enfoque durante los últimos treinta años para el tratamiento de aguas residuales ha sido mejorar la calidad del efluente con la inclusión de tratamientos secundarios y terciarios o avanzados en las plantas de tratamiento. De tal manera que se han alcanzado altos niveles de tratamiento no solo para los constituyentes comunes de las aguas residuales municipales sino también para la remoción de componentes específicos tales como nutrientes y metales pesados. Una consecuencia de estos logros es el incremento en la cantidad de lodos generados. El procesamiento de estos lodos, su reúso o disposición representa un problema muy complejo para los ingenieros en el campo del tratamiento de aguas residuales municipales (Marchioretto 2003). A menudo el tratamiento de los lodos producidos representa hasta el 50% del costo total del tratamiento de aguas residuales municipales.

De acuerdo con el tren de tratamiento, los lodos generados por una planta de tratamiento de aguas residuales se denominan: primarios, secundarios, mixtos o químicos.

Los lodos primarios son aquellos que se extraen de los sedimentadores primarios. Consisten principalmente en arena fina, sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos. Los lodos secundarios son aquellos generados en exceso en el tratamiento secundario biológico y consisten en lodos biológicos, resultado de la conversión de productos de desecho solubles del efluente primario y partículas que escapan a este tratamiento.

Los lodos mixtos se producen por la combinación de lodos primarios y secundarios. En cuanto a los lodos químicos estos se generan cuando se agregan sales de aluminio o fierro y/o cal en tratamientos de agua residual para mejorar la remoción de sólidos suspendidos o para precipitar algún elemento durante la operación de floculación-coagulación (Henze *et al.* 2002).

Una vez producidos los lodos residuales es necesario darles un tratamiento antes de su disposición final. En general las líneas de tratamientos de lodos residuales se encuentran enfocadas a dos aspectos fundamentales:

- Reducción del volumen. Tiene por objetivo incrementar el contenido de sólidos por unidad de volumen, para concentrar los lodos y remover una parte del líquido.
- Estabilización o reducción del poder de fermentación. Consiste en reducir su actividad biológica (tendencia a la putrefacción) y su contenido de microorganismos patógenos.

En el **Cuadro 1.1** se muestran los distintos métodos de tratamiento y disposición de los lodos residuales y los biosólidos.

La estabilización de lodos residuales pretende que estos puedan ser descargados en el ambiente sin que se cause daño alguno, ni produzca condiciones dañinas o indeseables. Los objetivos principales para efectuar la estabilización del lodo son:

- Reducir el número de microorganismos patógenos.
- Descomponer la materia orgánica en compuestos inertes o inorgánicos.
- Eliminar olores desagradables.

Cuadro 1.1. Métodos de tratamiento y disposición final de lodos residuales y biosólidos

Tratamiento	Método
Espesamiento	Gravedad
	Flotación
	Centrifugación
	Filtración
Estabilización	Digestión aerobia
	Digestión anaerobia
	Compostaje
	Estabilización química (cal)
Deshidratación	Secado en camas de arena
	Tratamiento con calor
	Filtración
Disposición final	Incineración
	Disposición en suelos
	Vertido al mar

Fuente: Eckenfelder, Jr., 1980

La supervivencia de microorganismos patógenos y la proliferación de olores en el lodo se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollen sobre la fracción orgánica del mismo. Los medios de estabilización más eficaces para eliminar el desarrollo de estas condiciones son: la reducción biológica del contenido de materia volátil; la oxidación química de la materia volátil; la adición de agentes químicos para hacer el lodo inadecuado para la supervivencia de microorganismos y la aplicación de calor con el objetivo de desinfectar o esterilizar el lodo.

Las técnicas de estabilización de lodos más utilizadas son: la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización con cal, el tratamiento térmico y el compostaje (Godfree y Farrell 2005). En la ciudad de Puebla se generan anualmente 80,000 m³ de biosólidos aproximadamente, en las plantas Atoyac Sur y Alseseca Sur. El proceso de digestión anaeróbica es el proceso empleado para estabilizar los lodos en las plantas mencionadas.

1.11. Estabilización de biosólidos: digestión anaerobia

La digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos empleados en la estabilización de lodos. En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en él, en ausencia de oxígeno molecular.

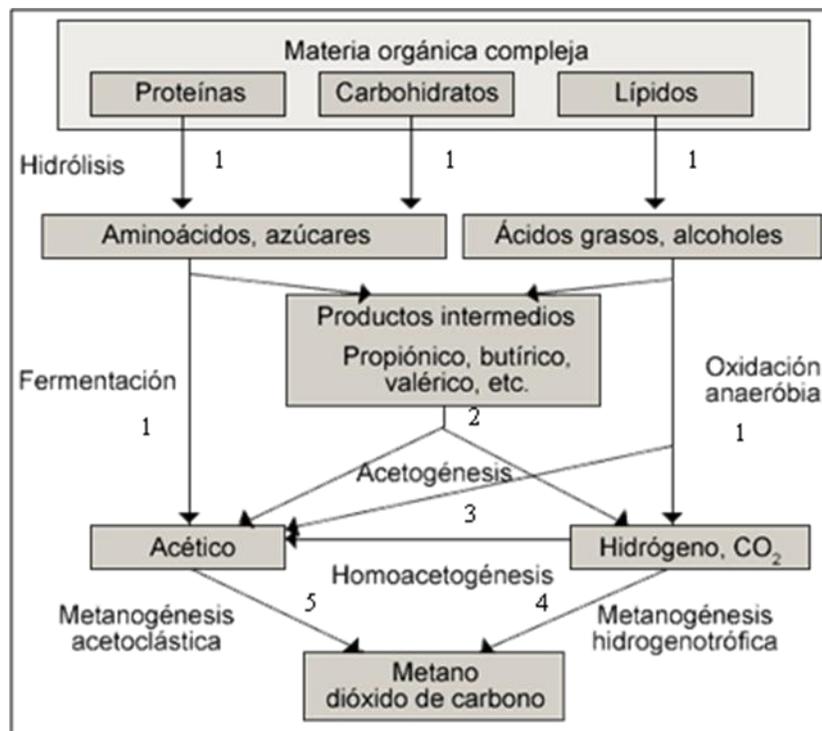
En el proceso de digestión anaerobia, la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y secundarios se convierte en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) principalmente. El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen dentro de estos tanques durante periodos de tiempo considerables. El lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica degradable y de microorganismos patógenos vivos (Horan *et al.* 2004).

La conversión biológica de la materia orgánica de los lodos se produce en tres etapas (Crites y Tchobanoglous 2001). El primer paso del proceso comprende el rompimiento de las moléculas “grandes” de materia orgánica en sus monómeros (hidrólisis). El segundo paso, llamado acidogénesis se refiere a la conversión bacteriana de los monómeros generados (carbohidratos, ácidos grasos y aminoácidos) en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular. El tercer paso, llamado metanogénesis, implica la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono (**Figura 1.4**)

La composición de los biosólidos es variable dependiendo de varios factores como la calidad del agua residual tratada y los procesos de tratamiento entre otros. Sin embargo de manera general en los lodos residuales se presentan cinco grupos de componentes (Rulkens 2003):

- Compuestos orgánicos no tóxicos: materia orgánica, nitrógeno, compuestos que contienen fósforo, potasio.
- Componentes tóxicos:
 - Elementos potencialmente tóxicos, tales como Zn, Cu, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, As (variando desde más de 1 ppm hasta menos de 1000 ppm).

- PCBs (bifenilos policlorados), PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos), dioxinas, pesticidas, alkilsulfonatos lineales, fenoles nonílicos, etc.
- Patógenos y otros contaminantes microbiológicos.
- Compuestos inorgánicos tales como silicatos, aluminatos, compuestos conteniendo calcio y magnesio, etc.
- Agua, con una variación en el porcentaje presente que va desde muy poca hasta más del 90%.



Fuente: Pavlosthatís y Giraldo-Gómez 1991)

Figura 1.4. Esquema de las reacciones llevadas a cabo durante el proceso de digestión anaerobia. Los números indican la población bacteriana responsable de cada etapa del proceso. 1. Bacterias fermentativas; 2. Bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3. Bacterias homoacetogénicas; 4. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

1.12. Marco legal sobre el uso de biosólidos

Debido a la gran cantidad de biosólidos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales en todo el mundo y a la tendencia creciente a favor de su aplicación en suelos por sus potenciales beneficios a la agricultura, se hizo necesario regular su calidad y las formas en que debía ser aplicado al suelo.

En 1993, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) emitió los lineamientos para el uso y disposición de biosólidos en suelos, en ese país (USEPA 1993).

Esta reglamentación ha servido como norma para el uso de biosólidos en algunos países y en otros ha sido la base para elaborar reglamentaciones propias. En México el uso y aprovechamiento de biosólidos está enmarcado de manera general en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), en su reglamento respectivo y en la NOM-053-SEMARNAT-1993 (SEMARNAT 1993). Y de manera particular en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002). Las restricciones establecidas por esta norma, en cuanto al contenido de metales pesados y patógenos, así como la clasificación de la calidad de los biosólidos de acuerdo con el contenido de estos parámetros, se muestra en los **Cuadros 1.2, 1.3 y 1.4**.

En la **Figura 1.5** se observan los lineamientos regulatorios que deben seguir los lodos residuales y biosólidos para su aprovechamiento en uso agrícola, en la legislación mexicana.

Cuadro 1.2. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

CONTAMINANTE (concentración total)	EXCELENTES (mg kg⁻¹ materia seca)	BUENOS (mg kg⁻¹ materia seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

Cuadro 1.3. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos residuales y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella</i> spp. NMP/g en base seca	Huevos de helminetos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

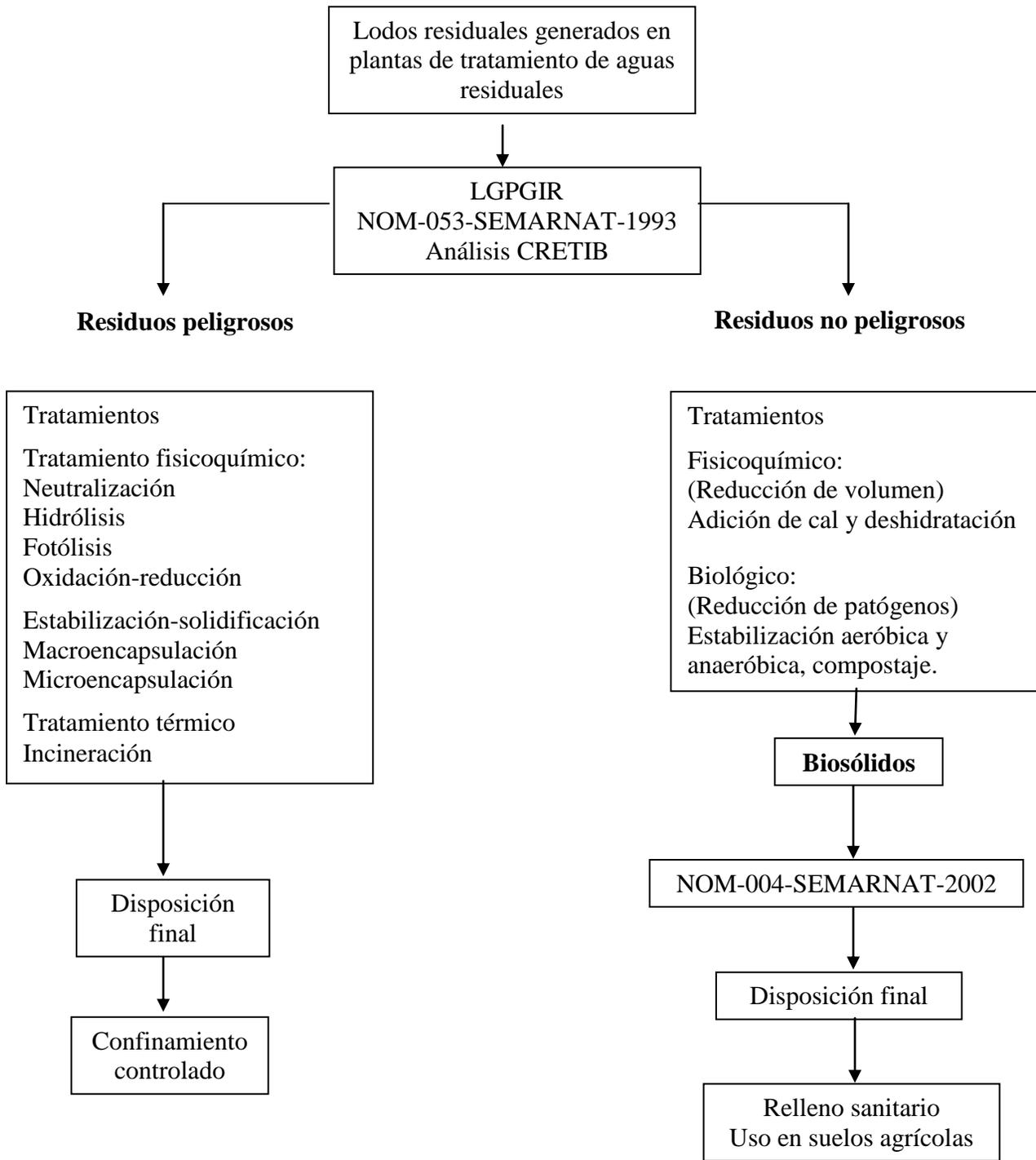
Cuadro 1.4. Aprovechamiento de biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para las clases B y C
EXCELENTE O BUENO	B	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para las clases B y C
EXCELENTE O BUENO	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

1.13. Aplicación de biosólidos en la agricultura

El uso de lodos residuales o biosólidos como un mejorador del suelo (**Figura 1.6**) en agricultura es muy discutido (McBride 1995). Aunque en la mayoría de los países europeos y los Estados Unidos de América, el lodo residual es comúnmente usado como fertilizante, esta práctica es aún muy controversial (Renner 2000). Por un lado, el reciclado de nutrientes contenidos en los biosólidos, conforma un principio de la sustentabilidad. Y por el otro, la introducción de contaminantes en el suelo y los riesgos asociados a organismos incluido el hombre contradice los principios de prevención. Beneficios y riesgos han sido comparados unos contra otros. Para uso a corto plazo solamente los biosólidos de la mejor calidad debe ser utilizado (tipo Excelente o Bueno, clase C, según NOM-004-SEMARNAT-2002 en la legislación mexicana). Para su empleo a largo plazo deberán desarrollarse sistemas y técnicas, los cuales permitan conciliar el principio mencionado de la sustentabilidad y la prevención de riesgos (O'Connor *et al.* 2005).



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.5. Marco legislativo para el manejo y reúso de biosólidos en México



Figura 1.6. Aplicación de biosólidos en suelos agrícolas de La Paz Tlaxcolpan, Puebla

Entre las características benéficas de los biosólidos como mejoradores o enmendadores de suelos se ha encontrado que no sólo contienen materia orgánica, sino también varios nutrientes, los cuales son reciclados y contribuyen a la nutrición de la planta (Singh y Agrawal 2008).

Otra característica benéfica de los biosólidos es que pueden mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo. En algunos campos de investigación una aplicación de lodos residuales fue seguida por un incremento en el contenido de humus, actividad biológica y valor del pH. Por el incremento del valor del pH del suelo la fracción soluble de metales pesados puede ser reducida a pesar de la entrada de metales pesados (Tsadilas 1995). También puede incrementar el rendimiento de la materia seca de muchos cultivos (Andrade *et al.* 2000) como sucedió con el sorgo forrajero por ejemplo, en estudios realizados en México y que han reportado este resultado (Hernández-Herrera *et al.* 2005).

También se ha encontrado que tratamientos mixtos de biosólidos con fertilizante mineral pueden elevar la productividad del suelo hasta en un 20% (Delgado *et al.* 2002). En el cultivo de maíz se han presentado resultados los cuales sugieren que la aplicación de biosólidos aumenta la producción de grano en proporción a la cantidad de biosólidos aplicada y por otra parte mejora las características de suelo al aumentar significativamente el contenido de materia orgánica y de nutrientes como N y P al final de la aplicación (Hernández-Ortiz *et al.* 1999; Andrade *et al.* 2000).

Cuevas *et al.* (2000), en un experimento de campo en un suelo calcáreo para un cultivo de maíz enmendado con un compost de lodos residuales encontraron que las cantidades de metales pesados aportadas por el lodo residual, no representaron ningún riesgo para el buen desarrollo del maíz y los contenidos de aquellos en las diferentes partes de la planta no superaron los umbrales de tolerancia que pudieran causar toxicidad.

En cuanto al efecto que tiene la aplicación de biosólidos sobre las propiedades del suelo se ha encontrado que el efecto sobre el pH es mínimo ya que se produce un aumento muy ligero. Sobre la materia orgánica se reportan aumentos que varían en un rango de 3 a 4%. En lo que se refiere al contenido de metales pesados no se observan incrementos significativos en su contenido en el suelo después de la aplicación (Quinteiro *et al.* 1998). También se han reportado incrementos en la materia húmica, capacidad de intercambio catiónico, porosidad del suelo y retención de humedad (Lindsay *et al.* 1998).

Sobre los efectos que la adición al suelo de lodos residuales o biosólidos produce sobre la actividad microbiana de suelos enmendados con lodos residuales, se ha encontrado que a bajas dosis de biosólidos disminuye la actividad enzimática de la ureasa y la fosfatasa alcalina y esto se atribuye a la presencia de metales pesados en los biosólidos; sin embargo con mayores dosis de aplicación de biosólidos la actividad enzimática de la ureasa y la fosfatasa alcalina aumentó considerablemente (Banerjee *et al.* 1997).

Entre los riesgos por el uso de los biosólidos como fertilizantes del suelo se encuentran entre otros su contenido de metales pesados como se ha mencionado. Algunos metales presentes en los lodos residuales o biosólidos son micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (por ejemplo el cobre y el zinc) y proveen un beneficio a los cultivos. Sin embargo, como la mayoría de los elementos, en exceso pueden causar problemas al crecimiento de la planta.

Otros metales pesados no son esenciales para la nutrición de la planta y son tóxicos para animales y humanos en concentraciones definidas (por ejemplo, arsénico, cadmio, plomo, y mercurio). Es por esta razón que su uso en tierras agrícolas y forestales puede ser restringido. Los metales más comúnmente encontrados en los lodos residuales son Pb, Ni, Cd, Cr, Cu y Zn y las concentraciones de metales están gobernadas por la naturaleza y la intensidad de la actividad industrial, así como por el tipo de proceso empleado durante el tratamiento de los lodos residuales. Normalmente, las aguas residuales domésticas tienen un contenido más bajo de metales pesados que las aguas residuales industriales. Se ha demostrado (Pires y Mattiazzo 2003), que la biodisponibilidad de los metales puede ser elevada en biosólidos tratados con polímeros, cuando se compara con los tratamientos que usan cloruro férrico y óxido de calcio. Por lo tanto la biodisponibilidad de metales está directamente relacionada con las características químicas del suelo y de los biosólidos.

El uso a largo plazo de biosólidos puede causar acumulación de metales en el suelo. Regularmente después de una aplicación a corto plazo de biosólidos, los niveles de metales pesados pueden incrementarse considerablemente (Oliveira y Mattiazzo 2001). Se han observado incrementos en las concentraciones de Cu, Cr, Ni y Zn en suelos enmendados por cuatro años con biosólidos. Walter *et al.* (1999) en un estudio de especiación química de metales pesados presentaron resultados indicando que los suelos enmendados con biosólidos durante cinco años incrementaron sus niveles totales de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, aunque el incremento encontrado estaba en las fracciones más resistentes. Los metales pesados pueden contaminar la cadena alimenticia y reducir el rendimiento de los cultivos (Oliveira y Mattiazzo 2001).

El consumo de plantas conteniendo altos niveles de metales pesados pueden provocar graves riesgos a la salud humana (Turkdogan *et al.* 2003). Dependiendo de las condiciones ambientales y de la proporción en que los lodos son agregados a los suelos, las formas móviles de los metales pesados liberadas por los biosólidos y las cuales no fueron tomadas por las plantas, pueden moverse bajo el perfil del suelo y alcanzar los mantos acuíferos, afectando los suministros de agua de los seres humanos (Nouri *et al.* 2001).

Los lodos pueden introducir excesivas cantidades de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, pesticidas y microorganismos patógenos al suelo (Barry *et al.* 1995), la salinidad del suelo puede verse afectada por la aplicación del lodo y, consecuentemente la disponibilidad del metal se puede volver alta. Por lo tanto el riesgo de contaminación del suelo por metales pesados debe ser considerado cuando se apliquen los biosólidos y una comprensión del comportamiento de los metales pesados en el suelo es esencial para valorar los riesgos ambientales cuando esos metales son incorporados al suelo.

Otro riesgo potencial a la salud por el uso agrícola de biosólidos es la presencia de patógenos como coliformes fecales, *salmonellae* spp virus entéricos, parásitos, etc. De acuerdo con Godfree y Farrel (2005), el proceso digestión anaerobia, utilizado para estabilizar los biosólidos reduce de manera considerable la presencia de patógenos en los lodos residuales, hasta alcanzar la categoría “Clase A” (**Cuadro 1.3**). Con lo cual se reduce el riesgo para la salud humana y animal. Por otra parte, Gerba y Smith (2005), establecieron los tiempos de supervivencia en el suelo, de los patógenos que sobrevivieron al proceso de digestión anaerobia: bacterias y virus, entre dos y tres meses; helmintos, dos años.

1.14. Efectos ambientales por la aplicación de biosólidos en la agricultura

Cuando una sustancia en cualquier estado físico, producto de la actividad humana, se incorpora o actúa sobre un ecosistema o un agroecosistema puede ocasionar una modificación en alguno de sus componentes: atmósfera, agua, suelo, flora, fauna.

Al aplicar biosólidos de origen urbano como enmiendas agrícolas, el principal efecto ambiental se da en el recurso natural suelo. Las características físico-químicas de los biosólidos modifican las características del suelo y se produce una alteración. Esta alteración puede ser positiva o negativa. Es decir puede mejorar o deteriorar las características del suelo. Este es el efecto ambiental al que se avocó este estudio con la finalidad de cuantificar la alteración producida a las propiedades del suelo.

Otro efecto ambiental ocasionado al agroecosistema por la aplicación de biosólidos como enmiendas agrícolas, se produce en la atmósfera debido al olor de los biosólidos. Además de la molestia ocasionada por su olor desagradable de los biosólidos, no se tiene información sobre los efectos que éste tenga sobre la salud humana y animal (Schiffman y Williams 2005).

Un tercer efecto ambiental ocasionado por la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas es el efecto ocasionado en el paisaje del agroecosistema. El color negro característico de los biosólidos y su apariencia ocasionan una alteración del paisaje.

1.15. Beneficios económicos y sociales por la aplicación de biosólidos

El mejoramiento en las características de los suelos agrícolas por la aplicación de biosólidos y el consecuente aumento de la fertilidad de este, produce plantas de maíz más altas, más verdes, de tallo más grueso, hojas más anchas y mazorcas más grandes. En consecuencia se generan mayores rendimientos a los productores. Es a partir de estos mayores rendimientos de donde se derivan los beneficios económicos y sociales obtenidos por los mismos.

El concepto de beneficio económico manejado en este trabajo de investigación se refiere a los mayores ingresos económicos obtenidos por el productor al comercializar la cosecha y el rastrojo obtenido en sus terrenos enmendados con biosólidos, al ahorro en fertilizante y al ahorro en la compra de rastrojo para alimentar a sus animales.

El concepto de beneficio social se deriva del concepto de beneficio económico. Al obtener mayores ingresos económicos los productores pueden acceder a bienes y

servicios con los que no contaban. Los indicadores utilizados para medir este beneficio fueron: modificación en la alimentación, mejoras en la vivienda, adquisición de muebles para el hogar, adquisición de servicios básicos (energía eléctrica, drenaje, agua potable), adquisición de otros servicios (teléfono, conexión a internet), asistencia a servicios de salud privados (si son de su preferencia).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA GENERAL

2.1. Plan general del proyecto

Para alcanzar los objetivos planteados, el proyecto de investigación se dividió en dos partes: la evaluación del impacto que los biosólidos provocan en el ambiente, concretamente en el recurso natural suelo, y la medición del efecto socio-económico ocasionado en los productores. Para obtener la información se utilizaron métodos y técnicas cuantitativas y cualitativas que permitieron cumplir con los objetivos del estudio (Hernández-Sampieri *et al.* 2008).

La primera parte del proyecto, con la cual se cumplieron los dos primeros objetivos específicos, se desarrolló en siete fases:

- 1) Observación directa del problema de estudio. Se realizó mediante recorridos de campo con la finalidad de explorar y observar los aspectos de manejo de biosólidos por parte de los productores en la localidad seleccionada. Esta etapa permitió conocer los aspectos deficientes de la aplicación y el manejo de biosólidos por parte de los productores. Entre otras situaciones, se observó: el vaciado de biosólidos por medio de camiones de volteo en los terrenos agrícolas, la incorporación y el manejo que realizan los productores, las condiciones de los cultivos desarrollados en suelos con biosólidos, etc.
- 2) Selección de las parcelas de estudio y de los sitios de muestreo, de acuerdo a los criterios establecidos, para la toma de muestras de suelo y tejido vegetal.
- 3) Toma de muestras de suelo en las parcelas seleccionadas.
- 4) Análisis fisicoquímicos de las muestra de suelo. Determinación de parámetros como la textura, el pH, CIC, materia orgánica, Nt, micronutrientes esenciales, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn.
- 5) Toma de muestras de tejido vegetal en las parcelas seleccionadas.
- 6) Análisis químicos del tejido vegetal. Determinación de la concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en la raíz, el tallo, hojas, hojas del elote y grano de las plantas de maíz.

7) Procesamiento y análisis de la información obtenida en las fases anteriores. Se analizó la información recogida para observar las interrelaciones entre los parámetros estudiados para sacar conclusiones sobre el efecto de la aplicación de biosólidos en el suelo y la planta de maíz.

La segunda parte de proyecto de investigación, con la cual se cumple el tercer objetivo específico, se desarrolló en cuatro fases:

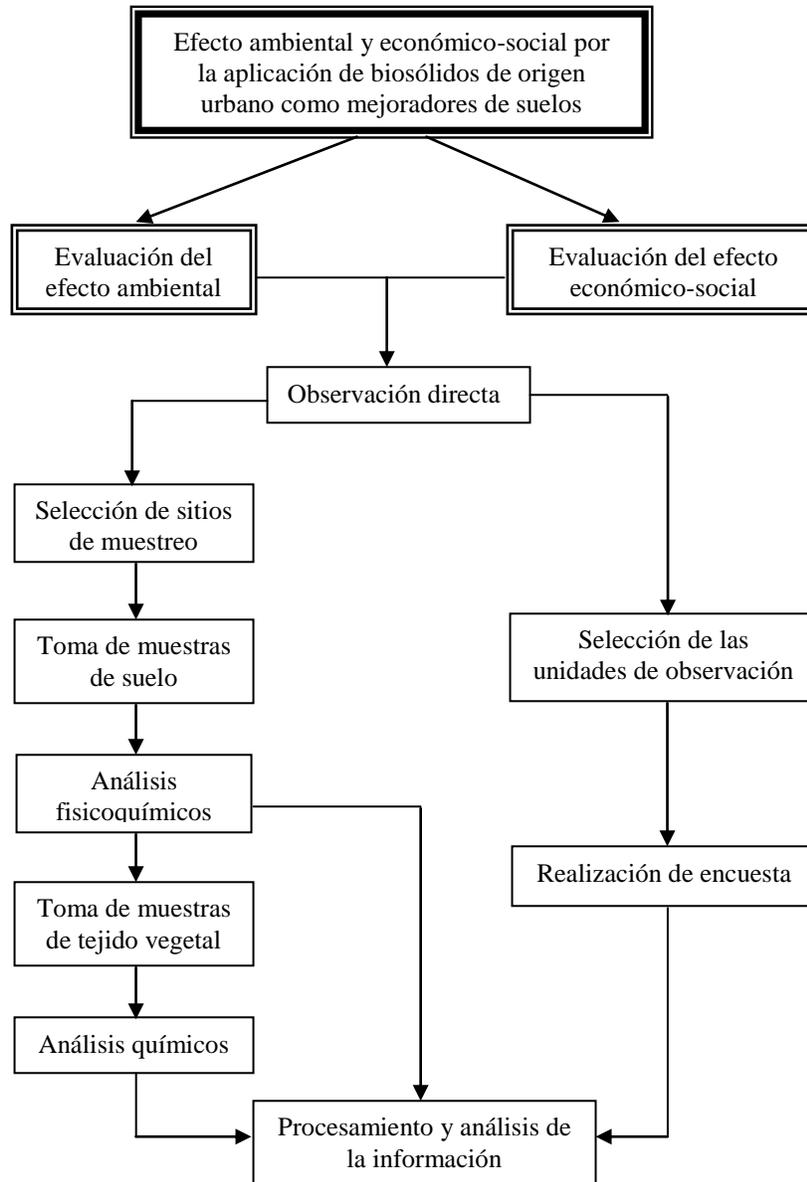
1) Observación directa. En esta fase se observaron entre otros aspectos: la ubicación geográfica de la comunidad, las vías de comunicación existentes, servicios básicos de que dispone la comunidad, condiciones de las viviendas, etc.

2) Selección de unidades de observación. Se seleccionaron los productores de acuerdo a los criterios establecidos, para aplicar la encuesta.

3) Realización de encuesta a los productores, por medio de la aplicación de un cuestionario estructurado.

4) Procesamiento y análisis de la información obtenida. La información recogida a través del cuestionario fue capturada y codificada. Se analizó la información con la finalidad de determinar si existen beneficios económicos y sociales a los productores por la aplicación de biosólidos.

En la **Figura 2.1** se muestra el plan general del proyecto y la secuencia de su realización.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.1. Plan general del proyecto de investigación

2.2. Descripción de la zona de estudio

2.2.1. Medio físico

La zona de estudio se encuentra ubicada en la zona rural que está al sur del municipio de Puebla, Pue., a una distancia aproximada de 15 km de la ciudad de Puebla de Zaragoza, capital del estado. La Paz Tlaxcolpan es la comunidad en donde se realizó este trabajo de investigación, y se ubica en las coordenadas geográficas: 18° 54' 21" N y 98° 13' 16" O. (**Figura 2.2**).

