



S.E.P.

S.E.S.

Tec.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“RESPUESTA MORFOLÓGICA Y METABÓLICA DE LOS
AMINOÁCIDOS TRIPTÓFANO, LISINA, METIONINA Y PROLINA
EN LOS GRANOS DE *Zea mays L.* A DIFERENTES DOSIS DE
COMPOSTA ELABORADA CON BIOSÓLIDOS”.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA
BEATRÍZ JUÁREZ ROBLES
N. DE CONTROL:0428D0109**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ**

**CO-DIRECTORA:
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL**

Metepec, Estado de México, noviembre de 2018

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "Respuesta morfológica y metabólica de los aminoácidos triptófano, lisina, metionina y prolina en los granos de Zea Mais L a diferentes dosis de composta elaborada con biosólidos", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales presenta la C. Beatriz Juárez Robles, con número de control 0428D0109 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesario para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
DIRECTOR DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ
BERRIEL
CO DIRECTORA DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
REVISORA

DR. JORGE ALBERTO LUGO DE LA FUENTE
REVISOR

DRA. ROCÍO VACA PAULÍN
REVISORA

DRA. MARÍA DEL CARMEN DÍAZ NAVA
REVISORA

JLGR/magj

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207, Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Metepec, Edo. de México, 27/noviembre/2018

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1258/2018.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

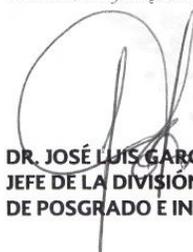
C. BEATRIZ JUÁREZ ROBLES
CANDIDATA AL GRADO DE DOCTORA
EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E.

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "Respuesta morfológica y metabólica de los aminoácidos triptófano, lisina, metionina y prolina en los granos de Zea Mais L a diferentes dosis de composta elaborada con biosólidos", la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

"Educación, Integridad y Ciencia"



DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj



Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México.
Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmutador: 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



ISO 9001:2015
CERTIFIED

AGRADECIMIENTOS

Agradezco por la colaboración de este trabajo:

Al **Tecnologico Nacional de Mexico/ Instituto Tecnologico de Toluca y al Laboratorio de Ingenieria Ambiental LIIA** de la misma institución por las instalaciones brindadas para la realización de esta investigación.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia CONACYT** por la beca otorgada para la realización de los estudios de posgrado.

Al **Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de México COMECyT** por el apoyo financiero para la impresión de esta tesis.

Quedo especialmente agradecida con los asesores de tesis que me compartieron sus experiencias y conocimientos para el desarrollo de esta investigación:

Al **Dr. Isaias de la Rosa Gómez** por brindar el apoyo académico, de recursos, y motivacional. Por todas sus aportaciones científicas y sugerencias. Por la confianza, apertura e impulso en el desarrollo de este objetivo en común.

A la **Dra. Ma. del Consuelo Hernández Berriel, Dra Ma. del Carmen Díaz Nava, Dra. Rocío Vaca Paulín, Dra Ma. del Carmen Carreño de León** y al **Dr. Jorge Alberto Lugo de la Fuente** por el aporte de sus conocimientos y experiencias que me sirvieron como guía en mi labor científica. Siempre tuvieron buenos comentarios y aportes que enriquecieron este trabajo, así como su atención, amabilidad y accesibilidad.

A la **Dra. Ma. De Consuelo Mañon Salas** quien también se colaboro, así como a los estudiantes de servicio social que en algún momento apoyaron en la realización de la parte experimental en la parcela agrícola.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo que recibí de mi **padre, madre y hermanas (Oli, Susy, Lau, Eli, Cris)** que en momentos de arduo trabajo me apoyaron en mis actividades personales y por que siempre he contado con ellos.

DEDICATORIAS

A mis hijos:

Jimena y Sebastián

Mi gran tesoro y felicidad, a quien amo y siempre me impulsan a ser una mejor persona.

A mis padres:

*Margarita Robles Garibay
y Pablo Juárez Arriaga*

Por su amor y por que con su esfuerzo me guieron por el sendero del bien y la superación, ya que sin sus enseñanzas no hubieran sido posibles.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	iv
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	4
1. FUNDAMENTOS	6
1.1 Suelo	6
1.1.2 Suelos en el Estado de México	6
1.1.3 Uso agrícola del suelo	7
1.2 <i>Zea mays</i> L.	8
1.2.1 Clasificación biológica y taxonómica	8
1.2.2 Características botánicas y morfo-fisiológicas	9
1.2.3 Variedad de razas, zonas de cultivo y características físicas	9
1.2.4 Composición química de los granos	10
1.2.5 Las proteínas y aminoácidos en el grano de <i>Zea mays</i> L.	12
1.2.6 Áreas de siembra, épocas de cultivo y fertilización	17
1.2.7 Producción y demanda del maíz	19
1.3 Biosólidos	19
1.3.1 Generación de biosólidos en México	20
1.3.2 Uso y disposición final de los biosólidos	21
1.4 Estiércol degradado	23
1.5 Arcilla	24
1.6 Composta	27
1.7 Estado del Arte	32
2. MÉTODO	34
2.1 Ubicación y descripción del sitio experimental	34
2.2 Etapas del experimento	36
2.3 Compostaje	38
2.3.1 Acondicionamiento	38
2.3.2 Pilas de compostaje	39

2.3.3 Muestreo y análisis de calidad de biosólidos y composta	39
2.4 Diseño experimental	40
2.5 Muestreo y caracterización del suelo preliminar	41
2.6 Dosificación de las enmiendas evaluadas	42
2.7 Material vegetal	44
2.8 Preparación del suelo y labores de cultivo del maíz	44
2.8.1 Cosecha en seco y caracterización morfo-fisiológica de <i>Zea Mays L.</i>	45
2.8.2 Evaluación de la calidad nutritiva y metabólica del grano de <i>Zea mays L.</i>	48
2.9 Muestreo y caracterización del suelo enmendado	49
2.10 Análisis estadístico	50
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
3.1 Compostaje	51
3.1.2 Muestreo y análisis de calidad de biosólidos y composta	53
3.2 Muestreo y caracterización del suelo preliminar	57
3.3 Dosificación de las enmiendas evaluadas	60
3.4 Material vegetal	62
3.5 Preparación del suelo, labores de cultivo y seguimiento del maíz	64
3.6 Caracterización del <i>Zea mays L.</i>	65
3.6.1 Rendimiento del grano	65
3.6.2 Características morfo-fisiológicas de <i>Zea mays L.</i>	67
3.6.3 Evaluación de la calidad nutritiva y metabólica del grano de <i>Zea mays L.</i>	71
3.6.4 Análisis de correlación lineal simple entre las variables morfo-fisiológicas, nutraceuticas y metabólicas de <i>Zea mays L.</i>	79
3.7 Caracterización del suelo enmendado	82
CONCLUSIONES	86
REFERENCIAS	88
ANEXOS	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 Ubicación geoespacial de la parcela experimental	35
Figura 2.2 Diagrama de flujo de la parte experimental	37
Figura 2.3 Dimensión de la parcela y distribución de los tratamientos	45
Figura 3.1 Dinámicas de a) temperatura; b) pH; c) % humedad en el compostaje de biosólidos	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1.1 Composición química de muestras de maíz de grano azul	11
Tabla 1.2 Contenido de minerales en maíz	12
Tabla 1.3 Componentes del estiércol en tres especies animales (%)	23
Tabla 1.4 Influencia del tiempo en la composición del estiércol (%)	24
Tabla 2.1 Análisis para evaluar la calidad de la composta y los biosólidos	40
Tabla 2.2 Análisis para la caracterización del suelo preliminar	42
Tabla 2.3 Composición del fertilizante inorgánico	43
Tabla 2.4 Características morfo-fisiológicas evaluadas en <i>Zea mays L.</i> cultivada en suelo enmendado con biosólidos compostados y sin compostar.	46
Tabla 2.5 Análisis de calidad nutritiva y metabólica en los granos de <i>Zea mays L.</i>	49
Tabla 3.1 Caracterización de biosólidos y compostas	53
Tabla 3.2 Caracterización del suelo preliminar	57
Tabla 3.3 Límites establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000	58
Tabla 3.4 Límites de CE	59
Tabla 3.5 Límites de pH	59
Tabla 3.6 Concentración de metales en suelo aceptadas internacionalmente	60

Tabla 3.7	Cálculo para determinar la dosis de aplicación	61
Tabla 3.8	Calidad de la semilla de <i>Zea mays L.</i>	62
Tabla 3.9	Seguimiento en el crecimiento del cultivo	64
Tabla 3.10.	Rendimiento del grano de maíz por tratamiento	66
Tabla 3.11	Caracterización morfo-fisiológica de <i>Zea mays L.</i> cultivado bajo la aplicación de diferentes dosis de composta y biosólidos	68
Tabla 3.12	Caracterización de la calidad nutritiva del grano de <i>Zea mays L.</i> en las diferentes dosis de biosólidos y composta	71
Tabla 3.13	Concentración de aminoácidos en granos de <i>Zea mays L.</i> cultivado en suelo enmendado con biosólidos y composta	76
Tabla 3.14	Correlaciones Producto-momento de Pearson entre variables morfo-fisiológicas, nutritiva y metabólicas en <i>Zea mays L.</i>	80
Tabla 3.15	Caracterización del suelo enmendado	82

RESUMEN

Los biosólidos poseen características que pueden mejorar la fertilidad de los suelos, sin embargo su aplicación depende de las características del biosólido, suelo y cultivo. Por tal razón es necesario evaluar la dosis a aplicar y los efectos que causa en los mismos. El objetivo de este estudio fue evaluar, bajo condiciones de campo, si había cambios en la calidad morfo-fisiológica, nutritiva, metabólica (medida por el contenido de lisina, triptófano, metionina y prolina) y el rendimiento en los granos de *Zea Mays L.*, al aplicar diferentes dosis de composta de biosólidos y biosólidos deshidratados. El suelo experimental se dividió en subparcelas de acuerdo a un diseño en bloques completamente aleatorios con 5 tratamientos y 7 repeticiones, los tratamientos aplicados al suelo fueron CB₁₂=composta de biosólidos a 12 t ha⁻¹, CB₂₄=composta a 24 t ha⁻¹, lo mismo para biosólidos granulados sin compostar BF₁₂ y BF₂₄ y un control de fertilizante mineral FM₁₀ de 10 t ha⁻¹. Se realizaron ANOVA y prueba de Tukey con una significancia estadística $\alpha=0.05$ % para las variables analizadas, además de correlaciones simples. En las características morfo-fisiológicas se midieron 12 variables vegetativas, en las características nutritivas se midió P, K, Ca y Zn. En las características metabólicas se determinaron los aminoácidos lisina Lys, triptófano Trp, metionina Met y prolina Pro. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos en las características, obteniendo una mejor respuesta en los tratamientos con biosólidos principalmente BF₂₄, y un menor efecto en CB₁₂. En las características morfo-fisiológicas: AP, CFL, LM, PM, TG y el rendimiento CB₁₂ fue inferior al resto de los tratamientos; la concentración de P fue mayor en CB₁₂, el K fue superior BF₁₂, en Zn no hubo diferencias significativas entre tratamientos, para Ca se encontraron mayores concentraciones en los tratamientos con biosólidos, en estos mismos tratamientos la concentración de Trp y proteína fue mayor; para la Met no se tuvo el mismo efecto ya que fue mayor en CB₁₂; en la Pro todos los tratamientos tuvieron diferencias significativas. En las correlaciones simples, el rendimiento del grano estuvo correlacionado positivamente con el peso de la mazorca PM ($r=0.60$), Lys ($r=0.61$), Pro ($r=0.63$) y

clorofila CFL($r=0.77$). Considerando estos resultados los biosólidos son la mejor opción para enmendar suelos agrícolas.

ABSTRACT

Biosolids have characteristics that can improve the fertility of soils, however their application depends on the characteristics of the biosolids, soil and culture. For this reason it is necessary to evaluate the dose to be applied and the effects it causes in them. The objective of this study was to evaluate, under field conditions, whether there were changes in the morpho-physiological, nutritive, metabolic quality (measured by the content of lysine, tryptophan, methionine and proline) and the yield in *Zea Mays L.* grains, when applying different doses of biosolids and dehydrated biosolids. The experimental soil was divided into subplots according to a completely randomized block design with 5 treatments and 7 replications. The treatments applied to the soil were CB₁₂= biosolids compost at 12 t ha⁻¹, CB₂₄ = compost at 24 t ha⁻¹, the same for granulated biosolids without composting BF₁₂ and BF₂₄ and a mineral fertilizer control FM₁₀ of 10 t ha⁻¹. ANOVA and Tukey test were performed with a statistical significance $\alpha = 0.05\%$ for the variables analyzed, in addition to simple correlations. In the morpho-physiological characteristics, 12 vegetative variables were measured, in the nutritional characteristics P, K, Ca and Zn were measured. The amino acids lysine Lys, Tryptophan Trp, methionine Met and proline Pro were determined in the metabolic characteristics. The results showed significant differences between the treatments in the characteristics, obtaining a better response in the treatments with biosolids mainly BF₂₄, and a lower effect in CB₁₂. In the morpho-physiological characteristics: AP, CFL, LM, PM, TG and the CB₁₂ yield was lower than the rest of the treatments; the P concentration was higher in CB₁₂, the K was higher BF₁₂, in Zn there were no significant differences between treatments, for Ca higher concentrations were found in the treatments with biosolids, in these same treatments the concentration of Trp and protein was higher; for the Met, the same effector was not present since it was greater in CB₁₂; in Pro, all treatments had significant differences. In the simple correlations, the grain yield was positively correlated with the weight of the ear PM ($r = 0.60$), Lys ($r = 0.61$), Pro ($r = 0.63$) and chlorophyll CFL ($r = 0.77$). Considering these results, biosolids are the best option to amend agricultural soils.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una investigación de campo donde se aborda la problemática del manejo y tratamiento de los biosólidos, ya que actualmente se enfrentan serios problemas ambientales asociados con su inadecuada disposición que deteriora los cuerpos de agua, suelo y aire, lo que representa una problemática de salud pública, económica (costos de tratamiento) y social.

Por otra parte, la agricultura atraviesa una creciente demanda mundial de alimentos e inestabilidad de los sistemas de cultivo, lo que conlleva a promover un alto consumo de fertilizantes y plaguicidas que erosionan y salinizan el suelo además de dañar y extinguir las especies vegetales nativas, así como de una sobreexplotación del suelo que rebasa su capacidad productiva.

La importancia del metabolismo y crecimiento de los cultivos en relación a la nutrición mineral y orgánica ha abierto nuevas perspectivas para las prácticas de fertilización. Por otra parte, el compostaje es un método eficiente para la valorización de los biosólidos y permite el aprovechamiento de los nutrientes que contiene y que pueden mejorar la estructura del suelo, la fertilidad, el crecimiento y la productividad de los cultivos.

Dado que el grano de maíz es el segundo cereal más consumido a nivel nacional e internacional después del trigo, es de gran interés mantener sus propiedades y características nutritivas pues de existir alguna modificación en su composición y/o concentración en aminoácidos esenciales como la lisina, triptófano y metionina, podría impactar a la salud humana y animal. De igual manera es de gran interés incrementar el rendimiento del maíz, por lo que es conveniente explorar estrategias para mejorar esta situación mediante prácticas de fertilización.

Es por ello que en esta investigación los biosólidos granulados y compostados fueron aplicados a suelo agrícola, para evaluar la respuesta en el cultivo de maíz azul de variedad criolla y los cambios en el suelo experimental.

El objetivo principal fue evaluar si la aplicación de dichos materiales modificaba el rendimiento, la calidad nutritiva, las características morfo-fisiológicas y metabólicas (medidas por el contenido de los aminoácidos triptófano, lisina, metionina y prolina) en los granos de *Zea mays L.*

De igual manera los resultados de esta investigación servirán para conocer si la aplicación de composta de biosólidos y biosólidos degradados es adecuada para su uso en la agricultura y reducir los problemas ambientales que ocasionan.

En el apartado 1 se describen los conceptos básicos de los suelos y el desarrollo del cultivo de *Zea mays L.*, así como el manejo y tratamiento de los biosólidos, considerando al compostaje como una opción de tratamiento utilizando arcilla y estiércol degradado.

En el apartado 2 se presenta el método de cómo se desarrolla la investigación, desde la ubicación y descripción del sitio experimental, la caracterización del suelo preliminar, las labores de cultivo, el proceso de muestreo y análisis de las variables evaluadas en *Zea mays L.* para finalmente realizar el análisis estadístico.

En el apartado 3 se presentan y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente presentan las conclusiones y fuentes consultadas en esta investigación.

1. FUNDAMENTOS

La superficie terrestre está cubierta por una fina capa de suelo en donde se establece una relación dinámica entre la biodiversidad, a fin de mantener la productividad biológica. Los residuos, tanto animales como vegetales, vuelven al suelo para descomponerse gracias a la acción microbiana presente en él. Su preservación es uno de los grandes desafíos a enfrentar (Scotti *et al.*, 2015).

1.1 Suelo

Es considerado como un cuerpo natural vivo dinámico, que tiene una función vital en los ecosistemas globales, compuesto por material mineral (formado principalmente de arcillas, limo y arena), materia orgánica (MO), agua, aire y organismos vivos. Es el producto final de la influencia del tiempo combinado con el clima, topografía, organismos (flora y fauna) y de materiales parentales (rocas y minerales originarios) (FAO/UNESCO/ISRIC, 2007).

Se caracterizan por tener diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas tales como color, textura, estructura, espesor, composición (tipo de minerales y elementos químicos presentes) (Abdul *et al.*, 2015). En general, el suelo contiene 2-5 % de partículas orgánicas, 20-45 % minerales, 10-25 % de agua y 15-25 % de aire; sin embargo, estas proporciones pueden variar en diferentes suelos debido a la localidad y el clima. No todos los suelos son adecuados para todo tipo de cultivos; por lo tanto, la evaluación de la calidad del suelo es muy importante (Abdul *et al.*, 2015; Kunkoro *et al.*, 2014; Teng *et al.*, 2014).

1.1.2 Suelos en el Estado de México

De acuerdo con la clasificación internacional de los suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, la Unión Internacional de Ciencias del suelo y el Centro Internacional de Información y Referencia en Suelos

(FAO/IUSS/ISRIC) en México se encuentran 25 unidades de suelo y 7 subunidades, de ellas 78 % conforman la superficie nacional. Las 3 categorías dominantes en términos de superficie, son los Leptosoles, Regosoles y Calcisoles (FAO/IUSS/ISRIC, 2007).

En el Estado de México los suelos dominantes son: Andosoles con 4,799.08 km², seguidos de los Feozems con 4,727.18 km², Regosoles con 2,656.83 km², Vertisoles con 2,414.85 km², Cambisoles con 1,960.47 km² (INIFAP, 2010). En el municipio de Zinacantepec los tipos de suelos dominantes son Andosol (56-84 %), Feozem (28.25 %), Cambisol (2.38 %), Arenosol (0.79 %) y Vertisol (0.28 %) (INIFAP, 2010). De acuerdo con el atlas ecológico de la cuenca hidrográfica del río Lerma (Gobierno del Estado de México, 1993) los Andosoles se ubican en las partes altas, correspondientes al Nevado de Toluca y sus estribaciones.

Se caracterizan por ser producto de la degradación de cenizas y arenas generadas por la actividad volcánica; poseen una capa superficial que varía de color que puede ser negro, gris u ocre; su textura es esponjosa y en ocasiones muy suelta, donde las actividades que se desarrollan son principalmente forestales con el establecimiento de plantaciones; presentan problemas para su uso agrícola por su poca capacidad de la vegetación cultivada a absorber fósforo (Gobierno del Estado de México, 1993).

1.1.3 Uso agrícola del suelo

El uso agrícola del suelo y de las comunidades vegetales es una actividad parcial del proceso global de producción, en México la utilización de plantas alcanza niveles muy altos en productos como el maíz (*Zea mays L.*), frijol (*Phaseolus sp.*), calabaza (*Cucurbita spp*) y chile (*Capsicum annum*) (INECC, 2014).

En este aspecto existe una problemática para aumentar el nivel productivo por encima del crecimiento poblacional, ya que se ha seguido un modelo basado en el

alto consumo de fertilizantes y plaguicidas para mantener la producción de monocultivos (Chengsong *et al.*, 2012), además de demandar constantemente la expansión de la frontera agrícola con pérdida de las comunidades vegetales nativas del país.

Adicional a esto por las características topográficas y climáticas del país, el potencial para la agricultura se ve reducido, por estas razones no ha sido posible incrementar los rendimientos de los cultivos, ya que se continúa con la importación de granos básicos (INECC, 2008), se afecta la capacidad productiva de la tierra, agota los mantos freáticos, saliniza el suelo, contamina las aguas superficiales y subterráneas con agroquímicos y ocasiona daños a la flora y fauna al ser desplazadas (Muslera y Ratera, 1991).

A pesar de lo anterior, la capacidad productiva del país ofrece aún grandes oportunidades, siempre y cuando se aprovechen los recursos naturales en forma sustentable; así como, el potencial tecnológico, social y los conocimientos empíricos sobre el uso de la naturaleza (INECC, 2014).

1.2 *Zea mays* L.

Los análisis genéticos del maíz prehistórico le señalan una antigüedad de 9,000 a 11,000 años de acuerdo a lo encontrado en la caverna El Ajuereado y El Riego, en la zona de Tehuacán, Puebla. Los principales factores que han incidido en la evolución del maíz son las cruces interraciales, intergenéticas, las mutaciones, el impulso genético, la selección natural y artificial, lo que ha llevado al nacimiento de las variedades que actualmente conocemos (Carillo, 2009).

1.2.1 Clasificación biológica y taxonómica

Recibe el nombre común de maíz y para su clasificación dentro del reino Vegetal, subdivisión *Pteropsidae*, a la clase de las angiospermae, subclase

monocotyledonae, grupo *glumiflorae*, al orden de las graminales, perteneciente a la familia Gramínea o Poaceae, tribu *Maydeae*, del género *Zea*, especie *mays*, con variedades diversas. Con base en caracteres de la espiga o inflorescencia masculina, el género *Zea* ($2n=20$), se divide en dos secciones (Doebley e Iltis, 1980; Iltis y Benz, 2000):

- a) La sección *Luxuriantes* o teosintles que agrupa 4 especies
- b) La sección *Zea* que se circunscribe a una sola especie (*Zea mays*) con 4 sub especies (INECC, 2008; INECC, 2014; Sánchez *et al.*, 1998).

1.2.2 Características botánicas y morfo-fisiológicas

La especie *Zea mays L.* es una planta anual de metabolismo fotosintético, con inflorescencias estaminadas (masculinas) y pistiladas (femeninas); tallos entre 0.6 y 3 m de altura, erectos, con entrenudos cilíndricos en la parte superior y estrías alternas en la inferior. Con periodo vegetativo en verano. El fruto también llamado grano o semilla, está compuesto de dos partes principales el embrión (germen) y el endospermo. Cada mazorca contiene de 200-400 granos que pueden ser de diversos colores negruzco, azulado, púrpura, rojo, blanco y amarillo. El cultivo de maíz tienen un ciclo que comprende cinco periodos que son: nascencia, crecimiento, floración, fructificación y maduración-secado. El “sistema Iowa”, divide el ciclo en etapas vegetativas (V) y etapas reproductivas (R) (Jugenhermer, 1981).

1.2.3 Variedad de razas, zonas de cultivo y características físicas

En México existe una gran diversidad de variedades criollas de maíz azul, las cuales corresponden a varias razas. En Valles Altos de la Mesa Central (Estado de México y Tlaxcala), predomina el maíz azul de la raza Chalqueño y Cónico, en el noroeste del país (Sinaloa) predomina la raza Tabloncillo (Agama-Acevedo *et al.*, 2011).

