

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SALVATIERRA



**PRODUCCIÓN E INOCUIDAD DE MAÍZ (*Zea Mays* L.) POR
EFECTO DE LA APLICACIÓN DE UN BIOSÓLIDO EN UN
VERTISOL DE GUNAJUATO**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Elaborada por:

ERICK MUÑIZ ANDRADE

Para obtener el título de:

INGENIERO EN INNOVACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

Director interno: Ing. Francisco Méndez Reyes

Director externo: Dr. Aurelio Báez Pérez

Salvatierra, Guanajuato

marzo de 2025



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico Superior
de Salvatierra
Dirección General
Subdirección Académica

ANEXO XXXIII.
FORMATO DE LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

C. ING. LIZBETH ESTEFANÍA ESCOBAR PANIAGUA
Jefe del Departamento de Servicios Escolares
ITESS

PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto de titulación integral para su impresión y realización del acto de examen profesional:

Nombre del estudiante y/o egresado:	ERICK MUÑOZ ANDRADE
Carrera:	INNOVACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE
No. de control:	AG19110199
Nombre del proyecto:	PRODUCCION E INOCUIDAD DE MAÍZ (<i>Zea maíz</i>) POR EFECTO DE LA APLICACIÓN DE UN BIOSÓLIDO EN UN VERTISOL DE GUNAJUATO
Producto:	TESIS

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica

M.E. WALTER MANUEL ZÚÑIGA MALDONADO
Coordinador de Ing. Innovación Agrícola

Ing. Francisco Méndez Reyes DIRECTOR	Ing. Víctor Antonino Cortes Pérez REVISOR 1	M.E. Walter Manuel Zúñiga Maldonado REVISOR 2

* solo aplica para el caso de tesis o tesina

c.c.p. Expediente



Manuel Gomez Marin No. 300 Comunidad de Janicho, Salvatierra, Guanajuato C.P.
36973 Tels. 466 663 96 00 y 466 688 06 31 Ext. **XXXX**, e-mail:
marcos@itesse.edu.mx tecna.mx | www.itesse.edu.mx





TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SALVATIERRA
COORDINACIÓN DE INNOVACIÓN EN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

TESIS

Presentada por:

ERICK MUÑOZ ANDRADE

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título de

INGENIERO EN INNOVACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

Aprobado por

Ing. Francisco Méndez Reyes

Dr. Aurelio Báez Pérez

ME. Walter Manuel Zúñiga
Maldonado

Ing. Víctor Antonino Cortes Pérez

ME. Walter Manuel Zúñiga Maldonado

Coordinador de Innovación en Agrícola Sustentable

RESUMEN

Se efectuó un estudio para evaluar la producción e inocuidad de maíz por efecto de la aplicación de dosis crecientes de un biosólido producido por una planta de tratamiento de aguas domesticas de la empresa Ecosistemas de Celaya S.A de C.V. Los lodos residuales (biosólidos) producidos durante el tratamiento de las aguas negras, con un tratamiento adecuado, constituyen una alternativa en la aplicación de abonos orgánicos para la producción de cultivos, especialmente cereales, los cuales representan un menor riesgo de contaminación del grano, parte esencial para el consumo, el cual no tiene contacto directo con lodo residual. El estudio de efectividad biológica se llevó a cabo en instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en el Campo Experimental Bajío en Celaya, Guanajuato. Se estableció un experimento donde se evaluaron cuatro dosis del biosólido: 0, 12.5, 25 y 50 t ha⁻¹. El diseño experimental fue en bloques al azar con nueve repeticiones. El lodo se incorporó en las parcelas previo a la preparación del terreno. La producción de maíz alcanzó 8.2 t ha⁻¹ en el tratamiento testigo, sin aplicación del biosólido, y 13 t ha⁻¹ en el tratamiento con incorporación de 50 t ha⁻¹ del biosólido. El estudio microbiológico, para determinar la inocuidad biológica, reveló que las poblaciones de microorganismos dañinos en la salud humana o animal, en los tratamientos con aplicación de las diferentes dosis del biosólido, fueron semejantes a las que se encontraron en el tratamiento sin la aplicación del mismo, es decir, que la aplicación del biosólido no incidió la reproducción de poblaciones estos microorganismos más allá de las que se encuentran en forma natural en el ambiente. La apariencia física del grano fue sana y limpia. La probabilidad en la presencia de *E. coli*, fue la misma en todos los tratamientos. El estudio de metales pesados reveló que la concentración de elementos en el biosólido estuvo por debajo de lo que establece la norma; sin embargo, se prevé que una contante aplicación de grandes volúmenes del biosólido al suelo podría implicar una acumulación importante en el suelo a largo plazo.

ABSTRACT

A study was conducted to evaluate the production and safety of corn as a result of the application of increasing doses of a biosolid produced by a domestic water treatment plant of the company Ecosistemas de Celaya S.A de C.V. The residual sludge (biosolids) produced during the treatment of sewage, with adequate treatment, constitute an alternative in the application of organic fertilizers for the production of crops, especially cereals, which represent a lower risk of contamination of the grain, an essential part for consumption, which does not have direct contact with residual sludge. The biological effectiveness study was carried out at the facilities of the National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research (INIFAP), in the Bajío Experimental Field in Celaya, Guanajuato. An experiment was established where four doses of the biosolid were evaluated: 0, 12.5, 25 and 50 t ha⁻¹. The experimental design was in randomized blocks with nine replications. The sludge was incorporated into the plots prior to land preparation. Corn production reached 8.2 t ha⁻¹ in the control treatment, without application of the biosolid, and 13 t ha⁻¹ in the treatment with the incorporation of 50 t ha⁻¹ of the biosolid. The microbiological study, to determine biological safety, revealed that the populations of microorganisms harmful to human or animal health, in the treatments with application of the different doses of the biosolid, were similar to those found in the treatment without its application, that is, that the application of the biosolid did not affect the reproduction of populations of these microorganisms beyond those found naturally in the environment. The physical appearance of the grain was healthy and clean. The probability of the presence of *E. coli* was the same in all treatments. The study of heavy metals revealed that the concentration of elements in the biosolid was below what is established by the standard; However, it is anticipated that continued application of large volumes of biosolid to soil could result in significant soil accumulation over the long term.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, por la facilidad otorgadas para el desarrollo de la presente investigación.

A la empresa Ecosistema de Celaya S.A. de C.V., del grupo EPM México, por el financiamiento otorgado para este trabajo, mediante el proyecto titulado: “Estudio de efectividad biológica de los desechos sustraídos de plantas tratadoras de agua”, el cual fue convenido con INIFAP (Número SIGI: 13332933989) y llevado a cabo bajo la dirección del Dr. Aurelio Báez Pérez, investigador del INIFAP, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato.

Al instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Salvatierra (ITESS) y todos mis profesores, gracias por sus valiosas enseñanzas y mi formación académica.

Al Dr. Aurelio Báez Pérez, por la dirección del presente trabajo de investigación y la realización de esta tesis.

A mis asesores: Ing. Francisco Méndez Reyes, ME. Walter Manuel Zúñiga Maldonado e Ing. Víctor Antonino Cortes Pérez, por sus sugerencias y revisión de la tesis.

Al personal del Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del INIFAP, Campo Experimental Bajío: María del Carmen Ramírez Balderas, Mariana Lizbeth Ordaz, Leonardo Cruz García y Edgar Adrián Olivares Arreola, por su apoyo en la realización de los análisis de laboratorio.

A mis papas que, con su apoyo, perseverancia y optimismo, se pudo cumplir este sueño. También quiero agradecer a todos mis compañeros de la carrera por brindarme su amistad y todos aquellos momentos que pasamos.

DEDICATORIAS

Dedico la presente a mis Padres como agradecimiento al apoyo brindado durante estos años de estudio y como reconocimiento de gratitud al haber finalizado esta carrera.

Sabiendo que jamás existirá una forma de agradecer en esta vida de lucha y superación constante, deseo expresarles que mis ideales, esfuerzos y logros han sido también suyos y constituyen el legado más grande que pudiera recibir. Con cariño, admiración y respeto.

Por qué solo la superación de mis ideales me ha permitido comprender cada día más la difícil posición de ser padre. Mis conceptos, valores morales y mi superación se las debo a ustedes, esto será la mejor de las herencias, lo reconozco y lo agradeceré eternamente en adelante, pondré en práctica mis conocimientos y el lugar que en mi mente ocuparon los libros, ahora será de ustedes.

A ustedes que me han heredado el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo, que es el amor.

A ustedes que sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para educarme.

A quienes la ilusión de su vida ha sido verme convertido en una persona de provecho, a quienes nunca podría pagar todos sus desvelos ni aun con las riquezas más grandes del mundo, por esto y más gracias.

ÍNDICE

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
AGRADECIMIENTOS	VI
DEDICATORIAS	VII
 CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	 6
1.1. Introducción.....	6
1.1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.1.2. Justificación	7
1.2. Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo General.....	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
1.3. Hipótesis	8
 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	 9
2.1. Producción de aguas residuales	9
2.1.1. Tratamiento de las aguas residuales	10
2.1.1.1. Uso de aguas negras en México	10
2.1.2.1. Uso de aguas negras en el Bajío	11
2.2. Biosólidos	12
2.2.1. Uso de biosólidos en la agricultura.....	12
2.3. Importancia del maíz a nivel mundial.....	13
2.4. Importancia del maíz a nivel nacional	14
2.4.2. Uso de biosólidos en la producción de maíz.....	16

CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES	17
3.1. Delimitación del área de estudio	17
3.1.2. Descripción del suelo	17
3.2 Diseño estadístico	18
3.2.1 Descripción de los tratamientos	18
3.3 Manejo Agronómico	20
3.4. Temperatura y precipitación	20
3.5. Componentes de rendimiento	20
3.5.1. Población de plantas.....	21
3.5.2. Altura de Planta.	21
3.5.3. Rendimiento de Grano.	21
3.5.4. Peso Seco de Biomasa Aérea.	21
3.5.5. Peso de 200 granos.....	21
3.5.6. Índice de cosecha.....	21
3.6. Análisis Nutrimental de hoja (NPK).	22
3.6.1. Solubilización de minerales en plantas por el método de digestión húmeda	22
3.6.2 Determinación de nitrógeno total en plantas por el método microkjeldahl	23
3.6.3 Determinación de fosforo total en plantas con molibdovanadato de amonio por el método espectrofotométrico	23
3.6.4 Determinación de nutrimentos totales en plantas por espectrofotometría de absorción atómica	24
3.7. Contenido de Proteína de Grano.	24
3.8. Análisis de inocuidad microbiológica del grano	24
3.9. Análisis de metales pesados	25
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26