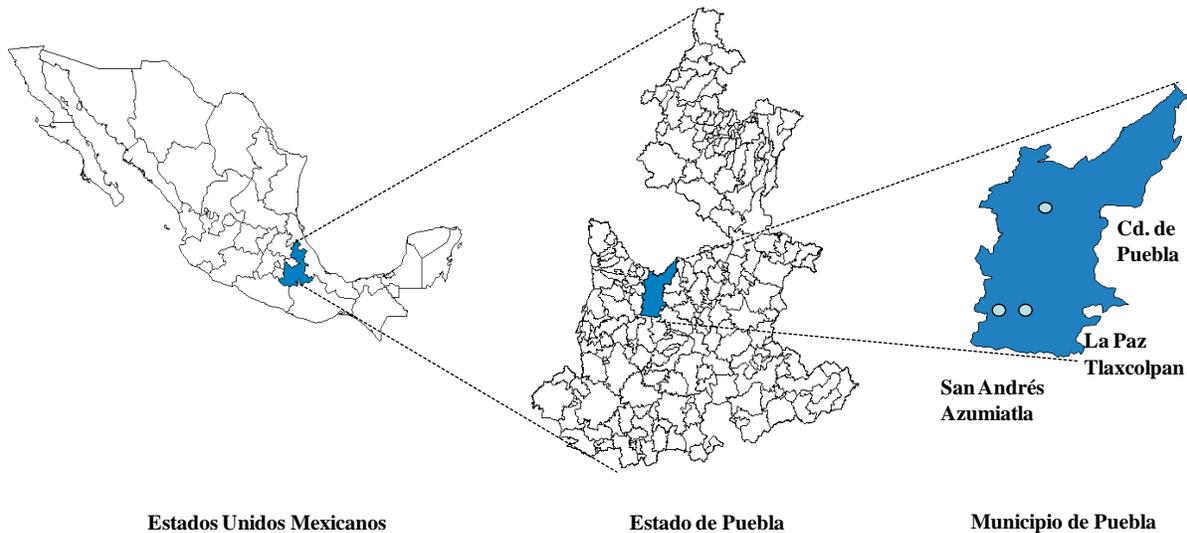


Figura 2.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

Los principales aspectos físicos de la zona de estudio son (INEGI 2009):

- Clima: templado subhúmedo con lluvias en verano, humedad media. El % de precipitación invernal es menos de 5 mm.
- Precipitación total anual: 700-800 mm.
- Uso del suelo actual y vegetación: agricultura de temporal y pastizal respectivamente.
- Hidrología subterránea: permeabilidad en materiales consolidados, baja-media. Permeabilidad en materiales no consolidados, alta.

- Temperaturas medias anuales: 16-18°C.
- Relieve: llanura aluvial con lomerío.
- Geología (clase de rocas): roca ígnea extrusiva intermedia.
- Posibilidades de uso agrícola: agricultura de tracción animal estacional.
- Edafología: Los suelos de esta zona son delgados. Son de tipo cambisol eutrítico de llanuras y lomerío. Horizonte B cámbico. Su estructura es formación de terrones. Una capa color pardo a gris o pardo grisáceo. Capas profundas pardo amarillento. La textura es de migajón arenoso a migajón arcilloso en la superficie. Tienen una capacidad de intercambio catiónico moderada. Los suelos son ligeramente ácidos o neutros. Presentan tepetate a menos de 50 cm de profundidad.

2.2.2 Perfil sociodemográfico

La localidad de La Paz Tlaxcolpan tiene una distancia aproximada a la cabecera del municipio de Puebla de Zaragoza de 15 km. Tiene la categoría de Inspección y pertenece a la Junta Auxiliar de San Andrés Azumiatla. Su población actual es de 700 habitantes (CONAPO 2005).

La actividad económica preponderante es la agricultura de temporal, así como la cría de ganado de traspatio. La productividad agrícola de los suelos de la zona es baja. El cultivo principal es el maíz, pero también se siembran frijol y calabaza.

De acuerdo con datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO), esta localidad presenta un grado de marginación municipal muy bajo, pero su grado de marginación por localidad es alto (CONAPO 2005). Por otra parte y de acuerdo con los mapas de pobreza y marginación social elaborados por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), esta localidad presenta un grado de rezago social medio (CONEVAL 2005).

2.3. Efecto ambiental producido por la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas

Para evaluar el efecto ambiental ocasionado por la aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas, la investigación se dividió en dos partes: la primera enfocada a determinar el impacto ambiental negativo en cuanto a la acumulación y disponibilidad de metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb y Zn), provocado por la adición de biosólidos al suelo, al transcurrir el tiempo. Y la segunda dirigida a estimar el impacto ambiental positivo que el uso de biosólidos produce en los suelos agrícolas de la zona, concretamente en las propiedades que determinan su fertilidad y la variación de los valores de éstas con la antigüedad de aplicación.

Para llevar a cabo estas dos partes de la investigación, se tomaron muestras de suelo en seis parcelas, en las cuales, en cada una de ellas se aplicaron biosólidos en años sucesivos del 2003 al 2008, con lo cual, se tienen antigüedades de adición de uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis años. La toma de muestras y los análisis fisicoquímicos se realizaron en el año 2009. Se tomaron 10 submuestras por parcela para conformar una muestra compuesta, con lo cual se obtuvieron seis muestras compuestas. También se muestreo un suelo sin biosólidos como control. Esta actividad se realizó de acuerdo con lo establecido por la norma oficial mexicana para el muestreo de suelos (SEMARNAT 2000). También se tomaron muestras de tejido vegetal en cada una de las parcelas seleccionadas para evaluar la absorción de metales pesados por la planta cultivada en estos suelos.

2.3.1. Biodisponibilidad de metales pesados en suelos con biosólidos

Con la finalidad de conocer cuál es el verdadero riesgo del ingreso de los metales pesados a las redes tróficas, es necesario determinar su biodisponibilidad más que su contenido total, en los suelos enmendados con biosólidos. Para alcanzar este objetivo se empleó el procedimiento de extracción química secuencial BCR de tres etapas (Rauret *et al.* 2000), para el fraccionamiento de las muestras de suelo. De esta manera, además de conocer la concentración de la fracción biodisponible de los metales pesados, se determinó como se encuentran repartidos estos elementos en

las diferentes fracciones sólidas de los suelos enmendados con biosólidos y su variación temporal. Aspectos que se presentarán en el Capítulo III.

A partir de la hipótesis específica: “La biodisponibilidad de metales pesados y el riesgo de su ingreso a las redes tróficas por la aplicación de biosólidos al suelo, se incrementan”, es posible derivar las variables involucradas. La variable independiente es el tiempo y la variable dependiente es la biodisponibilidad de los metales pesados. El objetivo es conocer la variación de la disponibilidad de los metales pesados en función del tiempo.

2.3.2 Operacionalización de variables

En el **Cuadro 2.1** se muestra el proceso de operacionalización de la variable “biodisponibilidad de metales pesados en suelos enmendados con biosólidos” derivada de la hipótesis específica correspondiente (Hernández-Sampieri *et al.* 2008).

Cuadro 2.1. Operacionalización de la variable “biodisponibilidad de metales pesados en suelos enmendados con biosólidos”

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operacional	Nivel de medición	Indicadores
Biodisponibilidad de metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) en suelos enmendados con biosólidos	Cuantitativa continua	Forma química en la que se encuentran los metales pesados en el suelo, que los hace susceptibles de ser absorbidos por las plantas	Concentración de metales pesados en la fracción biodisponible, extraída de muestras de suelo con el método de extracción química secuencial BCR	De razón	Concentración cuantificada de metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) en mgkg^{-1} de materia seca

2.3.3. Efecto de los biosólidos en los parámetros de la fertilidad del suelo y en la planta de maíz

Para evaluar el efecto a través del tiempo, que la adición de biosólidos produce en la fertilidad de los suelos, se determinaron los parámetros que son indicadores de su nivel. Entre otros parámetros, se cuantificaron el contenido de materia orgánica (MO),

pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CE), nitrógeno total (Nt), Nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), P total y cationes intercambiables (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y Na^+), así como metales extraíbles con DTPA (Cu, Fe, Mn y Zn). Todos estos procedimientos de análisis se realizaron de acuerdo a lo establecido por la normativa correspondiente (SEMARNAT 2000). Para las muestras de tejido vegetal se realizó una digestión ácida húmeda. Todas las cuantificaciones se hicieron por espectroscopia de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Aspectos que se detallan en el Capítulo IV.

A partir de la hipótesis específica: “La fertilidad de los suelos aumenta por la aplicación de biosólidos”, es posible derivar las variables involucradas. La variable independiente es el tiempo y la variable dependiente es la fertilidad mostrada por los suelos mejorados con biosólidos. El objetivo es conocer la variación de la fertilidad en función del tiempo.

2.3.4 Operacionalización de variables

En el **Cuadro 2.2** se observa el proceso de operacionalización de la variable “fertilidad de los suelos” derivada de la hipótesis específica correspondiente (Hernández-Sampieri *et al.* 2008).

Cuadro 2.2. Operacionalización de la variable “fertilidad de los suelos mejorados con biosólidos”

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operacional	Nivel de medición	Indicadores
Fertilidad de los suelos	Cuantitativa continua	Situación del suelo en relación con la capacidad de abastecer las necesidades de la planta en cuanto a los diferentes elementos nutritivos	Medición de los parámetros que determinan el nivel de fertilidad del suelo	De razón	Valores de: pH, CIC, Nt, contenido de materia orgánica, micronutrientes, etc.

2.4. Efecto económico y social producido por la aplicación de biosólidos

La encuesta es una técnica que consiste en recopilar información sobre una parte de la población. Es una técnica muy difundida en el área de la investigación social aplicada (Rojas 2002). La encuesta se realiza por medio de técnicas de interrogación y sirve para recopilar datos como conocimientos, ideas y opiniones de grupos.

El objetivo de la encuesta es obtener información relativa a las características predominantes de una población mediante la aplicación de procesos de interrogación y registro de datos (Castañeda 2005). Esto se logra a través de las respuestas orales o escritas a un conjunto de preguntas previamente diseñadas que se aplican en forma masiva; con ello se concentran datos relativos a sucesos ya ocurridos, es decir, se recoge información de situaciones pasadas. Uno de los instrumentos que puede emplearse para levantar una encuesta es el cuestionario.

Un cuestionario en sentido estricto, es un sistema de preguntas racionales, ordenadas en forma coherente, tanto desde el punto de vista lógico como psicológico, expresadas en un lenguaje sencillo y comprensible. El cuestionario permite la recolección de datos de fuentes primarias, es decir, de personas que poseen la información que resulta de interés (Hernández-Sampieri *et al.* 2008). En este caso, son los productores que aceptaron aplicar biosólidos en sus terrenos y sus experiencias al respecto.

Dentro de la encuesta, el cuestionario es el instrumento que vincula el problema de investigación con las respuestas que se obtienen de la población. En general, el tipo y las características del cuestionario se determinan básicamente a partir de las necesidades de la investigación, así como de los rasgos y tamaño de la población (García-Córdoba 2009).

Con el objeto de evaluar si la aplicación de biosólidos como enmiendas agrícolas produce un aumento en sus rendimientos y en consecuencia esto les proporciona algún beneficio económico y social, se investigó entre los productores de la localidad su opinión en cuanto a esta práctica. Se indagó en las experiencias personales que han tenido al usar biosólidos en sus parcelas. Para recabar la información requerida

se utilizó la técnica de la entrevista personal y como instrumento para recabar los datos se empleó como instrumento el cuestionario (Rojas 2002). Aspectos que se detallan en el Capítulo V.

El cuestionario se diseñó con la finalidad de obtener información sobre las prácticas de uso de los biosólidos por parte de los productores, de las ventajas que ellos observan, de los inconvenientes detectados, si han obtenido mayores rendimientos en sus parcelas y si esto se ha reflejado en mayores ingresos económicos.

Como único criterio de inclusión para la selección de las unidades de observación, se estableció que el productor hubiera aceptado la aplicación de biosólidos en sus terrenos. Aproximadamente 30 productores de la comunidad han aceptado usar biosólidos en sus parcelas. Únicamente 24 de ellos aceptaron participar en la encuesta. Este es el número total de unidades de observación y por lo tanto es la población total de interés. Considerando que el número total de unidades de observación no era muy alto se consideró factible la realización de un censo y se aplicó el cuestionario a toda la población.

El cuestionario se elaboró con preguntas cerradas, abiertas y mixtas de acuerdo a la información que se deseaba obtener. Se incorporaron preguntas precodificadas y las preguntas abiertas se codificaron posteriormente. La información se capturó y se realizó un análisis estadístico para obtener los resultados.

A partir de la hipótesis específica: “Existe un incremento en el rendimiento de las cosechas en suelos con biosólidos y en consecuencia beneficio económico y social para los productores”, es posible derivar las variables involucradas. La variable independiente es el rendimiento de las cosechas adicionadas con biosólidos y la variable dependiente es el beneficio económico y social obtenido por los productores. El objetivo es conocer los beneficios (económicos y sociales) que obtienen los productores que usan biosólidos.

2.4.1. Operacionalización de variables

En el **Cuadro 2.3** se observa el proceso de operacionalización de la variable “beneficio económico y social obtenido por los productores” derivada de la hipótesis específica correspondiente (Rojas 2002).

Cuadro 2.3. Operacionalización de la variable “beneficio económico y social obtenido por los productores”

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operacional	Nivel de medición	Indicadores
Beneficio económico obtenido por los productores que utilizan biosólidos, en sus terrenos	Cuantitativa continua	Obtención de mayores ingresos económicos por parte de una persona o grupo de personas por la realización de una actividad que le proporciona una remuneración	Estimación por el propio productor de los rendimientos en las parcelas donde aplica biosólidos	Intervalo	<ul style="list-style-type: none"> • Cosechas obtenidas • Venta de cosecha • Ahorro en fertilizante • Ahorro en alimento para ganado
Beneficio social obtenido por los productores que utilizan biosólidos en sus terrenos	Cualitativa discreta	Obtención de bienes y servicios por parte de una persona o grupo de personas, los cuales mejoran su calidad de vida	Bienes y servicios adquiridos por productor como consecuencia del beneficio económico adquirido por usar biosólidos en sus terrenos y aumentar sus rendimientos.	Nominal	<ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de servicios (teléfono, energía eléctrica, etc.) • Mejoras en la vivienda • Más y mejor alimentación • Acceso a servicios de salud

2.5. Desarrollo de la estrategia

La metodología usada para desarrollar la estrategia, está basada en la propuesta por Silva-Lira (2003). Básicamente consta de cinco etapas para su desarrollo: identificación del problema que la estrategia tratará de solucionar, identificación de las causas y efectos respecto al problema analizado, identificación de los medios y fines que permitirán investigar las posibles soluciones al problema investigado, una definición de los objetivos de la estrategia, un análisis FODA de los objetivos específicos y finalmente, se proponen las acciones que conforman la estrategia.

La identificación y el análisis de problemas es el primer paso para enfocar los objetivos de la estrategia. En esta parte se analizan e identifican los que se consideran que son los principales problemas de la situación analizada.

En este caso particular, el problema central de la aplicación de biosólidos de origen urbano en suelos agrícolas, es la falta de procedimientos de manejo integral y sistémico que reduzcan los riesgos desde el punto de vista ambiental y de salud. Por lo tanto se definen los efectos más importantes del problema en cuestión, para analizar y verificar su importancia, lo cual dará una idea de la gravedad de las consecuencias que tiene no resolver el problema que se ha detectado.

La siguiente etapa en la elaboración de la estrategia es la identificación de medios y fines. En esta parte se hace una descripción de la situación esperada, es decir lo que se espera alcanzar en la medida que se pueda solucionar el problema central que se ha detectado, identificando las posibles alternativas de solución. Al hacer esto, todas las que eran causas del problema central, se transforman en medios para resolverlo, y los que eran efectos se transforman en fines. El problema central ahora se transforma en el gran objetivo de la estrategia, y que es lograr hacer un manejo integral eficiente y adecuado de los biosólidos como enmiendas agrícolas en la zona de estudio.

El siguiente paso para establecer la estrategia es la definición de los objetivos. En esta parte se analiza la secuencia de la intervención que se debe efectuar para contribuir a alcanzar el objetivo general. Para aplicar la secuencia de intervención se deben identificar los objetivos.

El análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) se aplica al objetivo específico de la estrategia para identificar las fortalezas y debilidades del entorno que pueden influir en el logro del objetivo específico, sobre la base de las potencialidades y limitaciones establecidas en el análisis de la situación estudiada.

CAPÍTULO III. BIODISPONIBILIDAD Y FRACCIONAMIENTO DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS ENMENDADOS CON BIOSÓLIDOS DE ORIGEN MUNICIPAL

RESUMEN

Los biosólidos originados en el tratamiento de aguas residuales municipales se utilizan en suelos agrícolas como una fuente de nutrimentos y de materia orgánica. Su contenido de metales pesados puede restringir su uso como enmienda agrícola, por el riesgo potencial de introducirlos a las redes tróficas. Determinar la concentración total de metales pesados en suelos enmendados con biosólidos es un criterio insuficiente para evaluar el riesgo. Los metales pesados se encuentran unidos a los diferentes componentes sólidos del suelo, los cuales de acuerdo con sus características fisicoquímicas presentan diferente disponibilidad. El objetivo de este trabajo fue determinar las concentraciones biodisponibles y la distribución de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos enmendados con biosólidos en un periodo de seis años y, establecer si existe relación entre la biodisponibilidad y la distribución de los metales con la antigüedad de aplicación. Se utilizó un procedimiento de extracción química secuencial de cuatro etapas para determinar las concentraciones de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en cuatro fracciones químicas definidas operacionalmente y que representan la biodisponibilidad y la distribución de los metales en los suelos enmendados. Las concentraciones totales se determinaron por medio de una digestión ácida en sistema abierto. La cuantificación de los metales pesados se realizó por ICP-AES. El Cd no fue detectado. La biodisponibilidad de Cu y Pb decrece con la antigüedad de aplicación y la del Zn aumenta. La antigüedad de aplicación de los biosólidos, influyó en la redistribución de Cu, Pb y Zn en las cuatro fracciones extraídas. La distribución del Ni es menos afectada por la antigüedad de aplicación de los biosólidos. Los metales estudiados están retenidos en un alto porcentaje en las fracciones más estables, oxidable y residual. La fracción biodisponible de cada metal muestra bajos porcentajes, lo cual indica escasa disponibilidad en el suelo y por lo tanto un bajo riesgo de que sean incorporados a las redes tróficas.

ABSTRACT

The biosolids originated in the treatment of municipal wastewater are used in agricultural soils as a source of nutrients and organic matter. Heavy metal content may restrict their use as agricultural amendment, by the potential risk introducing them in food webs. To determine the total concentration of heavy metals in soils amended with biosolids is an insufficient criterion for assessing the risk. Heavy metals are bound to different solids components of soil, which according to their different physicochemical characteristics have different availability. The aim of this study was to determine distribution and bioavailable concentrations of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in soil amended with in a period of six years and a possible relationship between the bioavailability and distribution of metals with the age of application. It was used a sequential chemical extraction procedure of four steps for determining the concentrations of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in four operationally defined chemical fractions and represent the bioavailability and distribution of metals in soils amended. The total concentrations were determined by an open systems acid digestion. The quantification of heavy metals was performed by ICP-AES. The Cd was not detected. The bioavailability of Cu and Pb decreases with age of application and Zn increases. The age of application of biosolids, influenced in the redistribution of Cu, Pb and Zn in the four fractions extracted. The distribution of Ni is less affected by the age of application of biosolids. The metals studied are held in a high percentage in the more stable fractions, oxidizable and residual. The bioavailable fraction of each metal shows low percentages, indicating low availability in the soil and therefore a low risk of being incorporated into food webs.

INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos sólidos (biosólidos) generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales es un problema creciente en las grandes zonas urbanas. Por su alto contenido de materia orgánica y de nutrientes como N y P, la opción de emplearlos como enmendadores de suelos agrícolas parece adecuada desde el punto de vista agronómico y económico (McBride 2003).

Los avances tecnológicos y una legislación ambiental cada vez más estricta, han propiciado un mejoramiento tanto en el proceso mismo de tratamiento de las aguas residuales, como en los procesos de estabilización de los lodos residuales, lo cual ha generado una producción de biosólidos con una calidad que los hace propicios para su uso agrícola, debido a que están prácticamente libres de patógenos y con alto porcentaje de materia orgánica y de nutrientes. Sin embargo, el contenido y la disponibilidad de metales pesados es uno de los principales factores que pueden restringir el uso de biosólidos como enmiendas de suelos (O'Connor *et al.* 2005).

La aplicación repetida de biosólidos en suelos dedicados a la producción agrícola, puede llevar a un incremento en el contenido total de metales pesados y en las formas químicas disponibles para los seres vivos. Esta disponibilidad química es la que se ha denominado como “biodisponibilidad” (De las Heras *et al.* 2005).

El riesgo para la salud humana y para los agroecosistemas a partir de la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas, depende de la solubilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados. Las reacciones químicas entre los metales pesados y los componentes sólidos de suelos y biosólidos, determinan su solubilidad y biodisponibilidad (Basta *et al.* 2005). Estas reacciones son temporales. Algunas ocurren en segundos, en horas o en días, mientras que otras son mucho más lentas y se llevan a cabo en meses e incluso años (Sparks 2003).

Conocer la concentración total de metales pesados en suelos enmendados con biosólidos, proporciona información muy limitada sobre el comportamiento y el destino de estos elementos (Fuentes *et al.* 2008). El contenido total se encuentra repartido en distintas fracciones o formas químicas. La determinación de la concentración de metales pesados en las diferentes fases sólidas presentes en el suelo (orgánica y mineral) y en los biosólidos puede ser más útil para conocer su distribución y predecir su comportamiento, lo cual incluye la solubilidad, la movilidad, la biodisponibilidad y por lo tanto la toxicidad (Hettiarachchi *et al.* 2002, Covelo *et al.* 2007). La metodología por medio de la cual es posible obtener esta información es la especiación química o fraccionamiento.

La extracción química, simple o secuencial, de metales pesados es una técnica empleada para el fraccionamiento de los metales pesados presentes en muestras sólidas tales como suelos, suelos enmendados, biosólidos, sedimentos, etc. (Rao *et al.* 2008). En este trabajo se usó el esquema propuesto por la Comisión Europea a través del Community Bureau of Reference (BCR), que a partir del año 2002 se denomina Standard Measurement and Testing Program (SM&TP). En la actualidad existen muchos esquemas de extracción química secuencial; sin embargo, esa gran variedad de procedimientos provoca que los resultados obtenidos en distintos estudios no sean comparables, debido a las condiciones experimentales tan diferentes que establece cada protocolo de extracción. Ante esta situación la Comunidad Europea por medio del BCR, inició un programa para armonizar la metodología utilizada en los esquemas de extracción química secuencial para la determinación de metales pesados en muestras sólidas (López y Mandado 2002). El protocolo de extracción secuencial BCR establece la obtención de tres fracciones definidas operacionalmente; es decir, de acuerdo a las características químicas de las soluciones extractantes. Y aunque no la incluye en su protocolo, el procedimiento de extracción secuencial BCR recomienda una cuarta fracción conocida como residual. Las fracciones extraídas son las siguientes:

Etapa 1. Fracción intercambiable. Esta fracción incluye metales adsorbidos débilmente sobre superficies sólidas del suelo (arcillas, óxidos de Fe y Mn, materia orgánica) y que están retenidos por una interacción electrostática relativamente débil. Estos metales pueden ser liberados por un proceso de intercambio iónico. Los iones metálicos intercambiables son una medida de aquellos metales pesados que son liberados más fácilmente en la solución del suelo. Esta etapa representa la fracción con mayor biodisponibilidad.

Etapa 2. Fracción reducible. Se extraen metales pesados asociados principalmente a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Los metales pueden estar enlazados a los óxidos de Fe y Mn por alguno de los siguientes mecanismos o la combinación de ellos: la coprecipitación, la adsorción, la formación de complejos de superficie, el intercambio iónico y la penetración en la estructura cristalina. Los metales pesados unidos a estos

minerales son inestables en condiciones reductoras. Esta fracción ocupa el segundo lugar respecto a la biodisponibilidad de metales pesados hacia la solución del suelo.

Etapa 3. Fracción oxidable. Los metales pesados pueden estar asociados por medio de reacciones de complejación a la materia orgánica del suelo. Las formas metálicas solubles son liberadas cuando la materia orgánica es atacada en condiciones oxidantes severas. La biodisponibilidad de esta fracción depende en gran medida del tipo de materia orgánica.

La cuarta fracción recomendada por el protocolo de extracción BCR proporciona información sobre la concentración de metales que no fueron extraídas en las etapas anteriores y que se considera están recluidos en la estructura cristalina de minerales primarios. Por lo tanto su biodisponibilidad es muy baja.

En la ciudad de Puebla, México, ubicada en la región central del país, se está generando un volumen anual aproximado de 80,000 m³ de biosólidos, distribuido en las cinco plantas de tratamiento con que cuenta la ciudad. Como método de disposición final de los biosólidos, se les está utilizando como enmendadores en suelos agrícolas de comunidades rurales ubicadas en la periferia de la ciudad con precipitación limitada. Los suelos de esta zona son delgados, pobres en materia orgánica, baja fertilidad y por lo tanto su productividad también es baja. En opinión de los agricultores de la zona, la aplicación de biosólidos, les ha permitido aumentar los rendimientos y como consecuencia recibir mayor ingreso.

Los objetivos de este estudio fueron: conocer y comparar la biodisponibilidad de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos agrícolas, los cuales fueron enmendados con biosólidos en diferentes años, y determinar si existe relación directa entre la antigüedad de aplicación y la concentración biodisponible. Así como determinar si la distribución de estos metales en las diferentes fracciones químicas establecidas por el procedimiento de extracción secuencial BCR es afectada por el transcurso del tiempo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los suelos estudiados (Cambisoles) se localizan en la comunidad de La Paz Tlaxcolpan (18° 54' 21" N, 98° 13' 16" E), ubicada al sur del municipio de Puebla,

México. Los suelos de esta zona han sido enmendados con biosólidos desde el año 2003. Para la realización de este estudio se eligieron seis parcelas de 1 ha. En cada uno de estos terrenos se realizó una sola aplicación de biosólidos con una dosis de 40 tha^{-1} , en el periodo comprendido entre los años 2003 y 2008. Las muestras fueron tomadas en el mes de junio de 2009. Por lo tanto la antigüedad de aplicación en estas parcelas fue de seis, cinco, cuatro, tres, dos y un año respectivamente. También se eligió una parcela sin aplicación de biosólidos como tratamiento testigo.

Utilizando el método de zigzag, en cada una de las siete parcelas se tomaron diez submuestras a una profundidad de 30 cm. Las muestras se homogeneizaron y se usó el método del cuarteo para formar siete muestras compuestas de aproximadamente 1kg cada una, las cuales se colocaron en bolsas de polietileno para su traslado al laboratorio (SEMARNAT 2000). Las muestras se secaron al aire a temperatura ambiente, se molieron, y se tamizaron en una malla número 40 para obtener un tamaño de partícula $< 0.420 \mu\text{m}$. Pérez-Cid *et al.* (1996) establecen que existe una mayor eficiencia de extracción cuando el tamaño de partícula es menor. Las muestras se almacenaron en recipientes de polietileno a temperatura ambiente.

Para el fraccionamiento de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, se utilizó el procedimiento de extracción secuencial BCR de tres etapas (Rauret *et al.* 2000). Se aplicó a tres repeticiones y a un blanco. El blanco consistió en la solución extractante correspondiente a cada etapa del procedimiento. Todas las soluciones extractantes fueron preparadas con reactivos grado analítico (J.T. Baker) y agua tridestilada. Todo el material en contacto con muestras y reactivos se remojó en una solución de ácido nítrico 4 M durante 24 h y se enjuagó repetidamente con agua tridestilada. La secuencia de extracción fue la siguiente:

Etapa 1. Fracción intercambiable. 20 mL de ácido acético 0.11 M se agregaron a 1 g de muestra en un tubo de centrifuga de 38 mL de polipropileno. El tubo se puso en agitación (agitador horizontal Thermolyne) durante 16 h a temperatura ambiente. El extracto se separó del residuo sólido por centrifugación a 2400 rpm durante 20 min, en una centrífuga Beckman GS-15R. El líquido sobrenadante se filtró a través de papel filtro Whatman No. 40 y se almacenó a 4°C hasta su análisis. El residuo sólido

se lavó con 20 mL de agua tridestilada por agitación durante 15 min y se centrifugo durante 20 min a 2400 rpm. El sobrenadante se desechó.

Etapa 2. Fracción reducible. Al residuo de la etapa uno se agregaron 20 mL de clorhidrato de hidroxilamina 0.5 M (pH = 2), ajustado con ácido nítrico concentrado. Se agitó durante 16 h a temperatura ambiente. La separación del extracto y el lavado del residuo sólido se realizaron como se describe en la etapa anterior. El extracto se filtró y se almacenó a 4 °C para su análisis.

Etapa 3. Fracción oxidable. Al residuo de la etapa anterior se agregaron 10 mL de peróxido de hidrógeno 8.8 M. La digestión se llevó a cabo por una hora a temperatura ambiente con el tubo tapado, con agitación manual ocasional. La digestión continuó por una hora a 85 °C en un baño de agua. Se destapó el tubo y se redujo el volumen por evaporación hasta aproximadamente 1 mL. Se adicionaron otros 10 mL de peróxido de hidrógeno se tapó el tubo y la digestión prosiguió por otra hora a 85°C. Se destapó el tubo y el volumen se redujo por evaporación hasta 1 mL aproximadamente. Al residuo sólido, húmedo y frío, se agregaron 25 mL de acetato de amonio 1.0 M (pH=2, ajustado con ácido nítrico concentrado). Se agitó durante 16 h a temperatura ambiente. El proceso de separación del extracto y el lavado del residuo se realizaron como en las etapas previas. El líquido sobrenadante se filtro y se almacenó en un recipiente de polietileno a 4°C para su análisis.

Etapa adicional. Fracción residual. Como se mencionó anteriormente, el protocolo de extracción secuencial BCR no contempla la determinación de la fracción residual, pero recomienda realizarla para cuantificar la concentración de metales pesados que no fue extraída en las tres etapas indicadas anteriormente.

Para determinar la concentración de metales pesados en la fracción residual y la concentración total en las muestras de suelo, se utilizó el método EPA 3050B (USEPA 1996), propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, sus siglas en inglés), que consiste en una digestión de la muestra en medio ácido (Hernández-Herrera *et al.* 2005).

La cuantificación de la concentración de metales en todos los extractos se hizo por medio de un equipo (Varian Liberty Series II) de espectroscopia de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Las condiciones de operación del equipo se muestran en el **Cuadro 3.1**

Cuadro 3.1. Condiciones de operación del equipo de ICP-AES.