En la misma raza de maíz puede haber variabilidad en las características físicas (tamaño, peso, densidad y dureza del grano), así como en su composición química (proteínas, nutrientes, aminoácidos) y morfología del grano (cambios en la

morfología del almidón). Estas variables, aunque están definidas por el factor genético, también dependen de las prácticas de cultivo, condiciones climáticas y tipo de suelo, así como la interacción entre estos factores.

Las características físicas del grano de maíz tienen relación con aspectos de producción y rendimiento, (tamaño de grano, peso hectolítrico, dureza, capacidad de absorción de agua, entre otros); mientras que, su composición química y la morfología de los gránulos de almidón, ayudan a definir la calidad nutritiva y su uso en la elaboración de alimentos (Agama-Acevedo *et al.*, 2011). Estas variedades de maíz tienen ciertas limitantes como su alta susceptibilidad al ataque de las plagas y por la rápida pérdida de vigor y viabilidad de sus semillas (Salinas-Moreno *et al.*, 2010).

1.2.4 Composición química de los granos

Existen varias especies de maíz pigmentado de color blanco, amarillo, rojo, morado, café y azul y que están incluidas en las 41 razas de maíz descritas en México (Agama-Acevedo *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 1991). El maíz azul (*Zea mays L.*), debe su color a las antocianinas las cuales están localizadas en una capa delgada que recubre al endospermo, el cual está formado por proteínas y gránulos de almidón.

En México existe una gran diversidad de variedades de maíz azul, las cuales corresponden a varias razas. Dentro de las mismas razas, también existe variabilidad en tamaño, densidad y dureza del grano, así como en su composición química y morfología (cambios en la morfología del almidón). Estas variables, están definidas por el factor genético, pero también depende de las prácticas de cultivo, condiciones climáticas y tipo de suelo, así como la interacción entre estos factores (Agama-Acevedo *et al.*, 2011).

En base a materia seca y en forma general, el grano contiene aproximadamente 77 % almidón, 2 % azúcar, 9 % proteínas, 5 % aceite, 5 % pentosas y 2 %

cenizas. Las cenizas son sales de Ca, Mg, Mn, Zn, P, Al, Fe, Na, K, S, Mo, Cu, Bo y Cl. Para algunos nutrientes como el N y el P, la mayor parte de la cantidad total se encuentra en el grano. Otros como el molibdeno, el S y Zn se encuentran distribuidos uniformemente entre el grano y la parte vegetal (Jugenheimer, 1981; Skerman y Riveros, 1999).

El almidón contiene dos tipos de homopolímeros de glucosa, amilasa y amilopectina (Lim, 2013). En el maíz azul se tiene una menor cantidad de almidón, un índice glucémico inferior al maíz blanco, y una carga proteica superior en un 20 % al del maíz blanco (Méndez *et al.*, 2005). La composición de nutrientes en el maíz azul de las razas Tabloncillo (Sinaloa) y Chalqueño (Estado de México) se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Composición química de muestras de maíz de grano azul

Componente	Azul Tabloncillo	Azul Chalqueño
Humedad (%)	8.58 ± 0.31	8.29 ± 0.17
Cenizas (%)	1.63 ± 0.01	1.52 ± 0.03
Lípidos (%)	5.36 ± 0.04	4.91 ± 0.02
Proteínas (%)	9.04 ± 0.23	9.04 ± 0.12
Almidón (%)	78.50 ± 0.95*	82.90 ± 0.86*

Agama-Acevedo *et al.* (2011). Valores en base seca, excepto humedad. media±error std. *Contenido total de almidón en el endoespermo de maíz azul.

Los minerales no ha sido bien estudiado en esta variedad de maíz, los datos más conocidos son para el maíz blanco y amarillo debido a su mayor consumo y se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Contenido de minerales en maíz

Componente	*%	**Concentración (mg 100 g ⁻¹)
N	1.37	--
P	0.33	89.00
K	0.42	270.00
Ca	0.015	2.00
Zn	0.0020	0.45

(*Jugenhermer, 1981; **Lim, 2013).

Las vitaminas más importantes en el grano son la vitamina C (6.8 mg), tiamina (0.200 mg), riboflavina (0.060 mg), niacina (1.700 mg), ácido pantoténico (0.760 mg), vitamina B (60.055 µg), folato total (46 µg), colina total (23 mg), β-caroteno (1 mg), vitamina A (1 IU), luteína + zeaxantina (34 µg), vitamina E (α- tocoferol) (0.07 mg), γ-tocoferol (0.15 mg) y la vitamina K (filoquinona) (0.3 µm) (Lim, 2013).

1.2.5 Las proteínas y aminoácidos en el grano de *Zea mays L.*

El grano del maíz, como la de otros cereales, incluye pericarpio (6 %), endospermo (82 %) y germen (12 %). El principal componente estructural del endospermo es el almidón. La mayor parte de las proteínas en un grano maduro están en el endospermo y germen; pero, la proteína del germen es superior tanto en cantidad como en calidad (Nuss y Tanumihardjo, 2010).

Las proteínas son biomoléculas de alto peso molecular de cadenas largas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos, compuestas por los elementos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y en ocasiones fósforo y azufre. El contenido proteico está influenciado por la disponibilidad de sólidos nitrogenados, la calidad de las proteínas se determina por el contenido de aminoácidos (Mathews, 2002; Nelson, 2009). Las proteínas en los granos de las plantas se pueden clasificar en tres categorías (Shewry, 2002):

- a) Proteínas estructurales y metabólicas, necesarias para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas
- b) Proteínas de protección, protegen al grano contra diferentes tipos de daños bióticos y abióticos y
- c) Proteínas de reserva, que sirven como almacén de aminoácidos y son metabolizadas durante la germinación para fungir como fuente de nitrógeno, carbono y azufre para las etapas del desarrollo de la nueva planta. Son las que constituyen una gran proporción del total de proteínas en granos, la bioquímica y los mecanismos fisiológicos que regulan la síntesis y que son de gran interés.

También se pueden clasificar en cuatro grupos principales de acuerdo a su solubilidad en diferentes agentes: albúminas, globulinas, glutelinas y prolaminas. Las albúminas y glutelinas se caracterizan por un excelente balance de aminoácidos esenciales y corresponden a las proteínas del germen (Vasal, 2000; Dagne *et al.*, 2011). Las globulinas y prolaminas llamadas de reserva son proteínas de inferior calidad debido principalmente a su bajo contenido de algunos aminoácidos esenciales entre los que destacan la lisina y triptófano (Edelman y Colt, 2016).

En el endospermo del maíz se almacenan en promedio las siguientes proporciones de proteína: albúminas (3 %), globulinas (3 %), zeínas (60 %) y glutelinas (34 %) (Prasana *et al.*, 2001).

Algunos tipos específicos de prolaminas (zeínas) están relacionados con la dureza del endospermo del grano, su función es almacenar N, C y S, y suministrar estos elementos importantes a la plántula en germinación; en los genotipos de maíz las zeínas representan 50 a 70 % de la proteína del endospermo y se caracterizan por un alto contenido de glutamina, leucina y prolina (desprovistas de lisina y triptófano) (Prasana *et al.*, 2001).

La cantidad y calidad de proteínas depende de su contenido de aminoácidos esenciales (Okumoto y Pilot, 2011). Las prolaminas en el maíz tienen un alto contenido de leucina, alanina, prolina y glutamina. Las albúminas y globulinas son ricas en los aminoácidos básicos lisina, arginina, triptófano, metionina y cistina (Lim, 2013).

Los aminoácidos son constituyentes de las proteínas que proporcionan la nutrición esencial para los humanos y animales, y regulan las señales del crecimiento y desarrollo de las plantas (Deng *et al.*, 2017). Los aminoácidos contienen dos grupos funcionales comunes a todos ellos: un grupo amino $-NH_2$ y un grupo carboxilo $-COOH$. Los 20 aminoácidos principales presentan la misma estructura general, con la excepción de la prolina que consiste en un átomo de carbono en α al que se encuentran unidos un grupo $-COOH$, un grupo $-NH_2$ y un sustituyente R, que es el que confiere sus propiedades características a cada aminoácido (Mechthild, 2012; Okumoto y Pilot, 2011; Pratelli y Pilot, 2013).

La acción de los aminoácidos en los organismos vegetales se centra en su acción para ayudarlos a superar situaciones de estrés y de gran actividad metabólica como las que se producen en las fases de brotación, floración, fructificación, entre otras. Los aminoácidos desempeñan varios papeles críticos como osmoregulador, detoxificación de metales pesados, apertura de estomas y regulación del transporte de iones (traslado de nitrógeno orgánico), afecta la síntesis y actividad de enzimas, influye en la expresión de los genes y reacciones de oxireducción y homeostasis celular (Ben *et al.*, 2014).

Los aminoácidos son sintetizados por las plantas a partir del nitrógeno absorbido en formas de nitrato o amonio del suelo, dicho proceso supone un gasto energético por parte de la planta, en muchas ocasiones para evitar este gasto se procura adicionar directamente los aminoácidos (Lošák *et al.*, 2010).

La prolina es utilizada para compensar los desequilibrios celulares causados por el estrés ambiental. Su amplio uso en la naturaleza indica que tiene un papel biológico fundamental en la respuesta al estrés. Actualmente se reconoce que el metabolismo de la prolina impulsa procesos de señalización celular que promueven la apoptosis o la supervivencia celular, se ha demostrado que está implicada en la respuesta hipersensible en las plantas (Liang *et al.*, 2013).

La prolina mantiene la fotosíntesis y aumenta el porcentaje de germinación en condiciones adversas. Protege las membranas y las proteínas contra los efectos adversos de la alta concentración de iones inorgánicos, también funciona como un atrapador de radicales libres (Santoro *et al.*, 1992)

La metionina es un aminoácido limitante después de la lisina y triptófano en animales y la primera limitación en las legumbres (Scott y Bertran, 2004) uno de los dos aminoácidos que contiene azufre. En las plantas superiores, a partir de O-fosfohomoserina (OPH), las tres reacciones consecutivas catalizadas por γ -cistationina sintasa, β -liala cistationina, y metionina sintasa son únicos para la síntesis de metionina. La metionina es un precursor de etileno, por lo que incrementa la producción del cultivo, favorece el crecimiento radical y la asimilación de nitratos (Gigolashvili y Kopriva, 2014).

Los aminoácidos aromáticos como el triptófano son moléculas centrales en el metabolismo de las plantas ayuda y mejora los problemas de pigmento de la planta. Además de su función como bloques de construcción de las proteínas, sirve como precursor para una variedad de hormonas vegetales, como auxinas (ácido indol acético AIA, responsable del crecimiento de las células) y salicilatos, así como una amplia gama de metabolitos secundarios aromáticos con múltiples funciones biológicas y valor biotecnológico en la salud, industria médica y alimentaria (Bartel, 1997; Tzin y Galili, 2010; Vogt, 2010).

El triptófano es un precursor de alcaloides contra patógenos y herbívoros. Cuando las proteínas son oxidadas por ataque de las especies reactivas de oxígeno puede provocar daños irreversibles (Radwanski y Last, 1995).

El estrés por cualquier factor ambiental, que actúe sobre el vegetal afecta la respuesta bioquímica y fisiológica de los mismos y provocar daños y lesiones; en general, las situaciones de estrés originan una serie de cambios fisiológicos compensatorios que van encaminados a mantener las condiciones vitales del organismo. Sin embargo puede llegar a una fase de agotamiento, donde la capacidad adaptativa se agota, provocando perturbaciones metabólicas graves y, en algunos casos, la muerte vegetal (Ben *et al.*, 2014).

Los estados de estrés inducidos por factores ambientales (químicos, biológicos, mecánicos, hídricos, entre otros) deben ser considerados, estudiados y entendidos. Los mecanismos bioquímicos y moleculares por medio de los cuales las plantas soportan el estrés son necesarios para incrementar la tolerancia de los cultivos y conocer los límites del metabolismo al estrés (Choudhury *et al.*, 2013). Todos los aminoácidos de una proteína son susceptibles de modificación por el ataque de especies reactivas, entre los aminoácidos más sensibles se encuentra el triptófano.

La lisina es el aminoácido limitante para todos los cereales y la cantidad varía entre las especies, siendo más baja en el trigo y maíz y más alta en avena y arroz. Es un elemento necesario en la síntesis de todas las proteínas, hormonas, enzimas y anticuerpos (Gupta *et al.*, 2009; Lošák *et al.*, 2010; Meraz, 2014). Interviene en los mecanismos de resistencia a las tensiones extremas y potencia la síntesis de clorofila al ser una fuente de nitrógeno.

La nutrición nitrogenada es uno de los principales factores exógenos que limitan el crecimiento y producción de las plantas cultivadas. El contenido de aminoácidos en la biomasa de las plantas se ven afectados por la incorporación del nitrógeno.

Los nitratos y el amonio son las principales fuentes de nitrógeno para las plantas, las que se nutren de amonio generalmente muestran una mayor concentración de aminoácidos que las que absorben nitratos mientras que, un incremento en la concentración de nitrógeno en general, también aumenta el contenido de aminoácidos (Atanasova, 2008; Lošák *et al.*, 2010).

De acuerdo con Tilsner *et al.* (2005), con un bajo suministro de nitrógeno, los aminoácidos disminuyen. La mayor parte del NH_4^+ y NO_3 absorbido por las raíces se transloca en forma de aminoácidos y amidas a los brotes. La asimilación requiere que los carbohidratos sean translocados de los brotes a las raíces para proporcionar los esqueletos de carbono y la energía (ATP y NADPH) para el proceso de asimilación de NH_4^+ (Mengel y Kirkby, 2001). Por lo que la fertilización nitrogenada puede modificar la composición de los aminoácidos sintetizados en el maíz (Lošák *et al.*, 2010).

El maíz es deficiente en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano. En los granos de maíz blanco, los aminoácidos que destacan son el ácido glutámico 0.636 g, la leucina 0.348 g, la prolina 0.292 g, alanina 0.295 g, ácido aspártico 0.244 g, 0.150 g de fenilalanina, lisina 0.137 g, treonina 0.129 g, la isoleucina 0.129 g, valina 0.185 g, tirosina 0.123 g, arginina 0.131, glicina 0.127 g, serina 0.153 g, histidina 0.089 g, triptófano 0.023 g, metionina 0.067 g y la cistina 0.026 g (Deg *et al.*, 2017; Lim, 2013).

1.2.6 Áreas de siembra, épocas de cultivo y fertilización

Las condiciones óptimas de suelo y clima para lograr altos rendimientos no es limitante debido a la gran diversidad de tipos, razas y nuevas variedades de maíz que actualmente existen en México. Están adaptadas a prácticamente todas las condiciones que se puedan presentar en el país, se encuentra maíz cultivado a más de 3,000 msnm, con temperaturas medias mensuales durante su ciclo vegetativo de 28 °C en las zonas más cálidas, hasta 10 °C o menos de promedio mensual en las más frías (CDIA, 1980; Lim, 2013).

Zea mays L. prospera mejor en suelos fértiles, bien drenados y de textura media; en general, los mejores terrenos para el cultivo son los de origen aluvial, los franco-arcillosos y franco-limosos. Los suelos inadecuados para su cultivo son los completamente arcillosos o arenosos, con fuertes pendientes, erosionados, con altos porcentajes de sales (cloruros, sulfatos y carbonatos de sodio) y propensos a inundarse (CDIA, 1980; Skerman y Riveros, 1999).

Tiene un amplio intervalo de adaptación al pH; estudios de campo en suelos ácidos, indican que los máximos rendimientos se obtuvieron con pH de 6.0 o mayor. Posee mediana tolerancia a las sales. En estudios de invernadero se ha encontrado una caída drástica de los rendimientos cuando la conductividad eléctrica en el extracto de saturación es de 8 dS m⁻¹ (CDIA, 1980). Adquiere rendimientos máximos a CE de 2dS m⁻¹; de 50 % a CE de 9 dS m⁻¹ y nulos a 15.3 dS m⁻¹ (Skerman y Riveros, 1999).

Por lo general, el maíz requiere un fertilizante completo, sobre todo desde los 40 días de desarrollo hasta la etapa de maduración. La carencia de Zn provoca la clorosis foliar (Skerman y Riveros, 1999). Las necesidades de agua del cultivo en condiciones óptimas son de 800 a 1,200 mm durante su ciclo vegetativo (CDIA, 1980).

Las plantas de maíz tienen una alta demanda de potasio (K). A un nivel de rendimiento de grano de 10-12 t ha⁻¹, toda la biomasa aérea incorpora 250-300 kg de potasio, 80-90% del cual se acumula en los órganos vegetativos (Nagy 2006). El potasio influye en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz, tanto directa como indirectamente. Más de 60 reacciones enzimáticas son activadas por iones K⁺, principalmente durante la formación de carbohidratos y compuestos de proteínas de alto peso molecular, cumplen una importante función fisiológica en el metabolismo del agua y la regulación de la turgencia (Izsáki, 2017).

1.2.7 Producción y demanda del maíz

En cuanto a su producción a nivel internacional, los principales países productores de 1998-2010 fueron: Estados Unidos (40 %), China (19 %), Brasil (6 %), México (3 %) y el resto de los países (32 %) (SIAP, 2012). En México se cultivan anualmente 8.5 millones de hectáreas de maíz, con una media de 2.8 t ha⁻¹; en el Estado de México, de las 600 mil hectáreas que se siembran se estima que en 300 mil la productividad es muy baja (1.2 t ha⁻¹) (Ortíz-Cereceres *et al.*, 2007; Turrent, 1994; Turrent, 2009).

El maíz se trabaja en dos ciclos productivos: primavera-verano y otoño-invierno. En el ciclo otoño-invierno las regiones Noroeste y Norte son las que aportan los volúmenes más significativos de maíz (77.8% del total nacional), los contribuyentes mayoritarios son Sinaloa, Durango, Zacatecas, Sonora, San Luis Potosí, Tamaulipas y Coahuila (Castañeda-Sánchez, 2011; Galarza, 2011).

En el ciclo primavera-verano, destacan las regiones del Altiplano Central, Pacífico Sur y Bajío. La producción de estas regiones asciende al 76 % del total nacional del ciclo. Los principales productores son México, Guerrero, Michoacán y Jalisco (Castañeda-Sánchez, 2011; CDIA, 1980; Galarza, 2011).

En diferentes regiones del país se cultivan variedades criollas de maíz azul, en Valles Altos de la Mesa Central, predomina el maíz azul de la raza Chalqueño, para riego y Cónico para temporal, mientras que, en el noroeste la raza Tabloncillo. (Agama-Acevedo *et al.*, 2011).

1.3 Biosólidos

Los lodos residuales son los remanentes del proceso de tratamiento de aguas residuales, conformados por materia orgánica (MO) no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables y/o potencialmente tóxicos y sales inocuas y/o potencialmente tóxicas que se han removido durante el

tratamiento. Pueden estar presentes en sus formas originales o haber presentado transformaciones durante el proceso (Ortiz *et al.*, 1999).

Generalmente tienen un elevado contenido en MO, N, P, K, Ca, Mg, metales pesados tales como Cd, Pb, Zn, Mn, Cu, Ni, Cr y Hg; así como diversos grupos de microorganismos como hongos, bacterias, virus, nemátodos y parásitos. Las limitantes al hacer uso de este tipo de materiales se atribuye a la presencia de estos tres componentes: metales pesados, contaminantes orgánicos y organismos patógenos.

Debido a estas características la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos LGPGIR (2013), en su artículo 19 fracción V los clasifica como residuos de manejo especial, refiriendo a la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 como documento regulatorio para su tratamiento y disposición final (SEMARNAT, 2002).

A nivel estatal la NTEA-006-SMA-RS-2006 establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos. Un mejorador es cualquier compuesto de origen orgánico que por sus características puede utilizarse como acondicionador y fertilizante de suelos para mejorar su calidad productiva, incluyendo entre éstos a los biosólidos (SMA, 2006).

1.3.1 Generación de biosólidos en México

De acuerdo con Rojas y Mendoza (2012), los biosólidos generados por las 2,029 PTAR registradas en el inventario nacional de PTARs en el año 2011 fue de 640,000 a 10 millones de toneladas (CONAGUA, 2013). De acuerdo con lo publicado en 2016 por la CONAGUA se registró un incremento en el número de PTARs de 2,029 en el año 2011 a 2,477 plantas en 2015, con una capacidad instalada de 177 973.58 l/s, por lo que el volumen de biosólidos generados podría ser mayor (CONAGUA, 2015).

1.3.2 Uso y disposición final de los biosólidos

El confinamiento o uso sustentable de los biosólidos son las únicas formas de manejar este subproducto de las PTAR's. Los principales tipos de disposición final que son usados son los rellenos sanitarios (RESA), el confinamiento, la incineración y utilización con fines agrícolas. En México, los procesos de estabilización más usados son la digestión aerobia y el tratamiento con cal, por su facilidad de operación y en menor proporción es usado el compostaje, vermicomposteo y rara vez la digestión anaerobia (Iglesias y Pérez, 1989; Mahamud *et al.*, 1996; Moeller, 2000; Ramírez y Cardoso, 2000).

En el compostaje, el objetivo es obtener un material que cumpla los requisitos de reducción de patógenos, para su distribución y comercialización. En la estabilización de biosólidos de PTAR's domésticas generalmente se utilizan los métodos por pilas con aireación periódica y pila estática (Kiely, 1999; Tchobanoglous *et al.*, 1998). Después del compostaje, el producto final es más estable, donde la liberación de nutrientes de los biosólidos es lenta.

A diferencia de los biosólidos frescos, la composta se puede almacenar durante largos períodos de tiempo, conserva su calidad si se protege de la intemperie, y resulta en un producto con un agradable olor a tierra (Craig *et al.*, 2000). Los biosólidos contienen nutrientes para las plantas como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. A este respecto son iguales al de las enmiendas o abonos orgánicos tradicionales (Sadovnikova *et al.*, 1993).

Las limitantes al hacer uso de este tipo de materiales se atribuye a la concentración en metales pesados, debido al peligro potencial que representan para la salud humana y la biota (Pérez *et al.*, 2010). La toxicidad se debe a que son solubles en agua y por lo tanto, los organismos lo absorben con facilidad.

Se ha reportado que tienen efectos tóxicos sobre las células, alterando o desnaturalizando las proteínas, debido a su movilidad en los ecosistemas

naturales son peligrosos por su tendencia a bioacumularse y biomagnificarse; su toxicidad depende, de la concentración, la forma química y la persistencia (Cañizares-Villanueva, 2000; Navarro-Aviño *et al.*, 2007; Nebel y Wright, 1999). Entre los metales más peligrosos se encuentran el Pb, Hg, Cd y el Cr (Reyes, 2009).

La cantidad de nutrientes así como de metales que están en interacción con las plantas son pequeñas y disponibles a través de la difusión y migración. La solubilidad y movilidad de estos metales son factores determinantes para su disponibilidad durante el crecimiento (Leita y De Nobili, 1999). Wild (1992), observó en cultivos de leguminosas una mayor concentración de metales (Cd, Cr, Ni y Zn) respecto a gramíneas.

Las formas químicas de los metales pesados en el suelo influyen en su destino en términos de captación por las plantas o su migración dentro del perfil del suelo. No obstante, se han hecho estudios sobre su toxicidad en las plantas y se ha encontrado que no siempre son directamente correlacionados con las cantidades en el suelo (Leita y De Nobili, 1999).

En el suelo, los metales pueden presentarse en varias formas químicas al someterse a diferentes reacciones, como iones simples o complejos en la solución del suelo, iones intercambiables, enlazados con sustancias orgánicas y húmicas (formando complejos órgano-mineral), ocluidos o coprecipitados con óxidos, carbonatos, fosfatos u otros minerales secundarios y en forma de iones en la red cristalina de los minerales primarios, en residuos biológicos y microorganismos (Petruzzelli, 1989; Zhu y Alva, 1993).