4.1 Temperatura y precipitación	26
4.2. Población y mazorcas	27
4.3. Altura de planta	27
4.4. Parámetros de mazorca	28
4.5. Producción de grano	28
4.6. Peso de 200 granos	29
4.7. Biomasa aérea	30
4.8. Índice de cosecha	30
4.9. Análisis de calidad de grano	30
4.2.1 Análisis microbiológico del grano	31
4.2.2 Hongos	32
4.2.3 Bacterias	33
4.2.4 Metales pesados	34
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
5.1. Conclusiones	36
5.2. Recomendaciones	36
CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA CITADA	38
CAPÍTULO VII. ANEXOS.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales países productores de maíz a nivel mundial.	14
Tabla 2 Principales Estados productores de maíz con riego a nivel Nacional.	15
Tabla 3. Características del suelo después de la incorporación del lodo biológico. ..	18
Tabla 4 Tratamientos para evaluar la efectividad biológica lodo con el cultivo de maíz.	19
Tabla 5 Resultados promedio de componente de rendimiento en maíz. Estudio de efectividad biológica de lodo biológico. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato.	27
Tabla 6 Contenido de N, P, K y proteína en grano	31
Tabla 7 Análisis microbiológico del grano	32
Tabla 8 Contenido de Metales Pesados.....	35
Tabla 9 Contenido de metales pesados en muestras de suelo al final del ciclo del cultivo.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Croquis de ubicación del Campo Experimental Bajío del INIFAP. (Lezama-Pérez, 2017).....	17
Figura 2. Distribución unidades experimentales en campo. Franjas y tratamientos. Estudio de lodos orgánicos. Campo Experimental Bajío.	19
Figura 3 Distribución diaria de precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas.	26
Figura 4 Diagrama ombrotérmico. Campo Experimental Bajío.	26
Figura 5 (a) producción de grano. (b) relación entre producción de grano y dosis crecientes de lodo residual. INIFAP, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato.	29
Figura 6 Relación entre el contenido de P y proteína en función de las dosis crecientes de aplicación del lodo biológico (biosólido).	31

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. Introducción

En la actualidad, la abundante producción de aguas negras en las grandes urbes requiere de tratamiento, como una medida de saneamiento y limpieza del medio ambiente. Sin embargo, durante el proceso la remoción de contaminantes del agua residual se generan diferentes subproductos, principalmente basuras, arenas y lodos. Estos últimos son los que se produce en mayor cantidad, tanto por su volumen, como por el tratamiento posterior que requieren. Los lodos se producen principalmente en las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario del agua residual. Para poder disponerlos para usos agrícola, es necesario estabilizarlos y desaguarlos para reducir la atracción de vectores y su volumen, el cual depende del contenido de humedad. Un lodo primario tiene de 91 a 95% de humedad, con un valor típico del 94 %. En cambio, un lodo secundario, tiene del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2% (Metcalf y Eddy, 2003). Los lodos producidos en una planta de tratamiento deben cumplir con las siguientes Normas Oficiales Mexicanas: NOM-004-SEMARNAT-2002 (NOM-004) y NOM-083-SEMARNAT-2003 (NOM-083). Los biosólidos deben ser tratados para controlar la atracción de vectores. Se recomiendan varios procesos para lograr esto, como el reducir la masa de sólidos volátiles, al menos en un 38%, durante su tratamiento. Los biosólidos también se clasifican en excelentes o buenos de acuerdo al contenido de metales pesados. Y pueden clasificarse en A, B o C de acuerdo a su contenido de patógenos y parásitos.

El presente estudio tuvo como propósito evaluar el efecto agronómico e inocuo del lodo biológico sobre el desarrollo y producción de maíz en el estado de Guanajuato. Este lodo biológico fue producido por la empresa ECOSISTEMA DE CELAYA S.A. DE C.V., la cual tiene como actividad principal la elaboración del proyecto ejecutivo, construcción, equipamiento, elaboración de pruebas y puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Celaya, Guanajuato con capacidad media de diseño de 750 litros por segundo, así como el tratamiento, transporte y disposición final de residuos sólidos y lodos que se generen en la planta. Con base en

lo anterior, este lodo es tratado por la empresa para ser utilizado como abono biológico en los cultivos de interés agrícola, sobre todo en la producción de cereales.

1.1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la degradación de los suelos impone condiciones restrictivas que limitan y disminuyen el potencial de producción y la rentabilidad de los cultivos agrícolas (Vergara *et al*, 2005). Para mejorar la degradación de los suelos y aumentar sus reservas orgánicas edáficas es necesario la aplicación continua de abonos de origen orgánico. Una opción para este propósito, donde haya abundancia y disponibilidad de éstos, es el uso de biosólidos. Ante la problemática en la escasez de agua que enfrentan tanto las urbes como el sector agrícola e industrial es necesario el reciclaje de estas aguas domésticas, lo cual implica el tratamiento de las mismas. Durante el proceso se generan gran cantidad de lodos orgánicos, los cuales, con un tratamiento adecuado, que garantice su inocuidad, pueden ser empleados como abonos orgánicos para la agricultura.

1.1.2. Justificación

La inocuidad de los lodos tratados permite su utilización como abono biológico en la producción agrícola, principalmente cereales. El contenido de materia orgánica en estos biosólidos permitiría el mejoramiento de la fertilidad de suelos degradados. Los nutrientes contenidos en los lodos ofrecen diversas ventajas en comparación con los fertilizantes inorgánicos, gracias a que pueden ser incorporados lentamente por las plantas en crecimiento. Estas formas orgánicas de nutrientes son menos solubles en agua y, por lo tanto, tienen una menor probabilidad de lixiviarse a los mantos subterránea o ser arrastradas a las aguas superficiales. Una de las propiedades más importantes de los biosólidos es el sinergismo, el cual se manifiesta al aplicarse junto con fertilizantes químicos. Sinergismo es la acción combinada de varias sustancias químicas las cuales producen un efecto total más grande que el efecto de cada sustancia por separado. Esta propiedad permitiría reducir entre el 15 y 50 % la dosis de fertilizante químico que generalmente se aplica a los cultivos, con el mismo potencial de producción que, sólo la aplicación de fertilizante químico; es por ello que

se buscan implementar tecnologías para mejorar la fertilidad de los suelos y la productividad agrícola, para lograr así elevar los rendimientos de cultivos de importancia agrícola, en especial cereales (Crespo *et al.*, 2007).

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar el efecto agronómico e inocuo del lodo biológico sobre el desarrollo y producción en el cultivo del maíz.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar los parámetros de estimación de efectividad biológica en la producción de maíz.
- Evaluar el efecto de la acumulación de metales pesados en el suelo por efecto de la aplicación de las dosis crecientes del biosólido.
- Evaluar la inocuidad biológica del grano por efecto de la aplicación de las dosis crecientes del biosólido.
- Analizar el contenido nutrimental en grano (N, P, K y proteína) mediante un análisis de laboratorio.

1.3. Hipótesis

- La producción de maíz aumenta a medida que aumentan las dosis de aplicación de biosólidos como fertilizante orgánico
- El contenido nutrimental del grano será mayor con la dosis de aplicación más alta del biosólido.
- La acumulación de metales pesados en el suelo será mayor con la dosis de aplicación más alta del biosólido.
- La aplicación las dosis crecientes del biosólido al suelo no causará contaminación biológica del grano.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Producción de aguas residuales

En la actualidad el desarrollo industrial, la generación de energía, el crecimiento de las urbes, entre otras actividades humanas, generan graves problemas de contaminación ambiental. Lo anterior implica la presencia de sustancias nocivas en el agua, aire y suelo que son dañinas para la salud humana y las formas de vida biológicas en general. En lo referente a la demanda de agua por las urbes y para uso industrial, después de su aprovechamiento, paralelamente ocurre el deshecho del agua sucia o contaminada a través de un sistema complejo de drenajes que finalmente recolecta las aguas que se consideran residuales, las cuales son de composición variada dependiendo del origen de las descargas provenientes de las ciudades o municipios: industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuaria, doméstica, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-004-SEMARNAT-2002). Este tipo de aguas, también llamadas aguas negras, contienen residuos que incluyen tanto materiales orgánicos, que consumen o demandan oxígeno (como material fecal, restos de alimentos, aceites y grasas), como otra parte constituida por detergentes, sales, sedimentos, material orgánico no biodegradable, así como microorganismos y metales pesados. A nivel mundial el crecimiento demográfico y las exigencias de agua para uso doméstico e industrial hacen que los volúmenes de aguas negras se incrementen (Potisek-Talavera, 2010). Las aguas negras se vierten al sistema de alcantarillado, que normalmente las conduce a cuerpos de agua como mar, lagos y ríos, provocando la contaminación de aguas naturales. Es sumamente importante que, antes de su vertido a los cauces receptores, puedan ser tratadas para minimizar su impacto contaminante sobre el ambiente. En México, las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales están supeditadas por la NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes.

2.1.1. Tratamiento de las aguas residuales

En México, la necesidad del tratamiento de aguas negras para su reúso y atenuar la contaminación ambiental es cada vez más apremiante; sin embargo, la infraestructura actual en el país para este propósito es insuficiente. Conagua (2019) señaló que en el país existen actualmente 3,661 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, de las cuales sólo operan 2,642 (72.16 %). Las principales causas por las que éstas pueden quedar fuera de operación son diversas, pero en buena medida tiene que ver con falta de capacidad económica de los organismos operadores para el pago de insumos, falta de personal capacitado, vida útil rebasada, deficiencias en el diseño y la construcción, desinterés de autoridades locales y la insuficiencia, e incluso carencia, de alcantarillado sanitario para alimentarlas.

La mayoría de las plantas de tratamiento de aguas negras municipales inventariados por la CONAGUA (2019) tienen una capacidad instalada de hasta 10 L segundo⁻¹ (241 de 275 reportados), aunque hay algunas con flujos mucho mayores, como el que da servicio al municipio Centro en Tabasco, que es de 700 10 L segundo⁻¹. En el intervalo de hasta 10 L segundo⁻¹ de capacidad instalada, los humedales de tratamiento son los sistemas que presentan el mayor cociente de unidades en operación/unidades construidas: 0.886. Por su parte, los sistemas lagunares, 0.808 y los sistemas mecanizados (agrupación de lodos activados en todas sus modalidades, filtros percoladores o rociadores, discos biológicos y procesos duales), 0.539.

2.1.1.1. Uso de aguas negras en México

El uso de agua residual para riego agrícola no es reciente, su impacto ha sido objeto de análisis desde varias perspectivas: Según a Cabrera *et al.* (2003), Cajuste *et al.* (1991), Cifuentes *et al.* (1994), Mascareño y Guajardo (1977), Siebe (1994) y Vázquez-Alarcón *et al.* (2001) una de las zonas históricamente más importantes es el Valle de Mezquital, en el estado de Hidalgo, en la cual esta práctica tiene vigencia desde hace más de 50 años, con graves consecuencias. Valbuena *et al.* (2002) señalan que el uso de aguas residuales en la agricultura representa un riesgo para salud, debido a la alta prevalencia de infecciones entéricas en humanos.