Elemento	Longitud de onda (nm)	Límite de detección (mg L ⁻¹)
Cd	226.502	0.05
Cu	327.396	0.03
Ni	231.604	0.01
Pb	220.353	0.20
Zn	206.200	0.01
Potencia generador de radio frecuencia (kw)		1.1
Frecuencia del generador (MHz)		40.0
Velocidad de flujo gas enfriante (L m ⁻¹)		16.5
Velocidad de flujo gas auxiliar (L m ⁻¹)		2.25
Velocidad de flujo gas nebulizador (L m ⁻¹)		1.5

RESULTADOS

Biodisponibilidad de los metales pesados

El cadmio no fue detectado en ninguno de los extractos, en los correspondientes al procedimiento de extracción secuencial ni en los de la determinación del contenido total. La **Figura 3.1** muestra las concentraciones encontradas de Cu, Ni, Pb y Zn en la fracción de mayor biodisponibilidad (fracción intercambiable), en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en los suelos. La mayor biodisponibilidad de Cu y Pb se presentó en el suelo con un año después de la aplicación de biosólidos. El níquel tuvo su mayor biodisponibilidad en el suelo con mayor antigüedad de aplicación (6 años) y el zinc mostró su mayor concentración biodisponible después de cinco años de aplicados los biosólidos.

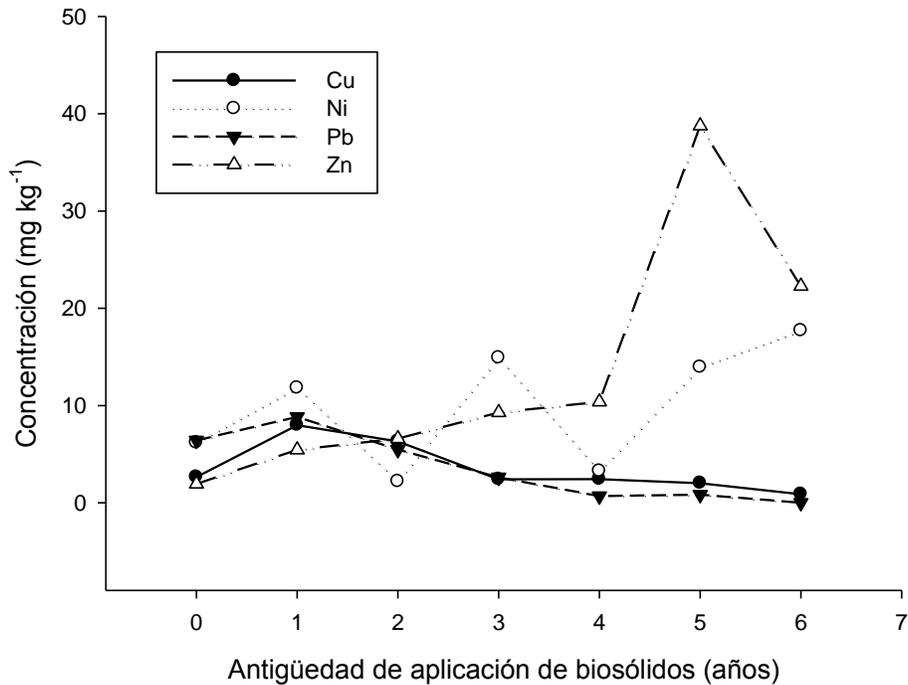


Figura 3.1. Variación de la biodisponibilidad de Cu, Ni, Pb y Zn en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos (0 = Testigo).

Distribución de los metales pesados

En el fraccionamiento de metales pesados, se encontró que, el cobre se distribuyó en mayor proporción en la fracción oxidable y la fracción residual en suelos con antigüedad de aplicación de biosólidos de uno, dos y tres años (**Figura 3.2**). Y en suelos con cuatro, cinco y seis años después de la adición de biosólidos su distribución mostró los porcentajes más altos en la fracción reducible y la fracción residual. En el testigo casi el 80% de cobre se encontró en la fracción residual, un 10% en la fracción oxidable y cerca de un 5% en la fracción intercambiable. El testigo mostró mayor porcentaje de cobre en la fracción intercambiable que los suelos con biosólidos con excepción del suelo con la aplicación más reciente (después de un año).

El níquel (**Figura 3.3**) estuvo presente entre un 25-30% en la fracción intercambiable después de uno, tres, cinco y seis años de aplicados los biosólidos en esos suelos.

En el testigo se encontró casi un 20% de níquel en la fracción intercambiable. En todos los suelos el níquel mostró un bajo porcentaje en la fracción residual y en la fracción oxidable se mantuvo casi constante el porcentaje en todos los suelos incluyendo al testigo. En la fracción reducible los porcentajes de níquel fueron similares en suelos con antigüedad de aplicación de uno, dos, cinco y seis años y en el testigo el porcentaje de níquel en esta fracción fue superior a la de todos los suelos enmendados con biosólidos.

El plomo se encontró en elevados porcentajes en las fracciones oxidable y residual (**Figura 3.4**). En todos los suelos incluyendo al testigo las dos fracciones juntas alcanzaron entre un 70% y un 90 % del total. El porcentaje más alto de plomo (25%) en la fracción intercambiable se encontró en el suelo con la aplicación más reciente de biosólidos. Y a medida que la antigüedad de adición de biosólidos se incrementó, el porcentaje decreció hasta llegar a cero en el suelo con mayor antigüedad de aplicación (seis años). En el testigo el plomo alcanzó casi un 20% en la fracción intercambiable. En la fracción reducible tuvo escasa presencia en todos los suelos incluyendo al testigo con la excepción del suelo con la mayor antigüedad de aplicación, en donde el porcentaje llegó a casi el 50%.

La distribución de zinc (**Figura 3.5**) mostró tendencia a incrementar el porcentaje de este metal en la fracción intercambiable cuando la antigüedad de aplicación de biosólidos en los suelos fue mayor. En el suelo con cinco años de antigüedad de aplicación llegó a casi 35%. La fracción oxidable mostró una tendencia inversa: a mayor antigüedad de aplicación menor porcentaje de zinc. La presencia de zinc en la fracción reducible fue muy poca en todos los suelos, excepto en el testigo donde llegó a un 20%. Y en la fracción residual del testigo el zinc alcanzó un elevado porcentaje del 65%. En general el zinc tuvo los porcentajes más altos en las fracciones oxidable y residual en todos los suelos incluyendo al testigo y la fracción dominante fue la oxidable.

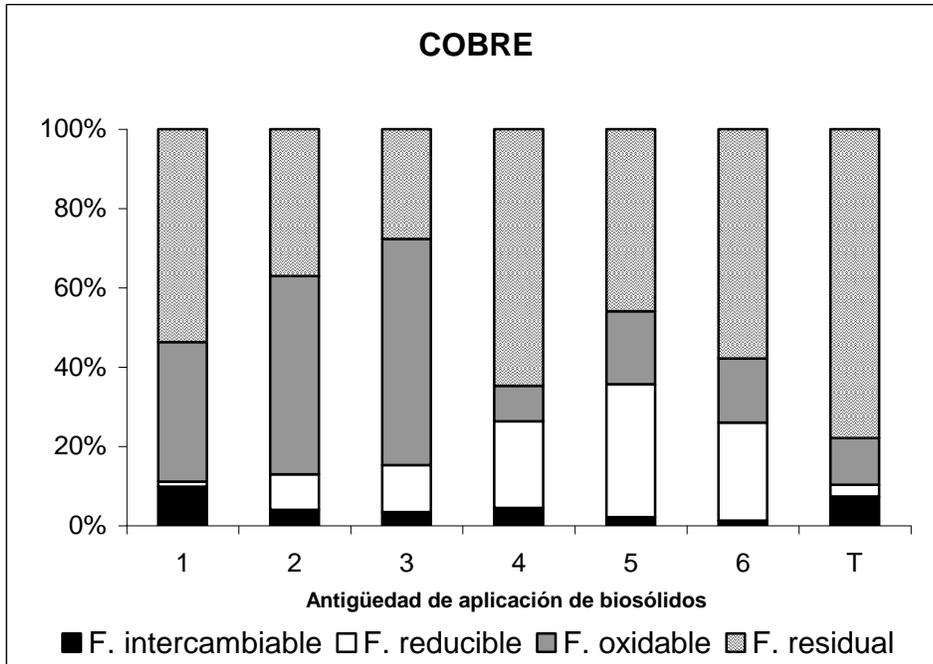


Figura 3.2. Distribución porcentual de cobre en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.

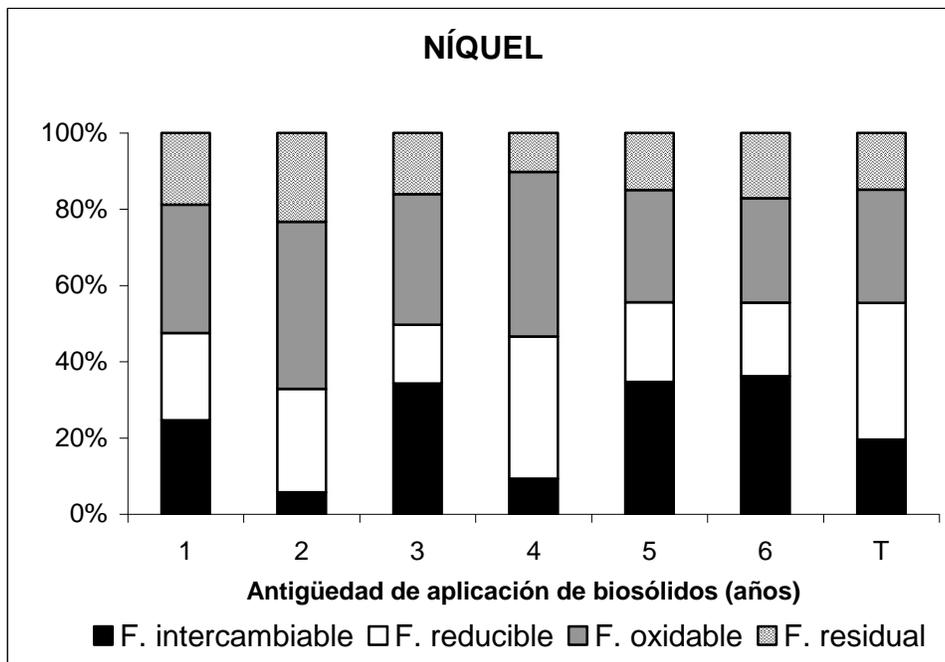


Figura 3.3. Distribución porcentual de níquel en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.

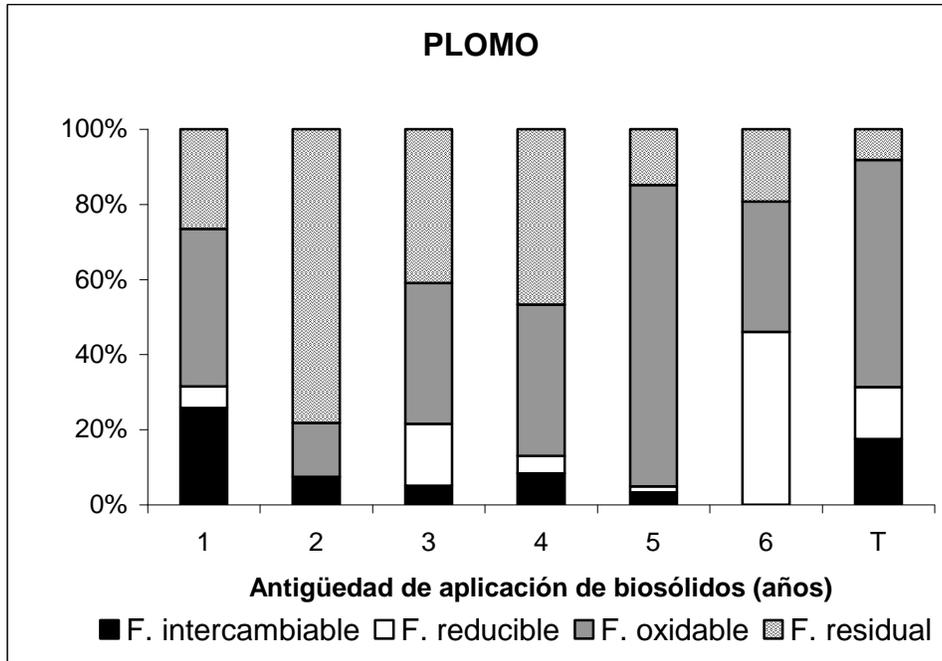


Figura 3.4. Distribución porcentual de plomo en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.

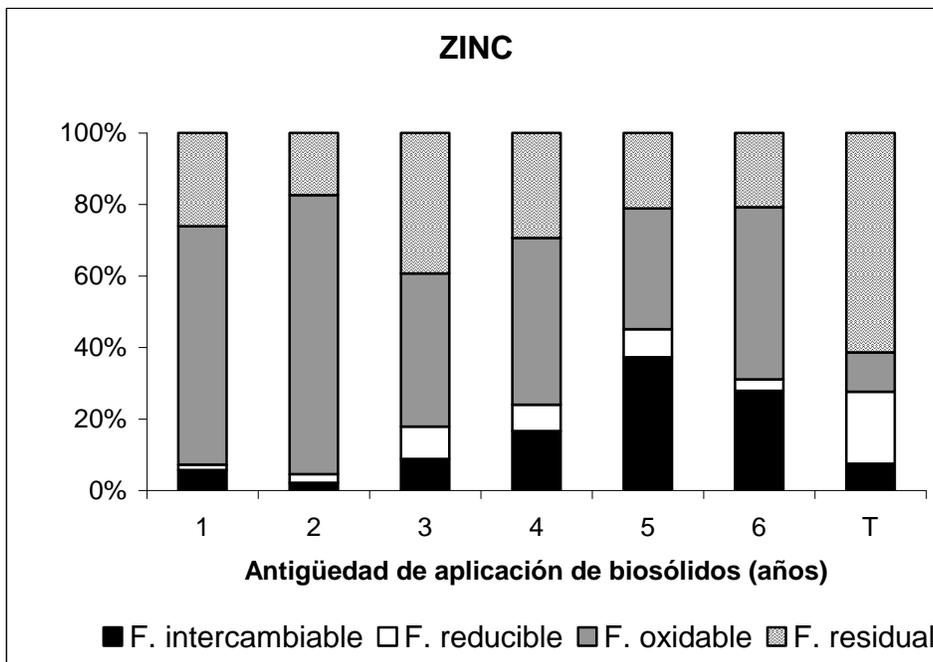


Figura 3.5. Distribución porcentual de zinc en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos en las cuatro fracciones extraídas por el procedimiento de extracción secuencial.

Concentración total

El cobre tuvo sus concentraciones totales más altas en los suelos con antigüedad de aplicación de dos, cinco y un año, en ese orden. La concentración total de cobre no mostró tendencia a incrementar o disminuir con la antigüedad de aplicación de los biosólidos. Para el níquel las concentraciones totales se mantienen casi constantes en los seis suelos enmendados con biosólidos y el testigo presentó una concentración similar. Las concentraciones totales de plomo fueron más elevadas en suelos con antigüedad de aplicación de dos, tres y un año, en ese orden. El plomo tampoco mostró alguna tendencia en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos. Y el testigo tuvo una concentración total de plomo más alta que la de todos los suelos con biosólidos, excepto las de suelos con dos y tres años de antigüedad de aplicación. El zinc presentó las concentraciones totales más altas de los cinco metales pesados en los suelos con biosólidos. Para el suelo con antigüedad de aplicación de dos años se encontró una concentración total superior a los 300 mgkg⁻¹. El testigo presentó una concentración total baja en comparación con las encontradas en los suelos con biosólidos. El **Cuadro 3.2** muestra comparativamente, para todos los elementos estudiados y en todos los suelos, las concentraciones totales y las concentraciones en la fracción intercambiable. Esta última indica la biodisponibilidad de cada metal.

Cuadro 3.2. Valores de la concentración total y de la concentración en la fracción intercambiable (media ± S, n = 3) de Cu, Ni, Pb y Zn en muestras de suelos con diferente antigüedad de aplicación de biosólidos.

Antigüedad aplicación (años)	Elementos [†]							
	Cu		Ni		Pb		Zn	
	FI (mg kg ⁻¹)	CT (mg kg ⁻¹)	FI (mg kg ⁻¹)	CT (mg kg ⁻¹)	FI (mg kg ⁻¹)	CT (mg kg ⁻¹)	FI (mg kg ⁻¹)	CT (mg kg ⁻¹)
1	7.97 ± 9.07	83.6 ± 2.62	11.8 ± 1.12	52.8 ± 3.77	8.83 ± 8.41	38.2 ± 3.92	4.42 ± 2.08	102.0 ± 9.0
2	6.30 ± 0.37	162.5 ± 6.55	2.20 ± 2.52	37.1 ± 8.98	5.47 ± 4.94	75.0 ± 5.45	6.68 ± 3.54	310.0 ± 15.64
3	2.41 ± 2.13	74.0 ± 2.82	14.90 ± 6.05	48.5 ± 2.91	2.61 ± 2.27	58.6 ± 3.33	9.27 ± 3.17	126.5 ± 3.19
4	2.42 ± 3.41	55.07 ± 3.71	3.27 ± 1.79	38.7 ± 1.73	0.68 ± 1.21	13.4 ± 1.67	10.37 ± 11.1	59.2 ± 3.74
5	2.01 ± 1.36	98.57 ± 1.35	13.94 ± 11.78	38.5 ± 5.96	0.83 ± 1.34	32.8 ± 9.68	38.75 ± 5.14	110.0 ± 2.90
6	0.88 ± 0.87	71.5 ± 0.92	17.7 ± 15.79	52.6 ± 6.51	ND	18.0 ± 4.93	22.26 ± 5.12	81.0 ± 4.35
Testigo	2.64 ± 4.58	49.4 ± 1.52	6.18 ± 8.51	35.2 ± 1.20	6.41 ± 6.54	41.0 ± 2.31	1.93 ± 0.96	30.1 ± 2.81

[†]El cadmio no fue detectado en la concentración total ni en ninguna de las fracciones extraídas
FI, fracción intercambiable; CT, concentración total; ND, no detectado

DISCUSIÓN

Como se observa en los resultados obtenidos para la fracción intercambiable o biodisponible, no existe, de forma general, una relación directa entre antigüedad de aplicación de biosólidos y el aumento o la disminución de la biodisponibilidad para los metales estudiados. Cada metal responde de manera diferente a la antigüedad de aplicación de biosólidos. Las concentraciones biodisponibles de cobre y plomo, sí muestran una tendencia consistente. Disminuyen con el transcurso del tiempo. Aunque el rango entre la concentración más alta (después de un año de aplicación de biosólidos) y la más baja (después de seis años de aplicación) es muy pequeño. Esto concuerda con lo que establecen McGrath *et al.* (2000): que la biodisponibilidad de los metales pesados es más alta durante los primeros tres años siguientes a la aplicación de biosólidos seguido por una más baja pero sostenida biodisponibilidad. Las concentraciones biodisponibles, de Cu y Pb, en los seis suelos son muy cercanas a las del testigo. Esto indica un efecto muy pequeño ejercido por la adición de biosólidos en la biodisponibilidad de estos dos metales, en los suelos estudiados.

La variación de las concentraciones biodisponibles del níquel muestra un comportamiento irregular, debido a que incrementan y disminuyen de manera alternada con el transcurso del tiempo después de aplicación de biosólidos. Los suelos con uno, tres y cinco años después de haberse aplicado los biosólidos muestran concentraciones similares y más altas que las de los suelos con dos y cuatro años de antigüedad de aplicación, que son las más bajas.

El suelo con antigüedad de aplicación de seis años muestra la concentración más alta e interrumpe la tendencia de incrementos y decrementos de los años de aplicación anteriores. Este comportamiento del níquel también ha sido encontrado por Bacon *et al.* (2005) en estudios de fraccionamiento, pero en un periodo de estudio de 12 años después de la aplicación de biosólidos. Las concentraciones biodisponibles de Ni en los suelos con biosólidos sí muestran un incremento considerable (del 100% al 200%) con respecto a la del testigo. Esto significa que la adición de biosólidos incrementa los niveles de biodisponibilidad del níquel en los suelos estudiados al transcurrir el tiempo. Las concentraciones son $< 18 \text{ mgkg}^{-1}$ en todos los suelos. El

valor sugerido como normal en el suelo por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT 2000) es de 50 mgkg^{-1} .

El zinc muestra una tendencia inversa a la del Cu y el Pb. Las concentraciones biodisponibles se incrementan con la antigüedad de aplicación de biosólidos. En los suelos con uno, dos, tres y cuatro años después de la aplicación, la biodisponibilidad del zinc aumenta sostenidamente aunque con incrementos muy pequeños. Pasa de 4.42 mgkg^{-1} después de un año de aplicación a 10.37 mgkg^{-1} después de cuatro años de aplicación. En un estudio similar de tres años, De las Heras *et al.* (2005) encuentran que los valores de la concentración de zinc son más altos tres años después de la aplicación de biosólidos. En el suelo con cinco años después de la aplicación, la concentración biodisponible de zinc se incrementa notablemente hasta casi 40 mgkg^{-1} y en el suelo con la aplicación más antigua alcanza los 22 mgkg^{-1} . El súbito incremento de la concentración biodisponible de zinc en el suelo con cinco años de antigüedad de aplicación pudo ser ocasionado por una contaminación de la muestra durante alguna etapa de la realización del experimento.

La afinidad del zinc y la materia orgánica (Kabata-Pendias y Pendias 2000, Basta *et al.* 2005) puede explicar los resultados encontrados, debido a que los metales pesados pueden ser más solubles o móviles en suelos enmendados con biosólidos cuando ellos están unidos inicialmente a la materia orgánica y son liberados cuando la materia orgánica se mineraliza con el transcurso del tiempo (Antoniadis y Alloway 2003). Comparados con el testigo, existe un incremento considerable en la biodisponibilidad del zinc en todos los suelos enmendados con biosólidos.

La distribución de metales pesados obtenida por el procedimiento de extracción secuencial muestra en general que Cu, Pb y Zn están distribuidos en su mayor parte en las fracciones más estables, oxidable y residual en todos los suelos incluyendo al testigo. Esto significa que un alto porcentaje de las concentraciones determinadas para estos metales son no biodisponibles. El Níquel tiene una distribución diferente. Se encuentra distribuido en mayor proporción en las fracciones oxidable y reducible, en ese orden y tiene escasa presencia en la fracción residual.

La redistribución del cobre en los suelos con biosólidos con el transcurso del tiempo, se da principalmente entre la fracción intercambiable (biodisponible) y la fracción reducible, aunque también interviene la fracción oxidable. Cuando la concentración intercambiable decrece a mayor antigüedad de aplicación de biosólidos, decrece la fracción oxidable y la fracción reducible se incrementa. Esto ocurre de manera consistente. Estos resultados indican que con el transcurso del tiempo, las fases inorgánicas del suelo empiezan a retener los metales liberados, tanto de la fracción intercambiable como de la oxidable. De acuerdo con Granato *et al.* (2004), los metales que son liberados de la materia orgánica después de la aplicación de biosólidos pueden también reaccionar con los constituyentes inorgánicos de los propios biosólidos o del suelo, tales como los óxidos de Fe, Mn y Al y quedar retenidos reduciendo su disponibilidad a las plantas.

Como se mencionó en la parte referente a la biodisponibilidad del níquel, existe un incremento-decremento alternado de la fracción intercambiable con el paso del tiempo. Esta situación ocasiona que alternadamente el níquel se redistribuya principalmente en las fracciones intercambiable y reducible. Cuando decrece la fracción intercambiable se incrementa la fracción reducible y viceversa. Esto sugiere que los metales liberados por la fracción intercambiable son adsorbidos por las fases minerales tanto del suelo como de los biosólidos, ocasionando el incremento de la fracción reducible. Pero también puede ocurrir una desorción alternada de estos metales que incrementan la fracción intercambiable. La fracción oxidable se mantiene casi en un porcentaje constante a través del tiempo y no interviene en esta dinámica de redistribución. Este comportamiento del níquel no ha sido aún reportado.

El plomo muestra una dinámica de redistribución con el transcurso del tiempo, semejante a la del cobre. Cuando aumenta la antigüedad de aplicación disminuye la concentración en la fracción intercambiable y se observan incrementos en las fracciones reducible y oxidable. Aunque estos incrementos no muestran una tendencia consistente. Strawn y Sparks (2000) y Brown *et al.* (2003) encuentran resultados similares en trabajos sobre suelos enmendados con biosólidos y

demuestran la importancia de la materia orgánica y los óxidos de Fe y Mn en la dinámica y limitación de la biodisponibilidad de los metales pesados.

Para el zinc existe una redistribución de las fracciones obtenidas en función de la antigüedad de aplicación. La fracción intercambiable se incrementa al transcurrir el tiempo. El incremento en esta fracción va asociado con un decremento de la fracción oxidable de manera consistente. Esta situación sugiere que cuando el zinc es liberado de la fracción orgánica es retenido por la fracción intercambiable. El trabajo de Almás *et al.* (2000) establece que aunque la materia orgánica presente en los biosólidos puede retener fuertemente metales pesados por largo tiempo, también puede suministrar ligandos orgánicos solubles al suelo y por lo tanto incrementar la potencial movilidad de los metales. Esto demuestra la gran importancia que tiene la fracción orgánica de los suelos y los biosólidos en la dinámica de la fracción biodisponible. El tipo de materia orgánica determinará el tiempo de retención de los metales (Bolan *et al.* 2003). La fracción reducible muestra pequeños incrementos al aumentar la antigüedad de aplicación.

En los resultados mostrados en el **Cuadro 3.2** se observa que, para el periodo de estudio, las concentraciones totales de Cu, Pb y Zn varían en incrementos y decrementos con la antigüedad de aplicación. Walter *et al.* (2002) reportan similar inconsistencia en las concentraciones totales de estos metales en un periodo de tiempo. La concentración total del níquel muestra escasa variación. Se mantiene casi constante durante todo el periodo de estudio.

La comparación de las concentraciones totales y las concentraciones intercambiables de los metales estudiados en todos los suelos, muestra que no existe correlación entre ambas. La concentración total no influye en la variación de la biodisponibilidad.

CONCLUSIONES

La concentración biodisponible de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos Cambisoles enmendados con biosólidos no muestra una tendencia consistente para todos los metales. No aumenta o disminuye linealmente con el tiempo, después de la aplicación de biosólidos, en un periodo de seis años. Cada metal muestra una

tendencia particular. El tiempo transcurrido después de la aplicación de biosólidos no influye de manera determinante en el aumento de la biodisponibilidad de los metales. La antigüedad de aplicación de los biosólidos influye en la redistribución de Cu, Pb y Zn en las cuatro fracciones extraídas. La distribución del níquel es menos afectada por la antigüedad de aplicación de los biosólidos.

Los metales estudiados están retenidos en un alto porcentaje en las fracciones más estables, oxidable y residual. La fracción biodisponible muestra porcentajes bajos, lo cual indica escasa biodisponibilidad.

La adición de biosólidos incrementa la concentración total de los metales en todos los suelos estudiados, pero esto no afecta el comportamiento de la concentración biodisponible.

LITERATURA CITADA

Almás A. R., McBride M. B. y Singh B. R. (2000). Solubility and lability of cadmium and zinc in two soils treated with organic matter. *Soil Sci.* 165, 250-259.

Antoniadis V. y Alloway B. J. (2003). Influence of time on the plant availability of Cd, Ni and Zn after sewage sludge has been applied to soils. *Agrochimica*, 47, 81-93.

Bacon J. R., Hewitt I. J. y Cooper P. (2005). Reproducibility of the BCR sequential extraction procedure in a long term study of the association of heavy metals with soil components in an upland catchment in Scotland. *Sci. Total Environ.* 337, 191-205.

Basta N. T., Ryan J. A. y Chaney R. L. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34, 49-63.

Bolan N. S. y Duraisamy V. P. (2003). Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: a review involving specific case studies. *Aust. J. Soil Research.* 41, 533-555.

Brown S., Chaney R. L., Hallfrisch J. G. y Xue Q. (2003). Effect of biosolids processing on lead bioavailability in an urban soil. *J. Environ. Qual.* 32, 100-108.

Covelo E. F., Vega F. A. y Andrade M. L. (2007). Competitive sorption and desorption of heavy metals by individuals soil components. *J. Hazard. Mat.* 140, 308-315.

- De las Heras J., Mañas P. y Labrador J. (2005). Effects of several applications of digested sewage sludge on soils and plants. *J. Environ. Sci. Heal. Part A* 40, 437-451.
- Fuentes A., Lloréns M., Sáez J., Aguilar M. I., Ortuño J. F. y Meseguer V. F. (2008). Comparative study of six different sludges by sequential speciation of heavy metals. *Bioresour. Technol.* 99, 517-525.
- Granato T. C., Pietz R. I., Knafel G. J., Carlson Jr. C. R., Tata P. y Lue-Hing C. (2004). Trace element concentrations in soil, corn leaves and grain after cessation of biosolids applications. *J. Environ. Qual.* 33, 2078-2089.
- Hernández-Herrera J. M., Olivares-Sáenz E., Villanueva-Fierro I., Rodríguez-Fuentes H., Vázquez-Alvarado R. y Pissani-Zuñiga J.F. (2005). Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21 (1), 31 – 36.
- Hettiarachchi G. M., Ryan J. A. y Schekel K. G. (2002). Role of iron and manganese oxides in biosolids and biosolids-amended soils on metal binding. Abstracts of papers. 223rd American Chemical Society National Meeting. Orlando, FL. 7 to 11 April 2002.
- Kabata-Pendias A. y Pendias H. (2000). *Trace elements in soil and plants*. CRC Press, Michigan, 432 pp.
- López P. L. y Mandado J. M. (2002). Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios Geol.* 58, 133-144.
- McBride M. B. (2003). Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks?. *Adv. Environ. Res.* 8, 5-19.
- McGrath S. P., Zhao F. J., Dunham S. L., Crosland A. R. y Coleman K. (2000). Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. *J. Environ. Qual.* 29, 875-883.
- O'Connor G. A., Elliot H. A., Basta N. T., Bastian R. K., Pierzynski, G. M., Sims, R. C. y Smith Jr., J. E. (2005). Sustainable land application: An overview. *J. Environ. Qual.* 34, 7-17.