La forma en que se presentan en el suelo depende de factores físicos y químicos como son la textura, pH, capacidad de intercambio catiónico CIC y el contenido de MO. La adsorción de metales es altamente dependiente del pH del suelo por

ejemplo, la sorción de metales catiónicos aumenta al aumentar el pH (Adriano *et al.*, 2004; Naidu *et al.*, 2008).

La MO del suelo tiene una alta afinidad por cationes metálicos debido a la presencia de ligandos o grupos funcionales, cuando aumenta el pH del suelo el ión H⁺ disocia los grupos funcionales carboxilo, fenólico y grupos hidroxilo, aumentando así la afinidad por los cationes metálicos (Park *et al.*, 2011). En general, las propiedades del suelo que ejercen un efecto directo en la adsorción de los metales son: pH>MO>CIC (Basta *et al.*, 1993, citado por Gómez, 1998).

1.4 Estiércol degradado

El estiércol es un abono orgánico que contiene nutrientes orgánicos como aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares y vitaminas, pero también es una valiosa fuente de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y algunos micronutrientes. Es una mezcla de las deyecciones sólidas y orina, constituida por materiales ricos en nitrógeno (orina y excremento) y por productos ricos en carbono (paja y aserrín) (Salazar *et al.*, 2003). El contenido (en porciento) en los excrementos de distintas especies animales se describe en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Componentes del estiércol en tres especies animales (%)

Clase de ganado	M. S.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Mg	SO ₄
Vacuno	16	0.29	0.17	0.10	0.35	0.10	0.04
Equino	24	0.44	0.35	0.35	0.15	0.10	0.06
Porcino	18	0.60	0.41	0.26	0.09	0.10	0.04

Fuente: Salazar *et al.* (2003); Soliva y Felipó (2003). M.S. Materia seca.

En el estiércol fresco el contenido de MO y su estabilidad, son parámetros importantes a considerar a la hora de fertilizar el suelo (Soliva *et al.*, 2004). Al incrementar la actividad de los microorganismos, estos incorporan a su biomasa el

N mineral disponible para cubrir sus necesidades provocando una fuerte inmovilización de éste, traducido en una falta de N para los cultivos en los que es aplicado (Almanza *et al.*, 2007; Soliva y Molina, 1999). Con el tiempo los componentes tendrán una variación en su proporción debido a los procesos de fermentación aerobia y anaerobia natural, como se muestra en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Influencia del tiempo en la composición del estiércol (%)

Materia constituyente del estiércol	Estiércol Fresco	Almacenamiento en meses		
		2	4	5 a 8
MO	24.50	19.50	18.00	17.50
Nitrógeno total	0.52	0.60	0.60	0.73
Nitrógeno amoniacal	0.15	0.12	0.10	0.05
Fósforo (P ₂ O ₅)	0.31	0.38	0.43	0.48

Fuente: Salazar *et al.* (2003).

Al igual que la composta, el estiércol degradado denominado comúnmente como “Lama” contribuye al mejoramiento del suelo al mejorar la retención de humedad, la aireación del suelo y las propiedades microbiológicas, controla la acidez (si el suelo es ácido), aumentar el grado de saturación del suelo con bases (Ca, Mg, K), e incrementar el contenido en humus (Soliva y Molina, 1999; Wang *et al.*, 2016). De ahí deriva su importancia para ser utilizado en el compostaje de residuos sólidos orgánicos (RSO).

1.5 Arcilla

Las arcillas y minerales de arcilla podrían haber desempeñado un papel central en la formación de proteínas y ácidos nucleicos en la tierra prebiótica (Sciascia *et al.*, 2011). Puede ser que hayan servido como vasos primitivos de aminoácidos, purinas y pirimidinas. Concentrándose estas biomoléculas en su superficie catalizando su polimerización (Ferris, 2006).

El término se aplica a los materiales de un tamaño de partícula inferior a 2 μm , y a los minerales que tiene similar composición química y características estructurales cristalinas. Sus propiedades fisicoquímicas derivan de su pequeño tamaño de partícula, su morfología laminar (filosilicatos), las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar (Auerbach *et al.*, 2004; Manahan, 2007).

Presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Cada mineral contiene dos tipos de hojas: tetraédricos (T) (grupos $(\text{SiO})_4^{4-}$) y octaédricos (O) (grupos $(\text{Al}^{3+}, \text{Mg} \text{ ó } \text{Fe}^{3+})$). Son clasificadas atendiendo a que sean bilaminares ó trilaminares y dioctaédricas ó trioctaédricas.

Pertenecen a los filosilicatos, grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas (Auerbach *et al.*, 2004). Los tres grupos principales de arcillas son el grupo de la montmorillonita $\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$, el grupo de la illita $\text{K}_{0-2}\text{Al}_4(\text{Si}_{8-6}\text{Al}_{0-2})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ y el grupo de la caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Manahan, 2007).

Sus propiedades fisicoquímicas derivan principalmente, de su pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm), su morfología laminar (filosilicatos), las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar (Auerbach *et al.*, 2004).

La composición química de las illitas $\text{K}_{0-2}\text{Al}_4(\text{Si}_{8-6}\text{Al}_{0-2})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ varía de acuerdo con el mineral primario del cual proviene. Presenta cierta facilidad para la fijación de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y NH_4^+ , protegiéndolos de la lixiviación y manteniéndolos disponibles como nutrientes (Auerbach *et al.*, 2004; Manahan, 2007). Es una arcilla electronegativa y con una capacidad de intercambio de cationes intermedia (10-50 cmol kg^{-1} arcilla).

Los sitios de adsorción son en la capa externa, los cristales se presentan formando escamas irregulares, por su superficie, plasticidad, cohesión y carácter coloidal pueden considerarse intermedia entre la caolinita y la montmorillonita. Poseen una buena biocompatibilidad, adsorción y capacidad de intercambio iónico (Tran y James, 2012; Wei *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2012; Zhou y Keeling, 2013). Normalmente es amarilla o roja si tiene hierro o blanca si es pura (Doval *et al.*, 1996).

Han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de adsorción, sin embargo aún no queda claro su papel en la biodegradación y secuestro de material orgánico, por lo que son escasos los estudios existentes que evalúan el impacto directo de la arcilla sobre la biodisponibilidad y biodegradación (Cébron *et al.*, 2015).

Algunas investigaciones como las realizadas por Babin *et al.* (2013) y Ding *et al.* (2013), encontraron que los minerales de arcilla (montmorillonita y illita) influyen en la composición de las comunidad de bacterias y hongos aunque no en su densidad, derivado de que los microagregados en las redes de las arcilla favorecen la interacción microbiana modificando los nichos ecológicos de los microorganismos (Cébron *et al.*, 2015; Totsche *et al.*, 2010).

Estos estudios confirman la importancia de los minerales como un factor que influye en la actividad bioquímica de los microorganismos del suelo, influenciada tanto por el efecto directo de las arcillas en las células microbianas e indirectamente por los cambios en el medio ambiente y que de forma directa se proyecta en los procesos de humificación. El carácter y el mecanismo de estos cambios dependen de la especie de microorganismo, la calidad y cantidad de los sorbentes minerales presentes en el suelo, entre otros factores ecológicos (Cébron *et al.*, 2015).

De acuerdo con Kobus y Pacowiczowa (1966) y Ziemięka y Kobus (1960), las pérdidas de carbono y nitrógeno durante la conversión de los residuos vegetales se reducen con la presencia de minerales de arcilla, lo cual se manifiesta con un marcado incremento en la biomasa microbiana y por lo general en la estimulación de la actividad microbiológica. Esto significa un aumento en la formación de humus y en una mayor producción de enzimas necesarias para la degradación (Martin y Haider, 1971).

La estimulación biológica indirecta de la unión de la MO heterogénea en el espacio interlaminar lábil de arcillas puede ser útil para la solución de un gran número de problemas ecológicos, ya que son capaces de disminuir la concentración de CO₂ y NH₃ generados en los procesos de degradación y no son emitidos a la atmósfera al ser adsorbidos por las arcillas en el suelo, por lo que pueden ser biotecnologías que minimizan la migración de sustancias nocivas al ambiente e intensificar la pedogénesis (Giniyatullin *et al.*, 2010).

Las arcillas han sido poco estudiadas para tal efecto en compostaje Witter (1988), Zhang y Sun (2015), trabajaron con zeolita, composta madura y arcilla con el fin de minimizar las pérdidas de nitrógeno reduciendo las emisiones de NH₃. Jolanun y Towprayoon (2010), utilizaron residuos de arcilla observando un aumento de temperatura en la etapa termofílica y mejora las emisiones de CO₂. Por tal razón, en esta investigación la adición del suelo arcilloso pretendió mejorar la absorción de agua, fomentar la actividad microbiana, evitar las pérdidas de nitrógeno por volatilización y de metales pesados por lixiviación.

1.6 Composta

El compostaje está definido por la Asociación Mexicana de Agricultores Ecológicos como un proceso para obtener productos agropecuarios sanos, mediante técnicas

que favorecen las fuentes naturales de fertilidad del suelo, permite la reutilización y biotransformación de materiales orgánicos (García *et al.*, 2014; Labrador, 2001). La legislación Europea (Directiva 99/31/CE) establece que componentes biodegradables deben desviarse gradualmente de los RESA, lo que exige el uso de alternativas de tratamiento de RSO, tales como el compostaje.

La composta resultante, contiene MO, así como nutrientes tales como: N, P, K, Mg, Ca, Fe y otros oligoelementos, necesarios para la vida de las plantas, con una gran variedad y densidad de microorganismos que sintetizan vitaminas, proteínas, entre otros y que repercuten favorablemente en el equilibrio biótico del suelo mediante la oxidación de los residuos por consorcios microbianos productores de enzimas.

Estas poblaciones se utilizan para generar mayor velocidad de descomposición biológica de los RSO y ofrecer soluciones en la minimización del impacto ambiental con la producción de abonos orgánicos que mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Rodríguez *et al.*, 2007; Torres *et al.*, 2007; Weerasinghe, 2017). Para evaluar la calidad durante y al final del proceso existen diferentes criterios basados en la cuantificación de los parámetros físicos, químicos y biológicos, entre los cuales se encuentran:

a) Relación Carbono/Nitrógeno: el C y el N son esenciales para la nutrición de cualquier organismo y es necesario contar con adecuadas proporciones para una buena fermentación. Los microorganismos de una composta utilizan el C como recurso energético y el N para la síntesis de proteína. El parámetro que mide esta proporción se llama relación C/N (Martínez *et al.*, 2008; Salazar *et al.*, 2003; Cariello *et al.*, 2007; Tzafrir *et al.*, 2007). Se suele considerar que la composta es suficientemente estable o madura cuando la relación C/N es menor a 25. Cuando se llega a una relación C/N de 10, la composta tiene una similitud en su composición con el humus del suelo (Zhu, 2006).

b) Nutrientes: Además de C y N, el fósforo es otro de los nutrientes importantes para las plantas y microorganismos del suelo, el cual debe de encontrarse disponible. La aplicación de composta a largo plazo, además de incorporar NPK incrementa la concentración disponible de Zn, Fe y Mn y por lo tanto también aumenta significativamente el contenido de la materia orgánica. Sin embargo, estos pueden cambiar en función del sustrato a compostar (Tittarelli, *et al.*, 2007).

c) Aireación: es necesaria para garantizar el proceso aerobio, tanto para suministrar oxígeno como para que pueda desprenderse CO₂ producido. La aireación deficiente retrasa la fermentación aerobia. Si la concentración de oxígeno alrededor de las partículas baja a valores inferiores al 20 % (concentración normal en el aire) origina procesos de fermentación anaerobia por la vía de la putrefacción, con sensibles pérdidas de N y C, mal olor y baja temperatura, efectos que sirven de indicadores de la necesidad de aireación (Moreno y Moral, 2007).

d) Humedad: el porcentaje de humedad adecuada para la biodegradación aerobia es muy cambiante según el autor; sin embargo, la mayoría lo sitúa en el intervalo de 15-35 %, incluso 40-60 %, sí se puede mantener una buena aireación. Valores superiores producirían anaerobiosis; pero un porcentaje menor a 10 %, reducirá la actividad biológica y el proceso se haría extremadamente lento.

e) Temperatura: dada su facilidad de medición y su relación con el proceso de fermentación, es el parámetro que más se usa para monitorear el proceso. Durante los primeros días se eleva a los 55 hasta 65 °C, posteriormente se estabiliza para luego bajar lentamente desde 40 hasta 30 °C. Cuando no se eleva hasta esos niveles, indica que la fermentación no marcha bien y si son acompañadas de malos olores, es señal de fermentación anaerobia. Las temperaturas altas (mayores de 65 °C) prolongadas, no son convenientes, pues pueden ocasionar la muerte bacteriana que frena la fermentación y también pérdidas de nitrógeno.

f) pH: los cambios en el pH durante el proceso de compostaje se deben a los cambios constantes en la composición química del sustrato. El pH en la composta está influenciado por tres sistemas ácido-base (Castrillón *et al.*, 2004). El sistema carbónico, con el CO₂ que se forma durante la descomposición, formando ácidos carbónico (H₂CO₃), bicarbonato ([HCO₃⁻] y carbonato (CO₃²⁻). El segundo sistema es el amonio (NH₄⁺) – amoníaco (NH₃), que se forma cuando se descomponen las proteínas. El tercer sistema está compuesto por varios ácidos orgánicos en los cuales predominan el ácido acético y el ácido láctico. Estos tres sistemas se combinan para formar la curva típica de pH del compostaje (Moreno y Moral, 2007).

g) Tamaño de partícula: Cuando los materiales no pierden rápidamente su estructura física la superficie de contacto entre el microorganismo y los residuos es pobre; por lo que, es importante el tamaño de partículas del material de partida (Uicab-Brito *et al.*, 2003). Un tamaño pequeño de las partículas supone mayor superficie de ataque y por lo tanto fermentaciones más rápidas y homogéneas; sin embargo, si el tamaño es excesivamente pequeño pueden originarse problemas de compactación excesiva que impidan la aireación (Labrador, 2001).

h) Microorganismos: los grupos de microorganismos presentes en el suelo, y composta están integrados por bacterias, hongos y actinomicetos, y que son los elementos clave del proceso. También están los agentes patógenos que pueden afectar negativamente a la calidad de la composta y se encuentran implicados en la generación de olores. Utilizando el método de compostaje en hileras, se deben alcanzar temperaturas de 55 °C o más, por lo menos durante 3 días de compostaje, para asegurar la completa destrucción de patógenos.

i) Maduración de la composta: se considera que una composta es madura cuando la fermentación prácticamente está paralizada y el producto se puede suponer estable. Existen varios métodos para comprobar la madurez; uno ya mencionado es la poca variabilidad en los valores de la relación C/N. También se

puede evaluar la relación NH_4/NO_3 ya que aunque esta relación varía dependiendo de las materias primas, en general; una composta inmadura tendrá mayores niveles de amonio que de nitratos (Soto y Meléndez, 2004).

j) Metales pesados: Las transformaciones en el compostaje son básicamente reacciones de oxidación, reducción e intercambio, que influyen en la solubilidad; e incorporación o adsorción en moléculas orgánicas, lo que reduce su biodisponibilidad y en consecuencia, su toxicidad. El tratamiento por compostaje puede dar lugar a reacciones físicas, químicas y biológicas, que conducen a la variación de pH, la mineralización de la MO, y la formación de sustancias húmicas. Estos cambios pueden influir en el comportamiento de distribución de los metales y su especiación en los biosólidos compostados. Los metales en la composta se adsorben sobre las sustancias húmicas o sobre óxidos del hierro lo que limita su biodisponibilidad (Barker y Bryson, 2002; Hsu y Lo, 1999; Yannsheng *et al.*, 2007; Zorpas y Loizidou, 2008).

Yannsheng *et al.* (2007), encontraron que la distribución de la especiación de metales pesados durante el compostaje no era sólo dependiente del contenido total de metales pesados, sino también de los parámetros del proceso de compostaje, tales como la temperatura, pH y contenido de MO.

Existe un consenso general en la literatura científica de que los procesos de compostaje aeróbico aumentan la formación de complejos de metales pesados en los residuos orgánicos, y que los metales están fuertemente unidos a la matriz de la composta y MO, lo que limita su solubilidad y el potencial de biodisponibilidad en el suelo, por lo que no se eliminan fácilmente si no se aplican condiciones de extracción fuertes utilizando por ejemplo, ácido nítrico concentrado (Grimes *et al.*, 1999; Smith, 2009).

1.7 Estado del Arte

En la última década se han realizado varios estudios acerca de la aplicación de biosólidos frescos y compostados como mejoradores de suelos agrícolas a nivel nacional e internacional, en estos estudios se evalúan los cambios que sufren las plantas cultivadas en presencia de los metales pesados que se encuentran en los biosólidos, y también han estudiado los cambios en los nutrientes esenciales principalmente el nitrógeno, pero pocos encaminados a evaluar la respuesta metabólica y modificaciones en la calidad nutritiva de la especie comestibles.

Por ejemplo Faria *et al.* (2014) y Qasim *et al.* (2001), compararon el efecto de la incorporación de diferentes dosis los biosólidos en el crecimiento del maíz, en general observaron que el porcentaje de germinación, el peso seco, las longitudes de hojas y de raíz, el rendimiento y la concentración de nitrógeno en los granos fue mayor.

También se ha evaluado los cambios en el cultivo al modificar la dosis de nitrógeno y otros nutrientes. De acuerdo con Zhang *et al.* (1993) y Zepeda-Bautista *et al.* (2009), la composición del grano se modifica mediante prácticas agronómicas y al aplicar diferentes dosis de nitrógeno. En estos estudios la proteína en grano incrementó de 4 a 8.40 % por el contrario, el porcentaje de fibra y celulosa disminuyeron al aumentar la proteína; no observaron cambios significativamente el contenido de triptófano ni cambios importantes por la aplicación de diferentes dosis de fósforo.

Vaca *et al.* (2011), estudiaron los efectos de la adición de biosólidos y su composta sobre las propiedades del suelo y en la especie *Zea mays L.* (metales pesados, calidad y productividad). Determinaron que incrementó la producción del grano y que la calidad fue adecuada para consumo humano; no observaron efectos tóxicos a causa de los metales.

En relación al comportamiento de los aminoácidos en las especies vegetales se tienen a Sánchez *et al.* (2001), que evaluaron el impacto de dosis elevadas de nitrógeno sobre el metabolismo de la prolina en *Phaseolus vulgaris L.*, de acuerdo con sus condiciones experimentales, la prolina es un buen indicador de exceso de N en plantas de frijol. Nadgórska-Socha *et al.* (2013), evaluaron la respuesta antioxidante en la especie *Vicia faba* por la contaminación de metales en suelo y observaron que la prolina se incrementó en las hojas por la exposición a los metales. Por otra parte, Mazen *et al.* (2010), observaron que al adicionar diferentes concentraciones de biosólidos al suelo, la planta *Triticum vulgare* se disminuía la prolina y que la proteína se incrementaba 1.2 veces con la dosis más alta.

Lošák *et al.* (2010), evaluaron los aminoácidos del grano de *Zea mays L.* Durante los dos años que duró el experimento, el contenido de nitrógeno en grano fue 1.54 % mayor. La dosis más alta de N redujo algunos de los aminoácidos (aspargina y glicina), estas diferencias fueron atribuidas a los cambios en la síntesis de amidas y aminoácidos.

Gondek *et al.* (2012) evaluaron el efecto de la fertilización con biosólidos, estiércol de cerdo y fertilizante mineral en trigo (*Triticum aestivum L.*). Las dosis aplicadas de biosólidos (10 y 14 t ha⁻¹) no afectaron significativamente el contenido de aminoácidos, mientras que la concentración de proteína estaba limitada por la concentración de lisina.

2. MÉTODO

La presente investigación se llevó a cabo en la planta piloto de compostaje del Instituto Tecnológico de Toluca. Las pruebas experimentales del cultivo de maíz se realizaron en el ejido de San Juan de las Huertas en Zinacantepec, Estado de México.

2.1 Ubicación y descripción del sitio experimental

San Juan de las Huertas está situado en la porción occidental del Valle de Toluca y está geo-referenciado con las coordenadas 19° 13' N y 99° 45' W a una altura de 2,860 msnm dentro del Valle de Toluca (Figura 2.1). El clima predominante de la zona de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (1988), es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w₂)(w)b(i'). La precipitación anual supera los 1,225 mm con temperaturas en verano de 28 °C y en invierno hasta 4 °C bajo cero.

De acuerdo con la carta topográfica: Volcán Nevado de Toluca - 2015 clave: E14A47 escala: 1:50 000 de la base de datos digitales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la unidad del suelo se clasifica como Andosol (An) subunidad úmbrico (um). Son suelos de textura franca a franco-arenosa, de origen volcánico con valores de pH moderadamente ácidos con baja saturación de bases (INEGI, 2015).

Con suelos que presentan pendientes de 0 a 6 %, con restricciones por la unidad de suelo aluvial; sin embargo, las condiciones edáficas, geológicas y topográficas del área, permiten el desarrollo de las actividades agropecuarias. La mayor parte del territorio presenta usos agropecuarios y forestales, en la cual se siembra maíz, haba, papa, avena y alfalfa, entre los más importantes (INIFAP, 2010).

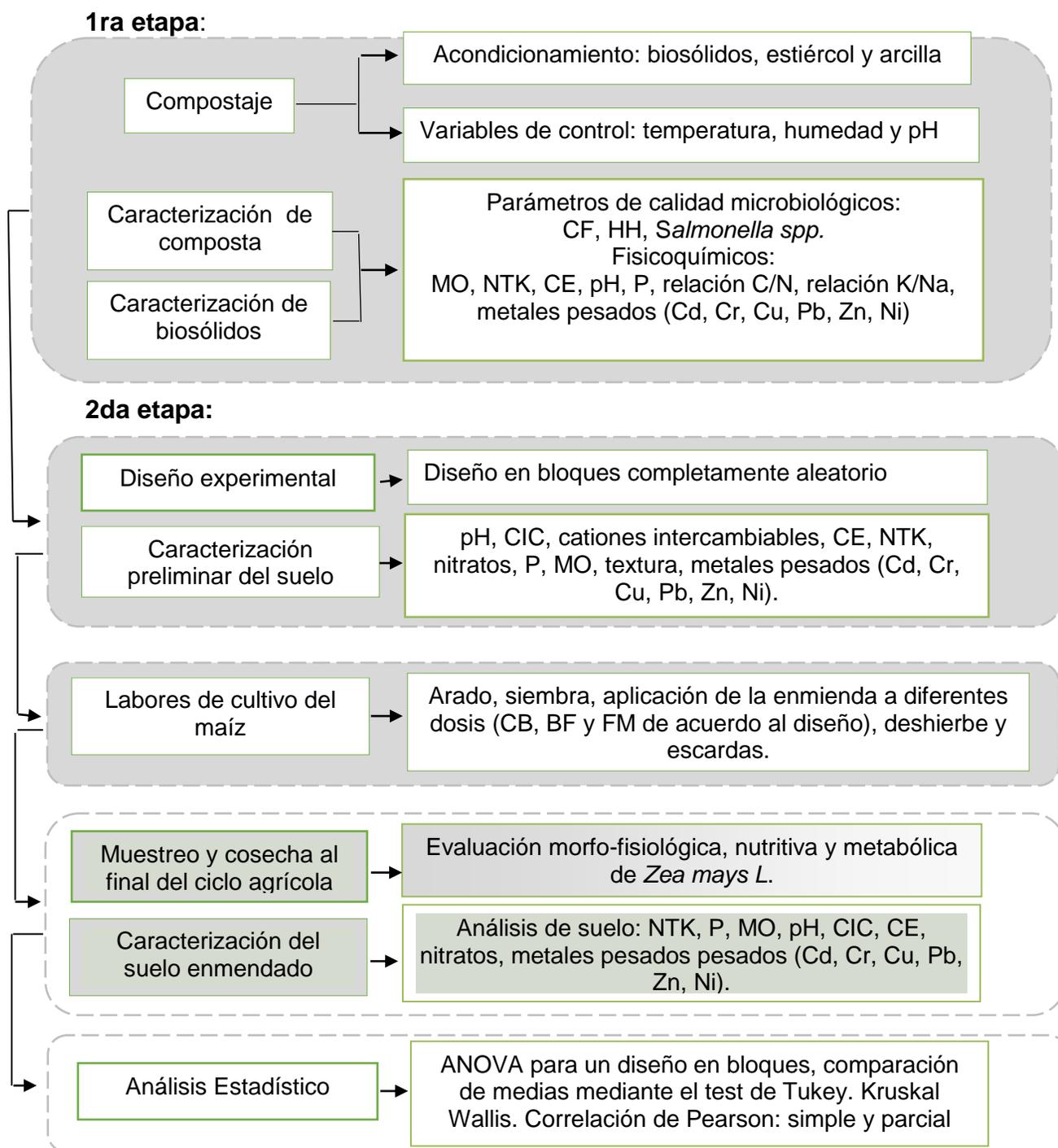


Fuente: google maps.com, 2015.