En México, la Comisión Nacional del Agua, ente encargado de la administración del recurso natural, reportó que para el año 2006, se generaron más de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas negras o residuales en el territorio mexicano. Esta es una situación preocupante, porque no se sabe a ciencia cierta el uso y destino de la mayoría de estas aguas. Las estadísticas oficiales (CONAGUA, 2015) señalan que del total de aguas residuales municipales generadas ($228 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) sólo $111.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ recibe tratamiento, cifra que es cuestionable ya que autores como Pacheco (2007) sugieren analizar con cautela y escepticismo los datos oficiales. Por otra parte, Cuenca-Adame *et al.* (2001) reportan el uso de aguas residuales para el cultivo de hortalizas en el Estado de Morelos, con presencia significativa en los municipios de Temixco, Xochitepec, Puente de Ixtla, Zacatepec y Jojutla, donde particularmente la cebolla (*Allium cepa*) presenta contaminación por coliformes fecales y helmintos. Otros estados como el Estado de México, Colima y Puebla, también son reportados por el uso de agua negras en sus prácticas agrícolas (Gómez *et al.* 2002; Pérez, 2002). En, el norte de México, donde predominan suelos áridos y semiáridos, se viene practicando el uso de aguas residuales para actividades agrícolas, debido a la escasez de agua de buena calidad: (Rivas-Lucero *et al.*, 2003). Ésta última autora reporta que en México no es usual que los contaminantes sean removidos por el tratamiento de aguas residuales; no obstante, se han detectado trazas de metales pesados (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg y Pb), microorganismos patógenos y algunos compuestos orgánicos tóxicos en las legumbres y otros cultivos.

2.1.2.1. Uso de aguas negras en el Bajío

El uso de aguas negras en el estado de Guanajuato y otras partes del Bajío, en la actualidad, es una realidad. García-García (2001) reportó el uso de aguas negras en el Bajío en el valle Morelia-Queréndaro, Ciénega de Chapala y Tuxpan, el Distrito de Riego 097 Lázaro Cárdenas de Apatzingán, y en la llanura de Gabriel Zamora. Campesinos señalan que no tienen otra opción, por la escasez y por la sequía que azota el estado. No se sabe que superficie se riegan con este tipo de aguas para la producción de cereales. Hay reportes que en Acámbaro e Irapuato se hacen este tipo de prácticas (El correo, 2024). Sin embargo, se aplica de manera directa, sin

tratamiento previo. Esta práctica, que surge como alternativa ante la escasez de agua limpia, plantea serios riesgos para la salud y el medio ambiente, pero se ha convertido en la única opción viable para muchos campesinos que luchan por mantener su fuente de ingresos.

2.2. Biosólidos

Los biosólidos son los residuos orgánicos que resultan del tratamiento de aguas residuales de origen comercial, industrial y municipal (aguas negras). Un objetivo del tratamiento es reducir de manera significativa la concentración de organismos que causan enfermedades (también conocidos como patógenos), así como metales pesados. La utilización de los lodos residuales conocidos también como biosólidos está regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Al cumplir con dichas normas, los lodos residuales se consideran biosólidos y pueden ser aprovechados como abonos orgánicos en suelos agrícolas forestales y pastizales, como una alternativa de disposición final (Jurado-Guerra *et al.*, 2004). Los biosólidos contienen materia orgánica y varios nutrientes que contribuyen a la nutrición de las plantas (Singh y Agrawal, 2008). Mejoran las características físicas, químicas y biológicas del suelo y pueden incrementar el rendimiento de la materia seca de muchos cultivos (Andrade *et al.*, 2000; Hernández-Herrera *et al.*, 2005).

2.2.1. Uso de biosólidos en la agricultura

Los biosólidos o lodos biológicos, resultantes de tratamiento de aguas domésticas, tradicionalmente son incinerados, puestos en rellenos sanitarios o utilizados como enmiendas en suelos agrícolas (González-Flores *et al.*, 2014). Esto último es factible sólo si cumplen con los estándares adecuados de inocuidad química y biológica para poder incorporarlos a los suelos agrícolas. En estas condiciones constituyen una buena fuente de nutrientes para las plantas, y puede mejorar algunas propiedades físicas y aportar de reservas orgánicas al suelo (López, *et al.*, 2011). Los biosólidos no tratados de manera adecuada pueden contener elementos potencialmente tóxicos, por

lo tanto, constituyen un alto riesgo para la cadena alimenticia a través de los cultivos, así como la contaminar el suelo y las aguas freáticas. Los Biosólidos no tratados o mal tratados, aunque contengan alto contenido de nutrientes para las plantas, también pueden contener microorganismos patógenos y metales pesados (Pescod, 1992), lo cual son los principales factores que pueden restringir su uso en la agricultura (Chandra y Prasad 2005).

Los biosólidos pueden contribuir con el mejoramiento de la fertilidad de suelos deteriorados, y aumentar las reservas de nutrimentos disponibles para las plantas, como: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y así contribuir con la producción de los cultivos (Kara *et al.*, 2003). Se estima que los biosólidos pueden contener entre 60 y 70 % de materia orgánica; por otra parte, una tonelada de biosólidos puede contener de 37 a 50 kg de N y de 13 a 24 kg de P (Stehower, 2000). Lo anterior permitiría disminuir el uso de los fertilizantes químicos. Diversos estudios señalan bondades en el aumento de reservas orgánicas del suelo por aplicación de biosólidos (Shober *et al.*, 2003; Hernández-Herrera *et al.*, 2005). Del mismo modo, otros estudios recomiendan su aplicación de manera combinada con estiércoles y fertilizantes químicos (Hernández-Herrera *et al.*, 2005). Si los biosólidos son bien tratados La concentración de metales pesados no supera los límites que establece la Norma (NOM004SEMARNAT2002), lo que indica que la aplicación no presenta riesgos de toxicidad para los cultivos, la salud humana y la contaminación ambiental.

2.3. Importancia del maíz a nivel mundial

El maíz es un cereal que ha cobrado importancia a nivel mundial en las últimas décadas, tanto por su demanda para la alimentación, como para uso industrial. Se estima que en el mundo se producen anualmente más de 206 millones de hectáreas (Orús, 2023). En Tabla 1 se representa los principales países productores de maíz, la producción cosechada y el rendimiento promedio por hectárea. El principal país productor a nivel mundial es Estados Unidos, con un total de 2,617,864 t ha⁻¹; en segundo lugar, está Croacia, con una producción total de 1,261,070 t ha⁻¹ de maíz que produce anualmente. México destaca como productor en tercer lugar, con un total de

1,059,259.87 t ha⁻¹. Sudáfrica se encuentra en el Décimo puesto con un total de 414,735 t ha⁻¹.

Tabla 1 Principales países productores de maíz a nivel mundial.

País	Superficie		Producción	Rendimiento
	Sembrada	Cosechada		
	ha		t	t ha ⁻¹
Estados Unidos	144,353	7.987	2,617,864	18,135.2
Croacia	30,110	300.821	1,261,070	41,882.1
México	68,937	8.492	1,059,260	15,365.6
Nigeria	204,527	3.931	775,990	3,794.1
Indonesia	109,823	2.467	653,822	5,953.4
Grecia	15,436	56.881	612,502	39,680.7
Hungría	38,195	52.336	511,374	13,388.5
Francia	22,139	6.849	460,902	20,818.6
Perú	47,526	14.288	446,324	9,391.2
Sudáfrica	38,437	7.185	414,735	10,790

Fuente (Orús, 2023).

2.4. Importancia del maíz a nivel nacional

México, como país de origen del maíz, tiene gran demanda de este cereal por la población, y también para la producción de animales. En el país se siembran más de 7.6 millones de hectáreas de este cultivo (SIAP, 2023) y se producen más de 26 millones de toneladas anualmente. Sin embargo, en condiciones de riego se siembran solamente 0.84 millones de hectáreas (Tabla 2). Guanajuato ocupa el primer lugar (Tabla 2) con una producción de más de 1.3 millones de toneladas al año y un rendimiento promedio de cerca de 10 t ha⁻¹. Chihuahua, Michoacán y Sinaloa, Jalisco e Hidalgo constituyen también los principales productores de este cereal en México najo condiciones de riego. Los demás estados cuentan con poca superficie con riego. Cabe destacar Baja California que, si bien su aportación en la producción de grano a nivel nacional es baja, su rendimiento promedio por hectárea es el más alto, con más de 11.1 t ha⁻¹.

Tabla 2 Principales Estados productores de maíz con riego a nivel Nacional.

País	Superficie		Producción	Rendimiento
	Sembrada	Cosechada		
	ha		t	t ha ⁻¹
Guanajuato	139,456	131,392	1,303,080	9.918
Chihuahua	129,118	122,938	1,202,242	9.779
Michoacán	117,710	81,867	630,561	7.702
Sinaloa	46,195	45,366	446,621	9.845
Hidalgo	54,169	53,008	435,665	8.219
Estado de México	80,711	63,864	316,642	4.958
Jalisco	41,322	33,855	266,879	7.883
Zacatecas	30,318	29,656	205,449	6.928
Puebla	39,275	34,467	192,809	5.594
Querétaro	28,145	22,531	172,170	7.642

Fuente (SIAP, 2023-2024).

2.4.1. Producción de maíz en Guanajuato

En el estado de Guanajuato se producen anualmente alrededor de 1.5 millones de toneladas de maíz en alrededor de 400 mil hectáreas, de las cuales 260 mil son de temporal y 140 mil son de riego, por lo que se trata de uno de los cultivos más importantes del estado (SIAP, 2024). EL rendimiento promedio de este cereal en condiciones de riego es de cerca de 10 t ha⁻¹, mientras que en temporal es de 1.75 ton/ha. La escasez de agua. El potencial de rendimiento de maíz, en las mejores zonas productora del estado, es mayor que 16 t ha⁻¹. Predomina el uso de semillas mejoradas distribuidas por empresas como: Monsanto, Berentsen y Dupont, entre otras, y el empleo excesivo de fertilizantes y otros insumos agrícolas para la producción de este cereal en Guanajuato. De acuerdo con Peña-Cabriaes *et al.* (2001). Las prácticas de agricultura intensiva que se emplean en el estado no contemplan, en muchos casos, la incorporación de abonos orgánicos, rotación de cultivos con leguminosas o al menos la incorporación de parte de los residuos de cosecha para el mantenimiento de las reservas orgánicas de los suelos agrícolas. Debido a lo anterior hay un evidente grado de deterioro de los suelos, lo cual se traduce en una mayor demanda de insumos para la producción agrícola, entre éstos el uso de los fertilizantes nitrogenados.

2.4.2. Uso de biosólidos en la producción de maíz

Diversos estudios muestran que el uso de biosólidos tratados o estabilizados como abono orgánico para la producción de maíz en México, tiene buenos resultados y mínimo riesgo de contaminación en la planta y el suelo (Flores-Gómez *et al.*, 2014; González-Flores *et al.*, 2017; Jurado *et al.*, 2006). Sin embargo, es importante señalar con especial énfasis el tratamiento que debe tener el biosólido para eliminar en el él contaminantes químicos y biológicos, que asegure su inocuidad. González-Flores *et al.* (2017) señalan que la dosis de biosólidos más adecuada para un suelo *Cambisol éutrico*, ubicado en la zona sur del municipio de Puebla, es de 400 t ha⁻¹. Esta dosis de aplicación es muy elevada; sin embargo, factible para la producción de maíz, siempre y cuando el lodo este perfectamente tratado. Es importante señalar que dosis excesivas en realidad sí favorece un riesgo de acumulación de contaminantes a mediano plazo si se hacen continuamente. Aun cuando los niveles de contaminantes se encuentren por debajo de los rangos permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, Excesivas aplicaciones al suelo irremediablemente favorecerían la acumulación de contaminantes, simplemente porque están contenidos en éste.

CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

3.1. Delimitación del área de estudio

El experimento se estableció en el Lote 24 del Campo Agrícola Experimental “Bajío” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Km. 6.5 Carretera Celaya-San Miguel de Allende S/N, Colonia Roque, Celaya, Guanajuato (Figura 1). Se ubica a los 20° 35' 18.2" LN y 100° 49' 34" LO, a una altitud de 1706 msnm. El clima de la región según García (1964) es BS1hw (W)(e)q. La temperatura media anual es de 20.6°C y la precipitación pluvial media anual es de 597 mm. El tipo de suelo del campo experimental corresponde según la clasificación de la USDA a un *Vertisol*, el cuál es representativo de la Región Bajío.

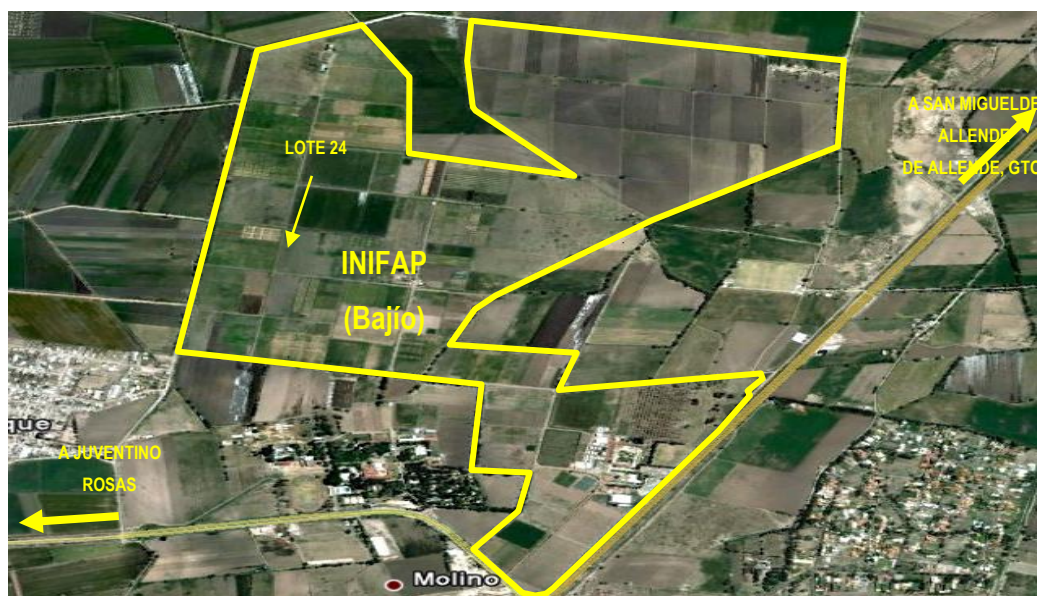


Figura 1 Croquis de ubicación del Campo Experimental Bajío del INIFAP. (Lezama-Pérez, 2017).

3.1.2. Descripción del suelo

El tipo de suelo correspondió a un suelo franco arcilloso, con entre 32 y 40 % de arcillas esmecticas 2:1, las cuales tienen una alta capacidad de retención de humedad e intercambio catiónico. El pH fue ligeramente alcalino, con un contenido bajo de materia orgánica y un alto contenido de nitrógeno total (Tabla 3). El suelo no se había cultivado por más de 10 años. Se observó un incremento significativo en el contenido de P-extractable Bray a medida que aumentó la incorporación de lodo residual. El contenido

de K, Ca y Mg fue alto, mientras que el contenido de Fe y Cu fue mediano; sin embargo, se observó un contenido de Zn de bajo a moderadamente bajo. El contenido de arena en el suelo varió entre 43 y 49 %, no se observó compactación en el mismo, pues la densidad aparente fluctuó entre 1.0 y 1.09 g cm⁻³.

Tabla 3. Características del suelo después de la incorporación del lodo biológico.

Lodo	pH	MO	N	P-Bray	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	Ar	L	Arc	DA
t ha ⁻¹		%	inorg													
						ppm								%		g cm ³
0	7.53	1.53	21.75	18.84	831	4946	519	120	8.4	0.5	15.3	0.9	16.8	49.3	33.4	1.01
12.5	7.58	1.50	36.25	19.81	885	5801	623	178	10.1	1.0	16.5	1.0	16.8	43.3	40.0	1.03
25	7.58	1.71	36.25	26.73	866	5585	697	173	9.4	1.1	19.5	1.1	20.8	43.3	36.0	1.09
50	7.66	1.63	34.28	35.32	839	5542	590	160	9.0	1.2	17.5	1.0	18.8	49.3	32.0	1.00

Ar: arena, Arc: arcillaL: limo, MO: materia orgánica

3.2 Diseño estadístico

Se empleó un diseño experimental en franjas completamente al azar con, cuatro tratamientos y nueve repeticiones. Los datos fueron procesados en el sistema de análisis estadístico SAS de acuerdo con el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Respuesta Observada

μ = Media con Efecto General

τ_i = Efecto del i-ésimo Tratamiento

β_j = Efecto del j-ésimo Bloque

ϵ_{ij} = Efecto del Error Experimental $\approx$ NI (0, σ^2)

En las variables donde se presentaron diferencias significativas, se procedió a hacer una comparación de medias por el método de Tuckey con un $\alpha=0.05$.

3.2.1 Descripción de los tratamientos

El ensayo se estableció en franjas y se analizó como un experimento en franjas al azar con nueve repeticiones por tratamiento (Figura 2). Se evaluó un testigo, sin aplicación del producto, y tres tratamientos con incorporación de dosis crecientes del lodo

residual: 12.5, 25 y 50 t ha⁻¹. No se adicionaron aplicaciones de fertilizantes químicos. Los tratamientos se describen en la Tabla 4.

Tabla 4 Tratamientos para evaluar la efectividad biológica lodo con el cultivo de maíz.

Tratamiento	Dosis lodo t ha ⁻¹	Descripción	Método de aplicación
1	Testigo	Testigo (sin producto)	-
4	50	Lodo biológico	Incorporado al suelo durante el barbecho
3	25	"	"
2	12.5	"	"

El experimento se estableció en una superficie de 3 024 m². Se consideraron 12 unidades experimentales, cada una conformada por 8 surcos de 0.8 m de ancho por 15 m de longitud. La distancia entre plantas fue de 15 cm. La parcela útil, dentro de cada unidad experimental, fue de 1.6 m², la cual correspondió a los 2 surcos centrales de 0.8 m de ancho por 5 m de longitud. La distribución de los tratamientos en el campo se presenta en la Figura 2.

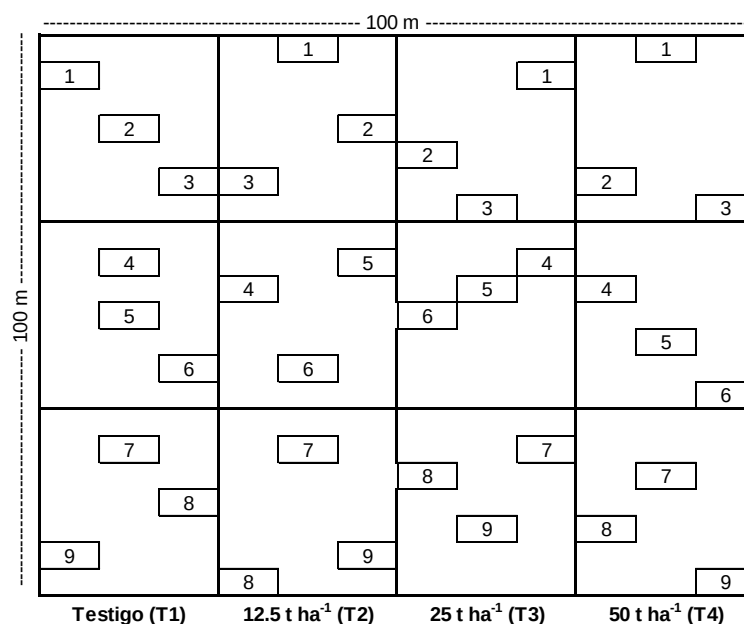


Figura 2. Distribución unidades experimentales en campo. Franjas y tratamientos. Estudio de lodos orgánicos. Campo Experimental Bajío.

3.3 Manejo Agronómico

Después de la aplicación del lodo en la superficie del terreno, éste se incorporó al suelo mediante el barbecho, posteriormente se hicieron dos pasos de rastra y se niveló, finalmente se surcó a 0.80 cm de ancho. La siembra del maíz se efectuó sobre terreno seco. Se utilizaron dos líneas de ciclo intermedio proporcionado por INIFAP. No se aplicaron fertilizantes químicos. Se aplicaron dos riegos: a la siembra y a los 30 días después de la siembra. No hubo necesidad de aplicar más riegos porque las precipitaciones se establecieron con oportunidad, y la distribución de las mismas, a lo largo del ciclo de cultivo, proporcionaron la humedad suficiente en el suelo para que concluyera el ciclo de cultivo. La emergencia de las plántulas ocurrió a 7 días del primer riego. Para el control de malezas se aplicó de manera combinada los herbicidas Elumis + Gesaprim Calibre 90 (postemergentes) para control de malezas de hoja angosta y ancha, respectivamente. Para el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) se aplicó el insecticida Allectus granulado con un salero, directo al cogollo, pero como persistía la incidencia también se aplicó durante agosto, de manera combinada, los insecticidas Palgus + Lorsban. Fue necesario hacer la aplicación de otro herbicida, por la fuerte incidencia de la plaga, para lo cual se aplicó finalmente el insecticida Coragen. Desde las primeras etapas de crecimiento del maíz se establecieron seis trampas con Feromonas y melaza para atrapar adultos de gusano cogollero. Se vaciaron 4 veces dichas trampas. La incidencia fue muy fuerte, sin embargo, se logró controlar. La cosecha del cultivo se efectuó en noviembre de 2017.

3.4. Temperatura y precipitación

Se registraron las temperaturas máximas y mínimas y la precipitación diaria mediante una estación meteorológica automatizada.

3.5. Componentes de rendimiento

Se evaluaron los diferentes parámetros de rendimiento en áreas de muestreo de dos surcos de 0.8 m de ancho cada uno, por 5 m de longitud (4 m²) en la zona alta media y baja de las franjas. Los parámetros evaluados se describen a continuación:

3.5.1. Población de plantas.

Se contabilizó el número de plantas por unidad de muestreo y se extrapoló en unidades de plantas por m².

3.5.2. Altura de Planta.

Durante la madurez fisiológica, en cada parcela experimental, se midieron 20 plantas en forma aleatoria dentro de las unidades de muestreo. La altura de planta se consideró desde la base, en el suelo, hasta la base de la espiga.

3.5.3. Rendimiento de Grano.

En cada unidad de muestreo (4 m²) se cosecharon todas las plantas. Las mazorcas se desgranaron y se pesaron. Se estimó la humedad de grano después de la cosecha mediante un determinador automático marca METTLER TOLEDO®. Se ajustó la humedad al 14 % para la estación del rendimiento de grano.

3.5.4. Peso Seco de Biomasa Aérea.

En cada unidad de muestreo se cuantificó el peso de grano + peso de paja aérea. El material vegetal se secó en una estufa de aire forzado a 70°C por 72 h. La suma del peso de grano más peso de paja correspondió al peso de la biomasa aérea. Los resultados se transformaron a toneladas por hectárea.