- Pérez-Cid B., Lavilla I. y Bendicho C. (1996). Analytical assessment of two sequential extraction schemes for metal partitioning in sewage sludge. *Analyst* 121, 681-688.
- Rao C. R. M., Sahuquillo A. y López-Sánchez J. (2008). A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials. *Water Air Soil Pollut.* 189, 291-333.
- Rauret G., López-Sánchez J. F., Sahuquillo A., Barahona E., Lachica M., Ure A.M., Davison C.M., Gomez A., Lück D., Bacon J., Yli-Halla M., Muntau H. y Quevauviller Ph. (2000). Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content. *J. Environ. Monit.* 2, 228-233.
- SEMARNAT (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 31 de Diciembre de 2002.
- Sparks D. L. (2003). *Environmental soil chemistry*. Academic Press, San Diego, 352 pp.
- Strawn D. G. y Sparks D. L. (2000). Effect of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb (II) sorption and desorption in soil. *J. Soil Sci. Soc, Am.* 64, 144-156.
- USEPA (1996). Method 3050B Acid digestion of sediments, sludges and soils, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846). Office of Solid Waste. United States Environmental Protección Agency. Manual. Washington, DC. 12 pp.
- Walter I., Martínez F., Alonso L., de Gracia J. y Cuevas G. (2002). Extractable soil heavy metals following the cessation of biosolids applications to agricultural soil. *Environ. Pollut.* 117, 315-321.

CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN CULTIVO DE MAÍZ: EFECTO A MEDIANO PLAZO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y EL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN LA PLANTA

RESUMEN

La generación y disposición final de biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, es un problema creciente en las áreas urbanas. El uso de estos residuos como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas parece una opción viable desde una perspectiva ambiental y económica por sus altos contenidos de materia orgánica y de nutrimentos. La principal restricción para este uso es su contenido de metales pesados y el riesgo de su ingreso a las redes tróficas. En la ciudad de Puebla, México, se generan anualmente 80,000 m³ de biosólidos que son aplicados en suelos agrícolas desde el año 2003 en cultivos de maíz. El efecto que esta práctica ocasiona en las propiedades químicas del suelo y en la disponibilidad de metales pesados a mediano plazo se desconoce. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto que la adición de biosólidos produce en las propiedades que determinan la fertilidad del suelo, en la disponibilidad de metales pesados y en las concentraciones de estos elementos en la planta en un periodo de seis años a partir de la aplicación de los biosólidos. Se tomaron muestras de suelo y planta en seis terrenos en los cuales se hizo una sola aplicación de biosólidos en años sucesivos del 2003 al 2008 y en un testigo. Se realizaron análisis químicos de los parámetros agronómicos que determinan la fertilidad del suelo y se determinó la disponibilidad de metales pesados por extracción con DTPA. Se realizó una digestión húmeda para las muestras de tejido vegetal. La cuantificación de metales pesados en los extractos de suelo y planta se realizó por ICP-AES. La adición de biosólidos incrementa la fertilidad de los suelos principalmente en los primeros cuatro años después de la aplicación. La disponibilidad de metales pesados aumenta con el tiempo. Los niveles Cu y Zn encontrados en el tejido vegetal no representan riesgo para la planta y la salud humana.

ABSTRACT

The generation and final disposition of biosolids from wastewater treatment plants is a growing problem in urban areas. The use of these wastes as organic amendments in agricultural soils seem to be a viable option from an environmental and economic perspective for its high content of organic matter and nutrients. The main restriction for this use is its content of heavy metals and the risk of their income on food webs. In the city of Puebla, Mexico, 80.000 m³ are generated annually of biosolids that are applied in agricultural soil since 2003 in maize culture. The effect that this practice causes in soil chemical properties and the availability of heavy metals in the mid-term is unknown. The objective of this study was to evaluate the effect of the addition of biosolids produced in the properties that determine soil fertility, availability of heavy metals and concentrations of these elements in the plant in a period of six years from the application of biosolids. Soil samples were taken and plant in six plots in which they made a single application of biosolids in successive years from 2003 to 2008 and a witness. Chemical analysis of agronomic traits that determine fertility of the soil were carried out, and it was determined the availability of heavy metals by DTPA extraction. Wet digestion was performed on samples of plant tissue. Quantification of heavy metals in soil and plant extracts was performed by ICP-AES. The addition of biosolids increases soil fertility especially in the first four years after application. The availability of heavy metals increases with time. Cu and Zn levels in plant tissue found without risk for the plant and human health.

INTRODUCCIÓN

Los biosólidos son lodos residuales estabilizados, derivados de los procesos de tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales (SEMARNAT 2002). La generación de estos residuos se ha incrementado consistentemente en las áreas urbanas como consecuencia del crecimiento poblacional y el desarrollo industrial, y su disposición final es un problema ambiental que ha aumentado en la última década (Gavalda *et al.* 2005).

Las opciones para disponer los biosólidos no son muchas: incineración, colocarlos en rellenos sanitarios, con el consecuente problema de las limitaciones de espacio, y reciclarlos como abonos orgánicos para uso agrícola (Alves *et al.* 2006).

La utilización de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas es viable no solo desde un punto de vista estrictamente ambiental sino también por razones económicas, y se considera una alternativa sustentable para su disposición final. Los biosólidos son usados ampliamente como una fuente barata de nutrientes en la agricultura, y además poseen otras cualidades que mejoran la fertilidad de los suelos, incrementando los rendimientos de los cultivos y por lo tanto generando ganancias económicas a los productores (O' Connor *et al.* 2005).

Entre los beneficios del uso agrícola de los biosólidos se encuentra el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas del suelo. Como mejoradores de suelos, los biosólidos reducen la densidad del suelo incrementando la porosidad, mejorando la estabilidad estructural y enriqueciendo el suelo con carbón orgánico (McBride 2003). Estos cambios resultan generalmente en incrementar la capacidad de retención de agua, sobre todo en suelos de textura gruesa, y a largo plazo mejoran la de transmisión de agua y la resistencia a la erosión del suelo (Samaras *et al.* 2008).

Los biosólidos tienen un alto contenido de materia orgánica y también contienen apreciables cantidades de N y P, aunque generalmente bajo contenido de K. Las cantidades de nutrientes solubles son inicialmente pequeñas y la toma de nutrientes por la planta debe esperar la mineralización de los constituyentes orgánicos de los biosólidos (Petersen *et al.* 2003). Esto ocasiona una disponibilidad de nutrientes a mediano y largo plazo.

Sin embargo, entre las principales restricciones para el uso agrícola de los biosólidos se encuentran, el contenido de metales pesados y la posible presencia de microorganismos patógenos. Los biosólidos normalmente contienen metales pesados, los cuales una vez en el suelo pueden ser tóxicos para las plantas, animales o humanos, debido a la transferencia y bioacumulación a través de las

redes tróficas. El riesgo depende de la concentración presente en el suelo, en los biosólidos, así como de su disponibilidad y movilidad (Castro *et al.* 2009).

Existen numerosos estudios científicos que han generado un gran cuerpo de información sobre los efectos ambientales y los beneficios asociados con la aplicación de biosólidos a suelos agrícolas (Bastian 2005). La mayoría de esa investigación ha sido realizada a nivel laboratorio o a escala en invernaderos, donde las condiciones ambientales son controladas. En tales estudios la recolección de datos es facilitada porque los experimentos no están sujetos a la incertidumbre asociada con el clima y otros factores sobre los cuales existe muy poco o ningún control (O'Connor *et al.* 2005).

Sin embargo, los resultados obtenidos en laboratorios o invernaderos frecuentemente no se extrapolan a las condiciones de campo. Los experimentos de corto plazo en invernaderos frecuentemente no son válidos para evaluar la transferencia de elementos traza del suelo a la planta en condiciones de campo (Bastian 2005). Existe por lo tanto la necesidad de realizar estudios a escala de campo en los sitios en donde se aplican los biosólidos. Los estudios de largo y mediano plazo son particularmente valiosos para documentar la sustentabilidad de esta práctica y para proveer información sobre los efectos ambientales con el transcurso del tiempo (O'Connor *et al.* 2005).

La ciudad de Puebla (19° 02' 37" N, 98° 11' 53" O), capital del estado del mismo nombre y ubicada en la región central de México, cuenta con una población de dos millones de habitantes y genera anualmente una cantidad aproximada de 80,000 m³ de lodos residuales en sus cinco plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos lodos residuales son estabilizados por medio de una digestión anaerobia mesofílica, con lo cual se eliminan una gran cantidad de microorganismos patógenos (Pepper *et al.* 2006) y posteriormente deshidratados para darles la calidad adecuada para ser empleados en suelos agrícolas (SEMARNAT 2002).

Desde el año 2003, estos biosólidos son empleados como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas de comunidades rurales ubicadas al sur de la ciudad de Puebla.

Estos suelos son pobres en materia orgánica, presentan baja fertilidad y bajos rendimientos.

Los objetivos de este trabajo fueron: evaluar en condiciones de campo y en cultivos de maíz, el impacto que la adición de biosólidos produce en las propiedades químicas que determinan la fertilidad del suelo, en el mediano plazo (seis años). Y determinar la evolución del contenido de metales pesados disponibles para la planta extraíbles con ácido dietilén-triamino-pentaacético (DTPA) en el suelo en el mismo periodo de seis años, así como detectar la presencia de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en las diferentes partes de la planta de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio fue la localidad de La Paz Tlaxcolpan ($18^{\circ} 54' 21''$ N, $98^{\circ} 13' 16''$ O), que se encuentra ubicada 15 km al sur de la ciudad de Puebla. En los suelos agrícolas de esta comunidad rural se han aplicado biosólidos desde el año 2003, exclusivamente en cultivos de maíz y con una dosis de 400 tha^{-1} . Para el muestreo de suelo se eligieron seis parcelas en las cuales se hizo una sola aplicación de biosólidos, en años sucesivos del 2003 al 2008. El muestreo se realizó en el mes de junio de 2009. Por consiguiente la antigüedad de aplicación fue de seis, cinco, cuatro, tres, dos y un año respectivamente para cada parcela. También se muestreo una parcela testigo sin adición de biosólidos.

Se empleó el método de zigzag para el muestreo de suelo y en cada parcela se tomaron diez submuestras a una profundidad de 30 cm. Las muestras se homogeneizaron y se utilizó el método del cuarteo para obtener siete muestras compuestas, cada una de 1.5 kg aproximadamente. Las muestras se colocaron en bolsas de polietileno para su traslado al laboratorio, en donde fueron secadas al aire a temperatura ambiente, molidas, tamizadas en una malla no.10 de acero inoxidable y finalmente almacenadas en recipientes de polietileno para su posterior análisis (SEMARNAT 2000).

En las muestras de suelo se determinaron los siguientes parámetros de fertilidad: pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad

eléctrica (CE), nitrógeno total (Nt), Nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), P total y cationes intercambiables (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y Na^+). Los procedimientos químicos analíticos utilizados fueron los establecidos en la norma correspondiente para estudios de fertilidad de suelos en México (SEMARNAT 2000). Para la determinación del contenido de metales pesados extraíbles en las muestras de suelo, se empleó el método propuesto por Lindsay y Norvell (1978), utilizando como solución extractante (0.005 M) una mezcla de ácido dietilen-triamino-pentaacético (DTPA), cloruro de calcio (CaCl_2) y trietanolamina (TEA). La solución se llevó a $\text{pH} = 7.3$. 10 g de muestra de suelo fueron colocados en 20 mL de solución extractante, la cual se puso en agitación durante dos horas. La solución resultante fue filtrada a través de papel filtro Whatman No. 42, envasada en recipientes de polietileno y puesta en refrigeración a 4°C hasta su análisis por ICP-AES.

El muestreo de la planta de maíz se realizó en las mismas parcelas elegidas para el muestreo de suelo. La época de muestreo fue a la aparición del elote. Se recolectaron tres plantas por parcela y con ellas se conformó una muestra compuesta por cada parcela, siete en total. Las plantas fueron lavadas con agua destilada, seccionadas en cinco partes: raíz, tallo, hojas, hoja del elote y grano, las cuales fueron colocadas en bolsas de papel y secadas en una estufa con aire forzado a una temperatura de 75°C durante 24 horas. Las muestras fueron molidas en un molino de cuchillas de acero inoxidable (Foss Cyclotec 1093) y pasadas por un tamiz 0.5 mm. Las muestras fueron llevadas hasta peso constante para proceder a su análisis. Se empleó el método de digestión húmeda para análisis de muestras de tejido vegetal propuesto por López-Ritas y López-Mélida (1978). Para cuantificar la concentración de metales en todos los extractos obtenidos, tanto de muestras de suelo como de tejido vegetal, se utilizó un equipo (Varian Liberty Series II) de espectroscopia de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Las condiciones de operación se muestran en el **Cuadro 4.1**. Todos los reactivos utilizados para el análisis químico de las muestras de suelo y tejido vegetal fueron grado analítico (marca Merck) y se usó agua tridestilada en todos los procedimientos.

Para el análisis de los datos se empleó el programa estadístico SPSS 15.0. Se realizó un análisis de correlación bivariada de Pearson (nivel de significancia de 0.01 y 0.05) entre todos los parámetros agronómicos, entre los parámetros agronómicos y los metales extraíbles con DTPA y entre Cd, Cu, Ni, Pb y Zn extraíbles con DTPA y el contenido de estos metales en las diferentes partes de la planta de maíz.

Cuadro 4.1. Condiciones de operación del equipo de ICP-AES.

Elemento	Longitud de onda (nm)	Límite de detección (mg L ⁻¹)
Cd	226.502	0.05
Cu	327.396	0.03
Ni	231.604	0.01
Pb	220.353	0.20
Zn	206.200	0.01
Fe	259.940	0.02
Mn	257.610	0.002
Potencia generador de radio frecuencia (kw)		1.1
Frecuencia del generador (MHz)		40.0
Velocidad de flujo gas enfriante (L m ⁻¹)		16.5
Velocidad de flujo gas auxiliar (L m ⁻¹)		2.25
Velocidad de flujo gas nebulizador (L m ⁻¹)		1.5

RESULTADOS

Caracterización de las muestras de suelo

La **Figura 4.1** muestra los resultados encontrados para el pH, el contenido MO (%), CIC y N-NO₃⁻. El pH presentó su valor más alto al año de adicionados los biosólidos. Los tres parámetros restantes presentan sus valores más altos en el segundo año después de la aplicación de biosólidos y los valores más bajos en el cuarto año posterior a la adición de biosólidos.

Los valores encontrados para otros parámetros agronómicos importantes para evaluar la fertilidad de los suelos se muestran en el **Cuadro 4.2**. Estos parámetros tuvieron el mismo comportamiento que los mostrados en la **Figura 4.1**, su valor más alto está en el segundo año después de la aplicación de biosólidos, después de lo

cual comienza una disminución en el contenido. Los valores más bajos se obtuvieron en el testigo y entre el cuarto y sexto años después de la aplicación de biosólidos, con la excepción del P y el K intercambiable que tuvieron su valor más bajo en el testigo y en el primer año después de la adición de biosólidos al suelo.

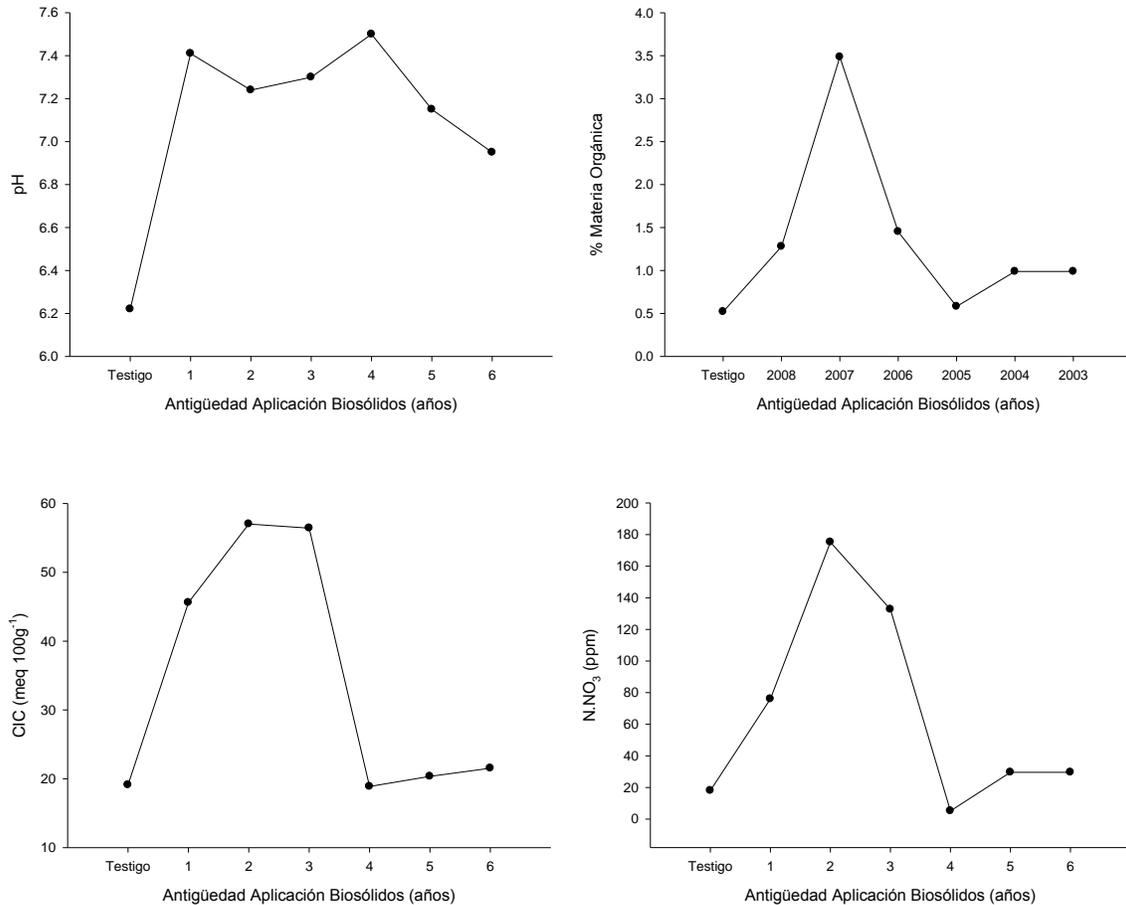


Figura 4.1. Variación temporal del pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y nitrógeno de nitratos en el suelo después de la aplicación de biosólidos.

Cuadro 4.2. Parámetros agronómicos de suelos enmendados con biosólidos y su variación con la antigüedad de aplicación.

Antigüedad aplicación biosólidos (años)	Parámetros							
	CE (ds m ⁻¹)	N-NH ₄ ⁺ (ppm)	Nt (%)	P (ppm)	K int (cmol _c kg ⁻¹)	Ca int (cmol _c kg ⁻¹)	Mg int (cmol _c kg ⁻¹)	Na int (cmol _c kg ⁻¹)
Testigo	0.41	10.3	0.01	17.48	0.26	12.30	5.40	0.31
1	2.93	15.27	0.04	68.00	0.19	41.90	7.10	0.35
2	4.36	16.74	0.12	195.50	0.37	46.30	10.50	0.52
3	2.92	14.16	0.06	136.00	0.26	46.30	7.50	0.33
4	0.48	10.94	0.02	59.50	0.35	25.30	7.40	0.27
5	1.57	4.5	0.03	72.25	0.39	28.40	8.80	0.37
6	0.85	9.1	0.03	88.22	0.46	20.20	5.50	0.29

La matriz de correlación de Pearson, obtenida para los parámetros agronómicos se muestra en el **Cuadro 4.3**. La CE presentó una correlación muy alta y positiva con la MO, la CIC, el Nt, el Ca intercambiable y el N-NO₃⁻ (significativas al nivel 0.01). La MO presentó correlaciones muy altas y positivas con el Nt (significativa al nivel 0.05), y con el Ca intercambiable y el N-NO₃⁻ (significativas al nivel 0.01). El Nt mostró una correlación muy alta y positiva con el N-NO₃⁻ (significativa al nivel 0.01).

Las concentraciones obtenidas de metales pesados extraíbles con DTPA y su variación respecto a la antigüedad de aplicación de biosólidos, se muestran en la **Figura 4.2**. El cadmio no fue detectado en ninguna muestra. Cobre, cinc, fierro y níquel tuvieron el valor más alto en el segundo año después de la aplicación. Esta tendencia es similar a la presentada por los parámetros agronómicos. El plomo tuvo su concentración más alta al tercer año y para el manganeso el valor más alto fue encontrado en el testigo. Los valores más bajos para todos los metales extraídos se

presentaron en el testigo y en cuarto año después de la aplicación de biosólidos al suelo, con excepción del manganeso que lo presentó en el cuarto año.

Cuadro 4.3. Matriz de correlación de Pearson para los parámetros agronómicos.

	pH	CE	MO	CIC	Nt	P	K	Ca	Mg	Na	N-NO ₃	N-NH ₄ ⁺
pH	1	.450	.290	.419	.359	.148	.017	.704	.526	.153	.318	.302
CE	.450	1	.890(**)	.936(**)	.905(**)	.266	-.236	.934(**)	.729	.834(*)	.950(**)	.711
MO	.290	.890(**)	1	.768(*)	.990(**)	.445	.101	.735	.782(*)	.938(**)	.899(**)	.632
CIC	.419	.936(**)	.768(*)	1	.802(*)	.243	-.402	.919(**)	.532	.636	.956(**)	.826(*)
Nt	.359	.905(**)	.990(**)	.802(*)	1	.420	.089	.784(*)	.825(*)	.918(**)	.924(**)	.625
P	.148	.266	.445	.243	.420	1	.640	.184	.074	.228	.355	.139
K	.017	-.236	.101	-.402	.089	.640	1	-.295	.156	.067	-.190	-.513
Ca	.704	.934(**)	.735	.919(**)	.784(*)	.184	-.295	1	.703	.635	.861(*)	.686
Mg	.526	.729	.782(*)	.532	.825(*)	.074	.156	.703	1	.836(*)	.653	.269
Na	.153	.834(*)	.938(**)	.636	.918(**)	.228	.067	.635	.836(*)	1	.790(*)	.452
N-NO ₃	.318	.950(**)	.899(**)	.956(**)	.924(**)	.355	-.190	.861(*)	.653	.790(*)	1	.751
N-NH ₄ ⁺	.302	.711	.632	.826(*)	.625	.139	-.513	.686	.269	.452	.751	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

En el **Cuadro 4.4** se muestra la matriz de correlación de Pearson que se obtuvo para los parámetros agronómicos y las concentraciones obtenidas de metales pesados extraíbles con DTPA en las muestras de suelo. La CE presentó correlaciones muy altas y positivas (significativas al nivel 0.01) con todos los metales extraíbles con DTPA, con la excepción del Mn. Para la MO se encontraron correlaciones muy altas y positivas con el Cu, el Zn y el Fe (significativas al nivel 0.01) y con el Ni (significativa al nivel 0.05). La CIC mostró correlaciones muy altas y positivas con el Cu, el Zn y el Fe (significativas al nivel 0.05) y con el Pb y el Zn (significativas al nivel 0.01). El Ca y el Na intercambiables tuvieron correlaciones muy altas y positivas con el Cu, el Zn y el Fe (significativas al nivel 0.05).

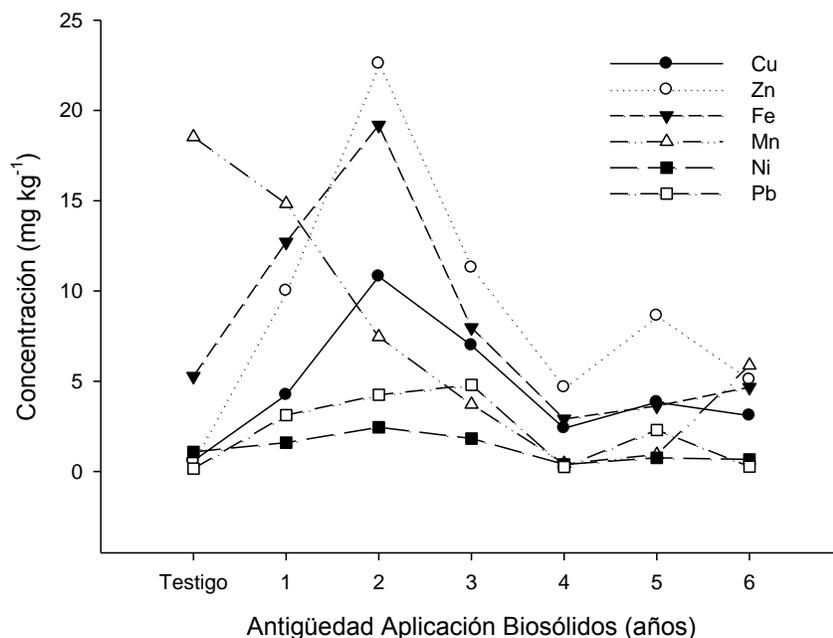


Figura 4.2. Metales pesados extraíbles con DTPA y su variación con la antigüedad de aplicación de biosólidos al suelo.

Cuadro 4.4. Matriz de correlación de Pearson para los parámetros agronómicos y los metales pesados extraíbles con DTPA.

	pH	CE	MO	CIC	Nt	P	K	Ca	Mg	Na	N-NO ₃	N-NH ₄ ⁺
Cu	.468	.929(**)	.948(**)	.861(*)	.979(**)	.448	.060	.862(*)	.811(*)	.846(*)	.950(**)	.620
Zn	.491	.942(**)	.965(**)	.815(*)	.980(**)	.376	.052	.862(*)	.868(*)	.908(**)	.906(**)	.598
Fe	.239	.907(**)	.906(**)	.825(*)	.870(*)	.248	-.253	.755(*)	.602	.859(*)	.864(*)	.812(*)
Mn	-.623	.017	-.043	.068	-.139	-.284	-.599	-.185	-.426	.044	.005	.334
Ni	.136	.926(**)	.852(*)	.929(**)	.851(*)	.185	-.379	.784(*)	.556	.800(*)	.954(**)	.793(*)
Pb	.470	.921(**)	.703	.927(**)	.762(*)	.130	-.336	.932(**)	.664	.653	.898(**)	.575

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en las muestras de tejido vegetal

El Cuadro 4.5 muestra los resultados encontrados para el contenido de metales pesados en las muestras de tejido vegetal. El cadmio y el plomo no fueron detectados en ninguna muestra. El níquel únicamente se encontró en la raíz y sus valores más altos se determinaron en el testigo y en el cuarto y quinto año después de la aplicación de biosólidos. Cobre y cinc estuvieron presentes en todas las partes de la planta y presentaron un comportamiento similar.

Cuadro 4.5. Concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en las diferentes partes de la planta de maíz (mgkg⁻¹).

Antigüedad aplicación biosólidos (años)	Parte de la planta										
	Raíz			Tallo		Hoja		Hoja del elote		Grano	
	Metales [†] (mg kg ⁻¹)										
	Cu	Ni	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
Testigo	2.72	50.78	22.63	0.94	5.36	ND	25.72	5.04	21.29	3.17	28.32
1	9.90	26.61	46.50	ND [‡]	9.28	12.26	61.95	2.19	27.04	3.62	37.35
2	15.60	16.11	57.14	4.67	39.08	10.41	123.22	5.03	52.69	5.48	77.52
3	13.54	8.86	49.70	3.61	25.26	14.54	86.01	1.65	33.89	1.93	33.92
4	13.21	32.80	39.30	1.23	16.74	1.23	16.74	2.94	23.90	5.45	159.63
5	8.55	3.69	29.28	ND	13.82	11.06	81.16	2.09	47.10	2.58	36.88
6	14.37	33.76	22.31	ND	14.97	8.91	54.60	1.18	21.11	1.34	11.34

[†] Cd y Pb no fueron detectados en ninguna muestra

[‡] ND; no detectado, abajo del límite de detección

Las concentraciones más altas de cobre se encontraron en el segundo año después de la aplicación de biosólidos en raíz, tallo, hoja de elote y grano. Para la hoja, su valor más alto se presentó en el tercer año después de la adición de biosólidos. El cinc tuvo sus valores más altos para todas las partes de la planta en el segundo año después de la aplicación de biosólidos al suelo, con excepción del grano, en donde su valor más alto se presentó al cuarto año de la aplicación de biosólidos.

En el **Cuadro 4.6** se muestran las correlaciones encontradas entre Cu y Zn extraíbles con DTPA y las concentraciones obtenidas de estos metales en las diferentes partes de la planta de maíz. El Ni no presentó ninguna correlación. El Cu extraíble mostró una muy alta y positiva correlación (significativa al nivel 0.05) con la concentración de Cu encontrada en el tallo de la planta. El Zn extraíble presentó correlaciones muy altas y positivas con las concentraciones de Zn encontradas en la raíz, la hoja del elote (significativas al nivel 0.05), el tallo y la hoja (significativas al nivel 0.01).

Cuadro 4.6. Matriz de correlación de Pearson para Cu, Ni y Zn extraíbles con DTPA y su contenido en la planta.

Metales en la planta	Metales extraíbles con DTPA		
	Cu	Zn	Ni
Raíz			
Cu	.667	.612	.271
Ni	-.643	-.630	-.348
Zn	.837(*)	.834(*)	.784(*)
Tallo			
Cu	.820(*)	.733	.767(*)
Zn	.933(**)	.884(**)	.674
Hoja			
Cu	.645	.615	.542
Zn	.916(**)	.912(**)	.786(*)
Hoja del elote			
Cu	.157	.214	.374
Zn	.775(*)	.821(*)	.566
Grano			
Cu	.288	.388	.225
Zn	.051	.089	-.192

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, las propiedades del suelo que determinan su fertilidad, se ven afectadas por la adición de biosólidos. Todos los parámetros determinados, tanto propiedades del suelo (**Figura 4.1** y **Cuadro 4.2**) como micronutrientes disponibles (**Figura 4.2**), tienen un comportamiento particular con el transcurso del tiempo en el periodo de estudio (seis años). Muestran un aumento en los primeros años después de la adición de los biosólidos, alcanzan un valor máximo en los siguientes dos o tres años después de la aplicación y comienzan a decrecer al cuarto, quinto o sexto años posteriores a la aplicación.

En la **Figura 4.1** se observa que, tomando como referencia el testigo, el pH cambia en el primer año posterior a la aplicación de biosólidos, de ligeramente ácido a ligeramente alcalino, manteniéndose por arriba del valor de 7 hasta el quinto año después de la aplicación de biosólidos y finalmente descendiendo al sexto año. Castro *et al.* (2009) y Kidd *et al.* (2007), reportan la misma tendencia del pH a incrementar y mantenerse ligeramente alcalino después de la adición de biosólidos al suelo en periodos de estudio de 3 y 10 años respectivamente. Esta variación ascendente del pH con la antigüedad de aplicación de biosólidos está relacionada con la cantidad de Ca intercambiable que se encuentra presente en los biosólidos (Navarro y Navarro 2003, O'Connor *et al.* 2005) y que muestra el mismo comportamiento a través del tiempo. A pesar de ser un factor determinante en el comportamiento de los demás parámetros agronómicos, el pH no muestra correlación significativa con ninguno, de acuerdo con lo observado en el **Cuadro 4.3**.