Figura 2.1 Ubicación geoespacial de la parcela experimental

2.2 Etapas del experimento

El experimento se dividió en dos etapas, las cuales se aprecian en el diagrama de flujo de la Figura 2.2; la primera etapa correspondió al acondicionamiento y compostaje de biosólidos y su evaluación en cuanto a la calidad agronómica y conforme a la normatividad mexicana vigente; en la segunda etapa, se realizó la caracterización del suelo, aplicación de los tratamientos (biosólido deshidratado y triturado, composta y fertilizante mineral) con base al diseño experimental, preparación del terreno (labores de cultivo), siembra de la especie y seguimiento durante el ciclo agrícola; en esta etapa también se realizó la cosecha y muestreo al final del ciclo agrícola, la evaluación de los efectos de los diferentes tratamientos en la especie *Zea mays L.* (determinación de aminoácidos y análisis químicos para evaluar la calidad del grano) y una segunda caracterización del suelo. Finalmente se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos.



CF: coliformes fecales. HH: huevos de helminto. MO: materia orgánica. NTK: nitrógeno total Kjendhal. CE: conductividad eléctrica. P: fósforo. CIC: capacidad de intercambio catiónico. CB: composta de biosólidos. BF: biosólidos. FM: fertilizante mineral

Figura 2.2 Diagrama de flujo de la parte experimental.

2.3 Compostaje

Las actividades requeridas para obtener la composta se describen en los siguientes apartados.

2.3.1 Acondicionamiento

Comprendió la adquisición y acondicionamiento de los biosólidos, suelo arcilloso y estiércol fermentado y se realizó con la finalidad de hacer eficiente el proceso de degradación.

a) Biosólidos

Los biosólidos se obtuvieron de una PTAR de origen municipal del Valle de Toluca, Estado de México, derivados de un proceso de digestión aerobia y posterior deshidratación mecánica en filtro-prensa, con una humedad de $80 \pm 5 \%$. Estos fueron trasladados a la planta de compostaje del Instituto Tecnológico de Toluca, para el acondicionamiento que consistió en lo siguiente:

a.1) Deshidratación: este proceso se realizó térmicamente por radiación solar sobre una película de polietileno, aireando manualmente utilizando palas, con una frecuencia de 3 a 4 veces cada 24 horas hasta obtener una humedad de $35 \pm 5 \%$, adquiriendo un material amorfo aglomerado.

a.2) Triturado y cribado: se usó un molino de martillos para reducir el tamaño de partícula, cribando simultáneamente con malla de 2 mm de diámetro integrada al molino, se obtuvo un material granular.

b) Suelo arcilloso

El material arcilloso que en adelante se denominará únicamente como “arcilla” se obtuvo de la zona minera del municipio de Calimaya, Estado de México y se cribó con malla de 2 mm.

c) Estiércol fermentado

El estiércol fermentado fue de origen equino, se inspeccionó y retiró el material extraño de gran tamaño.

2.3.2 Pilas de compostaje

Para la elaboración de las pilas se realizó el pesado de los materiales en base seca y posteriormente fueron mezclados. Las dimensiones de las pilas fueron considerando las recomendaciones por Tchobanoglous *et al.* (1998) e Íñiguez (2011), donde el ancho debe ser el doble de lo alto, y el largo es de acuerdo con las necesidades del productor. Se prepararon dos pilas conformadas con biosólido:arcilla:estiércol fermentado, en las proporciones 62:30:8, respectivamente de acuerdo a lo establecido por Juárez (2014), la técnica de compostaje empleada fue por pilas aireadas con volteos periódicos. Las dimensiones fueron de 1.0 x 0.5 x 3.0 m (ancho x alto x largo) cada pila fue de dos toneladas, identificadas como P1 y P2. Las variables de proceso a controlar fueron: temperatura, humedad y pH, medidas con una frecuencia de 24 horas durante los días que duró el proceso, el cual se consideró finalizado una vez que se registró temperatura ambiente en cada una de las pilas. La aireación y adición de agua se realizó cada 48 horas.

2.3.3 Muestreo y análisis de calidad de biosólidos y composta

Los biosólidos deshidratados y la composta obtenida fueron muestreados y conservados conforme al procedimiento establecido en el método de cuarteo de las normas NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos y la NTEA-006-SMA-RS-2006 para mejoradores de suelos (Anexo A). Se tomaron 8 muestras aleatorias para posteriormente obtener una muestra compuesta de la cual se realizaron los análisis de la Tabla 2.1. Para los metales, las condiciones instrumentales se especifican en el Anexo F.

Tabla 2. 1. Análisis para evaluar la calidad de la composta y los biosólidos

Variable	Método de medición	Normatividad
Microbiológicos		
Coliformes fecales (NMP g ⁻¹)	Filtración por membrana	NOM-004-SEMARNAT-2002 °NTEA-006-SMA-RS-2006
<i>Salmonella</i> spp. (NMP g ⁻¹ bs)	Número más probable	
Fisicoquímicos		
pH	En solución acuosa	NMX-FF-109-SCF-2008
Humedad (%)	Termogravimétrico (Analizador electrónico)	-----
MO (%)	Método Walkley y Black (1947)	NMX-AA-021-RECNAT -2000 Método AS-07
NTK (%)	Digestión-destilación de Kjeldhal.	NMX-FF-109-SCFI-2008 NMX-AA-067-1985
P (P ₂ O ₅) (%)	Colorimétrico Extracción Mehlich-3	Mehlich, 1985 (Anexo G)
CIC (mg kg ⁻¹)	Absorción atómica	NOM-021-RECNAT-2000
K y Na asimilable	Absorción atómica	NTEA-006-SMA-RS-2006
Metales Pesados totales: Pb, Cd, Zn, Cr, Cu (mg kg ⁻¹)	Extracción: HNO ₃ y HCl Absorción atómica	

Fuente:*Huevos de Helminto viable por gramo en base seca.

2.4 Diseño experimental

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables se empleó un diseño en bloques completamente aleatorio (DBCA), para controlar como fuente de variabilidad el gradiente pendiente que presentaba la parcela experimental. Para los tratamientos a ensayar se contempló tres tipos de acondicionamiento: biosólido (BF), composta de biosólidos (CB) y fertilizante mineral (FM) (control), con dos diferentes dosis de BF y CB (12 y 24 t ha⁻¹) y una sola dosis de FM (2 t ha⁻¹), las cuales fueron definidas en base a las concentraciones de metales

pesados en los biosólidos y el suelo experimental (cálculos mostrados en los resultados). Las combinaciones entre ambas variables conformaron cinco tratamientos con siete repeticiones (BF₁₂, BF₂₄, CB₁₂, CB₂₄, FM₁₀).

2.5 Muestreo y caracterización del suelo preliminar

El muestreo se realizó el 28 de enero de 2016, previo a la aplicación de los mejoradores, para análisis del suelo se siguió el procedimiento de la NOM-021-RECNAT-2000, se efectuó un muestreo sistemático en zig-zag. Para obtener la muestra, con una pala se realizó un hoyo en forma de “V” de 30 cm de profundidad del suelo, se tomó una porción de 2 a 3 cm de espesor y se eliminaron los borde laterales, se realizó el mismo procedimiento para cada submuestra. Posteriormente se conformó una muestra compuesta con peso final de 1,500 g, la muestra se homogenizó y acondicionó para los análisis fisicoquímicos indicados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Análisis para la caracterización del suelo preliminar

Variable	Unidad	Método de medición	Normatividad
Fisicoquímicos			
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	Medición electrolítica	NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-18
Textura	-	Bouyocos (1963)	NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-09
CIC	cmol(+)kg ⁻¹ de suelo	Acetato de amonio	NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-12
K	mg kg ⁻¹	Absorción atómica	NOM-021-RECNAT-2000
pH	--	En solución acuosa H ₂ O 1:2	NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-02
MO	%	Método Walkley y Black (1947)	NMX-AA-021-RECNAT -2000 Método AS-07
NTK	%	Digestión-destilación de Kjeldhal.	NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-08
P (P ₂ O ₅)	%	Colorimétrico. Extracción Mehlich-3	Mehlich, 1985
Metales pesados: Pb, Cd, Zn, Cr, Cu, Ni	mg kg ⁻¹	Absorción atómica	NTEA-004-SMA-RS-2006 Método AS-08

2.6 Dosificación de las enmiendas evaluadas

Se determinó la concentración de metales en los biosólidos, composta y suelo experimental para evitar la excesiva acumulación de dichos elementos en el suelo, considerando los límites permisibles aceptados internacionalmente (Aubert y Pinta 1977; Dec. 86/278/CEE, 1986; Ortiz, 1994; Porta, 1994).

Para tal fin se utilizó la ecuación 2.1 de la Unión Europea, en la que se controla la adición considerando el elemento limitante (de mayor concentración en los biosólidos) en relación con la concentración presente en el suelo, la frecuencia de aplicación y el número de años que se desea agregar al suelo:

$$\text{biosólido (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{(N - n)(P)}{(F \times T \times A)} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Donde;

N= concentración máxima permisible del elemento en suelo (mg kg⁻¹)

n= concentración del elemento en el suelo (mg kg⁻¹)

P= peso de un hectárea de suelo (t), considerando una densidad aparente de 1 t m⁻³ y una profundidad de 0.20 m

F= frecuencia anual de aplicación del biosólido

T= concentración del elemento en el biosólido

A= número de años de aplicación del biosólido

El cálculo se reporta en la parte de resultados. Las dosis empleadas fueron de 12 t ha⁻¹ y la segunda dosis al doble del óptimo de 24 t ha⁻¹. Para el fertilizante mineral o control se utilizó una mezcla de los fertilizantes inorgánicos Agrogen Fosfo N34® Superfosfato simple de calcio sólido en polvo y Agrogen Sulfamin 45® Sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄ estándar sólido en forma de cristales, en la Tabla 2.3 se muestra la composición de los fertilizantes.

Tabla 2.3. Composición del fertilizante inorgánico

Componente	Agrogen	
	Fosfo N34	Sulfamin 45
	%	
N	0.00	21.06
P	20.00	0.00
K	0.00	0.00
Ca	25.60	0.00
S	14.00	24.00
Fe	0.5000	0.0005
Mn	0.0028	0.0002
Cu	0.0030	< 0.0001
Zn	0.0080	< 0.0001

Los fertilizantes fueron mezclados en proporciones de 50:50, adicionando 10 kg del material en el bloque correspondiente con aplicación manual y superficial en forma de bandas, se aplicó inmediatamente después de la siembra. La dosis se determinó en relación a la cantidad que utilizan los agricultores en cada ciclo agrícola, considerando una aplicación superficial y no en conjunto con el grano como usualmente lo hacen cuando usan sembradora mecánica.

2.7 Material vegetal

Para los experimentos se utilizó semilla de *Zea mays L.* var. criolla obtenida del ciclo agrícola anterior de la misma área de estudio. A la semilla sembrada o semilla madre así como a los granos procedentes de cada tratamiento (semilla hija) se le realizaron pruebas físicas con el objetivo de asegurar la calidad física, de acuerdo a los parámetros establecido por la Asociación Internacional de Análisis de Semillas (ISTA), para ellos se colectó una muestra de grano de dos kilogramos para determinar: peso de 1,000 semillas, porcentaje de humedad de la semilla (%), peso hectolítrico (kg HI⁻¹), prueba de vigor (%) y pureza física (%) (ISTA, 2011). En el Anexo B se muestra el fundamento de cada técnica analizada.

2.8 Preparación del suelo y labores de cultivo del maíz

El suelo se preparó mediante un arado y rastreo, a los 15 días se realizó el trazado e identificación de cada tratamiento en base al DBCA, se conformaron 35 subparcelas (bloques de 49 m²) con ocho hileras y siete surcos, dejando pasillos de 1.0 m entre las subparcelas, distribuidas en un área de 2,500 m².

La siembra y aplicación de los tratamientos se realizó el día 26 de Marzo del 2015. Se utilizó una sembradora mecánica, con una distancia entre surcos de 75 cm y 20 cm entre hileras, se sembraron de 3-4 semillas por golpe cada 25 cm con una densidad de siembra aproximada de 50 000 plantas por hectárea y una profundidad de la siembra de 3 cm.

Posteriormente de acuerdo a la distribución establecida en el DBCA los tratamientos (composta, biosólido y fertilizante) se dosificaron sobre la superficie del suelo en forma manual, se aplicaron sobre las hileras e inmediatamente después se cubrieron con una capa delgada de suelo. En la Figura 2.3 se muestra el área experimental y la distribución de acuerdo al DBCA. La primera escarda se realizó el día 23 de mayo de 2015 en donde se eliminó la hierba de competencia y la segunda escarda se realizó el día 5 de junio de 2015.

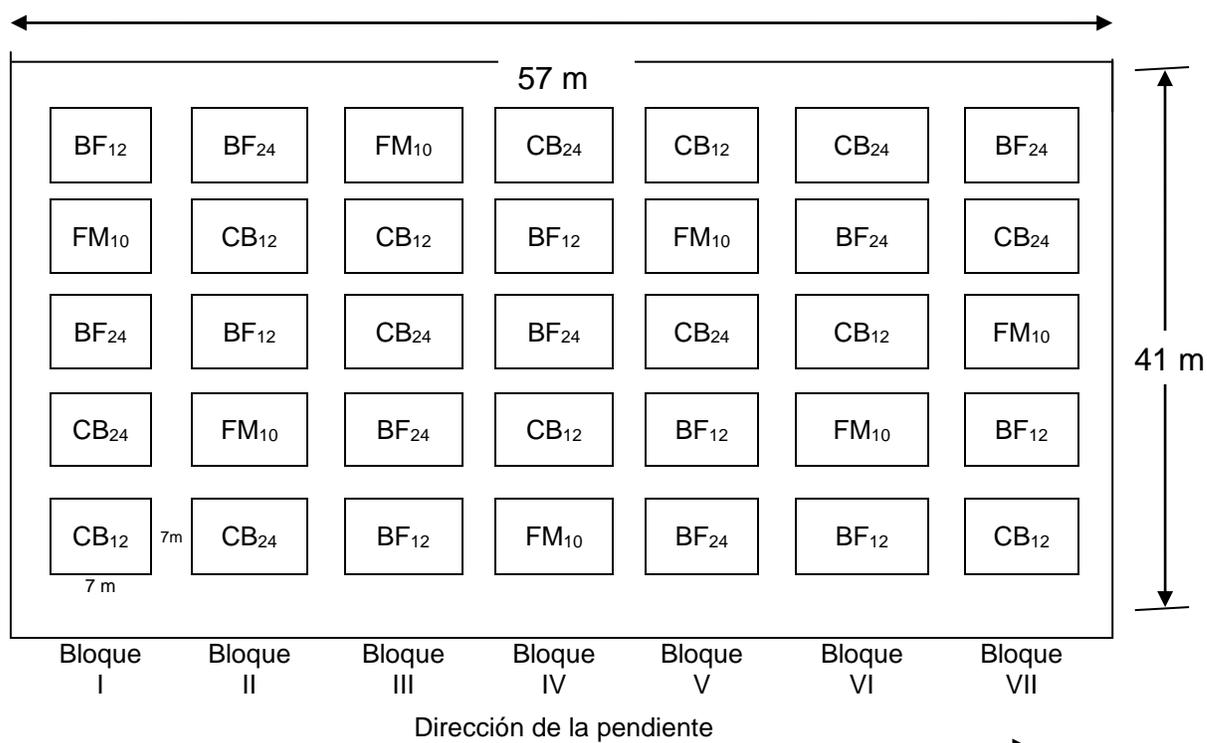


Figura 2.3 Dimensiones de la parcela y distribución de los tratamientos

2.8.1 Cosecha en seco y caracterización morfo-fisiológica de *Zea Mays L.*

El muestreo se llevó a cabo al final del ciclo agrícola, 177 días después de la siembra, cuando la planta del maíz y el penacho de la mazorca se observaba seco. Para la evaluación morfo-fisiológica de *Zea mays L.* se realizó la programación del muestreo, se definió la técnica de muestreo, se elaboraron los formatos de campo (Anexo C) y se capacitó al equipo de trabajo para un adecuado levantamiento de datos.

En campo, el primer paso fue delimitar las parcelas útiles, para ello se eliminaron 2 surcos de forma lateral y 1 m de forma frontal de cada subparcela, posteriormente se procedió al muestreo de 15 plantas seleccionadas aleatoriamente de cada subparcela y se procedió a medir las características morfológicas de interés que se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características morfo-fisiológicas evaluadas en *Zea mays L.* cultivada en suelo enmendado con biosólidos compostados y sin compostar.

	Abrev.	Significado	Método de medición
PLANTA	NP	Número total de plantas	Por conteo, <i>in situ</i>
	PA	Plantas acamadas	Por conteo, <i>in situ</i>
	MSP	Materia seca de planta o forraje	Secado con estufa de aire forzado a 105 °C (AOAC, 2000).
	AP	Altura de planta	En metros con flexómetro (TRUPER®), desde el suelo hasta la base de la espiga o penacho, <i>in situ</i>
	CLF	Clorofila	clorofilómetro SPAD 502 Plus® modelo 2900P (Konica Minolta®, Japan).
	NMPU	Numero de mazorcas por planta	Por conteo, <i>in situ</i>
MAZORCA	NMPU	Número de mazorcas por parcela útil	Por conteo en parcela útil(Ohaus®).
	MND	Mazorcas no desarrolladas	Visual por conteo, <i>in situ</i>
	PM	Peso de la mazorca	Con balanza granataria (Ohaus®).
	LM	Longitud de mazorca	Medición en cm con un calibrador tipo vernier análogo (mitutoyo®) medido de la base al ápice en la mazorca
	DM	Diámetro de mazorca	Medición en cm con vernier
GRANO	TG	Tamaño de granos por 100 granos	Medición en cm con vernier de la longitud del grano
	GM	Número de granos por mazorca	Por conteo
	PG	Peso de granos por 100 granos	Conteo y medición gravimétrica con balanza analítica.
	MSG	Materia seca del grano	Secado con estufa de aire forzado a 105 °C (AOAC, 2000)

Las variables morfológicas que se midieron *in situ* fueron: CLF, NP, PA, AP, DP, NMP; las restantes fueron evaluadas en la planta de compostaje del Tecnológico de Toluca. La clorofila se midió a los 148 días de realizada la siembra (antes de la cosecha). Las lecturas se tomaron de 11:00 am a 2:00 pm en diez plantas de cada parcela útil, se dividió la planta en tres tercios: superior, medio e inferior (cerca de

la raíz, parte media y parte superior cerca de la espiga) y se procedió a tomar las mediciones, se reportó en Unidades de Clorofila o Unidades SPAD (UC).

Para determinar materia seca de la planta se recolectaron 15 plantas de cada tratamiento de forma aleatoria desde el tallo, incluyendo tallo, mazorca y hojas y fueron depositadas en costales de rafia para su análisis en el laboratorio, el procedimiento se describe en el Anexo D.

Una vez finalizado el muestreo se realizó la recolección de la producción total de mazorcas de cada parcela útil, se recolectaron de forma manual, se arrancó la mazorca y se dejó la “paca” (tallo y hojas secas) en su sitio, se contabilizaron y depositaron en costales de rafia, se identificaron por tratamiento y repetición y fueron almacenadas en un lugar fresco y seco.

Se calculó el rendimiento del grano por hectárea (RH) en cada subparcela mediante la ecuación 2.2:

$$R = X * T * \frac{(100 - PHG)}{86} * FDG * \left(\frac{1000}{D}\right) \quad (\text{ec. 2.2})$$

Donde;

R= rendimiento del grano (kg h⁻¹) estandarizado a 14 % de humedad

X= peso promedio de 22 mazorcas (kg)

T= número total de mazorcas en el sitio de muestreo

PHG= Porcentaje de humedad de 22 mazorcas

86= Factor para estandarizar el rendimiento a 14 % de humedad

FDG= Factor de desgranado o relación grano-olote

D= ancho del surco (m)

Para calcular el FDG se consideró la ecuación 2.3:

$$\text{FDG} = \frac{\text{PG5MZ}}{\text{P5MZ}} \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde;

PG5MZ= Peso del grano de 5 mazorcas (sin olote, kg)

P5MZ= Peso de 5 mazorcas (kg)

2.8.2 Evaluación de la calidad nutritiva y metabólica del grano de *Zea mays L.*

La mazorca fue desgranada y se acondicionó el grano para los análisis químicos y bioquímicos. El acondicionamiento consistió en la limpieza del grano eliminando materia extraña como restos de olote, de suelo, pellillos secos de la mazorca, insectos, gusanos y el tamo que se genera con el desgranado del maíz. Se tomaron muestras compuestas de 1.5 kg para cada tratamiento. Los granos de maíz fueron triturados con un molino de discos de acero inoxidable marca “El número Uno®”, se obtuvo una harina fina que se almacenó en bolsas plásticas a temperatura ambiente evitando la humedad para conservar las muestras.

Para evaluar la calidad y valor nutritivo (respuesta metabólica de los grano del *Zea mays L.*) se realizaron análisis proximales y de valor nutracéutico siguiendo los métodos oficiales de la American Association of Cereal Chemists (AACC) y la Association of Official Analytical Chemists (AOAC) mostrados en la Tabla 2.5, los procedimientos se detallan en el Anexo D.

Tabla 2.5. Análisis de calidad nutritiva y metabólica en los granos de *Zea mays L.*

Variable	Método de medición
Composición química proximal:	
Proteínas totales	^a Digestión-destilación de Kjeldhal multiplicado por factor 6.25
Almidón	^c Enzimático y colorimétrico
Humedad	^d Gravimétrico
Cenizas	^d Gravimétrico
Nutrientes:	
K, Zn, Ca	^d Espectrofotometría de absorción atómica
P ₂ O ₅	^b Fotométrico
Aminoácidos:	
Lisina	^a NIRS (Espectroscopia de infrarrojo cercano)
Triptófano	
Metionina	HPLC (Cromatografía líquida de alta eficacia)
Prolina	Método derivatización 6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AQC) (sensibilidad 50 nmoles / μ L)

Fuente: ^aAOAC(46-13), 2000; ^bAOAC, 2000; ^cAOAC, 2000 (996.11), Goñi et al., 1997 y AACC (76.13); ^dAACC (08-01, 44-16) Internacional, 2000.