3.5.5. Peso de 200 granos.

De las muestras de grano cosechado en cada unidad Experimental, se cuantificó el peso de 200 granos en una balanza analítica con precisión de cuatro dígitos. El valor se reportó en gramos (g).

3.5.6. Índice de cosecha

Se estimó al dividir el peso del entre el peso de la biomasa aérea; es decir, el rendimiento económico entre el rendimiento biológico. Es una medida de la eficiencia reproductiva.

3.6. Análisis Nutricional de hoja (NPK).

Se recolectó una muestra compuesta por 10 submuestras de la hoja bandera del maíz, al término del crecimiento vegetativo, y se determinó el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del INIFAP, Campo Experimental Bajío. Primeramente, las muestras serán secadas a 70°C durante 72 horas en estufa de secado de aire forzado, después se efectuó la molienda mediante un molino Arthur H. Thomas Co. El análisis de N foliar se efectuó mediante el método Microkjeldahl (Williams, 2023); el P mediante el método de Molibdovanadato de amonio por espectrofotometría de UV visible (Chapman, 1966); y el K mediante espectrometría de absorción atómica (Williams, 2023).

3.6.1. Solubilización de minerales en plantas por el método de digestión húmeda

El proceso de digestión húmeda, se basa en una digestión con una combinación de Ácidos Sulfúrico (H_2SO_4), Nítrico (HNO_3) y Perclórico (HClO_4). Además, puede agregarse Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) para completar la digestión. No se recomienda usar H_2SO_4 si se tiene un tejido vegetal alto en calcio pues se formará Sulfato de Calcio insoluble (CaSO_4) obteniendo valores reducidos de Calcio y otros elementos por precipitación. la elección del método de la destrucción de la materia orgánica dependerá de los elementos a ser determinados y del contenido mineral esperado en el tejido. El HNO_3 es el ácido más utilizado en la mayoría de las mezclas de digestión, sirve para destruir la materia fácilmente oxidable. El HClO_4 se utiliza para acelerar y completar la digestión y aun cuando es altamente reactivo y oxidante con compuestos fácilmente oxidables como la materia orgánica, si se utiliza adecuadamente permitiendo que la muestra reaccione primero con el HNO_3 nos permite tener un digestado eficiente en poco tiempo. En el extracto obtenido es posible determinar la mayoría de los minerales en las muestras de Plantas (Williams, 2023).

3.6.2 Determinación de nitrógeno total en plantas por el método microkjeldahl

La determinación de nitrógeno total por este procedimiento involucra dos pasos:

- A) El peso de la muestra a analizar.
- B) La digestión de la muestra, esto para convertir el nitrógeno a amonio y así poder Obtener la determinación del amonio en el digestor.

La digestión de la muestra se debe de efectuar por calentamiento de la muestra con Ácido sulfúrico concentrado o sustancias similares como son los sulfatos de Potasio-Sodio, ya que estos promueven la oxidación de la materia orgánica y la conservación del nitrógeno orgánico a Amonio por incremento de la temperatura de digestión, y también emplea catalizadores como el Cobre y el Selenio, que aumenta la velocidad de oxidación de la materia orgánica por el Ácido Sulfúrico (Williams, S., 1984).

3.6.3 Determinación de fosforo total en plantas con molibdovanadato de amonio por el método espectrofotométrico

Este método no es aplicable a materiales que dan extractos coloreados o a soluciones que contengan además de Ortofosfato, u otros iones que formen complejos coloreados con el Molibdovanadato.

Este método es mediante una digestión previa preferentemente con Ácidos Nítrico y Perclórico, el Fosforo es convertido a Ortofosfato, una alícuota de ese extracto reacciona con el Molibdovanadato de Amonio formando un complejo de color amarillo muy estable, se deja reposar durante 15 min, para después determinar la Absorbancia de esa solución en un Espectrofotómetro a 470 nm (Chapman, H.D.,1966).

3.6.4 Determinación de nutrientes totales en plantas por espectrofotometría de absorción atómica

La espectrofotometría de absorción atómica es la técnica instrumental más ampliamente utilizada para la determinación rutinaria de muchos de los elementos que contienen los tejidos vegetales. El funcionamiento del espectrofotómetro de absorción atómica se basa en el principio de que los átomos en su estado basal de energía pueden absorber energía electromagnética cuando se enfoca sobre ellos la radiación de una longitud de onda apropiada.

La muestra de tejido vegetal en solución es aspirada y pulverizada en gotas finísimas que entran a la flama, generalmente de aire-acetileno (flama entre 2100 y 2400 °C), donde se producen átomos en estado basal los cuales absorben la energía luminosa que pasa sobre la flama y que proviene de la lámpara de catodo fotomultiplicador, que convierte la energía luminosa en energía eléctrica, es posible cuantificar la concentración del elemento presente en la muestra (Watson e Isaac, 1990).

3.7. Contenido de Proteína de Grano.

En cada parcela experimental, se tomó una muestra representativa de grano y se evaluó el contenido de proteína en el laboratorio mediante el método de Kjeldahl (Nielsen, 2003).

3.8. Análisis de inocuidad microbiológica del grano

Se recolectaron una submuestras de grano por tratamiento las cuales fueron turnadas al laboratorio de análisis microbiológico para hacer las respectivas pruebas que de confirmen la presencia o ausencia de microorganismos dañinos para la salud humana o animal en el grano, para evaluar la inocuidad en el grano por efecto del uso del biosólido. Se analizaron las poblaciones (UFC) de los siguientes géneros de microorganismos: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Bacillus*, *Penicillium*, *Esclrenquia coli*, *Fusarium* y Levaduras. Los métodos de evaluación se hicieron de acuerdo a la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, sobre Protección ambiental: Lodos y biosólidos,

especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

3.9. Análisis de metales pesados

Se efectuó el análisis de metales pesados en el suelo para evaluar acumulación de éstos por efecto de las dosis de aplicación del biosólido. La metodología que se consideró con base en lo que señala la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio o vanadio. La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establece diferentes alternativas para determinar la concentración objetivo a la cual se debe remediar un suelo. Estas opciones incluyen las concentraciones de referencia (totales y solubles) que esta Norma presenta, la determinación de concentraciones de fondo del suelo, el cálculo de concentraciones específicas conforme a las características propias del sitio y de concentraciones basadas en la biodisponibilidad de los contaminantes. En virtud de que los elementos regulados pueden estar presentes en el suelo de manera natural y en ocasiones en concentraciones tales que pueden representar un riesgo para la salud de la población humana o de los ecosistemas, es importante establecer criterios para determinar la contaminación antropogénica en suelos y en su caso las concentraciones de remediación. En el ámbito internacional estos criterios toman como base los valores de fondo y las evaluaciones de riesgo a la salud o ambiental.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Temperatura y precipitación

La distribución de la precipitación y las temperaturas medidas en la estación meteorológica del CEBAJ, a lo largo del ciclo de cultivo, se presentan en la Figuras 3 y 4. Se observó que la temperatura máxima extrema fue de 35 °C, la cual se registró durante el mes de mayo, mientras que la mínima fue de 0 °C, que ocurrió durante el 11 de diciembre. Los meses más cálidos fueron de abril a agosto con temperaturas medias mensuales por encima de los 20 °C. La precipitación pluvial anual fue de 561 mm. El mes más lluvioso fue julio, donde cayeron cerca de 180 mm. Durante el periodo en que se estableció la presente evaluación de maíz cayeron 547.2 mm de lluvia, es decir, 97.6% de la precipitación total.

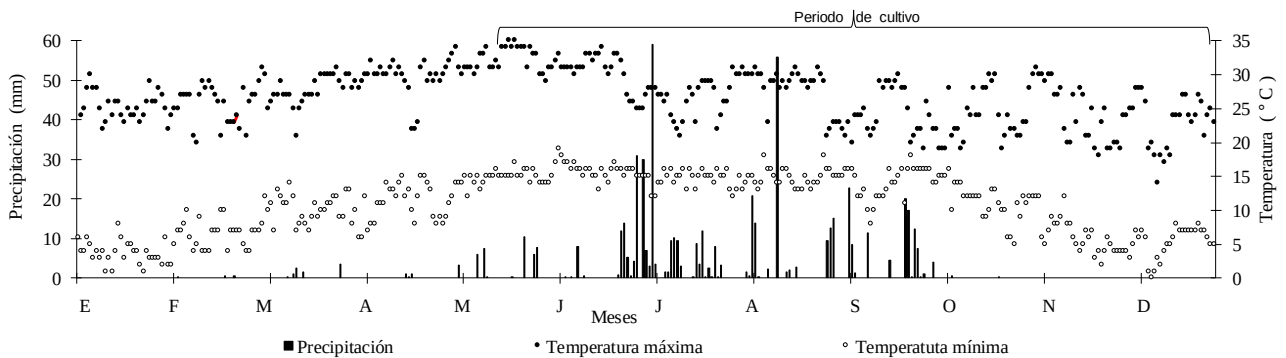


Figura 3 Distribución diaria de precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas.

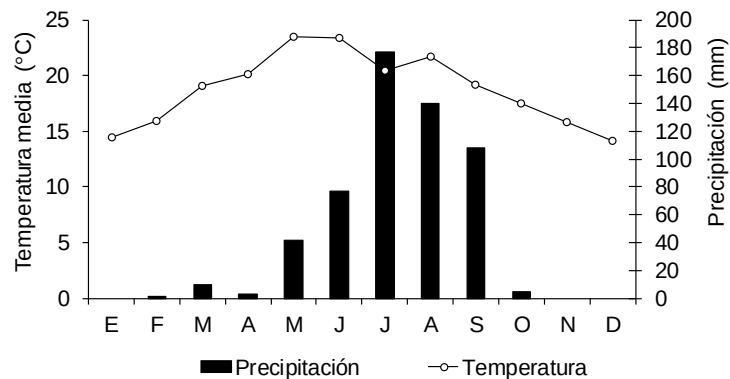


Figura 4 Diagrama ombrotérmico. Campo Experimental Bajío.

4.2. Población y mazorcas

La probación de plantas fluctuó entre 7.1 y 7.9 plantas m^{-2} , es decir entre 71,000 y 79,000 plantas ha^{-1} (Tabla 5). el coeficiente de variación experimental fue de 7.5%. El número de plantas fue mayor en el tratamiento sin aplicación de lodo (1) ($p<0.05$), comparado con lo hubo en los demás tratamientos; sin embargo, la población de mazorcas fluctuó entre 6.9 y 7.5 mazorcas m^{-2} , y ésta fue semejante en todos los tratamientos ($p<0.05$). Estos resultados muestran los tratamientos tuvieron condiciones semejantes en cuanto a competencia entre plantas, por lo cual las diferencias que se presentan en la producción de maíz se deben al efecto de los tratamientos. Una población entre 70, 000 y 80,000 plantas ha^{-1} , es adecuada para la producción de grano.

Tabla 5 Resultados promedio de componente de rendimiento en maíz. Estudio de efectividad biológica de lodo biológico. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato.