El contenido de MO, la CIC, el N-NO₃ y la CE muestran una tendencia similar. A partir del testigo, sus valores se incrementan después de un año de agregados los biosólidos y alcanzan sus valores máximos dos años después de la aplicación de la aplicación. A partir de ese momento empieza un decrecimiento en estos valores, que al cuarto año tienen los valores más bajos, alcanzando los niveles del testigo.

Los resultados sugieren que este comportamiento está determinado por el tipo y cantidad de MO aportada por los biosólidos al suelo. De acuerdo con Merrington *et al.* (2003), al llegar los biosólidos al suelo las formas más fácilmente degradables de la

materia orgánica comienzan a descomponerse y este proceso se lleva a cabo en un periodo que va de algunas semanas hasta un año y después de lo cual queda la materia orgánica de más lenta degradación. Después de la adición de biosólidos al suelo, la MO pasa de un nivel muy bajo con un 0.5% (testigo) a un nivel bajo con 1.25% (un año después de la aplicación), alcanza su máximo porcentaje en el suelo, nivel medio, con dos años de antigüedad de aplicación (3.5%) y después de tres años de aplicados los biosólidos cae su porcentaje a un nivel bajo con 1.40, para llegar al nivel muy bajo del testigo, cuatro años después de la aplicación de los biosólidos (SEMARNAT 2000).

La materia orgánica se caracteriza por tener una elevada CIC (Porta *et al.* 2003) y cuando presenta su máximo porcentaje, después de dos años de la aplicación de biosólidos, la CIC presenta también su nivel más alto, lo cual se refleja en la elevada correlación que existente entre ambos parámetros (**Cuadro 4.3**). El incremento temporal de la CIC también se ve favorecida por el incremento temporal del pH (Labrador 2001).

El comportamiento del N-NO_3^- corresponde con el proceso de degradación de la materia orgánica en el suelo y con el proceso de mineralización del nitrógeno orgánico, llevados a cabo por los microorganismos del suelo, cuya actividad se ve favorecida por el pH alcalino (Nouri *et al.* 2001). Por lo tanto en los suelos con dos y tres años de antigüedad de aplicación del biosólidos la disponibilidad del N-NO_3^- es alta, una vez que la MO está en el punto más alto de su descomposición.

Esta gran concentración del N-NO_3^- influye en el comportamiento de la CE de acuerdo con Etchevers y Padilla (2007), en consecuencia los dos parámetros presenta una variación similar al transcurrir el tiempo y la correlación entre estos dos parámetros es muy alta (**Cuadro 4.3**). El aumento de la CE está en un rango que va de: “efectos despreciables de salinidad” (en el testigo) hasta “suelo salino” (suelo con dos años de antigüedad de aplicación de biosólidos), de acuerdo con la normatividad mexicana correspondiente (SEMARNAT 2000). Este aumento en la CE y el consiguiente aumento de la salinidad, después de la aplicación de biosólidos al suelo también fue reportado por Bañuelos *et al.* (2007) y Schroder *et al.* (2008). Resultados

similares en cuanto a las tendencias ascendentes con el tiempo de parámetros como la MO, CE, CIC y Nt, después de la adición de biosólidos han sido reportados en estudios a mediano plazo de aplicación de biosólidos en invernadero en un periodo de tres años (De lasHeras *et al.* 2005).

La **Figura 4.2** muestra las concentraciones obtenidas y el comportamiento de los metales extraíbles con DPTA en función de la antigüedad de aplicación de biosólidos al suelo. Tomando como referencia al testigo, el incremento en la disponibilidad de los metales extraídos después de la aplicación de biosólidos es muy evidente. Zn, Fe y Cu (micronutrientes esenciales) muestran una tendencia ascendente en el suelo con un año de antigüedad de aplicación y alcanzan su máxima disponibilidad en el suelo con dos años de antigüedad de aplicación de biosólidos (Kidd *et al.* 2007). El Mn muestra una tendencia diferente a los tres metales anteriores. Sus valores más altos los presenta en el testigo y después de un año de la adición de los biosólidos y van disminuyendo gradualmente al transcurrir el tiempo hasta llegar a su valor más bajo en el suelo con cuatro años de antigüedad de aplicación.

Para los cuatro micronutrientes esenciales (Cu, Zn, Fe y Mn), las concentraciones encontradas en los suelos durante todo el periodo de estudio, son adecuadas para el desarrollo de la planta (SEMARNAT 2000). El Pb tiene su máxima concentración disponible después de tres años de aplicados los biosólidos y el Ni después de dos años. A partir de estos puntos sus concentraciones disponibles comienzan a disminuir. Sin embargo sus valores más altos no alcanzan los 10 mgkg^{-1} . Los valores sugeridos como normales en suelos para estos dos elementos por la normatividad mexicana son 35 y 50 mgkg^{-1} respectivamente (SEMARNAT 2000).

La variación temporal de los metales extraíbles con DTPA presenta el mismo patrón de comportamiento que los parámetros agronómicos en cuanto a su incremento con el tiempo y a tener su valor más alto en el segundo año después de la aplicación (Cu, Fe, Zn y Ni) o al tercer año de la adición de biosólidos (Pb). La tendencia encontrada en los metales extraíbles con DTPA es consistente con los resultados obtenidos por Sukkariyah *et al.* (2005) para Cu y Zn. Esto indica la influencia que los parámetros agronómicos tienen sobre la disponibilidad de los metales pesados en suelos

enmendados con biosólidos (O'Connor *et al.* 2005). De acuerdo a los resultados mostrados en el **Cuadro 4.3**, no existe una correlación significativa entre el pH y el contenido de metales disponibles en el suelo, lo cual también fue reportado por Dragović *et al.* (2008).

La afinidad del Cu, Fe, Zn y Pb con la MO ha sido ampliamente documentada (Kabata-Pendias y Pendias 2001, Basta *et al.* 2005) y con el proceso de descomposición que sufre la MO estos elementos tienen mayor disponibilidad al transcurrir el tiempo (correlación positiva muy alta entre estos elementos y la MO). Sin embargo el pH ligeramente alcalino que predomina durante el periodo de estudio, es un factor determinante que reduce considerablemente la disponibilidad de los metales pesados en los suelos enmendados (Porta *et al.* 2003). Se reduce la disponibilidad de Cu, Fe, Zn, Pb y Ni al transcurrir el tiempo. El elemento más afectado por el incremento del pH es el Mn. Al incrementarse el pH gradualmente con el tiempo, su disponibilidad decrece de igual modo, durante el periodo de estudio, hasta llegar a su valor más bajo (0.43 mgkg^{-1}) al cuarto año después de la aplicación de biosólidos al suelo. No existe correlación significativa entre pH y Mn disponible. La disminución de la disponibilidad de Pb y Ni es favorable en los cultivos porque reduce el riesgo de su ingreso a las redes tróficas (Basta *et al.* 2005).

A pesar de que Cu, Zn, Pb y Ni están disponibles en el suelo de acuerdo a los resultados mostrados en la **Figura 4.2**, únicamente el Cu y el Zn están presentes en todas las partes de la planta y el níquel se detectó solamente en la raíz. La presencia de Cu y Zn en el tejido vegetal muestra el mismo patrón de variación con respecto a la antigüedad de aplicación de los biosólidos al suelo que se encontró para los parámetros agronómicos y las concentraciones de metales extraíbles con DTPA. La mayor presencia de estos dos elementos se da en todas las partes de la planta en el suelo con dos años de antigüedad de la adición de biosólidos. El níquel muestra su mayor concentración en la raíz, en el testigo y en el suelo con cuatro años de antigüedad de aplicación. Las concentraciones más altas de Zn se encontraron en la hoja y en el grano y las de Cu en la raíz y en la hoja (Castro *et al.* 2009). La diferencia en la movilidad de estos elementos en la planta explicaría esta situación, debido a

que el Cu es un elemento inmóvil y el Zn un elemento móvil y se trasloca con mayor facilidad de la raíz a las partes aéreas de la planta (Baker 1990, Alcántar *et al.* 2007). La ausencia de Pb en toda la planta y del Ni en las partes altas de la misma, a pesar de estar disponibles en el suelo enmendado con biosólidos, sugiere la eficacia de la barrera suelo-planta, la cual limita la absorción de elementos traza como el Pb, Cr, Hg, Cu, Ni, Zn, Cd, Mo y Ti dependiendo de la especie vegetal en estudio (McBride 2003, Basta *et al.* 2005).

Las concentraciones de Cu y Zn encontradas en todas las partes de la planta de maíz son normales o suficientes y la de níquel en la raíz es excesiva o tóxica de acuerdo a Kabata-Pendias y Mukherjee (2007). La concentración de Zn extraíble con DTPA muestra una correlación alta con la concentración de Zn encontrada en la planta de maíz (en raíz, tallo, hoja, y hoja del elote). En el caso del Cu esta correlación alta solamente se da en la raíz de la planta. Con respecto al grano de maíz no hubo correlaciones significativas entre contenido extraíble y concentración en la planta para ningún metal.

CONCLUSIONES

Las propiedades químicas del suelo que determinan su fertilidad son afectadas positivamente después de la adición de biosólidos en el mediano plazo (seis años). Incrementan sus valores mejorando la fertilidad de los suelos estudiados. Ese efecto positivo ocurre en los primeros cuatro años después de la incorporación de biosólidos al suelo y principalmente se da en el segundo año después de la adición.

La disponibilidad de metales pesados (incluyendo los micronutrientes esenciales Cu, Zn, Fe y Mn) también aumenta con la adición de biosólidos al suelo. Los micronutrientes mantienen valores adecuados en los suelo durante el periodo de estudio y tienen sus valores más altos en el segundo año después de la aplicación. Pb y Ni aumentan su disponibilidad siguiendo la misma tendencia que los micronutrientes esenciales, pero sus valores más altos no representan riesgo de acuerdo a los valores establecidos en la norma oficial mexicana respectiva.

Las concentraciones de metales pesados encontrados en las diferentes partes de la planta de maíz (Cu y Zn únicamente) aumentan con la adición de biosólidos al suelo, pero no representan riesgo de Fitotoxicidad para la planta y presentan la misma tendencia en su variación temporal que las propiedades químicas del suelo y los metales pesados disponibles.

La aplicación de biosólidos como enmiendas agrícolas en los suelos de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan en el periodo de estudio (seis años) aumenta sus condiciones de fertilidad principalmente en los primeros cuatro años después de la aplicación y no presenta riesgos de incorporación de metales pesados a los cultivos de maíz.

LITERATURA CITADA

- Alcántar G., Trejo-Téllez L., Fernández L. y Rodríguez M. N. (2007). Elementos esenciales. En: Nutrición de cultivos (G. Alcántar y L. I. Trejo-Téllez, Ed.). Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa, México D. F., pp. 7-47.
- Alves M. C., Paz G. A., Colodro G., Perecin J. H. y Vidal V. E. (2006). Influence of biosolids rate on chemical properties of an oxisol in Sao Paulo, Brazil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37, 2481-2493.
- Baker D. E. (1990). Copper. En: Heavy metals in soils (B. J. Alloway, Ed.). Blackie and Son, Glasgow, Scotland, pp. 151-176.
- Bañuelos G. S., Pasakdee S., Benes S. H. y Ledbetter C. A. (2007). Long-term application of biosolids on apricot production. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 38, 1533-1549.
- Basta N. T., Ryan J.A. y Chaney R. L. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34, 49-63.
- Bastian R. K. (2005). Interpreting science in the real world for sustainable land application. *J. Environ. Qual.* 34, 49-63.
- Castro E., Mañas P. y De las Heras J. (2009). A comparison of the application of different waste products to a lettuce crop: effects on plant and soil properties. *Sci. Hortic.* 123, 148-155.

- De las Heras J., Mañas P. y Labrador J. (2005). Effects of several applications of digested sewage sludge on soil and plants. *J. Environ. Sci. Health, Part A.* 40, 437-451.
- Dragović S., Mihailović N. y Gajić B. (2008). Heavy metals in soils: distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assesment of contamination sources. *Chemosphere.* 72, 491-495.
- Etchevers B. J. D. y Padilla C. J. (2007). Diagnóstico de la fertilidad del suelo. En: *Nutrición de cultivos* (G. Alcántar y L. I. Trejo-Téllez, Ed.). Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa, México D. F., pp. 249-272.
- Gavalda D., Scheiner J. D., Revel J. S., Merlina G., Kaemmerer M., Pinnelli E. y Giresse M. (2005). Agronomic and environmental impacts of a single application of heat-dried sludge on an Alfisol. *Sci. Total Environ.* 343, 97-109.
- Kabata-Pendias A. y Pendias H. (2001). *Trace elements y soil and plants*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 413 pp.
- Kabata-Pendias A. y Mukherjee A. B. (2007). *Trace elements from soil to human*. Springer, Berlin, Alemania, 550 pp
- Kidd P. S., Domínguez-Rodríguez M. J., Díez J. y Monterroso C. (2007). Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. *Chemosphere*, 66, 1458-1467.
- Labrador J. (2001). *La materia orgánica en los agrosistemas*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 293 pp.
- Lindsay W. L. y Norvell W. A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and Cooper. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 42, 421-428.
- López-Ritas J. y López-Mélida J. (1978). *El diagnóstico de suelos y plantas*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 336 pp.
- McBride M.B. (2003). Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks? *Adv. Environ. Res.* 8, 5-19.

- Merrington G., Oliver I., Smernik R. J. y McLaughlin M. J. (2003). The influence of sewage sludge properties on sludge-borne metal availability. *Adv. Environ. Res.* 8, 21-36.
- Navarro B. S. y Navarro G. G. (2003). *Química agrícola*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 487 pp.
- Nouri J., Alloway B. J. y Peterson P. J. (2001). Study of the mobility of heavy metals in soil amended with sewage sludge. *Pak. J. Biol. Sci.* 4, 1285-1287.
- O'Connor G. A., Elliot H. A., Basta N. T., Bastian R. K., Pierzynski G. M., Sims R. C. y Smith Jr. J. E. (2005). Sustainable land application: An overview. *J. Environ. Qual.* 34, 7-17.
- Pepper I. L, Brooks J. P y Gerba C. P. (2006). Pathogens in biosolids. *Adv. Agron.* 90, 1-41.
- Petersen S. O., Petersen J. y Rubaek G. H. (2003). Dynamics and plant uptake of nitrogen and phosphorus in soil amended with sewage sludge. *Appl. Soil Ecol.* 24, 187-195.
- Porta J., López-Acevedo M. y Roquero C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 929 pp.
- Samaras V., Tsadilas C. D. y Stamatidis S. (2008). Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield and nitrate leaching. *Agron. J.* 100, 477-483.
- Schroeder J. L., Zhou D., Basta N., Raun W. L., Payton M. E. y Zazulak A. (2008). The effect of long-term annual application of biosolids on soil properties, phosphorus and metals. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 73-82.
- SEMARNAT (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 31 de Diciembre de 2002.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. 15 de Agosto de 2003.

Sukkariyah B. F., Evanylo G., Zelazny L. y Chaney R. L. (2005). Cadmium, copper, nyckel and zinc availability in a biosolids-amended piedmont soil years after application. *J. Environ Qual.* 34, 2255-2262.

USEPA (1996). Method 3050B Acid digestion of sediments, sludges and soils, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846). Office of Solid Waste. United States Environmental Protection Agency. Manual. Washington, DC. 12 pp.

CAPÍTULO V. EL USO DE BIOSÓLIDOS COMO MEJORADORES DE SUELOS AGRÍCOLAS Y SUS EFECTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES EN LA COMUNIDAD DE LA PAZ TLAXCOLPAN, PUEBLA

RESUMEN

La problemática ambiental originada por la generación de todo tipo de desechos (sólidos, líquidos, emisiones a la atmósfera) es una manifestación de la compleja relación que existe entre los seres humanos (agrupados en sociedad) y la naturaleza. La naturaleza es la fuente de los recursos necesarios que la sociedad extrae de ella para poder reproducir las condiciones indispensables para su existencia. Sin embargo, también es el depósito de todos los desechos generados por la sociedad y este flujo de materiales residuales se realiza sin considerar la capacidad de absorción de la naturaleza. De manera análoga con la noción biológica de metabolismo, el concepto de metabolismo social es utilizado en el estudio de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza y describe y cuantifica los flujos de materia y energía que se intercambian entre grupos sociales y los ecosistemas. Dentro de las dimensiones del metabolismo social, se encuentra el metabolismo urbano, que es el que produce mayor generación de residuos junto con el metabolismo industrial, a diferencia del metabolismo rural. Los residuos sólidos conocidos como “biosólidos” son un producto generado a partir del tratamiento de las aguas residuales urbanas y su generación y disposición final se han convertido en un problema que las grandes urbes deben solucionar. Una opción para darles un destino final a los biosólidos es utilizarlos como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas, debido a su naturaleza orgánica y a su contenido de nutrientes. En la ciudad de Puebla de Zaragoza, México, se generan anualmente 80,000 m³ de estos residuos y se les está utilizando como mejoradores de suelos agrícolas en las comunidades rurales ubicadas al sur de la ciudad, desde el año 2003. Los efectos que estos residuos pueden ocasionar en los suelos y el ambiente en general han sido muy estudiados desde diferentes enfoques. Pero los efectos económicos y sociales que se pueden ocasionar en las comunidades, en los productores y sus familias, es un campo de estudio prácticamente inexplorado. Se realizó una encuesta entre los productores de la localidad de La Paz Tlaxcolpan, Puebla, que están utilizando biosólidos en sus parcelas. El objetivo de este estudio

fue evaluar la magnitud de los beneficios económicos y sociales que los productores obtienen al utilizar biosólidos como enmiendas orgánicas en sus parcelas. Existe un incremento en los rendimientos en un rango de 25% a 100%, pero los beneficios económicos y sociales son mínimos.

ABSTRACT

The environmental problems caused by the massive output of all types of waste (solid, liquid, air emissions) is a manifestation of the complex relationship between humans (grouped in society) and nature. Nature is the source of the resources that society extracts from it in order to reproduce the conditions necessary for their existence. However, it also is the repository of all waste generated by society and this flow of waste materials is carried out without considering the absorptive capacity of nature. Similarly, with the biological notion of metabolism, the concept of social metabolism is used in the study of relations between society and nature and describes and quantifies the flows of matter, and energy are exchanged between social groups and ecosystems. Within the dimensions of social metabolism, is the urban metabolism, which is the largest generation of waste with industrial metabolism, unlike the rural metabolism. Solid waste known as "biosolids" are a net product of urban metabolism and generation and disposal have become a problem that cities must solve. An option to give a final destination for the biosolids is used as organic amendment in agricultural soils, due to its organic nature and content of nutrients. In the city of Puebla, Mexico annually generates an enormous amount of these wastes of this type and are being used as agricultural soil improvers in the rural community located in the southern city since 2003. The effects that these residues may have on soils and environment in general have been studied from different approaches. But the economic and social effects that can have on communities, farmers and their families, is a practically unexplored field of study. A survey among producers of the town of La Paz Tlaxcolpan, Puebla, who are using biosolids on their land. The aim of this study was to assess the magnitude of the economic and social benefits that farmers get by using biosolids as organic amendment in their fields. There is an increase in yields in the range of 25% to 100%, but social and economic benefits are

minimal. There is an increase in yields in the range of 25% to 100%, but social and economic benefits are minimal.

INTRODUCCIÓN

La utilización desmedida de recursos naturales y la gran cantidad de residuos de todo tipo que se generan en los grandes centros urbanos e industriales en el mundo, está ocasionando un conflicto ambiental de proporciones planetarias. La apropiación de recursos naturales con diferentes fines y la generación de desechos son situaciones naturales a cualquier especie de ser vivo. El gran problema surge cuando esos recursos son utilizados a un ritmo mayor a las capacidades de la naturaleza para reproducirlos y/o cuando los desechos son generados a un ritmo también mayor a la capacidad de absorción de la naturaleza, violando así dos de los principios básicos de la sustentabilidad.

Esta enorme cantidad de desechos producidos (sólidos, líquidos y gaseosos) y su consecuente efecto en el ambiente, son una manifestación muy clara de la compleja relación que existe entre el ser humano (agrupado en sociedad) y la naturaleza. La relación del ser humano con el ambiente siempre ha sido contradictoria. Por un lado, destruyendo para sobrevivir y por otro, garantizando la reproducción de seres vivos (agricultura, ganadería, zonas de prohibición de caza-pesca, etc.).

El concepto de “metabolismo social” es una herramienta teórico-metodológica para el estudio de la relación sociedad-naturaleza desde una perspectiva histórica, y contempla entre sus fundamentos teóricos, el estudio de la dinámica de entradas-salidas (uso de recursos naturales-generación de desechos) entre la sociedad y la naturaleza. Este concepto aborda la problemática social-ambiental, integralmente.

De manera análoga con la noción biológica de metabolismo, el concepto de metabolismo social es utilizado en el estudio de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza y describe y cuantifica los flujos de materia y energía que se intercambian entre grupos sociales y los ecosistemas. Este metabolismo lo realizan los seres humanos a través del proceso social del trabajo.

El proceso metabólico entre la sociedad y la naturaleza, está representado por cinco procesos distinguibles: la apropiación, la transformación, la distribución o circulación, el consumo y la excreción.

El metabolismo social o metabolismo socio-económico en general, está integrado a su vez por tres dimensiones principales: el metabolismo rural, el metabolismo urbano y el metabolismo industrial (Toledo 2008). En las diferentes etapas de la historia de la humanidad, estas tres dimensiones presentan diferentes intensidades para los cinco procesos metabólicos.

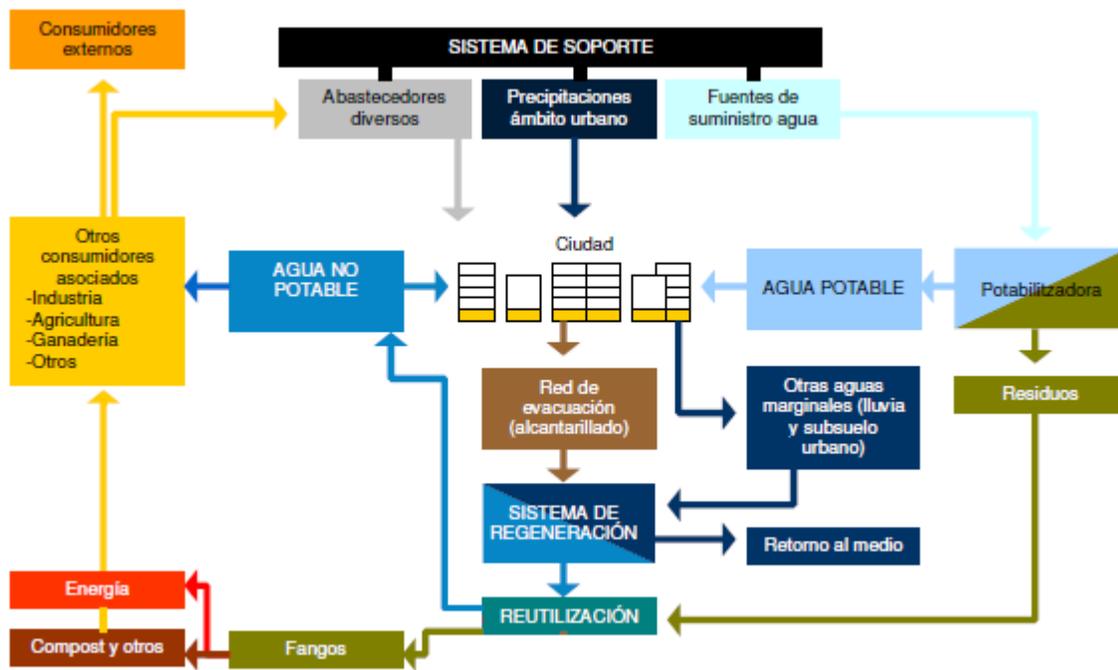
En la actualidad y en un marco dominante de producción capitalista, el metabolismo urbano presenta las mayores intensidades para los procesos de consumo y excreción y el metabolismo industrial para la transformación y la excreción. Esto puede explicarse bajo las premisas del sistema de producción capitalista: el sistema capitalista no produce tomando en consideración la capacidad de los ecosistemas de reproducir las materias primas que extrae y tampoco produce considerando la satisfacción de las necesidades humanas. Se produce exclusivamente por la ganancia. Por eso se tiene que producir siempre más y de manera más rápida (a cualquier precio), y se crea en los seres humanos la necesidad de consumir más mercancías, promoviendo de este modo la sociedad de consumo.

Los grandes consumidores de materias primas, recursos naturales y energía son los grandes centros urbanos e industriales en el mundo. Y como consecuencia lógica se convierten en los principales excretores de desechos hacia la naturaleza. Las grandes megalópolis, ciudades y centros urbanos requieren enormes cantidades de materias primas y energía para reproducir sus condiciones materiales de existencia.

Los seres humanos aglomerados en los grandes centros urbanos requieren (entre otras muchas cosas) grandes cantidades de agua para satisfacer sus necesidades. Éste recurso natural es extraído de la naturaleza y transportado a las ciudades (cada vez a mayores distancias y con un mayor consumo de energía), en donde, después de ser usada por los seres humanos para sus diferentes necesidades, el agua se convierte en un desecho que generalmente es descargado (excretado) a cuerpos de

agua naturales, como ríos, lagos, etc. De esta manera se ejemplifican perfectamente los procesos de consumo y excreción correspondiente al metabolismo social, en su dimensión urbana.

Por otra parte, debido a una cada menor disponibilidad de agua, en México y en el mundo, y a una regulación ambiental cada vez más estricta, en las grandes ciudades se ha incrementado en los últimos 20 años la necesidad de tratar y depurar las aguas de desecho generadas. Esto con el objeto de reutilizar el agua en algunas actividades y por otro lado, de excretar las aguas residuales urbanas a los cuerpos receptores con una mejor calidad para que la capacidad de asimilación de la naturaleza no se vea rebasada. En la Figura 6.1 se observa el ciclo del agua dentro del ámbito urbano.



Fuente: Crites y Tchobanoglous (2001)

Figura 5.1 Ciclo del agua en el ámbito urbano

Sin embargo, el tratar y depurar las aguas residuales generadas en las grandes ciudades ha traído consigo otro problema ambiental: la generación de enormes cantidades de residuos sólidos (lodos residuales), provenientes de los procesos de tratamiento. La idea de que únicamente con una tecnología ambiental cada vez más eficiente y compleja se resolverán los problemas ambientales del mundo, es otra de

las premisas de la producción capitalista (Rifkin 1990). Sin embargo, este hecho se convierte en un círculo vicioso, como ha ocurrido por ejemplo con los plaguicidas.

A partir del concepto de metabolismo social es posible observar, que es en los procesos de consumo y excreción, en la dimensión del metabolismo urbano, en donde se encuentra el origen de la problemática ambiental de la generación y disposición final de los residuos sólidos que se conocen como “biosólidos” (SEMARNAT 2002).

Entre los métodos más utilizados para la disposición final de biosólidos se encuentran: la incineración, depositarlos en rellenos sanitarios y utilizarlos como enmiendas en suelos agrícolas. Esta última opción es posible, debido a las propiedades de estos residuos, en cuanto a su composición química y sus características físicas. Poseen un alto contenido de materia orgánica y otros elementos que son esenciales para el desarrollo óptimo de las plantas de los cultivos. En la ciudad de Puebla de Zaragoza, México, como gran centro urbano (con poco más de millón y medio habitantes, aproximadamente), el consumo de agua se incrementa cada vez más y en consecuencia la generación de aguas residuales también se incrementa. Ante esta situación, a partir del año 2003 se inicio la construcción y operación de cinco plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales generan en la actualidad, más de 80,000 m³ al año de biosólidos. La depuración de las aguas residuales se resolvió parcialmente. Pero surgió un nuevo problema: la disposición final de tal cantidad de residuos sólidos generados.

Los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Puebla son utilizados como mejoradores de suelos agrícolas, en las comunidades rurales que se encuentran al sur de la misma. Una de estas localidades es La Paz Tlaxcolpan. En esta zona se practica la agricultura de temporal, y el cultivo principal es el maíz. Los suelos de esta comunidad son pobres en contenido de materia orgánica y otros elementos esenciales para el desarrollo de los cultivos. Por esta razón su productividad es baja. La finalidad de aplicar los biosólidos en los suelos agrícolas de esta zona es mejorar los rendimientos.

La casi totalidad de los trabajos de investigación que se realizan sobre el uso de biosólidos en suelos agrícolas se enfocan al impacto ambiental que puede ser provocado en el suelo. Esto es debido principalmente al contenido de metales pesados presentes en los biosólidos y al riesgo de que estos elementos pudieran ingresar a las redes tróficas poniendo en peligro la salud humana y animal (Granato *et al.* 2004, He *et al.* 2005, González *et al.* 2009, Torri y Lavado 2009). Otra vertiente muy estudiada sobre efectos del uso de biosólidos en suelos agrícolas, ha sido la de su impacto en las características que determinan la fertilidad del suelo y su efectos en el desarrollo de las plantas de los cultivos y en los rendimientos obtenidos en diferentes tipos de cultivos y de suelos (Bañuelos *et al.* 2007, Odlare *et al.* 2008, Samaras *et al.* 2008).

Sin embargo, los efectos de tipo económico y social que la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas puede provocar en los habitantes de las comunidades, prácticamente no ha sido abordado. Este es el aporte de esta investigación, cerrando el círculo, al estudiar los tres aspectos que intervienen en la incorporación de una innovación agrícola: los riesgos ambientales, efectos en la producción y los beneficios socio-económicos.

Considerando que la fertilidad del suelo es mejorada y en consecuencia se incrementan los rendimientos, los beneficios económicos de esta práctica no han sido estudiados, así como tampoco los impactos en la calidad de vida de los productores y sus familias. Por lo tanto existe la necesidad de medir estas variables para tener una visión más completa sobre el impacto que provoca la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas, no solo desde la perspectiva puramente ambiental sino también desde el punto de vista económico y social.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la magnitud de los beneficios obtenidos por los productores de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan por el uso de biosólidos de origen urbano en sus parcelas, desde el punto de vista económico (mayores rendimientos, mayores ingresos económicos, ahorros) y social (salud, alimentación, vivienda, servicios básicos).

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio fue La Paz Tlaxcolpan (18° 54' 21" N, 98° 13' 16" O), comunidad que se encuentra ubicada 15 km al sur de la ciudad de Puebla. En los suelos agrícolas de esta localidad rural se han aplicado biosólidos desde el año 2003, exclusivamente en el cultivo de maíz y con una dosis de 400 tha^{-1} .