Para los análisis de almidón y aminoácidos se realizó el acondicionamiento de la muestra de harina de maíz mediante una extracción Soxhlet durante 6 horas continuas con acetona y posteriormente con hexano para eliminar posibles interferencias en los análisis por efecto de las grasas, aceites y pigmentos que contiene el grano de maíz. Los procedimientos empleados fueron los descritos por Obi (1982) y los del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (Galicia *et al.*, 2012).

2.9 Muestreo y caracterización del suelo enmendado

Posterior a la cosecha se realizó el muestreo y análisis de suelo enmendado, se siguió el mismo procedimiento establecido para el suelo preliminar. Para cada subparcela se realizó un muestreo sistemático en zig-zag en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, las muestras obtenidas se homogenizaron y se

conformó una muestra compuesta de 1500 g por cada tratamiento. Los análisis fisicoquímicos analizados se muestran en la Tabla 2.2.

2.10 Análisis estadístico

Los parámetros de estadística descriptiva: media y desviación estándar, se utilizaron para el manejo de datos; las variables evaluadas fueron analizadas estadísticamente mediante un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño en bloques y comparación de medias de tratamientos a través de la prueba Tukey. Se aplicaron las pruebas de Shapiro Wilk y Levene para verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas. En los caso en que no se cumplieron los supuestos anteriores y no fue posible la transformación de las variables analizadas, se realizó un análisis para pruebas no paramétricas: Kruskal-Wallis. Se realizaron correlaciones múltiple y parcial entre las características morfo-fisiológicas, parámetros de calidad y valor nutritivo del *Zea mays L.* en relación a los tratamientos y las dosis de aplicación. Se empleó el paquete estadístico Statgraphic Centurion V.17.2.04 con un nivel de confianza del 95 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en cada etapa se describen a continuación.

3.1 Compostaje

A las pilas de composta se les dio seguimiento mediante las dinámicas de las variables de control de proceso. En estas se observó que la pila P1 alcanzó una máxima de 56.8 °C en la etapa termofílica y permaneció en temperaturas mayores a los 45 °C durante 17 días con una media de 48.5 °C; la P2 tuvo una máxima de 55.1 °C con 15 días en la etapa termofílica y con una media de 48.0 °C, lo que garantizó la eliminación de larvas, huevecillos y microorganismos patógenos. Ambas pilas culminaron la actividad microbiana intensa en un periodo menor a los 32 días (Figura 3.1a). Resultados similares encontraron Jolanun y Towprayoon (2010) y Zhang y Sun (2015), con residuos de arcilla y zeolita.

En la Figura 3.1b) se muestra la dinámica de pH. El primer día de iniciado el proceso el pH fue de 7.0 en ambos casos, al día dos este valor incrementó rápidamente con una media de 9, durante la etapa termófila, lo cual se atribuye al proceso de mineralización y consecuente generación de NH₃, así como indicativo de una adecuada aireación, ya que la anaerobiosis está asociada con valores bajos de pH (Madigan, 2004). El pH final fue de 8.5 y 8.4 para P1 y P2, respectivamente.

Al inicio del proceso la humedad fue de 37.1 y 27.3 % (Figura 3.1 c). En la etapa termófila se tuvo una media de 37.6 % para P1 y de 38.1 % para P2. Las variaciones de su contenido en la pila se deben por una parte a la generación propia del proceso de degradación, así como a los fenómenos de evaporación y condensación que ocurren a consecuencia de la elevación de la temperatura. El proceso finalizó con porcentajes de 33.1 y 35.9 % para P1 y P2, respectivamente

valores adecuados para el manejo del producto; resultados similares reportaron Ho *et al.* (2010).

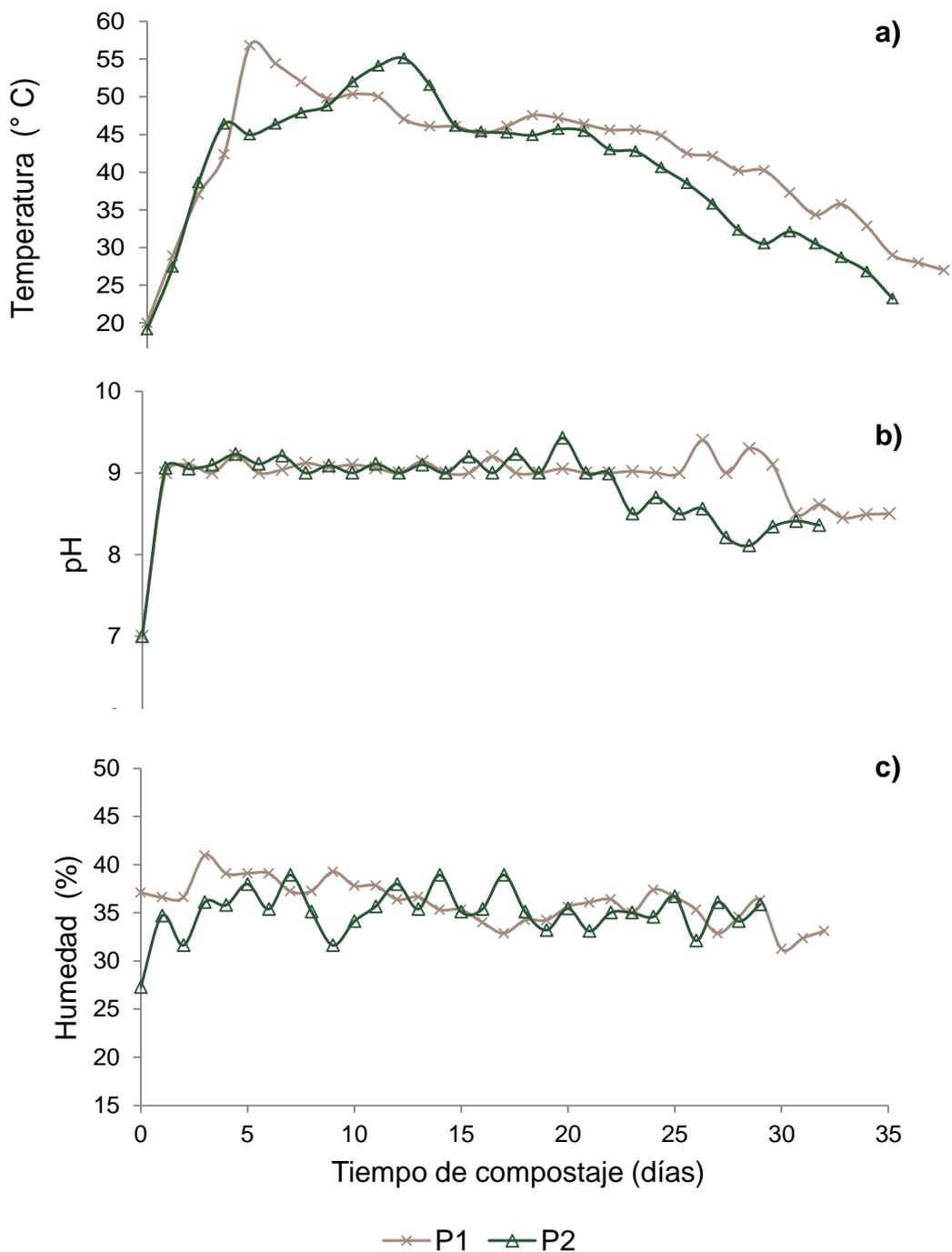


Figura 3.1 Dinámicas de a) temperatura; b) pH; c) humedad en el compostaje de biosólidos.

3.1.2 Muestreo y análisis de calidad de biosólidos y composta

Para realizar los análisis, se prepararon muestras compuestas de ambas pilas (P1 y P2), los resultados fueron comparados con la normatividad mexicana y se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caracterización de biosólido y composta

Parámetros	Normativo	Especificación	Biosólidos	Composta
Fisicoquímicos				
Humedad (%)	--	---	35.00 ± 0.70	33.50 ± 0.36
MO (%)	^a NTEA-006-SMA-RS-2006	> 15	18.30 ± 0.03	5.89 ± 0.02
NTK (%)	^b NMX-FF-109-SCFI-2008	1-4	2.50 ± 0.11	1.28 ± 0.03
Nitrógeno nítrico N-NO ₃ ⁻ kg ha ⁻¹	---	---	105.00 ± 0.22	80.07 ± 4.51
CE (ds m ⁻¹)	---	--	6.70 ± 1.16	6.12 ± 0.21
CIC (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	---	---	29.28 ± 0.68	26.23 ± 0.76
pH (en H ₂ O 1:2)		6.5-8.0**	8.00 ± 0.59	8.47 ± 0.13
P (mg kg ⁻¹)	NTEA-006-SMA-RS-2006	> 1000	831.00 ± 4.90	844.00 ± 1.83
relación C/N		< 12	4.25 ± 0.18	2.68 ± 0.08
relación K/Na		> 2.5	2.60 ± 0.06	6.07 ± 0.06
K (mg kg ⁻¹)	---	---	2971.60 ± 0.80	2471.12 ± 0.65
Zn (mg kg ⁻¹)	^c NOM-004-SEMARNAT-2002	E- 2 800 B- 7 500	829.20 ± 1.14	8.68 ± 0.13
	NTEA-006-SMA-RS-2006	90		
Pb (mg kg ⁻¹)	NOM-004-SEMARNAT-2002	E- 300 B- 840	52.60 ± 1.15	4.25 ± 0.18
	NTEA-006-SMA-RS-2006	5		

Fuente: **Excepto biosólidos estabilizados. E: Excelente; B: Bueno. n=4. media ± desviación estándar.

Tabla 3.1. Caracterización del biosólido y compostas (continuación)

Parámetro	Normativo	Especificación	Biosólidos	Composta
Cd (mg kg ⁻¹)	NOM-004- SEMARNAT-2002	E- 39 B- 85	2.25 ± 0.25	0.45 ± 0.28
	NTEA-006-SMA- RS-2006	1		
Cr VI (mg kg ⁻¹)	NOM-004- SEMARNAT-2002	E- 1 200 B- 3 000	96.15 ± 1.48	ND
	NTEA-006-SMA- RS-2006	5		
Cu (mg kg ⁻¹)	NOM-004- SEMARNAT-2002	E-1 500 B – 4 300	152.80 ± 3.90	28.88 ± 0.77
	NTEA-006-SMA- RS-2006	30		
Ni (mg kg ⁻¹)	NOM-004- SEMARNAT-2002	E-420 B –420	28.74 ± 1.63	27.03 ± 2.01
	NTEA-006-SMA- RS-2006	5		
Coliformes fecales (NMP g ⁻¹ bs)	NOM-004- SEMARNAT-2002	Clase A y B < 1 000 Clase C < 2 000 000	390 000	ND
	NTEA-006-SMA- RS-2006	≤ 1000		
HH (HH viables g ⁻¹ bs)	NOM-004- SEMARNAT-2002	Clase A < 1 Clase B <10 Clase C < 35	2.0	<0.5
	NTEA-006-SMA- RS-2006	< 10		
<i>Salmonella</i> <i>spp.</i> (NMP g ⁻¹ bs)	NOM-004- SEMARNAT-2002	Clase A y B < 3 Clase C < 300	< 3.0	< 3.0
	NTEA-006-SMA-RS-2006	< 3		

ND: No detectable. E-Excelente; B-Bueno. n=4. media±desviación estándar.

La MO culminó en valores inferiores a los establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002, lo que se atribuye a la mineralización y a la consiguiente

pérdida de carbono en forma de CO₂; estas pérdidas pueden llegar a representar casi 20 % en peso de la masa compostada (Zucconi *et al.*, 1987; Kulikowska y Gusiantin, 2015); además, de las características propias de cada sustrato empleado (suelo arcillosos, estiércol fermentado y biosólidos).

La relación C/N fue menor a 12 como lo especifica la NTEA-006-SMA-RS-2006, lo que también indica una rápida liberación de nitrógeno en el suelo a fertilizar, la relación C/N ideal para un composta madura es cercana a 10, similar a la del humus. El contenido de NTK se encontró de acuerdo a los límites establecidos por la normatividad vigente; la presencia de N-NO₃⁻ indica que esta forma de nitrógeno se encuentra en la composta madura, lo que evidencia la nitrificación (Zeng *et al.*, 2013).

La CE de la composta indica una menor concentración de sales solubles y de iones amonio y nitrato en relación a los biosólidos, estas bajas concentraciones pueden ser causadas por la lixiviación de los cationes K⁺ y Na⁺ y de la transformación del ión amonio a NH₃ durante el compostaje (Sánchez-Monedero, 2001). Valores altos de CE indican elevada salinidad que afecta la germinación y el crecimiento de las plantas, las cuales difieren en su tolerancia a las sales (Epstein, 1997). *Zea mays L.* es una planta semi-tolerante a la salinidad como lo demostró Rojas-Tapias *et al.* (2012) y Yongha *et al.* (2013), quienes observaron que a CE mayores a 7.6 dS m⁻¹ puede tener un efecto perjudicial en el crecimiento del maíz.

Con el proceso de compostaje el P incrementó; Wei *et al.* (2015), observaron el mismo comportamiento a partir de diferentes materiales (gallinaza, estiércol de cerdo, residuos sólidos urbanos, paja y residuos orgánicos) ya que el compostaje influye en la distribución de las fracciones de P y afecta su disponibilidad, sobre todo la actividad microbiana presente en el proceso de compostaje influye en la disponibilidad del P al solubilizarlo si se encuentra insoluble o mediante exudados de sustancias acidas y/o quelantes (Dotaniya y Meena, 2015).

De acuerdo con Dad (2018), la cantidad de P disponible estará en función de la estabilidad de los biosólidos, ya que el proceso de estabilización también afecta la cantidad y las formas presentes de P en los biosólidos.

Vigilar la concentración de Na en el suelo es de interés ya que influye en el estrés de las plantas y por lo tanto genera toxicidad en los cultivos, por ser considerado un importante competidor con el K; también su presencia como Na intercambiable en las arcilla puede alcalinizar y provocar la sodificación de los suelos. La composta empleada tuvo una relación K/Na de 6.07 por lo que cumple lo establecido en la NTEA-006-SMA-RS-2006 ($K/Na > 2.5$).

El pH de los biosólidos y compostas de acuerdo con la NTEA-006- SMA-RS-2006 es adecuado para sustratos orgánicos derivados de biosólidos. Los valores de metales pesados totales disminuyeron por el compostaje, resultados similares reportaron Gupta *et al.* (2005), He *et al.* (2009) y Suthar y Singh (2008) con biosólidos. De acuerdo con Huang *et al.* (2017), mediante la presencia de estabilizadores como las arcillas, zeolitas, cenizas volcánicas, óxidos de Fe/Mg y fosfatos se producen procesos de adsorción de los metales en su superficie, precipitación, formación de complejos estables o intercambio iónico que los inmoviliza y reduce la disponibilidad de los metales pesados. En esta investigación posiblemente por el efecto de la presencia de arcilla así como la presencia de microorganismos, y posible formación de ácidos húmicos en el proceso de compostaje causó un efecto en la disminución de la concentración de los metales analizados.

En los análisis microbiológicos no se presentó crecimiento de colonias azules características de los Coliformes Fecales; respecto a los análisis parasitológicos y patógenos de Huevos de Helminto viables y *Salmonella spp* se encontraron por debajo del límite establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002, lo que indica que el proceso en dichas pilas alcanzó las condiciones de temperatura apropiadas para la sanitización de la composta.

3.2 Muestreo y caracterización del suelo preliminar

Los resultados de la caracterización del suelo experimental se muestran en la Tabla 3.2. Respecto a la textura se tiene una textura gruesa, la fracción predominante fue la arena con 66 % y limo con 22 % con clase textural franco-arenosa de acuerdo a la United States Department of Agriculture (USDA, 2012) describe un suelo con buena aireación y drenaje; sin embargo, no retiene adecuadamente los nutrientes. Esto indica que la incorporación de MO puede favorecer la estabilidad de los agregados, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 el contenido de MO del suelo experimental es medio (Tabla 3.3), lo cual evidencia la necesidad de adicionar composta.

Tabla 3.2. Caracterización del suelo preliminar

Parámetros	Resultado
Arena (%)	66.00 ± 2.12
Limo (%)	22.00 ± 0.72
Arcilla (%)	12.00 ± 1.40
Clasificación textural	Franco Arenoso
MO (%)	2.18 ± 0.41
NTK (%)	0.08 ± 0.03
Nitrógeno nítrico NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	93.25 ± 9.86
Relación C/N	16.50 ± 0.82
CE (ds m ⁻¹) a 25 °C	0.19 ± 0.02
pH en H ₂ O a 25 °C	6.50 ± 0.33
CIC [cmol (+) kg ⁻¹]	19.59 ± 0.40
K [mg kg ⁻¹]	168.00 ± 0.51
P [mg kg ⁻¹]	208.71 ± 21.44
Zn [mg kg ⁻¹]	0.20 ± 0.04
Pb [mg kg ⁻¹]	1.20 ± 0.11
Cd [mg kg ⁻¹]	0.20 ± 0.05
Ni [mg kg ⁻¹]	0.40 ± 0.15
Cr [mg kg ⁻¹]	ND
Cu [mg/kg ⁻¹]	9.21 ± 0.50

ND: no detectado. n=7. media ± desviación estándar.

Tabla 3.3 Límites establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000

Clase	MO (%)	N- Total (%)	CIC [cmol (+) kg ⁻¹]
muy bajo	< 0.50	< 0.05	< 5.00
bajo	0.60 - 1.50	0.05 - 0.10	5.00 – 15.00
medio	1.60 - 3.50	0.10 - 0.15	15.00- 25.00
alto	3.60 - 6.00	0.15 - 0.25	25.00 – 40.00
muy alto	> 6.00	> 0.25	> 40.00

De acuerdo con Takahashi y Dahlgren (2016), la formación de complejos altamente estables de Al-humus en los suelos Andosoles puede facilitar la protección de C-orgánico formando grupos funcionales más condensados y menos susceptibles a la degradación enzimática, además de promover la adsorción de minerales complejos. Por tal razón el aporte de MO en los suelos mediante la aplicación de bisólidos y su composta puede mejorar estas características.

En función de los límites establecidos en la norma (Tabla 3.3) el contenido de NTK en el suelo experimental fue bajo (0.08 %). El contenido de nitrógeno nítrico fue de 93.25 kg ha⁻¹, su concentración depende de la actividad biológica ya que son fácilmente lixiviados y no son retenidos por los coloides del suelo; por eso, se consideran como la medida de nitrógeno fácilmente disponible para el cultivo (Mengel y Kirkby, 2001). Se estima que *Zea mays L.* extrae del suelo de 250 a 300 kg de N ha⁻¹ por lo que el aporte del suelo es deficiente para su adecuado crecimiento.

La CE reportó un valor de 0.19 ds m⁻¹ que de acuerdo con la norma tiene efectos despreciables de salinidad (Tabla 3.4), por ello la adición de composta no afecta a la salinidad del suelo. El maíz tiene un máximo rendimiento en valores de 2 dS m⁻¹ y disminuye al aumentar la CE, por lo que las sales del suelo experimental no afectan el cultivo.

El pH del suelo de acuerdo con la norma se encuentra clasificado como moderadamente ácido (Tabla 3.5); por tanto, no se tiene el inconveniente de adicionar las compostas que son alcalinas (8.0 a 8.6). En el suelo, valores de 6.1 a 6.5 son adecuados para la mayoría de los cultivos y se tiene una máxima disponibilidad de nutrientes, a pH bajo se favorece la solubilidad de nutrientes y algunos metales esenciales para las plantas como el Zn (Mengel y Kirkby, 2001).

Tabla 3.4 Límites de CE

Efectos	CE dS m ⁻¹ (25 °C)
Efectos despreciables de la salinidad	< 1.0
muy ligeramente salino	1.1 - 2.0
moderadamente salino	2.1 - 4.0
suelo salino	4.1 - 8.0
fuertemente salino	8.1 - 16.0
muy fuertemente salino	> 16.0

Tabla 3.5. Límites de pH

Clasificación	pH
fuertemente ácido	< 5.0
moderadamente ácido	5.1 - 6.5
neutro	6.6 - 7.3
medianamente alcalino	7.4 - 8.5
fuertemente alcalino	> 8.5

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 se considera que la reserva nutrimental y fertilidad es abundante cuando la CIC es mayor de 25 cmol (+) kg⁻¹ de suelo. En el caso del suelo experimental la reserva es media ya que se encuentra en el intervalo de 15-25 cmol (+) kg⁻¹. Este valor también está influenciado por el contenido de MO ya que si fuera un suelo con alto contenido de MO se tendría una alta CIC.

En cuanto al K, nutriente de gran importancia para el crecimiento de *Zea mays L.*, la concentración fue menor al que se encuentra en los biosólidos y composta, por lo que se tuvo un aporte adicional de este nutriente mediante la aplicación de las enmiendas elaboradas con los biosólidos.

El P está relacionado con la respuesta de los cultivos, por ello es importante que se encuentre presente; sin embargo, es un recurso limitado en la mayoría de los suelos. En suelos agrícolas y minerales el porcentaje de P en la capa arable varía

entre 0.02-0.08 % (200 a 800 mg kg⁻¹) y en promedio gira alrededor de 0.05 % (500 mg kg⁻¹) sin embargo, son muy variables en función del tipo del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1994).

Como el suelo experimental es un Andosol derivado de cenizas volcánicas, presentan un mayor contenido de P que los desarrollados de sedimentos meteorizados; sin embargo, este tipo de suelos tienen una alta tasa de retención de fosfatos y sulfatos, lo que limita la eficiencia de la fertilización en el cultivo (Ramos-Hernández y Flores-Román, 2008). De acuerdo con Takahashi y Dahlgren (2016), los principales constituyentes coloidales responsables de la absorción de P en los andosoles son los complejos alofanos-imogolitos y los complejos Al-humus. Es fuertemente dependiente del pH con una absorción máxima del P en valores de 3.0 a 4.0.

En los análisis se encontró que la concentración de P fue de 208.71 mg kg⁻¹, cerca del límite inferior sugerido anteriormente por Fassbender y Bornemisza (1994) para la capa arable, lo que sugiere que no se encuentra disponible para el cultivo, a menos que sea agregado en forma de fertilizante o enmienda orgánica. La concentración de los metales pesados fue muy baja en comparación con los límites establecidos por Aubert y Pinta (1977); Dec. 86/278/CEE (1986) y Porta (1994).

3.3 Dosificación de las enmiendas evaluadas

Para determinar la dosis adecuada de composta y biosólidos a adicionar en cada subparcela se utilizó la fórmula de la Comunidad Económica Europea (CEE) mencionada en el apartado 2.5.3. También se referenciaron las concentraciones máximas permisibles aceptadas internacionalmente de cada metal en el suelo (Tabla 3.6) y fueron sustituidas en la ecuación de la Tabla 3.7 como (N) (Aubert y Pinta 1977; Dec. 86/278/CEE, 1986; Ortiz, 1994 y Porta 1994):

Tabla 3.6 Concentración de metales en suelo aceptadas internacionalmente

Metal	Concentración permitida mg kg ⁻¹		
	a	b	c
Zn	---	150-300	250-400
Cr	300	---	---
Pb	70	50-300	---
Cd	---	1.0-3.0	1.5-2.0
Cu	130	50-140	---
Ni	300	30-75	---

Fuente: ^aAubert y Pinta (1977); ^bDec. 86/278/CEE (1986) y ^cPorta (1994).

De acuerdo con los análisis de metales pesados en suelo experimental y biosólidos, se realizó el cálculo para 50 años de aplicación (Tabla 3.7). Como se observa la dosis menor calculada fue para el Zn con 12.0 t ha⁻¹, por lo que este fue el metal limitante; por lo tanto, la aplicación en el experimento se definió de 12 t ha⁻¹ y otra con el doble de la óptima de 24 t ha⁻¹.