Trat.	Lodo	Número		Altura	Parámetros de mazorca					Peso	200	Biomasa	
	tratado	plantas	M	planta	φ	L	número			grano	granos	aérea	IC
	t ha ⁻¹	m ²		m		cm	hileras	G H ⁻¹	G M ⁻¹	t ha ⁻¹	g	t ha ⁻¹	
1	0.0	7.9a	7.5a	2.05a	5.1a	15.0a	31.8a	31.8a	1013a	8.2c	65.3b	22.9b	0.36c
2	12.5	7.1b	6.9a	2.02a	5.1a	14.9a	31.5a	31.5a	991a	10.2b	66.9ba	24.8ba	0.41ba
3	25	7.3ab	7.0a	2.05a	5.2a	14.8a	32.2a	32.2a	1041a	11.5ba	69.5ba	26.9a	0.43ba
4	50	7.5ab	7.4a	2.11a	5.3a	15.3a	32.1a	32.1a	1031a	13.0a	70.9a	26.6a	0.49a

ϕ : diámetro, G: granos, H: hileras, IC: índice de cosecha, L: longitud, M: mazorca

4.3. Altura de planta

Este parámetro no presentó diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$) entre tratamientos. La altura promedio de plantas fluctuó entre 2.02 y 2.11 m (cuadro 7), lo cual puede considerarse como homogéneo. Numéricamente el tratamiento con la aplicación de 50 $t\ ha^{-1}$ de lodo residual (4) fue el que presento ligeramente mayor crecimiento en la altura de planta, comparado con los demás tratamientos. Se esperaba un menor crecimiento en el tratamiento sin aplicación de lodo (1); sin embargo, el suelo, con base en el análisis químico-físico que se efectuó, presentó una mediana fertilidad, debido a que estuvo en descanso (sin cultivar) por varios años. Por

otra parte, la altura de planta no necesariamente se relaciona con la producción de grano.

4.4. Parámetros de mazorca

No se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en los diferentes parámetros de mazorca evaluados: diámetro, longitud, número de hileras, número de granos hilera por hilera y número de granos por mazorca (Tabla 5). Sin embargo, se observó una ligera tendencia, en estas variables, a aumentar en la medida que aumentaron las dosis de aplicación del lodo residual, principalmente en cuanto a diámetro de mazorca, número de hileras por mazorca y granos por hilera. Los parámetros de mazorca se relacionan directamente con la producción de grano, y la respuesta en su crecimiento se relaciona con la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo, principalmente nitrógeno. Las cantidades de lodo residual que se aplicaron en los tratamientos contienen importantes reservas de nutrimentos para las plantas, sin duda. La inocuidad que presentan, después del tratamiento en las plantas de agua residuales, es lo garantiza la factibilidad en su uso como abono biológico para la producción agrícola.

4.5. Producción de grano

El rendimiento de maíz presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) por efecto de los tratamientos. La producción de grano fluctuó entre 8.2 y 13.0 t ha⁻¹ (Figura 5a), y se observó que ésta aumentó a en función de las dosis crecientes de lodo residual. Hubo una estrecha relación entre ambas variables ($r^2 = 0.94$) (Figura 5b). La producción de maíz en Guanajuato, en condiciones de riego, es de cerca de 9 t ha⁻¹ en promedio (SIAP, 2018). Con la aplicación de 12.5 t ha⁻¹ de lodo orgánico se obtuvieron más de 10 t ha⁻¹ de grano. Esta respuesta en la producción se relacionó con la disponibilidad de nitrógeno, que fue incorporado al suelo con el biosólido. El tratamiento sin aplicación de lodo (1) tuvo una reserva de N inorgánico (NI), en los primeros 30 cm de profundidad, de 66 kg ha⁻¹. Después de incorporar las dosis crecientes del biosólido se estimó un aumento en el contenido de esta forma disponible de N para el aprovechamiento de las plantas en el suelo de alrededor de 108 kg ha⁻¹, es decir, 44

kg ha⁻¹ más cantidad de NI, respecto al tratamiento testigo (1). De acuerdo con el contenido de NI detectado en el lodo seco sólo se incorporaron 0, 1.9, 3.8 y 7.5 kg ha⁻¹ en los tratamientos respectivos (1, 2, 3 y 4); sin embargo, el contenido de N total en el lodo seco (6.45 %), implicó un aporte en el suelo de 0, 806, 1613 y 3225 kg ha⁻¹ de este elemento. Se desconoce la tasa de mineralización de este elemento, en las condiciones en que se llevó a cabo el estudio, pero evidentemente ésta se incrementó a medida que se incrementó la dosis de aplicación, lo cual se reflejó en la producción de maíz. Es muy probable que en ciclos subsecuentes de cultivo quede un efecto residual importante del biosólido, que puede seguir suministrando nutrientes para el desarrollo de los cultivos.

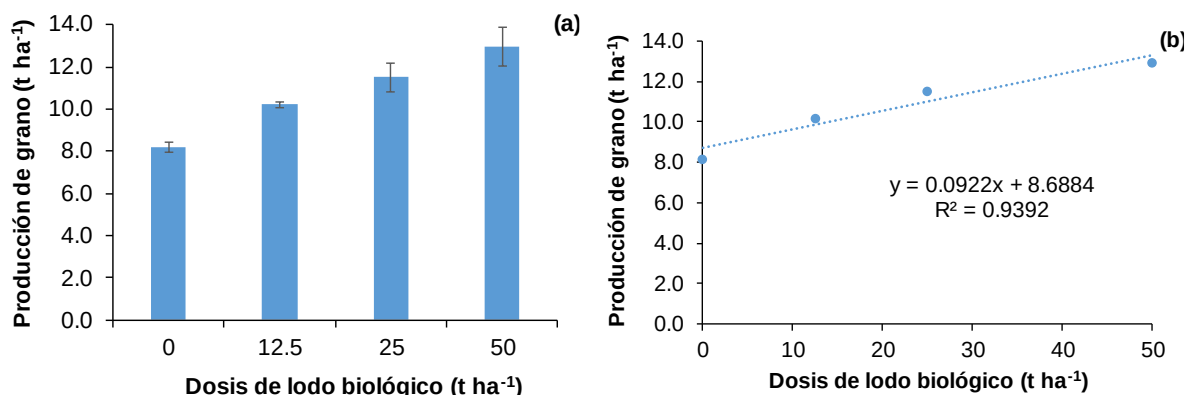


Figura 5 (a) producción de grano. (b) relación entre producción de grano y dosis crecientes de lodo residual. INIFAP, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato.

4.6. Peso de 200 granos

Este parámetro se relaciona directamente con el rendimiento. Los granos más ligeros se encontraron en el tratamiento sin aplicación de lodo residual (1), mientras que los más pesados se encontraron en el tratamiento con la aplicación más alta de éste producto (4). Estos resultados muestran que el lodo residual tiene un efecto positivo en la producción de maíz y que su uso como fertilizante orgánico es factible, con la dosis más alta, que fue donde se encontró mayor respuesta. El uso de lodos residuales como abono biológico y mejorador de suelos podría tener mayor factibilidad, con mayor probabilidad de inocuidad, en la producción de cereales.

4.7. Biomasa aérea

La producción de biomasa aérea, que corresponde a toda la producción vegetal que se produjo por encima de la superficie del suelo (paja + grano), fluctuó de cerca de 23 t ha⁻¹, en el tratamiento sin aplicación de lodo (1), hasta 26.6 t ha⁻¹ en el tratamiento con incorporación de 50 t ha⁻¹ de este producto del tratamiento de aguas residuales. Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos por efecto de la aplicación de las dosis crecientes de lodo residual y el comportamiento, entre tratamientos, fue semejante a lo que se explicó en la producción de grano. Hubo una relación muy estrecha entre estas dos variables ($R^2 = 0.87$).

4.8. Índice de cosecha

El índice de cosecha, que corresponde a la relación que hay entre el rendimiento económico (producción de grano) y el rendimiento biológico (producción de biomasa aérea), mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos por efecto de la aplicación de las dosis crecientes del lodo residual. Los valores fluctuaron de 0.36 en el tratamiento testigo (1) hasta 0.49 en el tratamiento con la aplicación de 50 t ha⁻¹ de lodo (4). A medida que aumenta el valor de índice de cosecha implica una mayor productividad de maíz (Tabla 5). La dosis más alta de lodo proporcionó mayor abundancia de reservas en nutrimentos de las plantas en el suelo que pudo aprovechar mayormente por el cultivo, lo cual se reflejó en una mayor producción de grano y biomasa aérea, y por lo tanto en el índice de cosecha. La aplicación de lodo más un complemento en la aplicación de fertilizantes químicos podría potenciar la producción. Por otra parte, el contenido orgánico en el lodo residual podría contribuir a mejorar la fertilidad del suelo en mediano plazo.

4.9. Análisis de calidad de grano

Los contenidos de N, P, K y proteína en grano se presentan en el Tabla 6. Se observó que, el tratamiento sin aplicación de lodo (1) presentó los niveles más bajos con respecto a los demás tratamientos (2, 3 y 4). Los contenidos de P y N, y por consecuencia de proteína, mostraron una clara tendencia a incrementarse en función

de las dosis crecientes de lodo orgánico, $R^2=0.87$ y 76 respectivamente (Figura 6). Lo anterior se relaciona con la disponibilidad de N y P que aprovecho el cultivo, lo cual aumentó en función de las dosis crecientes de aplicación del biosólido, como ya se explicó anteriormente.

Tabla 6 Contenido de N, P, K y proteína en grano

Tratamiento	Lodo t ha ⁻¹	N	P	K	Proteína
		%			
1	0	1.57a	0.45a	0.66a	9.79a
2	12.5	1.68a	0.49a	0.74a	10.48a
3	25	1.64a	0.49a	0.79a	10.23a
4	50	1.74a	0.52a	0.74a	10.88a

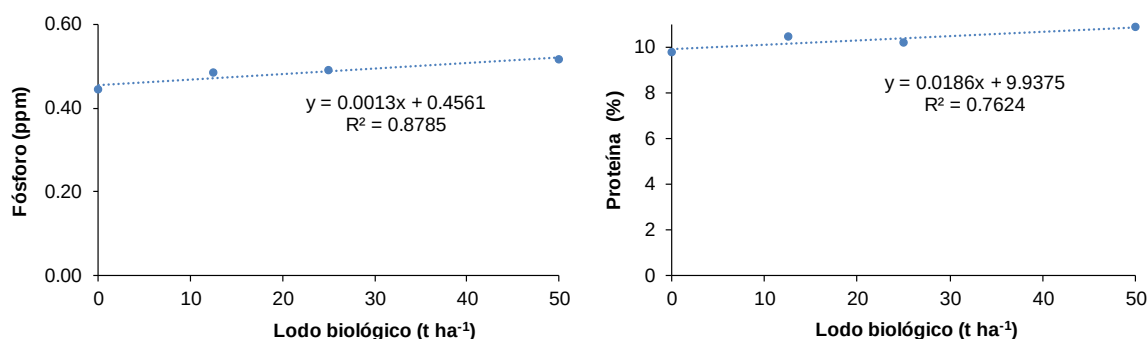


Figura 6 Relación entre el contenido de P y proteína en función de las dosis crecientes de aplicación del lodo biológico (biosólido).