Aproximadamente 30 productores de la comunidad han aceptado (hasta la fecha, 2010); únicamente 24 aceptaron participar en este estudio. Por lo que se realizó una encuesta con estos productores. No hubo necesidad de determinar un tamaño de muestra. La técnica empleada para recoger la información y para medir las variables estudiadas, fue la encuesta. Como instrumento se utilizó un cuestionario (Hernández-Sampieri *et al.* 2007).

El cuestionario fue de tipo estructurado, es decir que todas las preguntas fueron iguales y se aplicaron de manera uniforme a las unidades de observación (productores que utilizan biosólidos en sus terrenos). En este tipo de cuestionario las respuestas están prediseñadas o son de opción limitada, con lo que se asegura que todos den su respuesta a las mismas preguntas usando las mismas categorías (García-Córdoba 2009). Las preguntas incluidas en el cuestionario fueron abiertas, cerradas y mixtas. El cuestionario constó de seis apartados: a) Características de la unidad de producción; b) Tecnología de producción agrícola de maíz; c) Aplicación de lodos residuales (biosólidos); d) Beneficios económicos; e) Beneficios sociales y f) Salud.

Por este medio se buscó captar información sobre aspectos tales como los rendimientos obtenidos después de usar biosólidos, cambios en el suelo y en la planta observados por el productor, ingresos económicos, ventajas por usar biosólidos y principales inconvenientes de su uso, entre otros.

Se sistematizó y analizó la información a través de la precodificación y codificación posterior, captura electrónica y análisis estadístico de la información contenida en los cuestionarios aplicados. La información se procesó con el programa Statistical Package for Social Sciences (SPSS), versión 15.

RESULTADOS

Características de los productores

De la totalidad de los encuestados, 22 fueron del sexo masculino y únicamente dos del sexo femenino. En el **Cuadro 5.1** se muestran las edades de los productores. Se observa que aproximadamente la mitad de ellos tiene una edad que oscila entre los 50 y 59 años y casi un 30% tienen entre 70 y 79 años. En cuanto al nivel de escolaridad (**Cuadro 5.2**), el 45.8% no concluyeron su instrucción primaria y casi el 30 % no asistió a la escuela.

Cuadro 5.1. Edades de los productores.

Edad (años)	Frecuencia	Porcentaje
30-39	2	8.3
40-49	2	8.3
50-59	11	45.8
60-69	1	4.2
70-79	7	29.2
80-89	1	4.2
Total	24	100.0

En cuanto al tipo de tenencia de la tierra, todos los entrevistados respondieron que su propiedad es de tipo ejidal y la condición de humedad es de temporal en todos los casos. En lo referente al número de parcelas que poseen, el 70.8% respondió que son entre 1 y 2. Y solamente el 4.2% es propietario de cinco parcelas (**Cuadro 5.3**).

Por lo que respecta a la superficie total que cada productor posee, los resultados se observan en el **Cuadro 5.4**. El mayor porcentaje de los encuestados (46.2%) dijo poseer entre una y dos hectáreas, el 12.5% menos de una hectárea y un 4.2% dijo ser propietario de más de cuatro hectáreas.

Cuadro 5.2 Escolaridad de los productores.

Escolaridad	Frecuencia	Porcentaje
No asistió	7	29.2
Primaria inconclusa	11	45.8
Primaria terminada	3	12.5
Secundaria terminada	3	12.5
Total	24	100.0

Cuadro 5.3. Número de parcelas que poseen los productores.

No. de Parcelas	Frecuencia	Porcentaje
1	8	33.3
3	9	37.5
2	6	25.0
3	1	4.2
Total	24	100.0

Cuadro 5.4. Superficie total que poseen los productores

Superficie total (ha)	Frecuencia	Porcentaje
Menos de 1	3	12.6
1.0-3.0	19	79.1
3.1-4.0	1	4.2
Más de 4	1	4.2
Total	24	100.0

A la población de interés encuestada se le preguntó si los recursos generados por su actividad agrícola le eran suficientes para el sostenimiento de su familia, a lo que el

66.7% respondió que no y el 33.3% que sí. En concordancia con la pregunta anterior, se les inquirió a los productores si realizaban alguna otra actividad diferente de la agrícola que les proporcionara recursos económicos, a lo que el 87.5% respondió que sí y el restante 12.5%, que no.

De los productores que se dedican a otra actividad el 55.5% dijo trabajar como albañil y el 35.5% en la ganadería de traspatio. Al 38.1% de los productores, estas actividades les proporcionan el 50% de su ingreso familiar necesario y para el 19% representan el 80% del ingreso necesario.

Tecnología de producción agrícola

En cuanto a las labores de preparación del terreno, siembra y labores de cultivo, todos los productores entrevistados siguen las mismas prácticas. Para la preparación del terreno siguen la secuencia siguiente: barbecho, preparación del terreno con rastra, surcado y siembra, la cual realizan en los meses de mayo y junio, con semilla criolla.

Para las labores de cultivo se encontró la misma situación, todos realizan las mismas actividades: primera labor, primer desyerbe, segunda labor, segundo desyerbe. El 54.2% aplica herbicidas y el restante 45.8%, no. Todas estas labores las llevan a cabo entre los meses de junio y septiembre. La cosecha la hacen entre los meses de noviembre y diciembre.

En cuanto al empleo de fertilizantes minerales por parte de los productores, el **Cuadro 5.5** muestra los resultados encontrados. El 45.8% de los productores no fertiliza sus cultivos. Los productores que fertilizan sus cultivos emplean urea y la aplican al pie de cada mata en la primera labor en una cantidad promedio de 200 kg ha^{-1} .

Cuadro 5.5. Fertilización.

Fertilización	Frecuencia	Porcentaje
Siempre	5	20.8
A veces	8	33.3
Nunca	11	45.8
Total	24	100.0

En lo que respecta a la utilización de abonos orgánicos, únicamente el 33.3% lo utiliza en sus cultivos, generalmente es estiércol de vaca y lo aplican cada año. El tipo de tracción empleada por los productores se observa en el **Cuadro 5.6.**

Cuadro 5.6. Tracción empleada por los productores.

Tipo de tracción	Frecuencia	Porcentaje
Yunta propia	5	20.8
Yunta rentada	1	4.2
Tractor rentado	6	25.0
Tractor rentado y yunta rentada	7	29.2
Tractor rentado y yunta propia	4	16.7
Tractor propio y yunta propia	1	4.2
Total	24	100.0

Uso y manejo de biosólidos por los productores

El manejo que los productores dan a los biosólidos es de acuerdo a las instrucciones que recibieron de SOAPAP. La dosis recomendada por esta institución fue de 400 tha^{-1} en el cultivo de maíz exclusivamente. Sin aplicación de fertilizante mineral.

El **Cuadro 5.7** muestra los motivos, expresados por los productores, por los cuales se convencieron de usar biosólidos en sus parcelas. El 62.5% asistió a una plática informativa organizada y promovida por el SOAPAP y así se convenció de usar biosólidos en sus parcelas.

Cuadro 5.7. Motivos expresados por los productores, que los convencieron para usar biosólidos.

Motivos	Frecuencia	Porcentaje
Plática informativa del SOAPAP	15	62.5
Parcela demostrativa del SOAPAP	3	12.5
Observó los beneficios en otras comunidades que usaron biosólidos	4	16.7
Observó a sus vecinos aplicarlo y los rendimientos obtenidos	2	8.3
Total	24	100.0

En lo referente a la superficie en la cual los productores aplicaron biosólidos, el **Cuadro 5.8** muestra los resultados.

Cuando se les preguntó a los productores si sabían la cantidad de biosólidos que habían aplicado en sus parcelas, el 79.2% respondió que no y el resto contestó que sí.

Cuadro 5.8. Superficie en la cual los productores aplican biosólidos.

Superficie (ha)	Frecuencia	Porcentaje
< 1	7	29.2
1-2	14	58.3
> 3	3	12.5
Total	24	100.0

Respecto a cuándo incorporan o revuelven los biosólidos con el suelo después de que son depositados en sus terrenos, el 41.7% lo hace hasta los tres meses, el 20.8% a los seis meses y un 12.5% hasta después de un año. Estos resultados se observan en el **Cuadro 5.9**.

Cuadro 5.9. Incorporación de biosólidos al suelo después de la aplicación.

Incorporación de biosólidos al suelo	Frecuencia	Porcentaje
Al mes	1	4.2
A los dos meses	4	16.7
A los tres meses	10	41.7
A los seis meses	5	20.8
Al año	3	12.5
Lo deja en la superficie	1	4.2
Total	24	100.0

Al inquirir en la razón por la cual incorporan hasta después de transcurrido ese tiempo, el 79.2% respondió que deben esperar a que los biosólidos se sequen porque el terreno está muy fangoso y se atasca el tractor (**Cuadro 5.10**).

Cuadro 5.10. Motivo por la cual incorpora los biosólidos hasta esa fecha.

Motivo	Frecuencia	Porcentaje
Espera que seque. Terreno fangoso. Tractor se atasca	19	79.2
Alternar el sembrado de sus terrenos	4	16.7
Espera que se disuelvan los terrones de lodo seco	1	4.2
Total	24	100.0

Por otra parte, al 58.3% de los productores encuestados, las labores de cultivo en los suelos con biosólidos les parecen más fáciles que en terrenos sin biosólidos. Al 29.2% les parecen iguales en ambos terrenos. Al 12.5% restante les parecen más difíciles las labores en terrenos con biosólidos.

En el **Cuadros 5.11** y en el **Cuadro 5.12** se encuentran los resultados obtenidos a las preguntas hechas a los productores sobre cuáles eran los principales cambios que ellos han notado tanto en las características del suelo como en las de la planta.

Cuadro 5.11. Cambios notados por el productor en suelos con biosólidos.

Cambios observados	Frecuencia	Porcentaje
Color gris-negro. Más suave y poroso	20	83.3
Suelo más duro	1	4.2
Suelo más grueso	1	4.2
Absorbe más agua	1	4.2
Sin cambio	1	4.2
Total	24	100.0

Cuadro 5.12. Cambios notados por el productor en la planta de maíz en suelos con biosólidos.

Cambios observados	Frecuencia	Porcentaje
Mayor altura. Tallo más grueso. Hoja más ancha. Color más verde. Mazorca más grande	13	54.2
Mayor altura. Color más verde	10	41.7
Ningún cambio	1	4.2
Total	24	100.0

Las principales desventajas del uso de biosólidos, manifestadas por los productores se encuentran en el **Cuadro 5.13**. El 45.8% no encontró ninguna desventaja en el uso de biosólidos; el 25% de los productores encuestados señaló al olor desagradable de los biosólidos como su principal desventaja.

Cuadro 5.13. Principales desventajas encontradas por el productor en el uso de biosólidos.

Desventajas	Frecuencia	Porcentaje
Ninguna	11	45.8
Olor desagradable	6	25.0
Necesita más agua	3	12.5
Tiempo de espera para que seque	3	12.5
Crece mayor cantidad de yerba	1	4.2
Total	24	100.0

Beneficios económicos por el uso de biosólidos

En cuanto al impacto que el uso de biosólidos ha ocasionado en la economía de los productores y sus familias, se encontró que el 91.7% considera mayores sus cosechas después de usar biosólidos y el 8.3% estima que no hubo cambio en los rendimientos. En el **Cuadro 5.14** se observan los porcentajes de incremento en los rendimientos de las parcelas con biosólidos, de acuerdo con datos de los productores.

De la cosecha obtenida, el productor la reparte en varios rubros. El porcentaje que destina normalmente para la alimentación de su familia se muestra en el **Cuadro 5.15**. El 45.8% de los productores destina entre un 71-80% de la cosecha para alimentar a su familia. Un 8.4% destina entre el 91-100% de la cosecha a este rubro.

El porcentaje de la cosecha que el productor dedica a la venta se observa en el **Cuadro 5.16**. El 66.7% no destina parte de su producción a la venta; un 20.8% vende únicamente la décima parte de su cosecha. De los productores que venden parte de su cosecha, el 66.6% considera sus ingresos económicos más altos. El restante 33.3% considera que no hay cambio. Estos datos muestran que la agricultura de esta comunidad es en mayor parte de subsistencia.

Cuadro 5.14. Porcentaje de incremento en los rendimientos de las parcelas con biosólidos.

Porcentaje Incremento	Frecuencia	Porcentaje
0	2	8.3
25	1	4.2
33	3	12.5
40	1	4.2
50	6	25.0
60	2	8.3
100	4	16.7
150	2	8.3
Más de 400	3	12.5
Total	24	100.0

Cuadro 5.15. Porcentaje de la cosecha que el productor destina a la alimentación de su familia.

Porcentaje destinado alimentación	Frecuencia	Porcentaje
40-50	2	8.4
51-60	2	8.4
61-70	3	12.5
71-80	11	45.8
81-90	4	16.7
91-100	2	8.4
Total	24	100.0

Cuadro 5.16. Porcentaje de la cosecha que el productor destina a la venta.

Porcentaje destinado venta	Frecuencia	Porcentaje
0	16	66.7
10	5	20.8
20	1	4.2
30	1	4.2
40	1	4.2
Total	24	100.0

En cuanto a beneficios obtenidos por los productores que manifestaron obtener mayores ingresos económicos por venta de cosecha, se encontró lo siguiente: ninguno adquirió terrenos en compra o renta, solamente uno adquirió animales, ninguno realizó algún mejoramiento en su vivienda, solamente uno adquirió servicio telefónico y únicamente uno adquirió herramientas de labranza y solamente uno ahorró.

En lo referente a la cantidad de cosecha dedicada para la alimentación de animales, el 45.8% de los productores dedica un 10% de su cosecha a este rubro. Un 25% no tiene animales y por lo tanto no destina cosecha para esta actividad (**Cuadro 5.17**).

Cuadro 5.17. Porcentaje de la cosecha que el productor destina para alimentación de animales.

Porcentaje destinado alimentación animales	Frecuencia	Porcentaje
0	6	25.0
5-10	15	62.5
15-20	2	8.4
40	1	4.2
Total	24	100.0

Por otro lado, la parte de la cosecha que los productores dedican para semilla para el ciclo venidero se observan en el **Cuadro 5.18**. El 50% dedica solamente una décima parte y un 29.2% de los productores destina un 5% de su cosecha para semilla.

Cuadro 5.18. Porcentaje de la cosecha que el productor destina para semilla.

Porcentaje destinado para semilla	Frecuencia	Porcentaje
0	3	12.5
5-10	19	79.2
20	2	8.3
Total	24	100.0

En lo que respecta a la producción de rastrojo después de la aplicación de biosólidos, los productores manifestaron lo mostrado en el **Cuadro 5.19**. El 54.2% dijo que la producción de rastrojo se incremento poco y un 8.3% opinó que nada.

Cuadro 5.19. Incremento de la producción de rastrojo después de la aplicación de biosólidos.

Incremento Producción rastrojo	Frecuencia	Porcentaje
Mucho	5	20.8
Poco	13	54.2
Nada	2	8.3
No sabe	4	16.7
Total	24	100.0

A la pregunta de si el incremento en la producción de rastrojo lo beneficiaba de alguna manera, el 70.8% de los productores respondió que no. El 29.2% dijo que sí. A este último porcentaje de productores, se le pregunto cómo lo beneficiaba el incremento en la producción de rastrojo, a lo que respondieron lo siguiente: el 71.4%

manifestó que tenía más alimento y por más tiempo para sus animales; un 14.2% dijo que ahorra dinero en la compra de alimento para sus animales y otro 14.2% dijo que vendía más rastrojo.

Beneficios sociales por el uso de biosólidos

En lo referente a la alimentación de los productores y sus familias, se les preguntó si el incremento en sus rendimientos había influido en sus hábitos alimenticios. El 58.3% manifestó que no. El 41.7% dijo que sí. Esta última porción de productores dijo que la modificación consistía en mayor cantidad de la alimentación habitual. No incorporaron alimentos nuevos.

En cuanto a servicios como agua potable y energía eléctrica el 95.8% de los productores manifestó contar con ellos antes de usar biosólidos en sus terrenos. Un 4.2% dijo carecer de ellos. Por lo que respecta a drenaje, el 8.3% dijo contar con el servicio y el 91.7% dijo que no. Por otra parte, un 91.7% ya usaba gas L. P. para las necesidades del hogar y el 8.3% no contaba con él.

Para el servicio telefónico el 29.2% dijo contar con él y el 70.8% manifestó que no. Para el caso del servicio de Internet, el 95.8% no contaba con él y el 4.2% dijo que sí. Se les preguntó a los productores que si el obtener mayores rendimientos en sus cosechas les había ayudado adquirir algún servicio del que carecían. Un 91.7% dijo que no y un 8.3% dijo que sí. Este 8.3% pudo obtener servicio de agua potable, energía eléctrica y teléfono gracias a sus mayores rendimientos.

Los mayores rendimientos obtenidos no lograron que algún productor hiciera mejoras en su vivienda y solamente uno pudo adquirir muebles para su casa como producto de sus mayores rendimientos (una sala).

En cuanto al tema de la salud, el 45.8% prefiere utilizar servicios de salud privados y el 54.2% prefiere los servicios de salud públicos. A los productores que prefieren utilizar los servicios de salud privados se les inquirió de donde obtenían los recursos económicos para sufragar los gastos inherentes (**Cuadro 5.20**). El 63.6% vende

algún animal y solamente el 9.1% cubre este gasto con recursos provenientes de la cosecha.

Al preguntarles a los productores si el SOAPAP les había explicado la existencia de riesgos para su salud por el contacto físico con los biosólidos, el 70.8% respondió que no y el restante 29.2% contestó que sí.

Cuadro 5.20. Fuente de ingresos económicos que utilizan los productores para cubrir servicios de salud privados.

Fuente de ingresos	Frecuencia	Porcentaje
Por venta de animales	7	63.6
Por venta de cosecha	1	9.1
Ingresos por actividades no agropecuarias	3	27.3
Total	11	100.0

El 100% de los productores encuestados respondieron negativamente a la pregunta de si él o algún miembro de su familia se habían enfermado a partir del contacto con los biosólidos.

La estimación del beneficio de usar biosólidos en sus terrenos, de manera general, de acuerdo con la perspectiva de los productores, se muestra en el **Cuadro 5.21**.

Cuadro 5.21. Estimación del beneficio general proporcionado por aplicar biosólidos, de acuerdo a los productores.

Estimación	Frecuencia	Porcentaje
Mucho	5	20.8
Poco	18	75.0
Nada	1	4.2
Total	24	100.0

El 100% de los productores entrevistados dijo estar de acuerdo en continuar con la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas.

DISCUSIÓN

Dentro de las características de los productores encuestados y de acuerdo con los datos obtenidos respecto a su edad, se encontró que 20 de los 24 productores tienen 50 años o más. La mayoría de ellos entre 50 y 59 años. Por otra parte los productores entre 70 y 79 años son los siguientes en número. Esta situación sugiere la existencia de dos generaciones de productores claramente marcadas. La de los padres (generación que se extingue) y la de los primogénitos, que es la generación que está creciendo en número. Por otra parte es importante señalar que entre los productores entrevistados no existe ninguno menor de 30 años. Lo cual podría indicar que las generaciones más jóvenes presentan la tendencia de buscar otros medios de subsistencia diferentes a la actividad agropecuaria.

El nivel de escolaridad encontrado en los productores es bajo (**Cuadro 5.2**). Este resultado era esperarse ya que de acuerdo con CONAPO esta localidad tiene un grado de marginación alto; entre las dimensiones socioeconómicas que integran el índice de marginación que maneja esta institución se encuentra el de la educación (CONAPO 2005) y la residencia en localidades pequeñas.

Otra situación encontrada entre los productores encuestados y de acuerdo a la información obtenida, es la fragmentación en la tenencia de la tierra. En cuanto al número de parcelas que poseen (**Cuadro 5.3**), la mayoría (17) tienen entre una y dos parcelas y seis de ellos poseen tres parcelas y únicamente un productor dijo tener cinco parcelas. Esta situación se corresponde con la superficie total que poseen los productores (**Cuadro 5.4**). La mayoría tiene entre una y dos hectáreas, le siguen en número los que tienen entre dos y tres hectáreas. Solamente dos dijeron poseer más de tres hectáreas, uno de los cuales tiene más de cuatro.

Esta fragmentación en la posesión de la tierra que presentan los productores de la zona, puede contribuir a que los beneficios potenciales por el uso de biosólidos como enmiendas orgánicas sean más bien imperceptibles.

Es claro que el problema de la baja productividad de los suelos sumado al de la fragmentación en la posesión de la tierra, agrava el problema de los bajos

rendimientos que obtienen los productores de la localidad y en consecuencia sus ingresos económicos son bajos. Esta conjunción de factores, obliga a los productores con menor cantidad de superficie agrícola, a buscar otras fuentes de ingreso. Esto se reflejó cuando el 66.7% de los productores encuestados dijo que la actividad agrícola no le proporcionaba los recursos suficientes para el sostenimiento de su familia. El trabajo como albañil y la cría de animales de traspatio son las principales actividades a las que se dedican como fuente exterior de ingresos y representan entre un 50 y un 80% de su ingreso familiar necesario.

Respecto a la tecnología de producción agrícola, el punto más sobresaliente es la fertilización que realizan los productores en sus parcelas. La urea fue el fertilizante que dijeron emplear preferentemente, en sus cultivos. Podría pensarse que el uso de biosólidos traería como consecuencia un ahorro, debido a que ya no sería necesario comprar fertilizante. Sin embargo de acuerdo a los datos del **Cuadro 5.5**, se presenta una situación diferente.

Casi la mitad de los productores encuestados (11), nunca fertilizan sus cultivos. Otros ocho productores dijeron fertilizar ocasionalmente y únicamente cinco productores siempre realizan esta actividad. Debido a esta situación el ahorro por compra de fertilizante solamente beneficia a una pequeña parte de productores. A los que siempre han fertilizado. Para los demás y sobre todo para quienes nunca fertilizan ese ahorro es inexistente.

Respecto al manejo que los productores dan a los biosólidos en sus parcelas es importante destacar que estos residuos llegaron a esta localidad por iniciativa del SOAPAP. De los 24 productores encuestados, 18 aceptaron utilizar biosólidos en sus parcelas después de asistir a los eventos organizados y promovidos por el SOAPAP (**Cuadro 5.7**). Una plática informativa sobre el uso, manejo y beneficios de los biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas y una parcela demostrativa en un cultivo de maíz.

De lo anterior se puede deducir, el enorme interés que esta Institución tiene en que los productores usen los biosólidos en sus suelos. De esta manera está encontrando

un método de disposición final para estos residuos urbanos; este interés puede ser aprovechado y canalizado para realizar esta práctica sobre una base de conocimientos emanados de la investigación científica.

Otra situación que puede influir en la percepción de si existen o no los beneficios que proporcionan los biosólidos al ser usados como enmiendas en suelos agrícolas, es la cantidad de superficie que los productores destinan para que allí se depositen biosólidos (**Cuadro 5.8**). Siete de los productores los aplican a menos de una hectárea, la mayoría a una o dos hectáreas y solamente tres lo aplican a más de tres hectáreas. Es claro que los beneficios serán más visibles en los últimos tres productores al destinar más superficie a la aplicación de biosólidos.

Cabe destacar que 19 de los productores (79.2%) dijeron ignorar la cantidad de biosólidos que se depositan en sus parcelas. El resto manifestó conocer la cantidad que se depositaba en número de camiones de biosólidos que se depositaron en sus parcelas. Quienes aplicaron biosólidos en dos hectáreas dijeron que depositaron entre 30 y 50 camiones. Considerando que la capacidad del camión es de 14 m³, se depositaron entre 210 y 350 toneladas de biosólidos por hectárea. Esta cuestión es una manifestación clara de que la aplicación de biosólidos en la zona de La Paz Tlaxcolpan se está haciendo de manera ineficiente e inadecuada y muestra la enorme necesidad aplicar una estrategia de manejo integral y sistémico de los biosólidos en esta comunidad.

Otro aspecto importante en el manejo de los biosólidos es la incorporación de estos al suelo. Debido a la consistencia del lodo deshidratado (chiclosa y pegajosa) los vehículos se atascan y la distribución e incorporación por medio de tractor es casi imposible de realizar (**Cuadro 5.10**). Debido a esto los productores deben esperar algún tiempo (**Cuadro 5.9**) antes de poder distribuir los biosólidos y mezclarlos con el suelo. Esta es otra situación que ejemplifica la necesidad de que existan lineamientos claros respecto al manejo de los biosólidos. Los periodos de espera para que sequen los biosólidos van desde un mes hasta un año. La mayoría de los productores esperan entre dos y seis meses.

La deposición de los biosólidos en los suelos de La Paz Tlaxcolpan debería estar en función del clima de la zona. Los biosólidos deberían ser depositados en los meses de estiaje y no en época de lluvias. Esto reduciría y estandarizaría los tiempos de espera para incorporar los biosólidos al suelo.

Para los productores que cuentan con una sola parcela y en ella aplican biosólidos, la situación se tornaría muy problemática. Para quienes poseen varias parcelas puede resultar menos complicado que una parcela este sin producir en espera de que sequen los biosólidos.

Por otra parte 14 de los 24 productores entrevistados, manifestaron que las labores de cultivo son más fáciles en suelos con biosólidos. Lo que se relaciona directamente con los cambios observados en el suelo por los mismos productores (**Cuadro 5.11**). Principalmente en el cambio de textura del suelo. Veinte de los 24 productores encuestados opinaron que el suelo es más suave y poroso. Este sin duda alguna es uno de los beneficios que los biosólidos aportan a las características del suelo (Gavalda *et al.* 2005).

En cuanto a los cambios que han notado en la planta de maíz, 23 de los 24 productores opinaron positivamente a este respecto. De acuerdo a lo observado por ellos la planta es más alta, más verde, tallo más grueso, hoja más ancha y la mazorca más grande. Estas observaciones estarían confirmando que los biosólidos son fuente de nutrientes que produce un mejor desarrollo de la planta de maíz y serían parte de la justificación del uso de biosólidos en suelos agrícolas (De las Heras *et al.* 2005).

En lo referente a las desventajas encontradas por los productores en el uso de biosólidos, casi la mitad de los entrevistados (11) dijeron no encontrar ninguna; el principal inconveniente encontrado por los productores restantes fue el olor desagradable inherente a los biosólidos. A este respecto, Schiffman y Williams (2005), afirman que los malos olores se consideran signos de alerta a potenciales riesgos a la salud humana pero que no necesariamente tiene efectos directos en ella.

Otras desventajas observadas por los productores y que deben ser consideradas, son la gran cantidad de yerba o maleza que crece en los suelos con biosólidos, lo que llevaría a un gasto extra para aplicar herbicidas o labores extras de desyerbe. Por otro lado el tiempo necesario para que los biosólidos sequen.

Por otra parte, para evaluar si los productores realmente están obteniendo beneficios económicos al utilizar biosólidos en sus parcelas, el principal parámetro que debe ser medido es el rendimiento que han obtenido después de aplicar los residuos. A este respecto, 22 de los 24 productores entrevistados manifestaron haber obtenido mayores rendimientos después de usar los biosólidos (Hernández-Herrera *et al.* 2005). Esto significa que la gran mayoría de los productores se han beneficiado en este aspecto. Sin embargo los porcentajes de incremento en los rendimientos son muy variables de acuerdo con lo manifestado por los productores (**Cuadro 5.14**). Diecisiete de los productores incrementaron sus rendimientos en un 50% o más y los siete restantes un 40% o menos. Esta variación puede deberse a factores como: la época de aplicación de los biosólidos y el tiempo de incorporación.

Aunque casi todos los productores reportan incrementos en sus rendimientos, el beneficio económico que esto les puede representar, estará en función de la cantidad de cosecha que destinen a la venta. Y por lo que se observa en el **Cuadro 5.15**, un gran porcentaje se destina para la alimentación de la familia del productor. Once productores destinan entre un 70-80% para este rubro, lo que deja solamente un 20-30% para venta y para semilla. Esta cantidad destinada a la familia también puede estar influida por el tamaño de la misma.

En cuanto al porcentaje que los productores entrevistados destinan a la venta (**Cuadro 5.16**), se encontró que la mayoría (16) no destina ninguna cantidad de su cosecha a la venta. Únicamente tres destinan el 20% o más de su cosecha para venderla. Esta situación tiene como consecuencia que la mayoría de los productores no obtengan ingresos económicos pese a que sus rendimientos son más altos. El beneficio por tener más cosecha parece darse de otra manera y no en un mayor ingreso económico.

De los productores que dijeron destinar mayor cantidad de cosecha a la venta, tampoco experimentaron un gran beneficio económico, considerando como indicadores, la mejora de la vivienda, la adquisición de servicios y el ahorro. Los mayores ingresos solamente sirvieron para adquirir servicio telefónico en un caso, adquisición de herramientas de labranza en otro y solamente uno ahorró alguna cantidad de dinero. El ingreso de mayor cantidad de dinero al productor por mayores rendimientos y venta de cosecha no parece ser un beneficio tangible para los productores de La Paz Tlaxcolpan, debido principalmente a que la mayoría o la totalidad de su cosecha la destinan para alimentación de su familia, alimentación de sus animales y para semilla, rubros que son prioritarios para el productor (**Cuadro 5.17** y **Cuadro 5.18**).

Otro aspecto en el cual podría manifestarse el beneficio económico tomando como base el incremento de los rendimientos, es la producción de rastrojo que podría darse a partir de la utilización de biosólidos. En principio, los productores en su mayoría opinaron que, el incremento en la producción de rastrojo es poco (13) o ninguno (2) (**Cuadro 5.19**).

Pero aunque haya existido algún incremento, el beneficio de esto solo es experimentado por los productores que crían animales y principalmente por aquellos que, poseen más superficie y por lo tanto están en posibilidad de destinar más terreno al uso de biosólidos. De acuerdo con esto la mayor producción de rastrojo solo beneficiaría económicamente a quienes lo recogen y lo venden y significaría un ahorro para quien cría animales y lo necesita para alimentarlos, ya que al tener mayor cantidad de rastrojo pasaría más tiempo antes de necesitar comprarlo o llegaría la siguiente cosecha y ya no habría necesidad de adquirirlo.

Esta situación explicaría la respuesta de los productores a la pregunta de si la mayor producción del rastrojo los beneficiaba de alguna manera. El 70.8% respondió negativamente.

Por otra parte los hábitos alimenticios de los productores y sus familias no se modificaron a partir de que obtuvieron mayores rendimientos en sus parcelas. Más de

la mitad dijo que no habían cambiado su alimentación y la otra parte manifestó que solamente comían más de su alimentación habitual. Es en esta última porción de productores, en donde se ve reflejado el beneficio de los mayores rendimientos. A pesar de que dijeron no haber incorporado alimentos nuevos en su dieta ni comer carne con más frecuencia (normalmente lo hacen una vez por semana o cada quince días), el hecho de aumentar la cantidad de alimentos que consumen habitualmente es importante para los productores. Sin embargo, nuevamente este beneficio no se refleja en todos los productores que usan biosólidos.