Tabla 3.7 Cálculos para determinar la dosis de aplicación

Toneladas	$\frac{(N - n)(P)}{(FxTxA)}$	Biosólido t ha ⁻¹
Zn	$\frac{(250 - 0.2)(2000)}{(1 \times 829.25 \times 50)}$	12.0
Pb	$\frac{(70 - 1.2)(2000)}{(1 \times 52.6 \times 50)}$	52.3
Cd	$\frac{(1.5 - 0.2)(2000)}{(1 \times 2.25 \times 50)}$	520.0
Cr	$\frac{(300 - 0.0)(2000)}{(1 \times 96.13 \times 50)}$	54.1
Cu	$\frac{(130 - 9.2)(2000)}{(1 \times 152.87 \times 50)}$	31.6
Ni	$\frac{(300 - 0.4)(2000)}{(1 \times 28.74 \times 50)}$	166.8

3.4 Material vegetal

Las pruebas físicas se realizaron de acuerdo a las normas internacionales para el análisis de semillas (ISTA, 2011), estas características físicas de los granos del maíz representan el primer paso para asegurar la calidad de la semilla sembrada y cosechada además de ser de gran importancia para seleccionar y sugerir sus usos industriales. En la Tabla 3.8 se muestran los resultados de acuerdo al tratamiento empleado en los granos de maíz azul criollo.

Los resultados indican que la semilla sembrada (semilla proveniente del ciclo anterior y sembrada para los experimentos) tuvo buenas condiciones fisiológicas, por otra parte, la semilla obtenida después de aplicar los tratamientos presentó menor porcentaje de germinación. Entre tratamientos el BF₂₄ (biosólidos a la dosis de 24 t ha⁻¹) fue el que presentó el máximo potencial de germinación.

Tabla 3.8. Calidad de la semilla de *Zea mays* L.

Tipo de semilla	Humedad %	Peso hectolítrico kg HI ⁻¹	Germinación %	Número de semillas kg ⁻¹	Vigor %	Pureza física %	Peso 1000 semillas g	Forma y tamaño de semilla
	< 14.5 %	> 60 kg HI ⁻¹	> 80 %	2000-3000		> 95 %	> 403.0 g	-
Semilla sembrada	12.6	64.5	96.0	2,063	49.0	99.0	484.8	PG
semilla CB ₁₂	12.0	62.9	84.0	2,100	47.0	94.0	501.4	PG
semilla CB ₂₄	11.7	58.8	85.0	2,340	48.0	96.0	454.4	PG
semilla BF ₁₂	11.6	59.6	81.0	2,220	40.0	94.0	459.0	PG
semilla BF ₂₄	11.8	61.5	88.0	2,170	45.0	95.0	501.2	PG
semilla FM ₁₀	11.8	62.3	86.0	2,320	35.0	96.0	490.8	PG

PG: plano grande. ISTA (2011).

La humedad de la semilla fue adecuada dentro de los parámetros recomendados, cambios considerables en el porcentaje de humedad pueden afectar la tasa de deterioro, la aptitud para el almacenamiento y el ataque de plagas y hongos; en los tratamientos la humedad fue menor al valor máximo permitido de 13 %, reduciendo los riesgos antes mencionados.

El peso hectolítrico PH (indicador de la densidad y dureza del grano) fue menor en los tratamientos en relación al control, lo que podría indicar un cambio en la concentración de almidón, también es indicador de un grano suave, con mayor capacidad de absorción de agua y un alto rendimiento. Entre tratamiento el PH más alto fue el para CB₁₂ 62.9 kg Hl.

En relación al porcentaje de germinación el tratamiento que presentó el máximo potencial fue el tratamiento enmendado con BF₂₄ > 80 % recomendado (ISTA, 2011), pero inferior a la semilla que se sembró en los tratamientos. De acuerdo con Sethy y Ghosh (2013), la presencia de metales pesados como el Pb, Ni, Cu, Cd en el suelo inhiben la germinación de las semillas, el alargamiento de las raíces, el desarrollo de las plantulas de *Brassica nigra*, reduciendo el crecimiento y la actividad de enzimas antioxidante.

El vigor de la semilla permite una rápida y uniforme emergencia en el campo, y fue diferente entre los tratamientos, se observó menor vigor en el control FM₁₀ y en BF₁₂ y fue mayor en CB₂₄, pero todos fueron menores a los de la semilla sembrada, es importante considerar esta disminución en el vigor sobre todo para tener una idea de la capacidad del grano de superar condiciones adversas en campo y su potencial de almacenamiento una vez cosechado. La pérdida de vigor también está relacionada con la habilidad que tienen las semillas para llevar a cabo todas las funciones fisiológicas que les permitan germinar y emerger. El deterioro puede afectar las membranas celulares, y reducir la actividad enzimática y síntesis de proteínas (Navarro *et al.*, 2015).

En cuanto a sanidad o pureza física no se detectaron alteraciones ni algún otro tipo de daño en la semilla sembrada, en la semilla de los tratamientos se observó una reducción en la pureza ya que se encontraron granos dañados por roedores y germinaciones precoces. El peso de 1000 semillas fue mayor para CB₁₂ y BF₂₄, este valor muestra que esta semilla sembrada representa una mayor población o densidad de plantas por m² en las variedades con menor peso (CB₂₄ y BF₁₂).

Por la forma y tamaño de las semillas se clasificó como plano grande lo que indica que los granos se desarrollaron juntos uno del otro sin espacios en la mazorca causados por granos sin desarrollar, también está relacionado con la cantidad de grano abortado y que en este caso no modifico la forma y tamaño del grano.

3.5 Preparación del suelo, labores de cultivo y seguimiento del maíz

En el ciclo vegetativo del cultivo se efectuaron visitas periódicas para dar seguimiento a las parcelas, con la finalidad de realizar observaciones de su desarrollo (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Seguimiento en el crecimiento del cultivo.

Fecha	Observaciones
26/03/2015	Siembra
06/04/2015	Emergencia del <i>Zea mays L.</i> es visible la primera hoja: VE
15/04/2015	Se alcanzaron alturas de 15 a 18 cm. V3-V4
23/05/2015	El cultivo se encontró en el estado vegetativo de 5-6 hojas: V5-V6
04/06/2015	Comenzó la aparición del penacho, floración: V14, VT, R1
15/07/2015	Se produce la formación de las mazorcas (llenado de granos) R2
20/08/2015	Grano dentado: R5
21/10/2015	Muestreo de plantas y cuantificación de clorofila
13/11/2015	Madurez fisiológica. La planta se observó seca y la mazorca madura (el penacho de la mazorca cambió de verde a marrón)
19/11/2015	Se realizó el muestreo, mediciones y cosecha en seco del maíz

Durante la emergencia del cultivo y los primeros estados de crecimiento no se observaron diferencias por la aplicación de los diferentes tratamientos o enmiendas, ni al compararse con las parcelas aledañas al experimento. No se observó retraso o adelanto en la emergencia. A partir de la etapa V4-V5 se

empezaron a observar diferencias entre los distintos tratamientos, se notaba un mayor crecimiento en las parcelas con los tratamientos BF₁₂ y BF₂₄, en comparación con los tratamientos CB₁₂, CB₂₄ y FM₁₀.

3.6 Caracterización del *Zea mays* L.

3.6.1 Rendimiento del grano

Se calculó el rendimiento del grano por hectárea para cada tratamiento de acuerdo a la ecuación 2.2 y 2.3 del método, para esto fue necesario calcular previamente el peso de las mazorcas y el grano, la humedad del grano y el factor de desgranado FDG para cada tratamiento.

Factor de desgranado para cada tratamiento:

$$FDG_{CB_{12}} = \frac{PG5MZ}{P5MZ} = \frac{0.06634}{0.03134} = 0.47$$

$$FDG_{CB_{24}} = \frac{PG5MZ}{P5MZ} = \frac{0.136}{0.1017} = 0.75$$

$$FDG_{BF_{12}} = \frac{PG5MZ}{P5MZ} = \frac{0.1709}{0.1359} = 0.80$$

$$FDG_{BF_{24}} = \frac{PG5MZ}{P5MZ} = \frac{0.1895}{0.1545} = 0.82$$

$$FDG_{FM_{10}} = \frac{PG5MZ}{P5MZ} = \frac{0.1506}{0.1216} = 0.81$$

Ejemplo del cálculo del rendimiento del grano en una parcela de cada tratamiento:

$$R_{CB_{12}} = 0.0730 * 28 * \frac{(100 - 12)}{86} * 0.47 * \left(\frac{1000}{0.76}\right) = 1\ 300.09 \text{ kgha}^{-1}$$

$$R_{CB_{24}} = 0.1333 * 30 * \frac{(100 - 11.7)}{86} * 0.75 * \left(\frac{1000}{0.71}\right) = 4\ 326.54 \text{ kgha}^{-1}$$

$$R_{BF_{12}} = 0.1601 * 34 * \frac{(100 - 11.6)}{86} * 0.80 * \left(\frac{1000}{0.76}\right) = 5\ 855.21 \text{ kgha}^{-1}$$

$$R_{BF_{24}} = 0.1914 * 28 * \frac{(100 - 11.9)}{86} * 0.82 * \left(\frac{1000}{0.80}\right) = 5\ 595.69 \text{ kgha}^{-1}$$

$$R_{FM_{10}} = 0.1361 * 24 * \frac{(100 - 11.8)}{86} * 0.81 * \left(\frac{1000}{0.74}\right) = 3\ 655.90 \text{ kg ha}^{-1}$$

Con los rendimientos obtenidos en cada una de las 35 parcelas se calculó el rendimiento promedio para cada tratamiento, los cuales se muestran en la Tabla 3.10, se obtuvo un mayor rendimiento en los tratamiento de acuerdo al siguiente orden: BF₁₂> BF₂₄> CB₂₄> FM₁₀> CB₁₂. Estos resultados indican que la mineralización del biosólido en el suelo enmendado fue lo suficiente para administrar nutrientes al *Zea mays L.* por lo que el mejoramiento orgánico favoreció el cultivo al incrementar del rendimiento.

Tabla 3.10. Rendimiento del grano de maíz por tratamiento

TRATAMIENTO	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
CB ₁₂	1 492.00 ± 507.12 ^a
CB ₂₄	4 104.88 ± 637.48 ^b
BF ₁₂	5 303.68 ± 477.07 ^c
BF ₂₄	5 077.11 ± 584.48 ^c
FM ₁₀	3 329.16 ± 304.26 ^b

n=7. $\bar{x} \pm$ desviación estándar. Valores con diferentes letras denotan diferencias significativas (p<0.05).

De acuerdo con el análisis de varianza, los tratamientos presentaron diferencias significativa (F(4,24)=57.95, p<0.05). El rendimiento incrementó con los biosólidos en relación al control, caso contrario con la adición de la composta, de manera que presentó un menor rendimiento respecto al control. Entre CB₂₄ y FM₁₀ no hubo diferencias significativas. Esto se puede deber a que el aporte de MO, NTK, NO₃ y P fue menor en los tratamientos en donde se incorporó la composta en relación a los tratamientos enmendados con biosólidos.

El desarrollo del cultivo con dichas concentraciones de nutrientes se vio afectado y se comprueba en las características morfológicas en donde el tratamiento CB₁₂ fue el que tuvo menor MSG, AP, NMPU, menor longitud y peso de la mazorca, lo que también se reflejó en el rendimiento (Tabla 3.11).

De acuerdo con Dickerson (2003), los rendimientos del maíz azul de polinización abierta son relativamente bajos si se comparan contra rendimientos de híbridos comerciales, por lo que con el uso de biosólidos en dosis de 12 y 24 t ha⁻¹ y de composta de biosólidos en dosis de 24 t ha⁻¹ se podrían alcanzar mayores rendimientos.

De acuerdo con la SAGARPA (2016), para el año 2015 en el municipio de Zinacantepec se tuvo un rendimiento de 3 800 kg ha⁻¹, para el cultivo de maíz de grano de temporal de acuerdo al año agrícola y de 3 500 kg ha⁻¹ para el año 2014. Estos cambios se explican en parte por el aporte de nutrientes de los biosólidos y la composta, además de que se mejoraron las características físicas y químicas del suelo enmendado.

Álvarez *et al.* (2003), señalan que cuando hay un incremento en el nitrógeno, existe un nivel máximo a partir del cual no se observa respuesta en el rendimiento del grano, lo que posiblemente sucedió en el experimento entre BF₁₂ y BF₂₄. Gondek *et al.* (2012), observó que los rendimientos puede estar determinado en gran medida por la aplicación de biosólidos en el cultivo de trigo.

3.6.2 Características morfo-fisiológicas de *Zea mays L.*

Los resultados obtenidos durante la caracterización de *Zea mays L.* se muestran en la Tabla 3.11.

En las Tablas 3.11 y 3.12 se observan los resultados del ANOVA para un diseño en bloques completamente aleatorio y Kruskal-Wallis; las características morfo-fisiológicas: NP, MSP, MPU, NMP, DM, GM y MSG, no muestran diferencias estadísticamente significativas por la incorporación de los distintos tratamientos y las dosis empleadas ($p > 0.05$). Por el contrario las características: AP, LM, PM, TG, PG y CLF se vieron afectadas ($p > 0.05$).

Tabla 3.11. Caracterización morfo-fisiológica de *Zea mays L.* cultivado bajo la aplicación de diferentes dosis de composta y biosólidos.

Tratamiento						
Característica	CB ₁₂	CB ₂₄	BF ₁₂	BF ₂₄	FM ₁₀	
PLANTA	DES	0.76	0.71	0.76	0.79	0.74
	NP	25.29 ± 17.82 ^a	37.86 ± 17.68 ^a	36.57 ± 15.31 ^a	26.85 ± 9.72 ^a	27.57 ± 8.62 ^a
	AP (m)	1.97 ± 0.25 ^a	2.06 ± 0.15 ^{ab}	2.14 ± 0.24 ^{ab}	2.34 ± 0.10 ^b	2.17 ± 0.26 ^{ab}
	MSP	94.44 ± 0.25 ^a	94.52 ± 0.78 ^a	94.88 ± 0.58 ^a	94.96 ± 0.94 ^a	94.28 ± 0.56 ^a
	CLF (SPAD)	26.95 ± 7.26 ^a	35.62 ± 6.84 ^{ab}	45.31 ± 4.13 ^{cd}	48.63 ± 6.69 ^d	37.91 ± 4.46 ^{bc}
MAZORCA	MPU	23.00 ± 13.40 ^a	26.71 ± 9.69 ^a	27.86 ± 9.99 ^a	35.57 ± 11.07 ^a	24.43 ± 6.92 ^a
	LM (m)	0.11 ± 0.03 ^a	0.12 ± 0.03 ^{ab}	0.14 ± 0.02 ^{ab}	0.15 ± ±0.01 ^b	0.14 ± 0.03 ^{ab}
	PM (g)	92.35 ± 53.63 ^a	130.98 ± 38.54 ^{ab}	139.9 ± 30.85 ^{ab}	167.50 ± 23.46 ^b	120.70 ± 20.80 ^{ab}
	NMP	1.14 ± 0.38 ^a	0.86 ± 0.38 ^a	1.14 ± 0.38 ^a	1.29 ± 0.49 ^a	0.86 ± 0.38 ^a
	DM (m)	0.051 ± 0.005 ^a	0.053 ± 0.003 ^a	0.053 ± 0.003 ^a	0.055 ± 0.007 ^a	0.049 ± 0.003 ^a
GRANO	TG (cm) [‡]	0.015 ^a	0.015 ^a	0.015 ^a	0.017 ^b	0.015 ^a
	PG (g)	50.14 ± 2.05 ^a	45.44 ± 1.47 ^b	45.90 ± 1.40 ^b	50.12 ± 1.37 ^a	49.08 ± 1.24 ^a
	GM [‡]	17.07 ^a	17.57 ^a	23.64 ^a	19.50 ^a	12.21 ^a
	MSG (%)	88.00 ± 0.55 ^a	88.23 ± 0.68 ^a	88.40 ± 1.05 ^a	88.10 ± 1.14 ^a	88.20 ± 0.99 ^a

n=7. \bar{x} ± desviación estándar. Valores con diferentes letras dentro de cada fila denotan diferencias significativas (p<0.05).

[‡]Rango medio para prueba Kruskal Wallis

En AP no hubo diferencias significativas con la adición de composta y biosólidos respecto al testigo. Excepto en CB₁₂ donde la AP fue menor y significativamente diferente. Si bien la AP está relacionada con la genética de la planta, también son influenciados por otros factores, especialmente los nutrientes como el nitrógeno, potasio y la materia orgánica que son modificadas al adicionar enmiendas, en este caso con biosólidos (Lloret, *et al.*, 2016). Los biosólidos tienen la capacidad de mejorar las características físicas, biológicas y químicas del suelo, condiciones esenciales para un crecimiento adecuado de las plantas y cultivos (López *et al.*, 2017). Miralles *et al.* (2002), observaron que al incrementar la dosis de composta de biosólidos se incrementaba la longitud de tallo, plántulas emergentes y longitud de la raíz. Por su parte Dad *et al.* (2018), reportan diferencias significativas y

positivos por la aplicación de enmiendas de biosólidos en la AP, el ancho del tallo de diferentes cultivos.

González-Flores *et al.* (2017), también observaron una mayor altura del maíz por efecto del incremento de la dosis pero sin diferencias significativas durante la primera aplicación, este mejoramiento lo atribuyen al aporte de materia orgánica y nitrógeno, que proporciona un mejor desarrollo de la planta y una mayor producción de biomasa, también observaron que en los dos años posteriores y por el efecto residual del biosólidos la AP disminuyó y que las diferencias con el fertilizante mineral fueron hasta de 11 cm menos. Se considera que la razón por la que el tratamiento CB₁₂ tuvo AP diferentes e inferiores fue debido a la dosis suministrada, la cual no alcanzó a ser utilizada efectivamente por la planta.

En relación a la clorofila CLF la concentración fue mayor en los tratamientos con biosólidos. De manera que, BF₂₄ presentó la mayor concentración, mientras que CB₁₂ la menor y significativamente diferente a los demás tratamientos ($p < 0.05$). La CLF es un indicador del aporte de nitrógeno y del estrés de la planta, por lo que niveles bajos de nitrógeno afectan negativamente la síntesis de clorofila (Guoying, *et al.*, 2017).

Este mismo comportamiento se presentó para LM, donde BF₂₄ se destacó del resto, esto demostró que la longitud de la mazorca no respondió satisfactoriamente al adicionar la composta en dosis de 12 t ha⁻¹, eso puede deberse a que la menor dosis no alcanzó a suministrar adecuadamente los micro y macronutrientes como el nitrógeno que son de vital importancia para la formación de mazorcas. La LM es de gran importancia ya que está ampliamente relacionada con el rendimiento del grano. De acuerdo con González-Flores *et al.*, (2017) el uso de biosólidos favorece el crecimiento de las mazorcas de maíz, con efecto residual positivo.

Los resultados mostraron un efecto significativo en la variable PM, el tratamiento con biosólidos BF₂₄ presentó el valor más alto con diferencias significativas respecto a CB₁₂, pero no con el control FM₁₀ y el resto de los tratamientos. Los granos de maíz cultivados con niveles definidos de N ajustan tanto su peso como su composición de acuerdo con el suministro (Cazetta *et al.*, 1999), lo que indica una influencia de la fuente en la composición del grano (Seebauer *et al.*, 2010). Por lo tanto, la mazorca es sensible al nivel de N disponible, lo que resulta en que todos los granos en la misma mazorca tendrán la composición de proteínas y almidón consistentes.

El tamaño del grano presentó diferencias significativas ($p < 0.05$), las diferencias se observaron en el tratamiento BF₂₄ en relación a los demás tratamientos con el valor más alto. El PG fue mayor en CB₁₂, BF₂₄ y FM₁₀, mismos que fueron significativamente diferentes a CB₂₄ y BF₁₂ ($p < 0.05$). Esta variable al igual que las demás está dada por el genotipo y también por el ambiente (condiciones climáticas y suelo) que pueden favorecer la cantidad y calidad de los granos que una mazorca pueda llegar a tener (Acosta *et al.*, 2013). En este caso y ya que se trató de la misma semilla, estas diferencias se atribuyen a la dosis y al tipo de enmienda empleada que modificaron las características del suelo.

De acuerdo con Seebauer *et al.* (2010) y Uribe Larrea *et al.* (2004), el suministro asimilable puede alterarse por la disponibilidad de N y por el genotipo, ya que ambos afectan el rendimiento y la composición del grano, al disminuir el número de granos por planta como resultado de una polinización menos sincrónica, y/o a mayor abortos en el núcleo los cuales tienen niveles más bajos de poliaminas e iguales o mayores concentraciones de carbohidratos y aminoácidos (Liang y Lur, 2002; Paponov *et al.*, 2005; Uhart y Andrade, 1995).

La aplicación de los biosólidos favoreció el crecimiento de la especie *Zea mays L.*, respecto a la composta. Reszel *et al.* (2004) citado por Szymanska *et al.* (2013),

afirma que el efecto residual de los biosólidos en el maíz se observa en el primer año después de la aplicación.

González-Flores *et al.* (2017), lo atribuyen al gran aporte que hacen los biosólidos al suelo de materia orgánica y nitrógeno, lo que propicia un mejor desarrollo de la planta y una mayor producción de biomasa.

3.6.3 Evaluación de la calidad nutritiva y metabólica del grano de *Zea mays L.*

Con la limpieza y molienda del grano se obtuvo una harina a la que se le determinó su composición química proximal y nutracéutica, se analizó el contenido de humedad, cenizas, P, K, Ca, Zn, almidón y proteínas totales. Los resultados se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Caracterización de la calidad nutritiva del grano de *Zea mays L.* en las diferentes dosis de biosólidos y composta

PARÁMETRO	TRATAMIENTO					Referencia
	CB ₁₂	CB ₂₄	BF ₁₂	BF ₂₄	FM ₁₀	
Humedad (%)	13.49±1.00 ^a	14.06±1.02 ^a	13.90±1.12 ^a	14.34±1.46 ^a	13.34±1.05 ^a	⁴ 12.2
Cenizas (%)	1.62±0.10 ^{bc}	1.52±0.14 ^{ab}	1.84±0.19 ^c	1.56±0.11 ^{ab}	1.40±0.16 ^a	¹ 1.40-1.82
P (%)	0.13±0.03 ^a	0.12±0.04 ^{ab}	0.10±0.02 ^{ab}	0.08±0.02 ^b	0.08±0.03 ^b	² 0.42
K (mg kg ⁻¹)	0.44±0.12 ^a	0.45±0.08 ^a	0.69±0.15 ^b	0.45±0.09 ^a	0.63±0.14 ^{ab}	² 0.49
Ca (mg kg ⁻¹)	0.18±0.09 ^a	0.37±0.12 ^a	0.95±0.28 ^b	0.98±0.17 ^b	1.12±0.2 ^b	--
Zn (mg kg ⁻¹) ‡	16.15±2.84 ^a	17.44±2.71 ^a	17.41±3.44 ^a	20.43±5.67 ^a	14.05±8.66 ^a	³ 17-38
Almidón (%)	70.99±0.755 ^{ab}	72.06±2.28 ^b	68.64±1.66 ^a	69.77±1.91 ^{ab}	70.64±2.96 ^{ab}	⁴ 66.99-71.34/ ⁵ 58.07-71.54
Proteínas totales (%)	9.28±0.03 ^a	9.36±0.07 ^a	11.06±0.09 ^b	10.71±0.04 ^b	10.55±0.11 ^b	² 9.04±0.12/ ⁵ 8.27-11.21

*ND: No detectado. n=7. \bar{x} ±desviación estándar. Valores con diferentes letras dentro de cada fila denotan diferencias significativas (p<0.05). ¹Agama-Acevedo *et al.*, 2011; ²Aguirre y Alegre, 2015; ³Dikerson, 2003; ⁴Salinas *et al.*, 2003. Vaca *et al.*, 2011; ⁵Uriarte-Aceves *et al.*, 2015.