4.2.1 Análisis microbiológico del grano

La presencia de microorganismos dañinos para la salud humana o animal en el grano, de acuerdo con el análisis microbiológico efectuado en laboratorio, correspondió a hongos del género *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium* y *Alternaria*; y bacterias Gram (+) cortas y medianas, y Gram (-) cortas y medianas (Tabla 7). El estudio reveló que las poblaciones de estos microorganismos, en los tratamientos con aplicación de las diferentes dosis de biosólido correspondieron a las que se encontraron en el tratamiento sin la aplicación del mismo, es decir, que la aplicación del biosólido no incidió la reproducción de poblaciones estos microorganismos más allá de las que se encuentran en forma natural en el ambiente. La apariencia física del grano fue limpia.

Tabla 7 Análisis microbiológico del grano

Trat	Lodo	Fu	Pe	As	Al	B. cortos	B. medios	B cortos	B medios	Le	E. coli
Gram (+)								Gram (-)		presencia	
t ha ⁻¹		UFC g suelo ⁻¹									
1b3	0	42 x 10 ³	6 x 10 ³	-	-	112 x 10 ³	48 x 10 ³	62 x10 ³	60	-	Pr
1b2	0	6 x 10 ³	6 x 10 ³	-	-	12 x 10 ³	-	96 x 10 ³	156	-	"
1b1	0	2 x 10 ³	-	6 x 10 ³	-	20 x 10 ³	-	152x 10 ³	112	-	"
1b3	0	3 x 10 ³				190 x 10 ³		44 x 10 ³			Npr
T2b1	12.5	8 x 10 ³	-	2 x 10 ³	-	30 x 10 ³	-	120 x 10 ³	144	-	Pr
T2b2	12.5	6 x 10 ³	14 x 10 ³	2 x 10 ³	4 x 10 ³	36 x 10 ³	-	6 x 10 ³	24	-	"
T2b2	12.5	52 x 10 ³	-	2 x 10 ³	-	60 x 10 ³	-	198 x 10 ³	-	34 x 10 ³	No Npr
T3b1	25	12 x 10 ³	3	8	-	8 x 10 ³	-	-	16 x 10 ³	18 x 10 ³	Pr
T3b2	25	18 x 10 ³	6 x 10 ³	-	-	28 x 10 ³	-	42 x 10 ³	-	-	No Npr
T3b3	25	44 x 10 ³	12 x 10 ³	-	-	80 x 10 ³	-	360 x 10 ³	-	120 x 10 ³	Pr
T4b1	50	12 x 10 ³	-	4 x 10 ³		118 x 10 ³	-	520x 10 ²	146	-	Pr
T4b2	50	1 x 10 ⁴	-	1 x 10 ⁴		34 x 10 ⁴	-	22 x 10 ³	-	-	Npr
T4b3	50	22 x 10 ³	-			50 x 10 ³	-	12 x 10 ³	-	-	"

AL: Alternaria, AS: Aspergillus B: Bacillus, Pe: Penicillium, E: Escleroglyph, Fu: Fusarium, Le: levaduras, Npr: no probable, Pr: probable

4.2.2 Hongos

La presencia de estas especies de hongos puede ocasionar daño en la sanidad de los granos. La apariencia sana que tuvo el grano, después de la cosecha, indica que el desarrollo de los hongos podría presentarse bajo condiciones inadecuadas de almacenamiento. El género *Fusarium* fue el que presentó mayor contenido de unidades formadoras de colonias (UFC); sin embargo, no se observó que esto se deba a la aplicación de las dosis crecientes del lodo orgánico. Estos hongos están presentes de manera natural en el suelo, y la capacidad de retención de humedad que tiene, debido al alto contenido de arcilla, favorece su desarrollo, principalmente cuando hay lluvias abundantes. Las plantas no mostraron síntomas de enfermedad por la presencia de estos hongos, a lo largo del ciclo de cultivo; sin embargo, su presencia en el agroecosistema es parte de la biodiversidad. El género *Fusarium* es una especie que, si puede causar enfermedad en maíz y otras especies de plantas cultivadas, pero su presencia en este caso no afectó la sanidad del cultivo.

La actividad de hongos del género *Aspergillus* produce sustancias tóxicas, productos del metabolismo secundario, como las aflatoxinas, las cuales son sustancias muy potentes productoras de cáncer en animales de laboratorio (Wogan y Newberne, 1967). La presencia de este hongo en las diferentes muestras evaluadas fue muy inconsistente. Innegablemente hubo presencia del hongo en el grano, aparentemente un poco más donde se aplicó el biosólido; sin embargo, también en el tratamiento testigo (1), aunque con menor frecuencia. Debido a la naturaleza heterogénea de las poblaciones no puede atribuirse que hay un aumento con la aplicación de las dosis crecientes del lodo, ya que hubo varios casos donde no se detectó (Tabla 7). El proceso de nixtamalización, donde se aplica temperatura y cal debería ser suficiente para eliminar el hongo para el consumo humano; sin embargo, para el consumo animal no exactamente. La manera más efectiva de evitar los problemas ocasionados por las aflatoxinas es impedir que el hongo crezca en el sustrato. En el caso de granos almacenados, esto se puede lograr de varias formas, como: 1) Mantener la humedad del grano por abajo de los requerimientos de agua del hongo; esto es fácil en ciertos productos y en particular en regiones secas; sin embargo, no lo es en las regiones cálidas y húmedas, cuando no se cuenta con la tecnología apropiada, particularmente la del secado; 2) Conservar los granos a temperaturas inferiores a 10 °C, con el riesgo de que se desarrollen hongos que pueden crecer a esas temperaturas, como *Penicillium*, lo cual es caro pues requiere de condiciones de refrigeración, sobre todo cuando se manejan grandes volúmenes de granos para la alimentación humana y animal; 3) La resistencia genética de variedades que reduzcan o impidan la invasión de los granos por el hongo productor de aflatoxinas sería un método ideal; sin embargo, todavía no se han desarrollado variedades con esas características; y 4) Evitar la germinación de las esporas de los hongos, así como el desarrollo del micelio en el sustrato susceptible de ser contaminado con estas micotoxinas, mediante el uso de inhibidores químicos (Moreno-Martínez *et al.*, 2000).

4.2.3 Bacterias

La presencia de bacterias en el presente estudio no mostró un patrón consistente en cuanto a las poblaciones. Los bacilos cortos tanto Gram (+) como Gram (-) están

presentes en todos los tratamientos. Muchas las especies de bacterias Gram (-) son las que más frecuentemente causan enfermedades. La membrana externa que tienen estos microorganismos, que no es sensible a tinción, es a la que se atribuye una gran parte de esa responsabilidad patogénica. Dicha membrana exterior está compuesta por un complejo lipopolisacárido que actúan como endotoxinas, y si éstas entran en el sistema circulatorio provocan una reacción tóxica en el individuo infectado. Las endotoxinas son componentes estructurales exclusivamente de las bacterias Gram (-). La membrana externa de este tipo de bacterias ejerce una notable influencia en la resistencia frente a varios antibióticos, sobre todo a los que actúan sobre la pared de peptidoglicanos, que es el punto débil de las bacterias Gram (+). Dentro de las bacterias Gram (-) clasificadas como bacilos medianos, el *E. coli* es uno de los que tiene mayor patogenicidad en la salud humana y animal. En el presente estudio se observaron poblaciones irrisorias o nulas en las muestras evaluadas, con la excepción de una muestra con 16×10^3 UFC (Cuadro 9).

Para descartar la presencia de *E. coli* en alimentos o agua potable es preferible que se encuentren ausentes. Los resultados del presente estudio muestran poblaciones de bacilos medianos aun en el tratamiento sin aplicación de lodo, lo cual implica una alta probabilidad de presencia de *E. coli*; sin embargo, también, este tipo de microorganismos, estuvieron ausente en muestras con aplicaciones altas dosis del biosólido, por lo tanto, se concluye que, las poblaciones que se encontraron en el grano de maíz de *E. coli* se debe a su presencia natural del entorno y no por la aplicación del biosólido.

4.2.4 Metales pesados

El contenido de metales pesados en el biosólido, que se declaran por la empresa en las especificaciones, se encuentran por debajo del límite que marcan Normas Oficiales Mexicanas: NOM-004-SEMARNAT-2002 (NOM-004) y NOM-083-SEMARNAT-2003 (NOM-083). Sin embargo, al aplicar las dosis crecientes evaluadas en el presente estudio, los niveles de algunos metales aumentan proporcionalmente (Tabla 8). Los casos más notables fueron Cu, Hg y Ni, los cuales alcanzaron un nivel elevado con la

dosis de aplicación más alta del lodo biológico. Cu y Zn son elementos que requieren las plantas en mínimas cantidades; sin embargo, Hg y Ni pueden alcanzar niveles riesgosos con aplicaciones de grandes volúmenes del biosólido al suelo. Se calculó que 2.7 kg ha⁻¹ de Hg acompañan la incorporación de 50 t ha⁻¹ del lodo biológico.

Tabla 8 Contenido de Metales Pesados

Elemento	Contenido en biosólido mg kg ⁻¹	Dosis de aplicación en el lodo biológico			
		0	12500	25000	50000
		kg ha ⁻¹			
Arsénico	0.96	0.00	0.01	0.02	0.05
Cadmino	9.99	0.00	0.12	0.25	0.50
Cobre	118.25	0.00	1.48	2.96	5.91
Cromo total	54.43	0.00	0.68	1.36	2.72
Mercurio	1.16	0.00	0.01	0.03	0.06
Níquel	32.96	0.00	0.41	0.82	1.65
Plomo	28.57	0.00	0.36	0.71	1.43
Zinc	645.92	0.00	8.07	16.15	32.30

Al analizar muestras de suelo, al finalizar el ciclo de cultivo, para determinar el contenido de algunos metales pesados, se observó que no se detectaron incrementos de Ni y Cr, por efecto de la aplicación de 50 t ha⁻¹ del biosólido, con respecto al tratamiento sin la aplicación del biosólido (Tabla 9). Sin embargo, hubo un aumento significativo en el contenido de Cadmio. Lo anterior no implicó un nivel contaminante de riesgo, ya que la cantidad detectada sigue siendo extremadamente baja.

Tabla 9 Contenido de metales pesados en muestras de suelo al final del ciclo del cultivo.

Elemento	Lodo orgánico	
	0 ha ⁻¹	50 t ha ⁻¹
	mg kg ⁻¹ de suelo	
Níquel	13.542	11.173
Cobalto	NA	NA
Arsénico	0.802	1.066
Bario	NA	NA
Cromo	27.623	24.504
Cadmio	<0.005	0.046
Aluminio	NA	NA
Plomo	NA	NA

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Con base en el objetivo planteado en el presente estudio se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El estudio de efectividad biológica del biosólido evaluado en el cultivo de maíz, tuvo respuesta en la producción de grano en función de las dosis crecientes de aplicación. Se logró obtener hasta 13 t ha⁻¹ con 50 t ha⁻¹ del biosólido, sin aplicación de fertilizantes químicos.
- El estudio reveló que las poblaciones de microorganismos dañinos en la salud humana o animal, en los tratamientos con aplicación de las diferentes dosis del biosólido, correspondieron a las que se encontraron en el tratamiento sin la aplicación del mismo, es decir, que la aplicación del biosólido no incidió la reproducción de poblaciones estos microorganismos más allá de las que se encuentran en forma natural en el ambiente. La apariencia física del grano fue limpia. La probabilidad en la presencia de *E. coli*, fue la misma en todos los tratamientos.
- El estudio de metales pesados reveló que la concentración de elementos en el biosólido estuvo por debajo de lo que establece la norma; sin embargo, se prevé que una constante aplicación de grandes volúmenes del biosólido podría implicar una acumulación importante en el suelo a largo plazo.