El que los productores obtengan mayores rendimientos tampoco se ve reflejado en el rubro de servicios básicos. Por principio, 23 de ellos dijeron contar con agua potable y energía eléctrica. Veintidós de ellos usan gas para cocinar, siete cuentan con servicio telefónico y uno dijo contar con servicio de internet. Todo lo anterior es antes de usar biosólidos en sus parcelas. Prácticamente toda la comunidad carece de drenaje.

Únicamente dos productores dijeron haber obtenido alguno de los servicios anteriores después de utilizar biosólidos y obtener mayores rendimientos. Uno de ellos pudo adquirir energía eléctrica, agua potable y servicio telefónico y el otro el servicio telefónico. Nuevamente la explicación a esta situación parece ser la cantidad de superficie cultivable que poseen los productores de la localidad. Ambos productores son de los que poseen un mayor número de parcelas, mayor superficie de cultivo y por lo tanto destinan mayor cantidad de terreno para el uso de biosólidos, obteniendo mayores rendimientos. También son de los que dedican mayor cantidad de cosecha para venderla, obteniendo de esta manera ingresos monetarios, lo que les permitió adquirir estos servicios.

En cuanto a modificaciones o mejoras hechas a la vivienda del productor, como consecuencia de obtener mayores rendimientos, todos los productores respondieron negativamente. Incluso los productores con mayor cantidad de superficie cultivable, mayores rendimientos y mayores ingresos económicos tampoco alcanzaron este beneficio. En la obtención de mobiliario para la vivienda, solamente un productor logro adquirir un juego de sala, con los ingresos obtenidos a partir de sus mayores rendimientos por el uso de biosólidos. Cabe señalar que este productor cuenta

únicamente con dos hectáreas de superficie de cultivo y las dos las destina para usar biosólidos.

Respecto a la indagación que se hizo sobre, si los mayores rendimientos que reportan todos los productores entrevistados, influyen de alguna manera en la preferencia de los servicios médicos a los cuales asisten, se encontró que la mayoría (13) prefiere los servicios públicos de salud. Siete productores y sus familias utilizan ambos servicios. Estos siete productores dijeron cubrir los gastos por servicios de salud privados, cuando así lo requieren, con la venta de algún animal de corral (**Cuadro 5.20**). Estos productores destinan entre 5-20% de su cosecha para alimentar a sus animales. En consecuencia los mayores rendimientos obtenidos por usar biosólidos, los benefician de algún modo porque tiene mayor cantidad de grano para alimentarlos por más tiempo. Aunque solamente uno de estos siete productores dijo utilizar el rastrojo producido para alimentar a sus animales.

Por otra parte, cuatro productores tienen total preferencia por los servicios privados de salud por considerarlos de mejor calidad que los públicos. De estos cuatro productores, dos dijeron sufragar los gastos por venta de algún animal y otro por venta de su cosecha. En tres casos los mayores rendimientos obtenidos por usar biosólidos, beneficiaron a los productores de algún modo. Porque tienen suficiente alimentación para sus animales y porque la mayor cosecha les permite vender una parte para acudir a los servicios de salud de su preferencia. El cuarto productor dijo cubrir los gastos por asistir a servicios privados de salud con lo que gana trabajando como albañil.

En lo concerniente a los riesgos para la salud del productor y su familia, por entrar en contacto con los biosólidos en las parcelas cuando las laboran, la mayoría de los entrevistados (17) dijo no haber recibido ninguna plática explicativa por parte del SOAPAP, sobre los riesgos que podrían existir por entrar en contacto con los biosólidos. Esto demuestra y confirma la necesidad de contar con un cuerpo de conocimiento más completo sobre los efectos de los biosólidos cuando son aplicados al suelo, y que desembocaría en la existencia de programas de capacitación para el productor.

A este respecto se les cuestionó a los productores si ellos, o algún miembro de su familia se habían enfermado o había manifestado algún síntoma a partir del uso de biosólidos en sus terrenos. La respuesta en todos los casos fue negativa. Sin embargo, esta parte de los efectos de los biosólidos en la salud de los productores, requiere de estudios más detallados que proporcionen la información científica que de mayor certeza sobre los riesgos que pueden presentarse para la salud humana y animal en la localidad.

Sobre la percepción general de los productores sobre los beneficios de usar biosólidos englobando todos los aspectos tratados anteriormente, la mayoría (18) estima que el beneficio es poco (**Cuadro 5.21**), cinco productores consideran que el beneficio es mucho y un productor dijo que no existe ningún beneficio. Cabe señalar que entre los que opinaron que el beneficio es mucho se encuentran quienes poseen más superficie de cultivo y destinan más superficie a la aplicación de biosólidos.

CONCLUSIONES

La aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas en la localidad de La Paz Tlaxcolpan, incrementa los rendimientos de las parcelas que los productores destinan para esta práctica. Sin embargo, el rendimiento total y las ganancias económicas que obtienen los productores, están en relación directa con la cantidad de superficie de cultivo que poseen. Por este motivo el beneficio económico es totalmente desigual para todos los productores.

Quienes poseen mayor cantidad de superficie cultivable, pueden destinar mayor superficie a la aplicación de biosólidos, obtener mayores rendimientos, destinar mayor cantidad de cosecha a la venta y obtener ingresos económicos. También pueden destinar mayor cantidad de cosecha para la alimentación de sus animales. Los productores que poseen dos hectáreas de superficie cultivable o menos prácticamente no experimentan beneficio económico alguno.

En cuanto a los beneficios de tipo social que el incremento en los rendimientos de sus parcelas proporcionan a los productores, también es muy pequeño y se da principalmente en los que poseen mayor superficie de cultivo. Las ganancias

obtenidas les permitieron a algunos de estos productores obtener servicios como energía eléctrica, agua potable y teléfono. Para la mayoría de los productores, los incrementos en los rendimientos, solo los han beneficiado en cuanto a su alimentación, al poder aumentar de cantidad su dieta normal. En el aspecto salud y vivienda, no existe beneficio alguno para ningún productor.

De manera general, en opinión de todos los productores entrevistados de la localidad, los beneficios obtenidos por el uso de biosólidos son mínimos; uno de los factores que influye en que los rendimientos no sean mejores, es el manejo inadecuado, ineficiente y prácticamente improvisado de los biosólidos, que hacen conjuntamente los productores y el SOAPAP por falta de capacitación. Lo que demuestra la enorme necesidad de hacer mucho más técnica, científica y profesional la práctica de aplicar biosólidos de origen urbano como mejoradores de suelos agrícolas de temporal. No únicamente con el fin de mejorar la productividad de los suelos agrícolas sino de evitar riesgos de orden ambiental y de salud humana y animal.

LITERATURA CITADA

- Bañuelos G. S., Pasakdee S., Benes S. H. y Ledbetter C. A. (2007). Long-term application of biosolids on apricot production. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 38, 1533-1549.
- CONAPO (2005). Índices de marginación 2005. Consejo Nacional de Población. México D. F. 334 pp.
- De las Heras J., Mañas P. y Labrador J. (2005). Effects of several applications of digested sewage sludge on soil and plants. *J. Environ. Sci. Health, Part A.* 40, 437-451.
- He Z. L., Yang X. E. y Stofella P. J. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *J. Trace Elemen. Med. Biol.* 19, 125-140.
- Hernández-Herrera J. M., Olivares-Sáenz E., Villanueva-Fierro I., Rodríguez-Fuentes H., Vázquez-Alvarado R. y Pissani-Zuñiga J.F. (2005). Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21 (1), 31 – 36.

- García-Cordoba F. (2009). *El cuestionario*. Limusa, México D. F., 120 pp.
- Gavalda D., Scheiner J. D., Revel J. S., Merlina G., Kaemmerer M., Pinnelli E. y Giresse M. (2005). Agronomic and environmental impacts of a single application of heat-dried sludge on an Alfisol. *Sci. Total Environ.* 343, 97-109.
- González F. E., Tornero C. M. A., Ángeles C. Y. y Bonilla y Fernández N. (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (1), 15-22.
- Granato T. C., Pietz R. I., Knafl G. J., Carlson Jr. C. R., Tata P. y Lue-Hing C. (2004). Trace element concentrations in soil, corn leaves and grain after cessation of biosolids applications. *J. Environ. Qual.* 33, 2078-2089.
- Hernández-Sampieri R., Fernández-Collado C. y Baptista-Lucio P. (2008). *Metodología de la investigación*. 4ª ed. McGraw-Hill, México, D.F., 850 pp
- Odlare M., Pell M. y Svensson K. (2008). Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Manag.* 28, 1246-1253.
- Rifkin J. (1990). *Entropía; Hacia el mundo invernadero*. Urano, Barcelona, 335 pp.
- Samaras V., Tsadilas C. D. y Stamatiadis S. (2008). Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield and nitrate leaching. *Agron. J.* 100, 477-483.
- Schiffman S. S. y Williams C. M. (2005). Science of odor as a potential health issue. *J. Environ. Qual.* 34, 129-138.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2000. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*. 15 de Agosto de 2002.
- Toledo V. M. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Rev. de la Red Iberoam. Econom. Ecol.* 7, 1 – 26.

Torri S. y Lavado R. (2009). Plant absorption of trace elements in sludge amended soils and correlation with soil chemical speciation. *J. Hazard. Mat.* 166, 1459-1465.

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN GENERAL

Históricamente, las sociedades humanas han producido y reproducido sus condiciones materiales de existencia a partir de su metabolismo con la naturaleza. Este metabolismo lo realizan los seres humanos a través del proceso social del trabajo. Dicho proceso implica el conjunto de acciones a través de las cuales los seres humanos, independientemente de su situación en el espacio (formación social) y en el tiempo (momento histórico), se apropian, producen, circulan, transforman, consumen y excretan, materiales y/o energías provenientes del mundo natural (Toledo *et al.* 2002).

En las sociedades industriales actuales el excesivo consumo de recursos naturales y la generación de desechos (excreción), han propiciado una problemática ambiental de proporciones globales. En los grandes centros urbanos, existe un enorme consumo de agua, necesario para cubrir las necesidades básicas de una población en crecimiento. Este recurso es tomado de la naturaleza. Esta agua una vez utilizada es vertida regresada a la naturaleza pero con una calidad tal, que puede provocar enormes desequilibrios en los ecosistemas en los cuales se descargan. Por lo tanto existe la necesidad de tratarlas para incorporarlas a la naturaleza en condiciones que permitan que los ecosistemas ejerzan su capacidad de autodepuración y mantengan su equilibrio.

Como se señaló en el marco teórico y conceptual, los biosólidos son un producto indeseable pero inevitable en los procesos de tratamiento de aguas residuales y debido al tremendo incremento en el consumo de agua en las grandes ciudades, la cantidad de aguas residuales tratadas se incrementa también y en consecuencia la producción de biosólidos. Los biosólidos son los residuos sólidos (lodos) producidos por las plantas tratadoras de aguas residuales.

La enorme generación de biosólidos propicia otro problema ambiental: su disposición final. Entre las opciones para disponer los biosólidos se encuentran su incineración, su vertido al mar, su colocación en rellenos sanitarios y su aprovechamiento como enmiendas de suelos agrícolas. Esta última opción es viable debido a las

características propias de los biosólidos, como su contenido de materia orgánica y nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas.

En su calidad de “residuos” los biosólidos contienen sustancias que pueden ser tóxicas para los seres vivos, ya sea por su toxicidad inherente o porque a determinadas concentraciones suelen tener efectos nocivos a la salud. Los elementos conocidos como “metales pesados” se ubican dentro de esta última categoría.

La aplicación de biosólidos en suelos agrícolas se ha venido practicando desde hace por lo menos cinco décadas, en países como los Estados Unidos de América, España, Reino Unido, etc. En México, la cada vez mayor cantidad de biosólidos generados, ha hecho necesaria la regulación para su aplicación en suelos (SEMARNAT 2002). Las restricciones establecidas en la normativa mexicana, solo establecen límites para el contenido total de metales pesados y para ciertos parámetros microbiológicos que determinan la calidad de los biosólidos y su aptitud para ser usados en suelos. Pero no así para la biodisponibilidad de los metales pesados y su contenido en las distintas fracciones del suelo.

Con base en el enfoque de aprovechamiento de los biosólidos como enmiendas agrícolas, en el año 2003, el gobierno del Estado de Puebla, ubicado este en el centro de la República Mexicana, comenzó a través del SOAPAP, un programa de utilización de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas en comunidades rurales ubicadas al sur de la ciudad de Puebla (que cuenta con un poco más de un millón y medio de habitantes) y que genera anualmente 80,000 m³ de biosólidos en cinco plantas de tratamiento. La Paz Tlaxcolpan fue seleccionada por su cercanía con las plantas tratadoras de aguas residuales; la escasa fertilidad y bajos contenidos de materia orgánica de los suelos; la producción de cultivos básicos en condiciones de temporal, la presencia de suelos pobres y delgados, pero sobre todo la aceptación de los agricultores. El propósito fue mejorar la productividad de los cultivos en la zona, aumentar la fertilidad de sus suelos, generando mayores rendimientos y por ende beneficios sociales para los productores.

Sin embargo, existen escasos estudios e investigación a nivel de campo sobre los efectos que los biosólidos ocasionan al recurso natural suelo (O'Connor *et al.* 2005). Y aun existen menos trabajos que hayan estudiado los efectos ambientales, económicos y sociales en función del tiempo. Ello dio origen al presente trabajo de investigación en La Paz Tlaxcolpan, Puebla.

En la primera parte de este trabajo, se evaluó el efecto ambiental que los biosólidos ocasionan en los suelos agrícolas. En la primera etapa se estudió, como un efecto ambiental negativo, la dinámica de la biodisponibilidad de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, en función del tiempo. En la segunda etapa se determinó el efecto ambiental positivo de los biosólidos en los suelos. Esto referido a un mejoramiento de las características que determinan su fertilidad, y en consecuencia, a un potencial incremento en la productividad de los mismos.

Uno de los principales hallazgos sobre la biodisponibilidad en el suelo de los elementos estudiados, fue que en general no se incrementa de manera notable en el periodo de estudio. Cada metal estudiado presenta una dinámica diferente al transcurrir el tiempo después de la aplicación de los biosólidos.

La biodisponibilidad del cobre y el plomo muestra una tendencia marcada. Disminuye al pasar el tiempo. Un resultado similar fue observado por McGrath *et al.* (2000), al encontrar que las concentraciones biodisponibles de Cu y Pb disminuyen al transcurrir el tiempo. Son más altas en los primeros tres años después de la aplicación de biosólidos pero con tendencia a disminuir, en comparación con un testigo. Esto significa que la adición de biosólidos tiene un mínimo efecto sobre la biodisponibilidad de Cu y Pb en los suelos estudiados.

La biodisponibilidad del níquel y el zinc mostró una tendencia inversa a la del cobre y el plomo. Es decir se incrementan al transcurrir el tiempo. Respecto al níquel, si existe un incremento cualitativamente notable de su biodisponibilidad comparado con el testigo. Desde el suelo con un año de antigüedad de aplicación hasta el suelo con seis años, existe un incremento neto de la biodisponibilidad. Esto sugiere que la adición de biosólidos sí tiene un efecto sobre la biodisponibilidad del níquel en esos

suelos. Sin embargo cuantitativamente el valor más alto alcanzado por la concentración biodisponible no rebasa los 18 mgkg^{-1} . Bacon *et al.* (2005), en un estudio similar, también reportan esta tendencia de la biodisponibilidad del níquel, en un periodo de estudio de 12 años.

Respecto al zinc, el incremento de su biodisponibilidad al transcurrir el tiempo es un fenómeno que ha sido reportado en otros estudios semejantes (De las Heras *et al.* 2005, Nogueira *et al.* 2010). La tendencia es consistente. La aplicación de biosólidos a estos suelos agrícolas sí tiene un impacto en la dinámica de la biodisponibilidad del Zn.

Otro de los hallazgos importantes en este trabajo de investigación es la redistribución, en las diferentes fracciones determinadas, encontradas para Cu, Ni, Pb y Zn al transcurrir el tiempo. En primera instancia se debe remarcar que la mayor parte del contenido de estos metales en los suelos enmendados con biosólidos se encuentra en las fracciones con mayor estabilidad química: la fracción oxidable y la fracción residual.

Por otra parte la redistribución entre fracciones para Cu, Ni y Pb se da esencialmente de la fracción intercambiable (biodisponible) a la fracción residual y a la fracción oxidable. Basta *et al.* (2005), explican que esta tendencia del plomo y el cobre a enlazarse a los óxidos de Fe y Mn se debe a la formación de complejos metálicos de superficie de esfera interna, con lo cual se forman poderosos enlaces entre la superficie de los óxidos y los cationes metálicos. También el cobre y el plomo muestran una fuerte afinidad por la materia orgánica y la consecuente formación de complejos metálicos de superficie de esfera interna. Esta situación en general muestra la competitividad que existe entre las diferentes fracciones sólidas de los suelos enmendados con biosólidos, por la adsorción y retención de los metales (Covelo *et al.* 2007).

La redistribución del zinc al transcurrir el tiempo se da, de la fracción oxidable a la intercambiable esencialmente. Esto sugiere que cuando el zinc es liberado de la materia orgánica, pasa a la fracción biodisponible y no es retenido por los óxidos de

Fe y Mn. Esto explicaría el aumento de la biodisponibilidad del Zn al transcurrir el tiempo.

La afinidad del zinc y la materia orgánica (Kabata-Pendias y Pendias 2000, Nogueira *et al.* 2010) puede explicar los resultados encontrados, debido a que los metales pesados pueden ser más solubles o móviles en suelos enmendados con biosólidos cuando ellos están unidos inicialmente a la materia orgánica y son liberados cuando la materia orgánica se mineraliza con el transcurso del tiempo (Antoniadis y Alloway 2003).

Por otra parte el contenido total de los metales pesados en los suelos enmendados con biosólidos, no está correlacionado con su biodisponibilidad. El contenido de materia orgánica y las diferentes reacciones químicas que se llevan a cabo en el suelo son las que determinan la biodisponibilidad y la redistribución de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn.

En la segunda etapa de la evaluación del efecto ambiental que los biosólidos ocasionan al recurso natural suelo, se determinó el efecto positivo sobre las características del suelo que influyen en la fertilidad del mismo. También se cuantificó la disponibilidad de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en el suelo (método DTPA) y el contenido de metales presente en las diferentes partes de la planta de maíz, que se cultivaron en los suelos estudiados.

De manera general se encontró que todos los parámetros determinados, propiedades del suelo y micronutrientes disponibles, muestran un incremento en los primeros años después de la aplicación de los biosólidos, alcanzan un valor máximo en los primeros dos o tres años y a partir de ese momento decrecen hasta llegar a los niveles del testigo. Esto varía de parámetro a parámetro en cuanto al año en que alcanzan su máximo valor, pero la tendencia general es la misma.

El pH, el contenido de MO, la CIC, el $N-NO_3^-$ y la CE muestran el comportamiento descrito arriba. A partir del testigo, sus valores se incrementan después de un año de agregados los biosólidos y alcanzan sus valores máximos dos años después de la

aplicación. A partir de ese momento empieza un decremento en estos valores, que al cuarto año son más bajos, alcanzando los niveles del testigo.

El parámetro que parece determinar el comportamiento observado en la fertilidad del suelo a través del tiempo después de la adición de los biosólidos, es el contenido de materia orgánica que los biosólidos proporcionan al suelo. Tanto por su cantidad como por su tipo.

La materia orgánica tiene un papel determinante, no solo en la biodisponibilidad y la redistribución de metales pesados como se determinó anteriormente, sino en la variación de los parámetros de fertilidad del suelo. Influye en el pH del suelo, en la capacidad de intercambio catiónico, en el contenido de nitrógeno total, etc. Retiene y libera metales y es una fuente de elementos esenciales para el desarrollo de las plantas (Tan 1994).

Como se mencionó anteriormente, no solo la cantidad de materia orgánica es importante sino también su tipo; es esto último lo que parece determinar el periodo en el cual la fertilidad de los suelos enmendados alcanza su máximo. Por su origen y el método utilizado para la estabilización de los biosólidos (digestión anaerobia), se deduce que compuestos como los carbohidratos, amino ácidos, proteínas, ácidos orgánicos, lípidos, etc. han sido descompuestos durante el proceso de estabilización.

Por lo tanto, y de acuerdo con los resultados observados, estas situaciones sugieren que al llegar los biosólidos al suelo, la materia orgánica presente en ellos, sufre un proceso de humificación. El hecho de que el contenido de materia orgánica, muestre su valor más alto después de dos años de aplicados los biosólidos parece confirmar esta hipótesis. Sin embargo, al tercer año después de la adición de los biosólidos el contenido de materia orgánica comienza una tendencia decreciente. Esto sugiere, que si bien existió un proceso de humificación, el principal producto de este proceso fueron los ácidos fúlvicos. Estos ácidos a diferencia de los ácidos húmicos tienen una estructura más sencilla, menor peso molecular y son más fácilmente degradables por la acción microbiana (Labrador 2001). Lo que explicaría el periodo tan corto en que los biosólidos muestran sus efectos positivos sobre la fertilidad del suelo.

En cuanto a la disponibilidad de los metales pesados extraíbles con DTPA, los micronutrientes esenciales (Fe, Cu, Mn y Zn) muestran un comportamiento similar al de los parámetros de fertilidad. Esto demuestra que la disponibilidad de los micronutrientes también está relacionada con la dinámica que la materia orgánica tiene en el suelo. Incluso el Pb y el Ni tienen la misma tendencia.

A pesar del incremento temporal en la disponibilidad de los metales extraíbles con DPTA, únicamente el Cu y el Zn están presentes en todas las partes de la planta y el níquel se detectó solamente en la raíz. La concentración de Cu y Zn en el tejido vegetal muestra el mismo patrón de variación con respecto a la antigüedad de aplicación de los biosólidos al suelo, que el encontrado para el contenido de materia orgánica y los demás parámetros agronómicos. La mayor presencia de estos dos elementos se da en todas las partes de la planta que fue muestreada en el suelo con dos años de antigüedad de la adición de biosólidos. La hoja y el grano presentaron las concentraciones más altas de Zn. Las de Cu en la raíz y en la hoja (Castro *et al.* 2009). La diferencia en la movilidad de estos elementos en la planta explicaría esta situación. El Cu es un elemento inmóvil y el Zn un elemento móvil y se trasloca con mayor facilidad de la raíz a las partes aéreas de la planta (Baker 1990, Alcántar *et al.* 2007).

De las propiedades del suelo, el pH y la materia orgánica, son los que controlan la dinámica de las reacciones que ocurren allí. La biodisponibilidad de metales pesados, la redistribución de los mismos en las diferentes fracciones sólidas de los suelos enmendados con biosólidos, así como el suministro de micro y macronutrientes, están en función de esos dos parámetros. El aporte de materia orgánica que los biosólidos le proporcionan al suelo, es el factor clave para la retención de metales pesados y su baja biodisponibilidad y para el incremento en la fertilidad del mismo.

El incremento en la fertilidad de los suelos agrícolas de La Paz Tlaxcolpan por la aplicación de biosólidos, es el punto de partida que da inicio a la segunda parte del proyecto de investigación. La evaluación del efecto económico y social que el uso de estos biosólidos ocasiona en esta comunidad, partiendo del beneficio ambiental generado al suelo al incrementar la fertilidad.

El mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan, repercute necesariamente en el cultivo de maíz ahí desarrollado y en consecuencia influye en las características de la planta y en los rendimientos obtenidos. Para evaluar los beneficios económicos y sociales generados a los productores de la localidad que aceptaron aplicar biosólidos a sus terrenos de cultivo, se realizó una encuesta entre los mismos, usando como instrumento un cuestionario para obtener los datos requeridos.

La información obtenida muestra que el incremento en los rendimientos a consecuencia de una mayor fertilidad en los suelos mejorados con biosólidos es un hecho que confirmaron los productores entrevistados. En mayor o menor medida han reportado mayores rendimientos. En primera instancia se suponía que este hecho debía traer beneficio económico a los productores. Sin embargo, en apreciación de ellos mismos, el beneficio es mínimo para la gran mayoría. Al no existir un beneficio económico significativo, los beneficios sociales son prácticamente nulos (mejoras en vivienda, servicios básicos, mejor alimentación).

Uno de los principales factores que influyen en esta situación es el minifundio. La mayoría de los productores poseen entre una y dos hectáreas (46.2%) y un 12.6% poseen menos de una. En total un 58.8% tienen dos hectáreas o menos. Esto implica que estos productores tienen menos superficie de cultivo para destinar al mejoramiento con biosólidos. Por ende, su producción total será menor que la de aquellos productores que poseen tres o cuatro hectáreas. Los cuales son únicamente el 4.2% y que están en posibilidad de destinar más superficie para que se depositen biosólidos.

En los productores que poseen más superficie de cultivo se refleja más el beneficio económico por obtener mayor producción total. Son los que destinan más cosecha para venta, obteniendo mayores ingresos económicos, los que aprovechan más la producción de rastrojo (en venta o para consumo de sus animales), los que siempre utilizaban fertilizante mineral y que ahora ya no lo usan por la aplicación de biosólidos y por lo tanto el ahorro de ese gasto es apreciable.

Para los productores con menor cantidad de superficie la situación es diferente. Aunque se incrementaron sus rendimientos, ellos no destinan parte de la cosecha para venderla. Su cosecha es destinada para autoconsumo y para sus animales. Este sería el beneficio más tangible para estos productores. Tienen más alimento para consumir por un mayor periodo antes de tener que comprar el maíz. Estos productores nunca fertilizaban sus terrenos o en ocasiones aisladas. Por lo tanto el ahorro por la compra de fertilizante no se puede cuantificar.

En cuanto a los beneficios sociales, cuyos indicadores serían la obtención de servicios básicos (agua potable, energía eléctrica, línea telefónica), mejoras en vivienda o mejor alimentación. Prácticamente no existen. Solamente dos productores lograron obtener servicios básicos a partir de sus ganancias por mayores rendimientos por la aplicación de biosólidos. Y son los que poseen mayor cantidad de superficie de cultivo. Por otra parte ningún productor hizo mejoras a su vivienda y los hábitos alimenticios no cambiaron. Únicamente dijeron comer más de su alimentación habitual.

La percepción general de los productores sobre los beneficios obtenidos por el uso de los biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas es que este ha sido poco.

A pesar de que la aplicación de biosólidos en el agroecosistema de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan ha tenido un efecto ambiental positivo para el recurso natural suelo, de acuerdo con la evidencia científica encontrada en este trabajo de investigación y de que los rendimientos se han incrementado en algunos casos hasta en un 300% según palabras de los propios productores, los beneficios económicos y sociales son mínimos. Por lo tanto es necesario reconsiderar si la forma en que se están aplicando los biosólidos es la más adecuada en cuanto a dosis, manejo, etc. Y establecer la enorme necesidad de llenar los vacíos de información y datos científicos que harían de la aplicación de biosólidos en la zona, una práctica más redituable tanto ambiental como económicamente para los productores.

Si bien el objetivo del SOAPAP de distribuir los biosólidos que se generan en las cinco plantas de tratamiento de aguas residuales que operan en la ciudad de Puebla

de Zaragoza y a la vez aprovecharlos como enmiendas agrícolas, evitando así una mayor contaminación ambiental, se está cumpliendo, los beneficios sociales tácitos que reciben los productores que permiten la incorporación de los biosólidos en sus tierras de cultivo son muy limitados y en general no son percibidos por ellos, esto pone en duda la expectativa que pudiera generar una aplicación de biosólidos en cuanto a los beneficios económicos que pudieran obtenerse de ella.

CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con los resultados y las evidencias encontradas, a partir de la investigación realizada respecto al problema de investigación planteado, es posible establecer conclusiones sobre la aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas y sus efectos ambientales, económicos y sociales en la zona de estudio.

Respecto a los efectos ambientales, se concluye lo siguiente:

- La biodisponibilidad de los metales pesados, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, no aumenta en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen urbano, y no se incrementa al transcurrir el tiempo (el periodo de estudio fue de seis años). Esto indica que el riesgo de su absorción por las plantas de maíz y por lo tanto su ingreso a las redes tróficas es mínimo. Esto reduce notablemente el peligro para la salud humana y animal, en la población de La Paz Tlaxcolpan. El impacto ambiental negativo de los biosólidos en el suelo, en este aspecto es casi nulo. Con esto se cumple el primer objetivo específico planteado en esta investigación y de acuerdo a la evidencia científica encontrada, la primera hipótesis específica formulada se rechaza.
- Los suelos en donde se aplicaron biosólidos de origen urbano, incrementaron su condición de fertilidad temporalmente. Los valores de los indicadores seleccionados para medir la fertilidad de los suelos enmendados con biosólidos (pH, materia orgánica, Nt, CIC, los micronutrientes Fe, Cu, Mn y Zn), se incrementaron marcadamente durante los siguientes cuatro años después de la aplicación de los residuos. El segundo año después de la aplicación muestra la fertilidad más elevada. Este es un efecto ambiental positivo que los biosólidos ocasionan en el recurso natural suelo. Aunque es temporal. Con esto se cumple el segundo objetivo específico planteado y de acuerdo a la evidencia científica encontrada, la segunda hipótesis específica formulada no se rechaza.

Respecto a los efectos económicos y sociales, se concluye lo siguiente:

- Existe un incremento en los rendimientos de maíz en las parcelas que los productores de La Paz Tlaxcolpan destinan para que se apliquen biosólidos. Los beneficios económicos y sociales que pudieran desprenderse de este hecho son muy pobres de acuerdo con los mismos productores. Sin embargo esos beneficios económicos y sociales aunque mínimos son apreciados por los productores y están dispuestos a seguir empleando biosólidos en sus parcelas. Con esto se cumple el tercer objetivo específico planteado y de acuerdo con la evidencia encontrada, la tercera hipótesis específica formulada no se rechaza.
- A pesar de que los efectos ambientales son positivos (en un periodo de seis años de estudio). Y de que existe un aumento en los rendimientos que producen beneficios económicos y sociales mínimos, la aplicación de biosólidos en la localidad de La Paz Tlaxcolpan sin procedimientos sistémicos de manejo la vuelve potencialmente riesgosa. Los principales problemas detectados son: incertidumbre sobre las dosis adecuadas a los cultivos, mala distribución de los biosólidos en las parcelas, aplicación en terrenos con más de 5% de pendiente, ausencia de seguimiento y monitoreo por parte del SOAPAP, etc. Si estos problemas no son atendidos y solucionados de manera integral, a largo plazo pueden presentarse problemas de tipo ambiental y de improductividad de las parcelas, además de un posible ensalitramiento del suelo, ocasionados por sobredosis de biosólidos.