Como se observa el contenido de humedad en la harina de maíz fue uniforme entre los tratamientos (13.34 a 14.34 %). No se encontraron diferencias

significativas por efecto de los tratamientos ($p > 0.05$). Casanueva *et al.* (1995), reportaron valores de 10.6 % y Salinas *et al.* (2007), 12.2 % en maíz pigmentado. La Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, especifica una humedad máxima en maíz de 15 %, ya que a valores mayores puede haber crecimiento de hongos que merman la calidad del grano y causan enfermedades.

En los tratamientos el contenido de cenizas en el grano fue de 1.40 (FM₁₀) a 1.84 (BF₁₂). Las muestras presentaron diferencias estadísticamente significativas ($F(24,4)=9.82$; $p < 0.05$); los tratamientos CB₁₂ y BF₁₂ no presentaron diferencias significativas entre ellos; sin embargo, BF₁₂ presentó el valor más alto y significativamente diferente a los demás tratamientos ($p < 0.05$). Por lo que, la incorporación de los tratamientos en las diferentes dosis modificó el contenido de cenizas en el grano. Dado que las cenizas indican de forma general el contenido de minerales presentes, si la cantidad de cenizas se modifica puede ser efecto de elementos añadidos ya sean nutriente minerales como P, K y N o por efecto de la incorporación de metales pesados. Agama-Acevedo *et al.* (2011) y Figueroa *et al.* (2001), obtuvieron valores similares en cenizas de maíz azul. De acuerdo con los límites establecidos por la AACC y la AOAC (923.03) el contenido máximo es de 3.0 % (peso en seco). De acuerdo con López *et al.* (2007), valores superiores indican cambios en el contenido de minerales causados por diferencias genéticas, cambios en la composición del suelo, los fertilizantes utilizados y factores ambientales.

El porcentaje de P en el maíz presentó diferencias significativas entre CB₁₂ respecto a BF₂₄ y el control ($F(4,24)=3.16$; $p < 0.05$), mostrando una mayor concentración en el primero. Kabirinejad y Hoodaji (2012), observaron un incremento en los contenidos de N, P y K en las plantas de maíz por la aplicación de biosólidos a 50 t ha⁻¹. Por otra parte Zepeda-Bautista *et al.* (2009), no observaron cambios en la concentración de fósforo en la semilla de maíz por la aplicación de diferentes dosis de fertilizantes minerales, lo que sugiere una mayor

susceptibilidad para incrementar la concentración de estos nutrientes al incorporar enmiendas como composta o biosólido en relación al fertilizante mineral.

Matsuyama *et al.*, (1994) observaron que el maíz dentado absorbe mas P en los Andosoles; Ito *et al.* (2011), demostraron que la captación de P por el grano de sorgo fue mayor en los Andosoles alofánicos que en los no alofánico. Estos resultados apoyan la opinión de que la retención de P por los complejos Al-humus es más fuerte, lo que resulta en una menor disponibilidad de P para los cultivos agrícolas. De acuerdo con Takahashi y Dahlgren (2016), cuando se incrementa el pH del suelo la absorción de P disminuye, esto sucede cuando se realizan encalados como practica agrícola.

Los resultados son inferiores a los valores obtenidos por Aguirre y Alegre (2015), con una concentración promedio de 0.42 % en el grano de maíz y a los obtenidos por Dikerson (2003), en maíz azul de 0.26 a 0.35 %. Es importante considerar que la aplicación de los tratamientos fue en la parte superficial del terreno y de forma manual, y no en conjunto con la semilla como se hace al emplear fertilizantes minerales con máquinas sembradoras. También se observó en la parcela experimental residuos de biosólidos aglomerados, lo cual posiblemente disminuyó el proceso de asimilación por el maíz. Por otra parte, se debe de considerar que el suelo es un Andosol el cual, como ya se mencionó con anterioridad, tiene una alta retención de fosfatos.

Con el potasio las diferencias significativas fueron para BF₁₂ con la mayor concentración, respecto al resto de los tratamientos excepto para el control FM₁₀ (F(4,24)=5.67; p<0.05), lo que indica que la dosis empleada de los tratamientos afecta la asimilación del nutriente. Los valores promedios encontrados son similares a los obtenidos por Aguirre y Alegre (2015), que reportaron que la concentración de K en el grano de maíz es de 0.49 mg kg⁻¹.

Los tratamientos con biosólidos incrementaron la concentración de Ca respecto a los tratamientos con composta ($p < 0.05$) lo cual indica que al aplicar la composta se tuvo un menor suministro para la planta, sin embargo, no presentaron diferencias significativas respecto al control (Tabla 3.12), por lo que para este nutriente la aplicación de biosólidos fue la misma que con el fertilizante mineral. Por otra parte Esperschuetz *et al.* (2016), observaron que la aplicación de biosólidos aumentaba la concentración de Ca en las partes vegetales del sorgo.

Aunque en el tratamiento BF₂₄ se observó un incremento en la concentración de Zn en el grano de maíz, no se modificó significativamente ($p > 0.05$) por la incorporación de los diferentes tratamientos, ni por la dosis empleada. Caso contrario a lo reportado por Gutiérrez-Ginés *et al.* (2017), quien aplicó en diferentes especies además del maíz y en todas observó un incremento en dicho nutriente. Para que el Zn pueda ser absorbido debe encontrarse disponible en el suelo lo cual está altamente influenciado por el pH del suelo y su absorción es muy baja a pH mayores a 6, cabe señalar que el pH del suelo preliminar indicaba un valor de 6.5 ± 0.33 , valor que seguramente aumentó después de la aplicación de los biosólidos y composta los cuales tenían un pH de 8.0 ± 0.59 y 8.47 ± 0.13 respectivamente. Ya que si se observa la Tabla 3.12 la mayor absorción aunque sin diferencias significativas fue para el tratamiento BF₂₄.

Los valores de Zn considerados como tóxicos para plantas comestibles varían de acuerdo a la referencia, de 29- 95 mg kg⁻¹ (Lübben *et al.*, 1991) hasta 150 mg kg⁻¹ (Smith, 1996). Si la dosis es inferior a lo recomendado (Zn < 15 mg kg⁻¹) el metabolismo del N se modifica, si el Zn disminuye las proteínas también y aumentan los aminoácidos, se inhibe la permeabilidad de la planta liberando los aminoácidos y carbohidratos que atraen agentes patógenos e insectos hacia las raíces y brotes (Cakmak, 2000). En los tratamientos las concentraciones fueron superiores excepto para el control FM₁₀.

El almidón en el grano no presentó diferencias significativas por la aplicación de los tratamientos ($F(4,24)=2.70$; $p \geq 0.05$). Vaca *et al.* (2011), no encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el almidón del grano de maíz al enmendar con fertilizante inorgánico, biosólido y composta de biosólido.

Los maíces pigmentados se caracterizan por contener en su endospermo mayor cantidad de almidón que la encontrada en maíz blanco (Kriger *et al.*, 1998). El contenido de almidón del grano de variedad criolla Chalqueño del Estado de México (Amecameca, Jocotitlan, Coyotepec, Tianguistenco) de acuerdo con Agama-Acevedo *et al.* (2011), es de 78 y 89 %, sin embargo, estas diferencias bien pueden estar asociadas con la amplia gama de razas existentes en el país.

En relación a las proteínas, los valores fluctuaron entre 9.28 y 11.06 %, con diferencias significativas ($F(4,24)=9.34$; $p < 0.05$). Los tratamientos CB₁₂ y CB₂₄ presentaron la menor concentración respecto a BF₁₂, BF₂₄ y FM₁₀ ($p < 0.05$); por lo que, la incorporación de composta influyó en este parámetro.

Por su parte, Agama-Acevedo *et al.* (2011), encontraron diferencias significativas en el contenido de proteínas en el grano de maíz raza Chalqueño en el Estado de México. Pires *et al.* (2015), encontraron que los biosólidos afectan la cantidad de N absorbido por las plantas de maíz a dosis altas de biosólidos, incrementando la concentración de proteínas.

Aguilar *et al.* (2016), tuvieron diferencias significativas en las proteínas del grano, por efecto de la fertilización nitrogenada, dicho autor menciona que el suministro de N promueve un aumento en la concentración de proteína del endospermo, y que a dosis bajas de N la concentración de almidón y proteínas no es óptima.

También, el nivel de asimilación de N influye directamente en la actividad de las proteínas de zeína, así como de las enzimas (Cazetta *et al.*, 1999; Singletary *et al.*, 1990), e indirectamente afecta el suministro de asimilación al alterar la

biomasa de la planta y los metabolitos de N (Fageria y Baligar, 2005; Seebauer *et al.*, 2004).

En forma general, si los nutrientes esenciales son suministrados insuficientemente conducirán a alteraciones metabólicas, incluidos los cambios en las actividades de las enzimas, la tasa de reacciones metabólicas y la concentración de metabolitos. Además de las alteraciones en los patrones metabólicos, las deficiencias graves de los elementos esenciales también producen un conjunto de efectos característicos en la apariencia externa de las hojas, los tallos, las raíces, flores y frutos.

La comparación del efecto de las enmiendas orgánicas con el efecto del fertilizante mineral muestra mayor influencia en la composición química del maíz ya que los materiales orgánicos, principalmente los biosólidos, muestran un efecto benéfico no sólo en el rendimiento de la planta, sino también en su valor biológico y nutritivo.

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados obtenidos en los análisis de los aminoácidos lisina, triptófano, metionina y prolina del grano, que determinan la calidad de la proteína. Se observa que el tipo de enmienda suministrada en el suelo afecta la concentración de lisina ($F(4,24)=10.94$; $p<0.05$), obteniendo mejores resultados en los tratamientos BF, de manera que la adición de 24 t ha^{-1} incrementa la concentración de lisina. Un incremento en la concentración de lisina en el grano de maíz es de gran interés ya que se trata de un aminoácido esencial para los animales monogástricos, y que se encuentra limitado en la semilla del maíz.

Losak *et al.* (2010), mencionan que después de fertilizar durante un año un cultivo de maíz con dos dosis diferentes fertilizante nitrogenado (120 y 240 kg ha^{-1} de N), no obtuvo diferencias significativas en el contenido de lisina, esto posiblemente se deba a que el tipo de material empleado no cambió, caso contrario para este

estudio, al variar de biosólidos a composta, lo que probablemente influyó en los procesos enzimáticos y metabólicos por tratarse de enmiendas orgánicas, lo cual indica que la aplicación de los biosólidos aumenta la concentración de la lisina de forma favorable.

Se encontró que por el tipo de enmienda aplicada había diferencias significativas en la concentración de triptófano, con una mejor respuesta en los biosólidos ($F(4,24)=12.82$; $p<0.05$). En relación la dosis no hubo efecto significativo al cambiar de 12 a 24 ton ha^{-1} . Respecto al control se tuvo diferencias significativas con BF_{24} . Las concentraciones de triptófano fueron similares a las reportadas por Vidal *et al.* (2008), en la caracterización de maíz criollo nacional. También se observó que los tratamientos BF_{12} y BF_{24} , en donde se encontró la mayor concentración de lisina y triptófano, fueron los tratamientos con el mayor rendimiento y cantidad de proteína, lo que indica que en función del tratamiento aplicado, la calidad del maíz fue mejorada.

Tabla 3.13 Concentración de aminoácidos en granos de *Zea Mays L.* cultivado en suelo enmendado con biosólidos y composta.

PARÁMETRO (%)	TRATAMIENTO						Referencia
	CB_{12}	CB_{24}	BF_{12}	BF_{24}	FM_{10}		
Lisina	0.249 ± 0.030 ^a	0.263 ± 0.030 ^{ab}	0.294 ± 0.026 ^{bc}	0.315 ± 0.024 ^c	0.245 ± 0.018 ^a		0.18-0.32 [‡]
Triptófano	0.046 ± 0.006 ^a	0.047 ± 0.006 ^a	0.056 ± 0.003 ^{bc}	0.062 ± 0.005 ^c	0.052 ± 0.004 ^{ab}		0.04-0.051 [†]
Metionina	7.70 ± 0.186 ^a	6.091 ± 0.050 ^b	6.919 ± 0.043 ^c	6.427 ± 0.029 ^d	6.783 ± 0.029 ^c		--
Prolina	1.246 ± 0.045 ^a	2.227 ± 0.034 ^b	3.147 ± 0.070 ^c	1.727 ± 0.032 ^d	0.691 ± 0.020 ^e		0.07-1.08 [‡]

[‡]Gutiérrez *et al.*, 2014; [†]Vidal *et al.*, 2008; [‡]Nankar *et al.*, 2017. $n=7$. $\bar{x} \pm$ desviación estándar. Valores con diferentes letras dentro de cada fila denotan diferencias significativas ($p<0.05$). Los aminoácidos están expresados en % base seca.

En relación a la metionina, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos CB_{12} , CB_{24} y BF_{24} en relación al control ($p<0.05$), donde el tratamiento CB_{12} presentaba una mayor concentración de metionina y CB_{24} la menor.

La prolina presentó diferencias significativas en todos los tratamientos y en relación al control ($p<0.05$). Nankar *et al.* (2017), reportaron que el contenido de

prolina en maíz azul en la región norte de México es de 0.07 a 1.08 %, valores inferiores a los encontrados en esta investigación. De acuerdo con (Hare y Crees, 1997), las perturbaciones ambientales pueden afectar el proceso fotosintético o su funcionamiento por la producción de prolina. La acumulación en los granos donde se aplicaron los tratamientos indica que posiblemente el cultivo presentó una respuesta de protección ya que como se puede observar en la Tabla 3.13 en el control se obtuvo la menor concentración, tal vez este aumento resulte de la presencia de metales pesados ya que este aminoácido tiene un efecto de protección principalmente con los elementos reductores como lo metales pesados, además de estar involucrada en la regulación del pH celular y potencial redox celular bajo condiciones de estrés (Hare y Cress, 1997; Rana *et al.*, 2017). Otra posibilidad son las dosis de nitrógeno suministrado indirectamente mediante los biosólidos ya que como lo observó Sánchez *et al.* (2001) en *Phaseolus vulgaris L*, la prolina es un buen indicador de exceso de nitrógeno en las plantas.

Recientes estudios respaldan la importancia de los aminoácidos en los procesos fisiológicos, los cuales se ven fuertemente afectados por la actividad de los transportadores específicos del nitrógeno orgánicos (Tegeeder, 2012). Esta es otra posibilidad de los cambios presentados en la concentración de la prolina, ya que el suministro de nitrógeno disponible para el cultivo fue superior en los tratamientos con biosólidos.

El hecho de que los aminoácidos se acumulen en los tejidos vegetales ya sea respuesta al estrés o por el aporte de nitrógeno, es un ejemplo de los efectos sobre la composición y el rendimiento de los cultivos (Halford *et al.*, 2015). Los aminoácidos estudiados no solo son esenciales para la síntesis de proteínas, enzimas y muchos compuestos esenciales para el metabolismo de las plantas, crecimiento y defensa; además, afectan los procesos biológicos al ser moléculas de señal o al influir en la acción de las hormonas a través de la conjugación de nuevos aminoácidos. Estos efectos muestran que al modificar el material de enmienda en la siembra se afectan los procesos metabólicos que intervienen en el crecimiento y desarrollo.

3.6.4 Análisis de correlación lineal simple entre las variables morfo-fisiológicas, nutraceuticas y metabólicas de *Zea mays L.*

Los coeficientes estimados de correlación simple para cada par de variables se muestran en la Tabla 3.14. De manera general la mayoría de las variables se correlacionaron, sin embargo, las que presentaron mayor valor de correlación (coeficiente de Pearson $r > 0.60$, $p\text{-valor} < 0.05$) se mencionan a continuación.

El rendimiento del grano estuvo correlacionado positivamente con 9 variables de las 26 estudiadas, dentro de estas variables, el peso del grano PM ($r=0.60$), Lys ($r=0.61$), Pro ($r=0.63$) y la clorofila CFL($r=0.77$) fueron las más asociadas al rendimiento. Como se aprecia las variables PM, Lys, Pro y CFL estuvieron mas correlacionados, lo que indica que si estas características en las plantas se modifican e incrementan podrian tenerse cultivos más productivos.

El Trp se correlacionó con peso de la mazorca PM ($r=0.61$), Ca ($r=0.61$), las proteínas ($r=0.67$), CFL ($r=0.78$) y Lys ($r=0.86$). La Lys se asoció con el rendimiento ($r=0.61$), PM ($r=0.68$) y CFL ($r=0.72$). La prolina se correlacionó con las cenizas ($r=0.60$), el peso del grano PG ($r=0.62$) y el rendimiento ($r=0.63$). Por otra parte la metionina presentó correlación con PG ($r=0.39$) y una correlación inversa con el rendimiento ($r=-0.67$) y la CFL ($r=-0.45$).

Como se puede observar, algunas de las variables utilizadas para evaluar las características morfo-fisiológicas se correlacionan con las variables de calidad del grano. Por ejemplo el PM se correlaciona con la Lys y Trp, por lo que al medir el PM se puede esperar que la cantidad de Lys y Trp se incremente dada la correlación lineal positiva que presentan. Lo mismo se puede ver en otras características morfo-fisiológicas como GM (granos por mazorca), PM (peso de la mazorca), NMP (número de mazorcas por planta), LM (largo de la mazorca), PG (peso del grano), MSP (materia seca de la planta) que se correlacionan con la metionina, prolina, triptófano y proteínas en algunos de los tratamientos.

Se observó que los coeficientes de correlación en las características metabólicas eran más altos que los coeficientes entre las variables morfo-fisiológicas lo que evidencia más cambios en los factores metabólicos por la adición de los diferentes tratamientos.

	NP	MPU	AP	NMP	TG	LM	PM	DM	GM	PG	MSP	MSG	CLF	czas	P	K	Ca	Zn	humd	prot	rend	lis	trip	almd	met	pro	
NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.39*	-	-	-	-	-	-	-	-0.39*	-	-	-	-	-	-	-	-	
MPU		0.55*	-	0.46*	-	0.53*	-	-	-	-	-	0.49*	-	-	-	-	-	-	-	-	0.37*	0.36*	-	-	-	-	
AP			-	0.43*	-	0.40*	-	-	-	-	-	0.50*	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43*	-	0.37*	-	-	-	
NMP				-	-	-	-	-	-	-	-	0.43*	-	-	-	-	-	-	-	-	0.40*	-	0.57*	0.46*	-	-	
TG					0.35*	0.51*	0.36*	-	-	-	-	0.48*	-	-	-	-	0.46*	-	-	-	0.34*	0.53*	0.56*	0.48*	-	-	
LM						0.77**	0.48*	0.57*	-	-	-	0.53*	-	-	-	-	0.50*	-	-	-	0.36*	0.36*	0.45*	0.51*	-0.39*	-	
PM							0.53*	0.53*	-	-	-	0.71**	-	-	-	-	0.39*	-	-	-	0.34*	0.60*	0.68**	0.61*	-	-0.44	
DM								0.50*	-	-	-	0.47*	-	-	-	-	-	-	-	-	0.44*	0.46*	0.41*	-	-0.36		
GM									-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.38*	-	-	-		
PG										-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.37*	-	-	-	0.39	-0.62**	
MSP											-	0.39*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.37*	-	-	-	
MSG												-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CLF													-	-	-	-	0.57*	-	-	-	0.59*	0.77**	0.72**	0.78**	-0.36*	-0.45	0.36*
czas														-	-	-	-	-	-	-	-	0.37*	-	-	-	0.60*	
P															-	-	-0.47*	-	-	-	-0.40*	-0.35*	-	-0.46*	-	-	
K																-	0.47*	-	-	-	0.58*	-	-	-	-	-	
Ca																	-	-	-	-	0.75*	0.51**	0.39*	0.61*	-0.35*	-	
Zn																		-	-	-	-	0.42*	-	-0.46*	-	-	
humd																			-	-	-	-	-	-	-	-	
prot																					0.51*	0.54*	0.67**	-0.50*	-	-	
rend																						0.61*	0.58*	-	-0.67	0.63**	
lis																							0.86**	-0.46*	-	0.43*	
trip																								-0.51*	-	-	
almd																									-0.11	-	
met																										-	
pro																										-	

Tabla 3.14. Correlaciones Producto-momento de Pearson entre variables morfológicas, nutritiva y metabólicas en *Zea mays L.* a diferentes dosis de composta y biosólidos aplicados a suelo agrícola. *p<0.05,**p<0.01, n=35.

3.7 Caracterización del suelo enmendado

En la Tabla 3.14 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del suelo enmendado. No se observaron cambios en la clasificación textural; el contenido de MO incrementó en todos los tratamientos comparado con el suelo preliminar (Tabla 3.2) en el siguiente orden $FM_{10} < CB_{24} < BF_{12} < CB_{12} < BF_{24}$. Como se observa el aporte de materia orgánica es nulo para el fertilizante mineral ya que no posee las características benéficas de las enmiendas orgánicas.

El contenido de NTK en el suelo preliminar fue bajo al igual que el aporte de NO_3 ; en el suelo enmendado estos valores incrementaron para todos los tratamientos especialmente en BF_{24} , lo cual se debe al aporte proveniente las enmiendas especialmente de los biosólidos; en la composta y el fertilizante mineral, sin embargo, el NTK fue menor.

Para el caso del fertilizante mineral, existen varios factores a los que puede atribuirse dicho efecto, como es la alta susceptibilidad de lixiviarse a través del perfil del suelo (ya que carece del aporte de MO que impide se pierda con facilidad) así como la demanda y disponibilidad de N, que es rápidamente absorbido por el cultivo, a diferencia del biosólido y la composta que tienen tasas de mineralización y liberación gradual para las plantas (Correa y Silva, 2016).

De acuerdo a la normatividad citada en la Tabla 3.4, la CE del suelo después de aplicar los materiales de enmienda y culminar el ciclo agrícola tuvo efectos despreciables de salinidad. El pH del suelo enmendado fue menor en comparación con el suelo preliminar y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 fue la misma (moderadamente ácido), estos valores de pH permite una mayor disponibilidad de los micronutrientes, un efecto positivo para su asimilación por el cultivo. La reducción del pH en BF y CB indica la presencia de bases intercambiables ya que generalmente disminuyen la proporción de cationes ácidos (H^+ y Al^{+3}) (Martínez *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 1992).

Tabla 3.15. Caracterización del suelo enmendado

PARÁMETRO	RESULTADO							
Arena (%)	72 ± 0.65							
Limo (%)	20 ± 0.44							
Arcilla (%)	8 ± 0.31							
Clasificación textural	Franco Arenoso							
PARÁMETRO	TRATAMIENTO							
	CB ₁₂	CB ₂₄	BF ₁₂	BF ₂₄	FM ₁₀			
MO (%)	6.83 ± 0.41	5.29 ± 0.58	6.3 ± 0.53	7.73 ± 0.57	3.17 ± 0.13			
NTK %	0.2 ± 0.03	0.15 ± 0.07	0.18 ± 0.02	0.21 ± 0.04	0.11 ± 0.03			
NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	240.1 ± 1.72	185.25 ± 9.95	220.8 ± 7.69	255.65 ± 6.6	113.2 ± 4.68			
CE (ds m ⁻¹) a 25 °C	0.18 ± 0.02	0.17 ± 0.09	0.18 ± 0.05	0.17 ± 0.07	0.17 ± 0.07			
pH en H ₂ O a 25 °C	6.12 ± 0.26	6.29 ± 0.17	6.17 ± 0.14	5.52 ± 0.24	5.66 ± 0.05			
CIC [cmol (+) kg ⁻¹]	19.57 ± 0.78	20.33 ± 0.71	21 ± 1.28	21.15 ± 1.03	20.06 ± 0.52			
K (mg kg ⁻¹)	120.18 ± 2.19	180.82 ± 5.11	180.07 ± 6.72	280.15 ± 1.64	140.53 ± 2.55			
P (mg kg ⁻¹)	278 ± 5.35	231.25 ± 8.99	246.25 ± 5.56	249 ± 3.92	249.25 ± 2.87			
Zn (mg kg ⁻¹)	6.57 ± 0.09	24.17 ± 1.34	2.81 ± 0.51	80.67 ± 9.67	1.41 ± 0.46			
Pb (mg kg ⁻¹)	ND	0.6 ± 0.18	0.68 ± 0.09	0.82 ± 0.13	0.8 ± 0.14			
Cd (mg kg ⁻¹)	ND	0.22 ± 0.02	0.2 ± 0.13	0.2 ± 0.02	ND			
Ni (mg kg ⁻¹)	0.22 ± 0.13	0.31 ± 0.09	0.2 ± 0.06	0.2 ± 0.03	0.2 ± 0.05			
Cr (mg kg ⁻¹)	ND	ND	ND	ND	ND			
Cu (mg/kg ⁻¹)	1.65 ± 0.51	1.8 ± 1.07	1.22 ± 1.4	1.78 ± 1.26	0.8 ± 0.3			

ND: No detectado. n=4. $\bar{x} \pm$ desviación estándar.