5.2. Recomendaciones

- Procurar la seguridad ambiental (suelos y agua) y daño organismos vivos (animales y personas), para lo cual es necesario un adecuado manejo en el tratamiento de aguas residuales tratadas y sus lodos o biosólidos. Debe implementarse un adecuado control local sobre el mismo.

- Solamente deben aplicarse biosólidos que cumplan con requisitos estrictos que marca la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, que protejan la salud, seguridad y bienestar de la gente y animales, así como la calidad del agua y el suelo.
- Para su aprovechamiento como mejorador de suelo y fertilizante, los biosólidos deben ser declarados “residuos no peligrosos” para el ambiente (NOM-052-SEMARNAT-2005), con base en el análisis CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico-infeccioso) de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) de la SEMARNAT.

CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adame, E., Riestra-Díaz, D., Pérez-Mangas, J. & Echegaray-alemán, A. (2001). Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. *Agrociencia*, 35(3), 255-265.
- Andrade, M. A.; Marcel, P.; Reyzaabal. M. L.; Montero Ma. J. 2000. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología*. 7(3):21-29.
- Cabrera, R. B., Gordillo, A.J. & Cerón, A. (2003). Inventario de contaminación emitida a suelo, agua y aire en 14 municipios del Estado de Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), 171-181
- Cajuste, L., Carrillo, G., Cota, G. & Laird, R. (1991). The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58, 763-77 15.
- Chapman, H.D. (ed.), 1966. Diagnostic criteria for plant and soil, Division of agriculture, University of California, Riverside. CA. USA.
- Cifuentes, E., U. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett, A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud Publica Mex*. 36:3-9.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Estadísticas del agua en México. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/imta/documentos/reuso-de-aguas-residuales-en-la-agricultura#:~:text=El%20total%20de%20aguas%20residuales,que%20permite%20mejorar%20su%20calidad>. Fecha de consulta: 20/02/2025.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2019. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2019. Comisión Nacional del Agua. <https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/perspectivas/2021/b-imta-perspectivas-2021-09.pdf>. Fecha de consulta: 12/06/2024.
- Cuenca-Adame, E., D. Riestra-Díaz, J.M. Pérez –Mangas y A. Echegaray-Alemán. 2001. Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. *Agrociencia* 35: 255-265.

- El Correo. 2024. Campesinos de Guanajuato recurren a regar con aguas negras ante falta de agua. Periódico del 19/04/2024. <https://www.periodicocorreo.com.mx/vida-publica/campesinos-de-guanajuato-recurren-a-regar-con-aguas-negras-ante-falta-de-agua-20240418-97233.html>. Fecha de consulta: 20/02/2025.
- García, E. 1984. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México. pp.16-21.
- García-García, J.O. 2001. La Agricultura de Riego y el Riego con Aguas Negras. Economía y Sociedad. Año VI (10): 155-180.
- González-Flores, E., E. Sandoval-Castro y A. Pérez-Magaña. 2014. Biosólidos en la producción de maíz: impacto socioeconómico en zonas rurales del municipio de Puebla. Estudios Sociales 43:62-86.
- González-Flores, E., J.E. Ramos-Barragán, M.A. Tornero-Campante y M. Murillo-Murillo. 2017. Revista Mexicana de Ciencia Agrícolas 8(1):119-132.
- Hernández-Herrera J.M., E. Olivares-Sáenz, I. Villanueva-Fierro, H. Rodríguez-Fuentes, R. Vázquez-Alvarado y J.F. Pissani-Zuñiga. 2005. Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero" Revista Internacional de Contaminación Ambiental 21: 31-36.
- Jurado-Guerra, P., M. Luna-Luna y R. Barretero-Hernández. 2004. Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. Tec. Pec. Mex. 42: 379-395
- Jurado, P. T. Arredondo, E. Flores, V. Olalde y J. Frías. 2006. Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrimentos del suelo y la producción de forraje en pastizales semiáridos. Terra Latinoamericana 25: 211-218.
- Lezama-Pérez, R.S. 2017. Evaluación de tres tipos de fertilizantes en la disponibilidad de nitrógeno y potencial de producción de maíz (*Zea Mays* L.) en un *Vetrisol* del estado de Guanajuato. Tesis de licenciatura del ITESS. Salvaterra, Gunajuato pp: 24.
- López, C., Herva, M., Franco-Uria, A. and Roca, E. 2011. Inventory of heavy metal content in organic waste applied as fertilizer in agricultura: evaluating the risk of transfer into the food chain.

- Mascareño, C. y R. Guajardo. (1977). Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y de la producción agrícola en el distrito de riego 03 por el uso de aguas negras de la ciudad de México, *Agrociencia*, 27, 95-119.
- Metcalf and Eddy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4 ed.). Nueva York, Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Moreno-Martínez, E., M. Vázquez-Badillo y F. Facio-Parra. 2000. Uso de sales del ácido propiónico para inhibir la producción de aflatoxinas en granos almacenados de maíz. *Agrociencia* 34:477-484.
- Nielsen. *Food Analysis*. 3ra edition. Kluwer Academic/Plenum Publishers UA: New York. 2003. pp: 143.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Diario Oficial de la Federación del 2 de marzo de 2007. file:///C:/Users/ASUS/Downloads/nom-147-semarnat_ssa1-2004_unlocked.pdf. Fecha de consulta: 27/11/2024.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT. 2002. Diario Oficial de la Federación del 15 de agosto de 2003. <https://dof.gob.mx/nota-detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0>. Fecha de consulta: 27/11/2023.
- Orús, A. 2023. Superficie de cultivo mundial de maíz 2016-2023. Publicado 17 de febrero de 2023. <https://es.statista.com/estadisticas/1130624/superficie-maiz-cultivada-en-el-mundo/>. Fecha de consulta: 28 de junio de 2024.
- Pacheco, R. (2007). Participación de la comisión racional del agua en el tratamiento de aguas residuales en la cuenca Lerma-Chapala, Estadísticas federales y realidades estatales. *Región y Sociedad*, 19(39), 55-76.
- Peña-Cabriales, J.J., O.A. Grageda-Cabrera y J.A. Vera-Núñez. 2001. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: uso de las técnicas isotópicas (^{15}N). *Terra Latinoamericana* 20: 51-56.
- Pescod M. 1992. *Wastewater treatment and use in agriculture*. FAO. Italia. <http://www.fao.org/./docrep/T0551E/T0551E00.htm>. Fecha de consulta: 26/11/24.
- Potisek-Talavera, M. del C, U. Figueroa-Viramontes, G. González-Cervantes, R. Jasso-Ibarra e I. Orona-Castillo. 2010. Aplicación de biosólidos al suelo y su

- efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. *Terra Latinoamericana* 28: 327-333.
- Rivas-Lucero, B., Nevarez-Morillón, G., Bautista-Margulis, R., Pérez-Hernández, A. 8. Saucedo-Terán, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. *Agrociencia*, 37(2), 157-166.
- SIAP, 2018. <http://infosiap.siap.gob.mx>. Fecha de consulta 18/01/2018.
- Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 10(1):15-21.
- Singh, R.P. y M. Agrawal. 2008. Potential Benefits and Risks of Land Application of Sewage Sludge. *Waste Management*: 28:347-358.
- Stehouwer, R. C., A. M. Wolf, and W. Dotty. 2000. Chemical monitoring of sewage sludge in Pennsylvania, variability and application uncertainty. *J. Environ. Qual.* 29: 1686-1695.
- Shober, A. L., R. C. Stehouwer, and K. E. Macneal. 2003. Farm assessment of biosolids effects on soil and crop tissue quality. *J. Environ. Qual.* 32: 1873-1880.
- Valbuena, D., O. Díaz-Suárez, L. Botero-Ledesma y R. Cheng-Ng. 2002. Detección de helmintos intestinales y bacterias indicadoras de contaminación en aguas residuales, tratadas y no tratadas. *Interciencia* 27(12): 710-714
- Vázquez-Alarcón, A., L. Justin-Cajuste, C. Siebe-Grabach, G. Alcántar-González, y M.D.L. De la Isla, (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35(3), 267-274.
- Vergara-Sánchez, M. Á., J.D. Etchevers, J. Padilla-Cuevas. 2005. La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39:259-266.-2024.
- Watson, M.E. and Robert A. Isaac, 1990, *Analytical Instruments for Soil and Plant Analysis*. In R.L. Westerman (ed) *Soil Testing and Plant Analysis*. 3. Edition. SSSA Book Series N° 3, Madison WIS U.S.A.
- Williams, S. (ed.), *Official Methods of analysis of the association of official analytical Chemists (AOAC)*. 2023. 22th. Edition, 3:3.124 y 2:2.057.

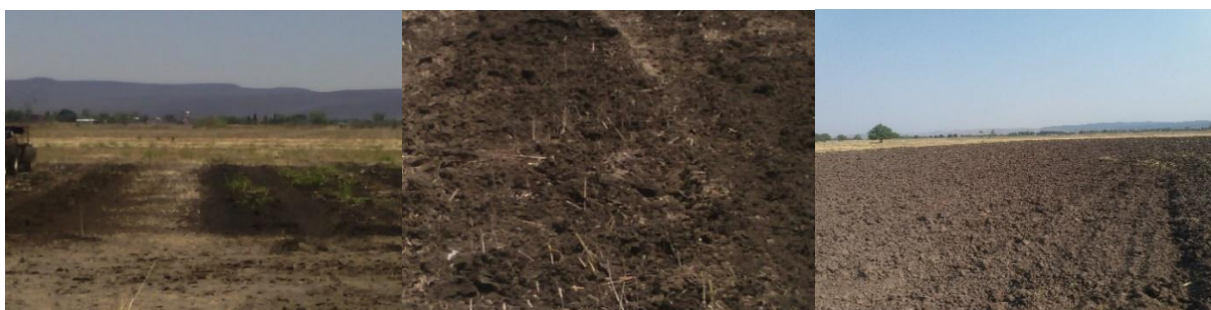
Wogan, G. E., and P. M. Newberne. 1967. Dose-response characteristics of aflatoxin B1 carcinogenesis in the rat. *Cancer Res.* 27: 543-548.

CAPÍTULO VII. ANEXOS.

Anexo 1. Acarreo y distribución de lodo biológico en parcela antes de establecer el experimento. Campo Experimental Bajío.



Anexo 2. Proceso de incorporación del lodo en el suelo y preparación del terreno.



Anexo 3. Establecimiento y desarrollo del cultivo. Campo Experimental Bajío.



Anexo 4. Proceso de análisis en el laboratorio.



Anexo 5. Instrumentos de análisis en los procesos de laboratorio.



Anexo 6. Análisis de fósforo por espectrometría de UV visible.