Sobre el objetivo y la hipótesis generales:

- El objetivo general de este trabajo de investigación se cumplió: determinar los efectos ambientales en suelos agrícolas de temporal del sur del municipio de Puebla que han sido enmendados con biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y evaluar el beneficio económico-social que esta práctica reditúa a los productores.
- En el presente trabajo de investigación no se encontró evidencia para rechazar la hipótesis general planteada al inicio del mismo: La aplicación de biosólidos

como enmiendas agrícolas impacta positivamente el agroecosistema y beneficia a los productores de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan.

ESTRATEGIA PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL, EFICIENTE Y SIN RIESGOS AMBIENTALES DE BIOSÓLIDOS EN SUELOS AGRÍCOLAS EN LAS COMUNIDADES RURALES DEL SUR DEL MUNICIPIO DE PUEBLA

De acuerdo con los datos y la información mostrados en los capítulos anteriores, en los cuales se documentan los beneficios y las desventajas (tanto en el aspecto ambiental como en el económico-social) inherentes a la aplicación de biosólidos de origen urbano en los suelos agrícolas de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan, municipio de Puebla, es posible establecer algunas líneas de acción para conformar una estrategia general, viable y factible, para mejorar y optimizar el uso y manejo de biosólidos como enmiendas agrícolas.

Esta estrategia está enfocada, por un lado, a producir un mayor beneficio económico para los productores de la zona y que esto pueda redundar en un mejoramiento de su nivel de vida. Por otro lado, se busca la conservación del recurso natural suelo, el mejoramiento de sus características de fertilidad y la disminución de los riesgos de su contaminación por metales pesados y su posible ingreso a las redes tróficas.

Con la información obtenida en los capítulos precedentes es posible establecer cuáles son los aspectos que deben ser modificados, mejorados e instrumentados en su caso, para que el uso de biosólidos en suelos agrícolas en el sur del municipio de Puebla, sea una práctica basada en la investigación científica y cumpla al menos con uno de los principios básicos de la sustentabilidad agrícola, el reciclaje, como punto de partida en el manejo ecológico de los recursos naturales (Tommasino 2005).

De acuerdo con las evidencias obtenidas, el problema central de la aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas en la comunidad de La Paz Tlaxcolpan, no es la calidad de los biosólidos, ni el rechazo por parte de los productores, sino el “manejo inadecuado, ineficiente y riesgoso que se hace de estos residuos, tanto por parte del SOAPAP como de los productores”.

Causas y efectos del manejo inadecuado, ineficiente y riesgoso de biosólidos

El uso y manejo inadecuado e ineficiente de biosólidos de origen urbano como mejoradores de suelos agrícolas es producto de varias causas identificadas. La falta de recursos humanos, materiales y económicos destinados a esta área por parte de la Institución que propone esta práctica, hasta la falta de información, la integración de la información ya existente, la falta de investigación científica dirigida, y la carencia de un programa de capacitación para uso y manejo, son algunas de las causas que originan el problema central (**Figura E.1**). Entre los efectos que el problema central produce, están la baja productividad de las parcelas, bajos ingresos económicos para los productores y el riesgo de contaminación del suelo por metales pesados.

Medios y fines para lograr un manejo integral, eficiente y sin riesgos de los biosólidos

Las causas que propician el problema central detectado deberán ser atacadas a efectos de convertirlas en condiciones positivas que son deseadas y viables de ser alcanzadas. Cuando estas causas desaparezcan el problema podrá ser solucionado. Es decir cuando existan suficientes recursos humanos, materiales y económicos por parte del SOAPAP, cuando exista la investigación necesaria dirigida a objetivos, cuando la información científica existente sea integrada y aprovechada para generar el conocimiento básico que redunde en la capacitación del personal del SOAPAP y de los productores sobre las condiciones óptimas del manejo de los biosólidos. Por lo tanto el objetivo específico a cumplir se transforma en la situación esperada y corresponde a la solución del problema central identificado.

Definición de objetivos

El objetivo específico de la estrategia es: “Lograr un manejo integral, eficiente y sin riesgos de los biosólidos en la zona de estudio”.

Al cumplir el objetivo específico se dará fin a los efectos negativos del problema central (**Figura E.1**), es decir a los riesgos ambientales, a la baja productividad de los suelos, a los bajos ingresos económicos de los productores, etc. Por lo tanto el objetivo general es: “Aumentar la productividad de los suelos agrícolas enmendados

con biosólidos, disminuir los riesgos de contaminación y beneficiar económicamente al productor”

La lógica de la intervención de la estrategia se muestra en la **Figura E.2**. Primero se han establecido las actividades que van a conducir al logro de los resultados, los resultados son los medios que llevan a alcanzar el objetivo específico, el cual una vez logrado establecerá las bases para cumplir con el objetivo general de la estrategia.

Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA)

En la **Figura E.3** se muestra la matriz de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) que se aplica al objetivo específico de la estrategia que es: “lograr un manejo integral, eficiente y sin riesgos de los biosólidos en la zona de estudio”. En esta parte se identifican las fortalezas y debilidades del entorno que pueden influir en el logro del objetivo específico, sobre la base de las potencialidades y limitaciones establecidas en el análisis de la situación estudiada.

Estrategia propuesta para el manejo integral, eficiente y sin riesgos ambientales de biosólidos en la zona de estudio

En el **Cuadro E.1** se muestra la matriz de objetivos y estrategias para el uso eficiente y adecuado de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas.

Considerando que la estrategia es un conjunto de orientaciones prioritarias que establecen el camino elegido para alcanzar un objetivo (Silva-Lira 2003). En el **Cuadro E.1** se muestran las acciones propuestas, orientadas hacia la consecución de, en primer lugar, hacer un uso y manejo integral, más eficiente y sin riesgos de los biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas y una vez alcanzado esto, lograr que las parcelas de los productores sean más productivas, conservar y mejorar el recurso suelo y evitar el riesgo de contaminación por metales pesados. El alcanzar estos logros puede redundar finalmente en un mejoramiento del nivel de vida de los productores y sus familias.

De esta manera, y de acuerdo con Crites *et al.* (2000), se estaría enfatizando la aplicación de residuos al suelo de una manera que proteja la salud humana y animal,

salvague los recursos naturales agua y suelo y mantenga la calidad del ecosistema a largo plazo. Lo cual concuerda con los criterios del desarrollo sustentable de mejorar la calidad de vida sin exceder la capacidad de asimilación de los residuos por los ecosistemas en los cuales se depositan (Rojas 2003).

Cuadro E.1. Matriz de objetivos y estrategias

OBJETIVO GENERAL: Aumentar la productividad de los suelos, disminuir los riesgos de contaminación y beneficiar económicamente a los productores.	
Objetivo específicos:	Estrategias:
Lograr un manejo integral y eficiente de los biosólidos en la zona de estudio.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conformación e integración de un cuerpo de conocimiento, constituido por los aportes de las diferentes investigación realizadas sobre el uso de biosólidos en suelos agrícolas en la zona de estudio. 2. Elaboración de manuales sobre el uso y manejo de biosólidos en campo. 3. Iniciar programas de capacitación para los productores que acepten aplicar biosólidos en sus parcelas. 4. Fomentar e incentivar la investigación en ésta área del conocimiento, por parte del SOAPAP. 5. Elaboración de programas de supervisión y seguimiento en todas las etapas del proceso de aplicación de biosólidos en suelos agrícolas en la zona de estudio. 6. Evaluar con precisión las bondades económicas del programa de aplicación de biosólidos en suelos agrícolas.

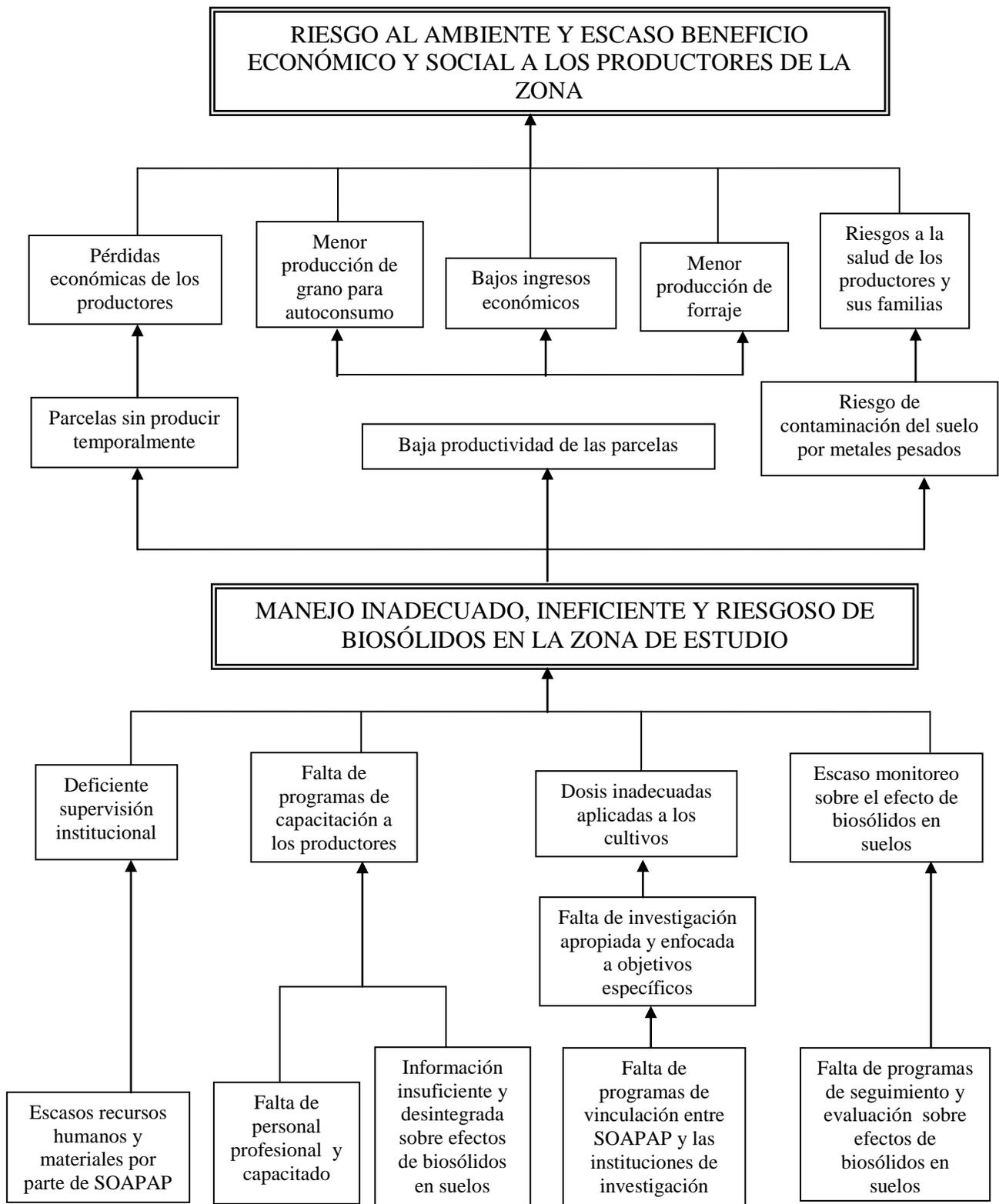


Figura E.1. Causas y efectos del problema central identificado

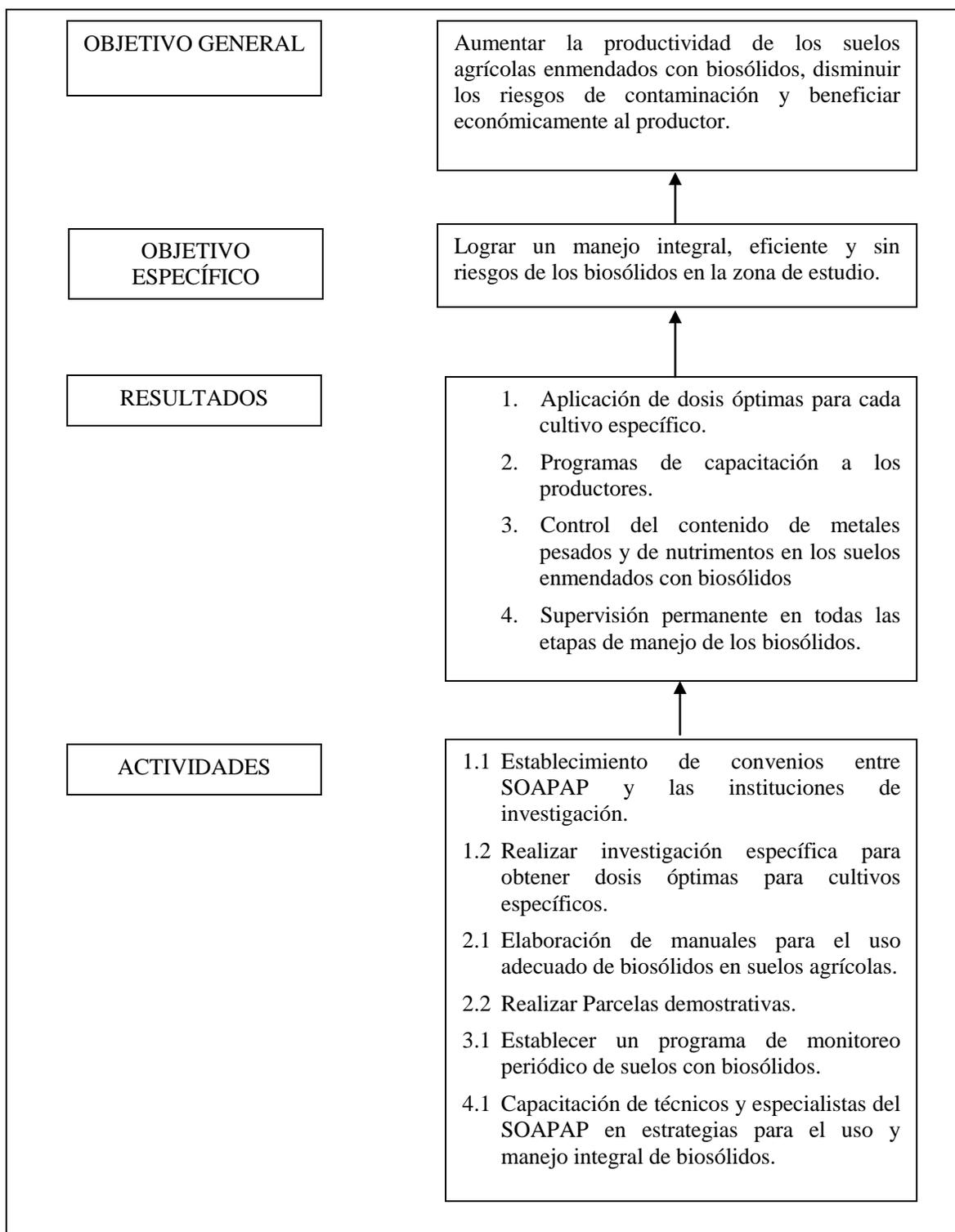


Figura E.2. Definición de objetivos

<p>OBJETIVO ESPECÍFICO Hacer un uso eficiente y adecuado de los biosólidos en la zona de estudio</p>	<p>FORTALEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aceptación del uso de biosólidos por parte de los productores de la zona. • Fuerte vinculación entre productores y el SOAPAP. • Existencia de información en investigación sobre biosólidos y sus efectos en suelos de la zona de estudio. • Buena calidad de los biosólidos de acuerdo a la normativa mexicana vigente. 	<p>DEBILIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falta de capacitación e información a los productores. • Escasa supervisión por parte de SOAPAP para dar seguimiento al uso de biosólidos en suelos. • Falta de integración de la información científica existente, producto de las investigaciones realizadas al respecto.
<p>OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Extender el uso de biosólidos a otras zonas aledañas. • Diversificar el uso de biosólidos a otros cultivos (además del maíz). • Realización de más investigación sobre los efectos de los biosólidos en suelos y cultivos. 	<p>POTENCIALIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aceptación del uso de biosólidos en otras regiones del estado. • Uso de biosólidos en otros cultivos de temporal de la zona. • Integración y sistematización de la información científica existente sobre la calidad y el uso de biosólidos en la zona. 	<p>DESAFÍOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lograr la integración y coordinación de todos los actores involucrados (SOAPAP, productores, investigadores) en el uso de biosólidos en suelos agrícolas y sus consecuencias ambientales.
<p>AMENAZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Producir biosólidos de menor calidad. • Desinterés institucional en mejorar el programa de uso de biosólidos en suelos agrícolas. 	<p>RIESGOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exceder las dosis recomendadas para cada cultivo por desinformación de los productores. • Acumulación de metales pesados en el suelo. 	<p>LIMITACIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Escasos recursos humanos, materiales y económicos destinados por SOAPAP al programa de uso agrícola de biosólidos. • Inexistente aportación económica por parte de SOAPAP a la investigación sobre el uso de biosólidos en suelos.

Figura E.3. Matriz de análisis FODA

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Alcántar G., Trejo-Téllez L., Fernández L. y Rodríguez M. N. (2007). Elementos esenciales. En: Nutrición de cultivos (G. Alcántar y L. I. Trejo-Téllez, Ed.). Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa, México D. F., pp. 7-47.
- Altieri M. A. (1999). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay, 339 pp.
- Altieri M. A. y Nicholls C. I. (2000). *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable*. ONU-PNUMA, México, D. F. 257 pp.
- Andrade M.L., Marcet P., Reyzábal M.L. y Montero M.J. (2000). Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología*, 7 (3), 21 – 29.
- Antoniadis V. y Alloway B. J. (2003). Influence of time on the plant availability of Cd, Ni and Zn after sewage sludge has been applied to soils. *Agrochimica*, 47, 81-93.
- Azevedo M.L., Ferracciú L.R. & Guimaraes L.R. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60, 793 – 806.
- Bacon J. R., Hewitt I. J. y Cooper P. (2005). Reproducibility of the BCR sequential extraction procedure in a long term study of the association of heavy metals with soil components in an upland catchment in Scotland. *Sci. Total Environ.* 337, 191-205.
- Baker D. E. (1990). Copper. En: Heavy metals in soils (B. J. Alloway, Ed.). Blackie and Son, Glasgow, Scotland, pp. 151-176.
- Banerjee M.R., Burton D.L. & Depoe S. (1997). Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. *Agri, Ecosis. & Environ.* 66, 241 – 249.
- Barry G.A., Chudek P.J., Best E.K., & Moody P.W. (1995). Estimating sludge application rates to land based on heavy metals and phosphorus sorption characteristics of soil. *Water Research*, 29, 2031 – 2034.
- Basta N. T., Ryan J. A. y Chaney R. L. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34, 49-63.

- Bustillo-García L. y Martínez Dávila J. P. (2008). Los enfoques del desarrollo sustentable. *Interciencia*, 33 (5), 389 – 395.
- Castañeda H. E. (2005). Metodología para el diagnóstico de agrosistemas y evaluación de la sustentabilidad en Cuilapam de Guerrero, Oaxaca. Tesis de Doctorado, Colegio de Postgraduados, Puebla, Puebla, 273 pp.
- Castro E., Mañas P. y De las Heras J. (2009). A comparison of the application of different waste products to a lettuce crop: effects on plant and soil properties. *Sci. Hortic.* 123, 148-155.
- Common M. y Stagl S. (2008). *Introducción a la economía ecológica*. Reverté, Barcelona, España, 562 pp.
- CONAPO (2005). Índices de marginación 2005. Consejo Nacional de Población. México D. F. 334 pp.
- CONEVAL (2005). Mapas de pobreza por ingresos y rezago social. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. México D. F. 505 pp.
- Covelo E. F., Vega F. A. y Andrade M. L. (2007). Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components. *J. Hazard. Mat.* 140, 308-315.
- Crites R. L., Reed S. C. and Bastian R. K. (2000). *Land Treatment systems for municipal and industries wastes*. McGraw-Hill, New York, pp. 336.
- Crites R. y Tchobanoglous G. (2001). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, 776 pp.
- De la Rosa D. (2008). *Evaluación agroecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible*. Mundi-Prensa, Madrid, España, 404 pp.
- De las Heras J., Mañas P. y Labrador J. (2005). Effects of several applications of digested sewage sludge on soils and plants. *J. Environ. Sci. Heal. Part A* 40, 437-451.
- Delgado-Arroyo M. M., Porcel-Cots M. A., Miralles-De Imperial Hornedo R., Beltrán Rodríguez E. M., Beringola L. & Martín Sánchez J. V. (2002). Sewage sludge compost. Effect on maize and soil heavy metal concentration. *Rev. Int. de Cont. Amb.* 18 (3), 147- 150.

- Eckenfelder Jr, W.W. (1980). *Principles of Water Quality Management*. CBI Publishing Company. Boston, 385 pp.
- Galafassi G. P. (1998). Aproximación a la problemática ambiental desde las ciencias sociales. Un análisis desde la relación naturaleza-cultura y el proceso de trabajo. *Theorethikos*. 1 (6), 1-14.
- Galafassi G. P. (2004). *Naturaleza, sociedad y alienación*. Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay, 168 pp.
- García-Córdoba F. (2009). *El cuestionario*. Limusa, México D. F., 120 pp.
- Glissman S. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 350 pp.
- Godfree A. y Farrell J. (2005). Processes for managing pathogens. *J. Environ. Qual.* 34, 105-113.
- González de Molina M. (2010). Sociedad, naturaleza, metabolismo social. Sobre el estatus teórico de la historia ambiental. En: Agua, poder urbano y metabolismo social (R. Loreto-López, Ed.). Colecc. Estudios urbanos y ambientales. Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades "Alfonso Vález Pliego", BUAP, Puebla, pp. 217-243.
- Hendel V. (2009). Sociedad, naturaleza y nuevas tecnologías. Un primer acercamiento a la problemática del monocultivo de soja en el partido de San Andrés de Giles. *Rev. Theomai*. 20, 62-80.
- Henze M., Harremoës P., La Cour Jansen J y Arvin E. (2002). *Wastewater treatment. Biological and chemical processes*. 3ª ed. Springer. Berlin, Germany, 430 pp.
- Hernández-Herrera J.M., Olivares-Sáenz E., Villanueva-Fierro I., Rodríguez-Fuentes H., Vázquez-Alvarado R. y Pisan-Zúñiga J.F. (2005). Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21 (1), 31 – 36.
- Hernández-Sampieri R., Fernández-Collado C. y Baptista-Lucio P. (2008). *Metodología de la investigación*. 4ª ed. McGraw-Hill, México, D.F., 850 pp.

- Horan N. J., Fletcher L., Betmal S. M., Wilks S. A. y Keevil C. W. (2004). Die-off of enteric bacterial pathogens during mesophilic anaerobic digestion. *Water Res.* 38, 1113-1120.
- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Puebla, Puebla. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Manual. Aguascalientes, Ags. 7 pp.
- Kabata-Pendias A. y Pendias H. (2000). *Trace elements in soil and plants*. CRC Press, Michigan, 432 pp.
- Kroiss H. (2003). Wastewater sludge management – the challenges. What are the potentials of utilising the resources in sludge? In: *Biosolids 2003 – Wastewater Sludge as a Resource*. June 23-25, 2003. Trondheim, Norway.
- Külling D., Stadelman F. & Herter U. (2001). Sewage sludge – fertilizer or waste? UKWIR Conference Brussels. Brussels, Belgium. October 30-31, 2001.
- Labrador J. (2001). *La materia orgánica en los agrosistemas*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 293 pp.
- Lindsay B. & Logan T. (1998). Field response of soil physical properties to sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 27, 534 – 542.
- McGrath S. P., Zhao F. J., Dunham S. L., Crosland A. R. y Coleman K. (2000). Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. *J. Environ. Qual.* 29, 875-883.
- Martínez-Alier J. (2008). Decrecimiento sostenible. *Ecol. Pol.* 35, 37-41.
- Martínez C. R. (2004). Fundamentos culturales, sociales y económicos de la agroecología. *Ciencias Sociales*, 103, 93-102.
- Maschiorretto M.M., Bruning H., Loan N.T.P. & Rulkens W.H. (2002). Heavy metals extraction from anaerobically digested sludge. *Water Sci. & Tech.* 46 (10), 1– 8.
- McBride M.B. (1995). Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective. *J. Environ. Qual.*, 24, 5 – 18.

- Metcalf y Eddy. (2003). *Wastewater engineering. Treatment, disposal and reuse*. Internacional Edition. McGraw-Hill, New York, 752 pp.
- Naidu R., Bolan N.S., Kookana R.S., & Tiller K.G. (1994). Ionic-strenght and pH effects on the sorption of cadmium on the surface charge of soils. *Environ. J. Soil Sci.* 45, 419 – 429.
- Nogueira T. A. R., Melo W. J., Fonseca I. M., Marcussi S. A., Melo G. M. P. y Marques M. O. (2010). Fraccionation of Zinc, Cd and Pb in a tropical soil after nine-year sewage sludge applications. *Pedosphere*, 20 (5), 545-556.
- Nouri J., Alloway B. J. & Peterson P. J. (2001). Forms of heavy metals in sewage sludge and soil amended with sludge. *Pakistan J. Biol. Sci.* 4(12), 1460 – 1465.
- Odum H. T. (1980). *Ambiente, energía y sociedad*. Blume, Barcelona, 350 pp.
- O'Connor G. A., Elliot H. A., Basta N. T., Bastian R. K., Pierzynski G. M., Sims R. C. y Smith Jr. J. E. (2005). Sustainable land application: An overview. *J. Environ. Qual.* 34, 7-17.
- Oliveira F.C., & Mattiazzo M.E. (2001). Metais pesados em latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana de acucar. *Scientia Agricola*, 58, 581 – 593.
- Ortiz-Hernández M. L., Sánchez-Salinas E. y Gutiérrez Ruiz, M. (1999). Efectos de la adición de lodos residuales sobre un suelo agrícola y un cultivo de maíz. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 15 (2), 69–77.
- Pavlosthatis S. G. y Giraldo-Gómez E. (1991). Kinetic of anaerobic treatment: a critical review. *Crit. Rev. Environ. Cont.* 21, 411-490.
- Pires A.M.M., y Mattiazzo, M.E. (2003). Biosolids conditioning and the availability of Cu and Zn for rice. *Scientia Agricola*, 60, 161 – 166.
- Quinteiro-Rodríguez M.P., Andrade-Couce M.L. y De Blas-Varela E. (1998). Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: experiencia de campo. *Edafología*, 5, 1 – 10.
- Rauret G., López-Sánchez J. F., Sahuquillo A., Barahona E., Lachica M., Ure A.M., Davison C.M., Gomez A., Lück D., Bacon J., Yli-Halla M., Muntau H. y Quevauviller Ph. (2000). Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents

in sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content. *J. Environ. Monit.* 2, 228-233.

Renner R. (2000). Sewage sludge, pros & cons. *Environ. Sci. & Tech.* 34, 1–19.

Rojas S. R. (2002). *Guía para realizar investigaciones sociales*. 34^a, Plaza y Valdez, México D. F., 437 pp.

Rojas H. J. (2003). Paradigma ambiental y desarrollo sustentable. En: *Conceptos básicos sobre medio ambiente y desarrollo sustentable* (J. Rojas y O. Parra Ed.) INET-GTZ, Buenos Aires, pp. 13-29.

Rulkens W.H. (2003). Energy from sludge: an overview and brief evaluation of most important options. In: 2nd International and 13th National Conference on Renewable Energy Sources. February 3-5. Czestochowa, Poland.

Schiffman S. S. y Williams C. M. (2005). Science of the odor as a potential health issue. *J. Environ. Qual.* 34, 129-138.

SEMARNAT (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993. Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. *Diario Oficial de la Federación*. 2 de Octubre de 1993.

SEMARNAT (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 31 de Diciembre de 2002.

SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*. 15 de Agosto de 2002.

Silva-Lira I. (2003). Metodología para la elaboración de estrategias de desarrollo local. Serie Gestión Pública No. 42. ILPES-CEPAL, Santiago de Chile, 64 pp.

Singh R. P. y Agrawal M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Manag* 28, 347-358.

- SOAPAP (2006). Programa Institucional 2005-20011. Sistema Operador de Agua y Alcantarillado de Puebla. Informe. Puebla, Pue. 33 pp.
- Tan K. H. (1994). *Environmental soil science*. Marcel Dekker, New York, 304 pp.
- Toledo V. M. (1993). La racionalidad ecológica de la producción campesina. *Agroecología y Desarrollo*. 5, 1-9.
- Toledo V. M. (1995). Campesinidad, agroindustrialidad, sostenibilidad: los fundamentos ecológicos e históricos del desarrollo rural. *Cuadernos de Trabajo*. 3, 1-45.
- Toledo V. M., Alarcón-Chaires P. y Barón L. (2002). *La modernización rural de México: un análisis socioecológico*. SEMARNAT-INE-UNAM, México, D.F., 132 pp.
- Toledo V.M. y González de Molina M. (2007). El metabolismo social: las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. En: *El Paradigma ecológico en la ciencias sociales* (F. Garrido, M. González de Molina, J. L. Serrano y J. L. Solana, Ed.). Editorial Icaria, Barcelona, pp. 85-112.
- Toledo V. M. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Rev. de la Red Iberoam. Econom. Ecol.* 7, 1–26.
- Tommasino H. (2005). Sustentabilidad rural: desacuerdos y controversias. En: *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable* (G. Foladori y N. Pierri, Ed.). Ed. Miguel Angel Porrúa-Universidad de Zacatecas, México, D. F., pp. 137-16.
- Tommasino H., Foladori G. y Taks J. (2005). La crisis ambiental contemporánea. En: *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable* (G. Foladori y N. Pierri, Ed.). Ed. Miguel Angel Porrúa-Universidad de Zacatecas, México, D. F., pp 9-26.
- Tsadilas, C.D., Matsi T., Barbayiannis N., & Dimmoyiannis D. (1995). Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metals fractions. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 26, 2603–2619.

Turkdogan M.K., Kilicel F., Kara K., Tuncer I., & Uygan I. (2003). Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey. *Environ. Toxi. Pharm.* 13, 175–179.

USEPA. (1995). Standard for the use and disposal of sewage sludge; 40 CFR Parts 403 and 503. Office of Waste Management United States environmental Protection Agency. Manual. Washington, DC. 176 pp.

Vitousek P., Mooney M. H., Lubchenco J. y Melillo J. (1997). Human domination of earth's ecosystems. *Science*. 277, 494-499.