Aravena *et al.* (2007) sugirieron que cuando se incorporan al suelo biosólidos con altos niveles de material orgánico, se produce una reactivación de la bacteria presente tanto en los biosólidos como en el suelo, lo que aumenta el metabolismo y disminuye los valores de pH del suelo, el tipo de suelo al que se aplica el bioólido también influye en este proceso.

Se observó que la CIC en el suelo incrementó de 19.59 cmol(+) kg⁻¹ en el suelo preliminar a 21.15 cmol(+) kg⁻¹ en el suelo enmendado, para el caso de BF₂₄, estos valores están estrechamente relacionadas con el aumento de la materia orgánica incorporada por los biosólidos y la composta los cuales tienen una CIC de 29.28 y 26.23 cmol(+) kg⁻¹, respectivamente. De acuerdo con Kabirinejad y Hoodaji (2012), la CIC y el contenido de cationes en el suelo incrementa por efecto de las dosis, el tratamiento aplicado y su contenido en coloides húmicos.

En cuanto al K se observó un incremento del nutriente en los tratamientos CB₂₄, BF₁₂ y BF₂₄ y un descenso en CB₁₂ y FM₁₀. En FM₁₀ se explica debido a que no se tuvo aporte extra en el fertilizante mineral solo la reserva del suelo por lo que disminuyó al suministrar la demanda del cultivo. Para CB₁₂ aunque sí hubo un aporte del nutriente fue menor al proporcionado por el resto de los tratamientos.

El P incrementó en el suelo enmendado en el siguiente orden: CB₂₄<BF₁₂<BF₂₄=FM₁₀< CB₁₂. Como se observa el aporte fue mayor en CB₁₂. Si bien la presencia de fósforo es de gran interés para la nutrición del *Zea mays L.* en exceso, como lo reporta Peen y Sims (2002), puede lixiviarse y causar problemas de contaminación en agua. Como se puede apreciar cuando se agregaron biosólidos al suelo, la concentración de P aumentó significativamente en relación con el suelo de control. Esto es consistente con la observación de Sepulveda-Varas *et al.* (2011) y Heathwaite *et al.* (2006), quienes señalaron que el aumento de P disponible debido a la incorporación de biosólidos tuvo un efecto acumulativo a lo largo del tiempo.

El débil crecimiento de las plantas se ha asociado con el contenido de metales tóxicos en los biosólidos. El contenido de Zn en el suelo enmendado incrementó en los tratamientos con biosólidos y composta como consecuencia de una alta concentración de Zn en los biosólidos, aunque no rebasó la concentración máxima permitida de 250 mg kg⁻¹ (Aubert y Pinta, 1977; Dec. 86/278/CEE, 1986), por lo que las dosis establecidas para los tratamientos fueron adecuadas.

Con respecto al resto de los metales no se observó un incremento en las concentraciones después de aplicar los tratamientos sin embargo, aun cuando no rebasan los límites nacionales e internacionales, se debe tomar precaución en su aplicación en el cultivo, ya que incrementan la concentración de prolina en el grano de *Zea mays L.*, como se pudo ver en esta investigación.

González-Flores *et al.* (2017), sugiere que los metales como el Cd queda fuertemente retenido en las fracciones sólidos de la mezcla suelo-biosólidos, ya que el Cd puede formar complejos muy estables con la materia orgánica, además de que la fracción de óxidos de Fe y Mn presentes en el suelo permiten que puedan quedar fuertemente adsorbidos. Igualmente el Pb presenta gran afinidad con la materia orgánica formando complejos de adsorción específica, por lo que a mayor dosis de biosólidos y materia orgánica, ocurre una mayor retención de Pb en el suelo.

Cortés *et al.* (2014), mencionan que en los Andosoles la secuencia de adsorción de metales es la siguiente: $Pb > Cu > Cd > Zn > Ni$, lo que explicaría por que la concentración de estos metales fue menor. Además de considerar que en suelos Andosol hay complejos rico en Al-humus que al formar los complejos humus-metal le confieren estabilidad al unirse a los grupos funcionales de las sustancias humucas (Takahashi y Dahlgren, 2016).

CONCLUSIONES

Se encontró que el rendimiento, las características morfo-fisiológicas, nutritivas y metabólicas (lisina, triptófano, metionina y prolina) en los granos de *Zea mays L.* se modificaban al aplicar en el suelo experimental las diferentes dosis de composta elaborada con biosólido y biosólido, encontrando diferencias estadísticamente significativas en las características evaluadas, y en comparación con el fertilizante mineral.

El rendimiento del cultivo se afectó por la aplicación de los tratamientos y fue superior al control; comparado con los rendimientos obtenidos en la región para el año 2015 el tratamiento BF₁₂ se destacó del resto.

En relación a la especie vegetal *Zea mays L.*, se determinó que las características morfo-fisiológicas AP, LM, PM, TG, PG y CLF presentaron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos. Observando que el tratamiento BF₂₄ fue el que obtuvo una mejor respuesta, sin embargo solo tuvo diferencias significativas con el control FM₁₀ en las variables TG y CFL.

En relación a las características de calidad nutritiva del grano de maíz, el contenido de cenizas, P, K, Ca, almidón y proteínas se modificaron por el tipo de enmienda (BF o CB) y dosis empleada (12 y 24 t ha⁻¹).

En cuanto a los aminoácidos estudiados, la lisina y el triptófano se incrementaron por efecto de la aplicación del biosólido, principalmente en BF₂₄, por otra parte, con la composta el comportamiento fue semejante al fertilizante mineral por lo que no tuvo efecto sobre la concentración de aminoácidos.

La metionina y prolina, mostraron ser susceptibles a la incorporación de biosólidos y composta ya que su concentración cambió e incrementó en los tratamientos,

excepto para CB₁₂, la concentración de prolina fue mayor en BF₁₂, indicando que probablemente exista estrés en la planta por su incorporación.

Las características morfo-fisiológicas, de calidad nutritiva y metabólica que presentaron una correlación estadísticamente significativa con el rendimiento fueron con peso de la mazorca PM ($r=0.60$), Lys ($r=0.61$), Pro ($r=0.63$) y clorofila CFL ($r=0.77$).

Se encontró que el proceso de compostaje alcanzó temperaturas mayores a 45 °C, garantizando con ello una adecuada eliminación de coliformes fecales, huevos de helminto y *Salmonella spp.* Respecto a los metales pesados se cumplieron los parámetros establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 tanto para biosólidos como en composta.

El suelo enmendado con BF₂₄ y CB₂₄ con respecto al resto de los tratamientos y al control presentó mejores características fisicoquímicas de acuerdo a los parámetros establecidos por la normatividad mexicana; también se observó que las concentraciones de metales pesados en el suelo posterior a un ciclo agrícola cumplían con los niveles tolerables en los estándares internacionales y nacionales.

REFERENCIAS

- AACC Internacional. (2000). Los métodos aprobados de análisis. Método 44-15 Método (11 ed). AACC International, St. Paul, MN, EE.UU.
- Acosta R, Colomer A, Ríos H, Martínez M. (2013). Morphoagronomic characterization of a maize population (*Zea Mays L.*) under open pollination conditions in Batabanó, ayabeque. *Cultivos tropicales*. 34 (2).
- Adbul Khalil H.P.S., Sohrab H. M., Enih R., Azli N.A., Saddon N., Davoudpoura Y., Nazrul I.M. y Dungani R. (2015). The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review. *Renewable and sustentable Energy Revies*, 43, 1005-1015.
- Adriano D.C., Wenzel W.W., Vangronsveld J. y Bolan N. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122, 121-142.
- Agama-Acevedo E., Ottenhof M.A., Farhat, I.A., Paredes-López O., Ortiz-Cereceres J. y Bello-Pérez L.A. (2005). Aislamiento y Caracterización del Almidón de Maíces Pigmentados. *Agrociencia*, 39(4), 419-429.
- Agama-Acevedo E., Salinas-Moreno Y., Pacheco-Vargas G. y Bello-Pérez L.A. (2011). Características físicas y químicas de dos razas de maíz: morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 317-329.
- Aguilar C.C., Escalante E.J.A.S, Aguilar M.I., Mejía C.J.A., Conde M.V.F. y Trinidad S.A. (2016). Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 419-429.

- Aguirre Y.G. y Alegre O.J. (2015). Uso de fuentes no convencionales de nitrógeno en la fertilización de maíz (*Zea mays L.*), en Cañete (Perú). I: Rendimiento y extracción de N, P y K. *Ecología Aplicada*, 14(2), 157-162.
- Almanza M., Fernández M., Valero J., López M. y Soliva M. (2007). Velocidad de mineralización del estiércol vacuno según su estabilidad. *Residuos ganaderos*, 96, 30-36.
- Álvarez R.H.S, Steinbach C.R., Álvarez y Grigera S. (2003). Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 18, 14-19.
- AOAC, Association of Oficial Agricultural Chemist. (2000) .Official methods of analysis. (9 ed.) Washington (USA). 832.
- Aravena, C., Valentín, C., Diez, M., Mora, M., Gallardo, F. (2007). Aplicación de lodos de planta de tratamiento de celulosa: efecto en algunas propiedades físicas y químicas de suelos volcánicos. *Revista de la Ciencia del Suelo y nutrición Vegetal*. 7, 1-14.
- Atasanova E. (2008). Effect of nitrogen sources on the nitrogenous forms and accumulation of amino acid in head cabbage. *Plant, Soil and Environment*, 54, 66–71.
- Aubert H. y Pinta M. (1977). Trace elements in soil. *Developments in Soil Science*, 7.
- Auerbach S.M., Carrado K. y Dutta P. (2004). Handbook of Layered Materials. University of Massachusetts Amherst. Massachusetts, U.S.A. 2-15.

- Babin D., Ding G.C, Pronk G.J, Heister K., Kögel-Knabner I., Smalla K. (2013). Metal oxides, clay minerals and charcoal determine the composition of microbial communities in matured artificial soils and their response to phenanthrene. *FEMS Microbiology ecology*. 86(1), 3-14. doi: 10.1111/1574-6941.12058.
- Barker A.V. y Bryson G.M. (2002). Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by Composting. *The scientific World Journal*, 2, 407-720. doi: 10.1100 / tsw.2002.91.
- Bartel, B. (1997). Auxin biosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 48, 51-66. doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.51
- Basta N.T., Pantone D.J. y Tabatabal M.A. (1993). Path analysis of heavy metals adsorption by soil. *Agronomy Journal*, 85, 1025-1057.
- Ben R.I., Pastor V. y Mauch-Mani B. (2014). Plant Responses to Simultaneous Biotic and Abiotic Stress: Molecular Mechanisms. *Plants*, 3(4), 458-475. doi.org/10.3390/plants3040458.
- Cakmak, I. (2000). Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(2), 185-205.
- Cañizares-Villanueva R.O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de microbiología*. 42, 131-143.
- Cariello M.E., Castañeda L., Riobo I. y González J. (2007). Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición. Vegetal*, 7(3), 26-37.

- Casanueva E., Kaufer M., y Pérez, A.B. (1995). Tablas de Nutriología Médica. Ed. Panamericana, México, 367-369.
- Castañeda-Sánchez A. (2011). Propiedades nutricionales y antioxidantes del maíz azul (*Zea mays L.*). *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*. (5-2), 75-85.
- Castrillón Q.O., Bedoya M.O. y Montaya M.D. (2004). Efectos del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. *Producción + Limpia*, 1(2), 87-98.
- Carrillo T.C. (2009). Origen del maíz naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92-93, 4-13.
- Cazetta J.O., Seebauer J.R. y Below F.E. 1999. Sucrose and nitrogen supplies regulate growth of maize kernels. *Annals of Botany*. 84, 747-754
- Cébron A., Beguiristain T., Bongoua-Devisme J., Denonfoux J., Faure P., Lorgeoux C., Ouvrard S. y Parisot N. (2015). Impact of clay mineral, wood sawdust or root organic matter on the bacterial and fungal community structures in two aged PAH-contaminated soils. *Environmental science and pollution Research Journal*. 22(18), 13724-13738.
- CDIA, Centro de Investigaciones Agrarias. (1980). El cultivo del maíz en México (ed. 25 aniversario). 148.
- Chengsong L., Yunfeng P., Wei M., Renyi L., Chunjian L. y Xuexian L. (2012) Proteomic analysis revealed nitrogen-mediated metabolic, developmental, and hormonal regulation of maize (*Zea mays L.*) ear growth. *Journal of Experimental Botany*, 63(14), 5275-5288. doi:10.1093/jxb/ers187.

- Choudhury S., Panda P., Sahoo L. y Panda S.K. (2013). Reactive oxygen species signaling in plants under abiotic stress. *Plant Signaling y Behavior*, 8(4). doi: 10.4161/psb.23681.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2000). Lodos que se generarán por cumplimiento de NOM-001-ECOL-1996. Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2013). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación [En línea: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDSINVENTARIO%202011%20FINAL.pdf>] [Consulta: Noviembre 2012].
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2015). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación [En línea: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDSINVENTARIO%202011%20FINAL.pdf>] [Consulta: Noviembre 2018].
- Corrêa, R.S. y Silva, D.J. (2016). Effectiveness of Five Biosolids as Nitrogen Sources to Produce Single and Cumulative Ryegrass Harvests in Two Australian Soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40. doi.org/10.1590/18069 657rbc20150216.
- Cortes P.L., Bravo R.I.S., Martin P.J.M., Menjivar F.C.M. (2014). Adsorción de metales pesados en Andisoles, Vertisoles y ácidos húmicos. *Ciencias del suelo*. 64(1), 61-71. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n1.43677>.

- Craig G. C., Kurtz K. y Brown S. (2000). Washington State Department of Ecology Solid Waste y Financial Assistance. Program Biosolids Management Guidelines for Washington State Publication, 93 -80.
- Dad K., Wahid A., Khan A.A., Anwar A., Ali M., Sarwaar N., Ali S., Ahmad A., Ahmand M., Khan K.A., Ansari M.J., Gulshan A.B. Nutritional status of different biosolids and their impact on various growth parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.09.001>.
- Dagne W., Maryke T.S. y Bindiganavile S.V. (2011). Protein quality and endosperm modification of quality protein maize (*Zea mays* L.) under two contrasting soil nitrogen environments. *Field Crops Reserch*, 121, 408-415.
- Deng M., Li D., Luo J., Xiao Y., Liu H., Pan Q., Zhang X., Jin M., Zhao M. y Yan J. (2017). The genetic architecture of amino acids dissection by association and linkage analysis in maize. *Plant Biotechnology Journal*, 15, 1250-1263. doi: 10.1111/pbi.12712.
- Dickerson, W.G. (2003). Nutritional analysis of New Mexico blue corn and dent corn kernels. Cooperative extension service, college of agriculture and home economics. New Mexico State Univerity. Las Cruces, NM. 2.
- Ding G.C., Pronk G.J., Babin D., Heuer H., Heister K., Kögel-Knabner I. y Smalla K. (2013). Mineral composition and charcoal determine the bacterial community structure in artificial soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 86, 15-25.
- Directiva 86/278/CEE. (1986). Unión Europea. Consejo de 12 de junio de 1986. Relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos,

en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. Diario Oficial de la Unión Europea L. 6.

Doebley J. y Iltis H.H. (1980). Taxonomy of *Zea* (Gramineae). I. A subgeneric classification with key to taxa. *American Journal and Botany*, 67(6), 982-993.

Dotaniya y Meena. (2015). Rhizosphere Effect on Nutrient Availability in Soil and Its Uptake by Plants: A Review. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Section B: Biological Sciences*. 85(1),1–12. DOI 10.1007/s40011-013-0297-0.

Doval M.M.M., García R.E., Luque del Villar J., Martín-Vivaldi C.J.I., Rodas G.M / Lunar R. y Oyarzun R. (1996). Arcillas Industriales: Yacimientos y Aplicaciones. En: Yacimientos Minerales. Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 582-608.

Edelman M. y Colt M. (2016). Nutrient value of Leaf vs. Seed. *Frontiers in Chemistry*, 4(32). doi: 10.3389/fchem.2016.00032.

Epstein E. (1997). The science of composting. Book review. *Waste Management y Research*, 17(66), 504.

Esperschuetz J., Anderson C., Bulman S., Lense O., Horswell J., Dickinson N, Hofmann R., and Robinson B.H. (2016). Production of Biomass Crops Using Biowastes on Low-Fertility Soil:1. Influence of Biowastes on Plant and Soil Quality. *Journal of Environmental Quality. Technical Report*. 1960-1969. doi:10.2134/jeq2015.12.0596.

Fageria N.K. y Baligar V.C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185.

- Faria V.R., Moriconi W. y Almeida P.R.A. (2014). Residual and cumulative effects of soil application of sewage sludge on corn productivity. *Environmental Science and pollution ressearch*, 21, 6472-6481.
- FAO/UNESCO/ISRIC Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación/ Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/ Centro Internacional de Información y Referencia en Suelos. (2007). Clasificación internacional de los suelos. Base referencial mundial.
- Fassbender H.W. y Bornemisza E. (1994). Química del suelo con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura IICA. (2 ed.). San José, Costa Rica. ISBN: 92-9039-1243. 444.
- Ferris J.P. (2006). Montmorillonite-catalysed formation of RNA oligomers: the possible role of catalysis in the origins of life. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 361(1474), 1777-86.
- Figueroa J.D.C y González-Hernández J. (2001). La tecnología de la Tortilla. Pasado, presente y futuro. *Ciencia y Desarrollo*, 27(156), 22-31.
- Galarza J.M. (2011). Situación actual y perspectiva del maíz en México. SIAP. <http://siap.gob.mx>.
- Galicia L., Miranda A., Gutiérrez M.G., Custodio O., Rosales A., Ruiz N., Surles R. y Palacios N. (2012). Laboratorio de calidad nutricional de maíz y análisis de tejido vegetal: Protocolos de laboratorio 2012. México, D.F.: CIMMYT. ISBN: 978-607-95844-5-0

- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México D.F: Offset Larios S.A, 46-52.
- García M. H. A., Balderrama C.P. J., Castro E. L., Mungarro I. C., Arellano G. M., Martínez J.L. y Gutiérrez Coronado M.A. Efecto del abono de sustrato gastado de champiñón en el rendimiento de frijol *phaseolus vulgaris* L. *Terra Latinoamericana*, 32, 69-76.
- Gigolashvili T. y Kopriva S.. (2014). Transporters in plants sulfur metabolism. *Front Plant Science*, 5, 1-16.
- Giniyatullin K.G., Shinkarev (Jr.) A.A., Shinkarev A.A, Krinari G.A., Lygina T.Z., Gubaidullina A.M. ySuchkova G.G. (2010). Binding of organic matter into an oxidation resistant form during the Interaction of clay minerals with plant residues. *Eurasian Soil Science*, 43(10), 1159–1173.
- Gobierno del Estado de México. Comisión coordinadora para la recuperación ecológica de la cuenca del río Lerma (1993). Atlas ecológico de la cuenca hidrográfica del río Lerma. Tomo 1. Cartografía.
- Gómez B.G. (1998). Variación estacional de metales pesados en lodos residuales de la planta tratadora de aguas “Toluca Oriente” (tesis de licenciatura). Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UAEMex, México. 72 pp.
- González-Flores E. Ramos-Barragán J.E., Tornero-Campante M.A. y Murillo-Murillo Misael. (2017). Evaluación de dosis de biosólidos urbanos en maíz bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8, 119-132.

- Grimes S.M., Taylor G.H. y Cooper J. (1999). The availability and binding of heavy metal in compost derived from household waste. *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, 74, 1125-30.
- Google maps.com. (2015) [En línea: <https://www.google.com.mx/maps/place/San+Juan+de+las+Huertas,+M%C3%A9xico/@19.2253272,99.7615209,525m/data=!3m1!1e1!4m2!3m1!1s0x85cd8647e288c25f:0x638df44261bc4898!6m1!1e1>].
- Gondek K., Kopec M., Glab T. (2012). The contents of microelements and exogenous amino acids in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grain after municipal sewage sludge fertilization. *Journal of Agricultural Science*. 4(12), 294-303. doi:10.5539/jas.v4n12p294.
- Goñi, I., A. García-Alonso, and F. Saura-Calixto. (1997). A starchhydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17, 427-437.
- Guoying L., Qingjie D. y Jianming L. (2017). Interactive effects of nitrate-ammonium ratios and temperatures on growth, photosynthesis, and nitrogen metabolism of tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 214, 41-50.
- Gupta H.S., Agrawal P.K., Mahajan V., Bisht G.S., Kumar A., Verma P., Sirivastava A., Shana S., Babu R., Pant M.C. y Mani V.P. (2009). Quality protein maize for nutritional security: rapid development of short duration hybrids through molecular marker assisted breeding. *Current Science*, 96 (2), 230-237.
- Gupta S.K., Tewari A., Srivastava R., Murthy R.C. y Chandra S. (2005). Potential of *Eisenia fetida* for sustainable and efficient vermicomposting of fly ash. *Water Air Soil Pollut*, 163, 293–302.

- Gutierrez-Gines M.J., Robinson B.H., Esperschuetz J., Madejon E., Horswell J., and McLenaghan R. (2017) Potential Use of Biosolids to Reforest Degraded Areas with New Zealand Native Vegetation. *Journal of Environmental Quality*. 46, 906-914. doi:10.2134/jeq2017.04.0139
- Gutiérrez H.G.F., Arellano V.J.L., Vázquez R.J.M., García R.E., Vazquez L.P. y Flores G.E. (2014). Formación de híbridos de maíz con calidad proteica: lisina, triptófano e índice de calidad. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*. 31. 171-189.
- Hare P.D y Cress W.A. (1997). Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*. 21(79). 102. doi.org/10.1023/A:1005703923347.
- Halford, N.G., Curtis, T.Y., Muttucumaru, N., Postles, J., Elmore, J.S., y Mottram, D.S. (2012). The acrylamide problem: a plant and agronomic science issue. *Journal of Experimental Botany*, 63, 2841-2851. doi: 10.1093/jxb/ers011.
- He M., Tian G. y Liang X. (2009). Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during aerobic composting of sewage sludge. *Journal of Hazard Materials*, 163, 671-677.
- Heathwaite, A., Burke, B., Bolton, L. (2006). Field drains as a route of rapid nutrient export from agricultural land receiving biosolids. *Science of the Total Environment*, 365, 33-46.
- Ho C.P., Yuan S.T., Jien S.H. y Hseu Z.Y. (2010). Elucidating the process of co-composting of biosolids and spent activated clay. *Bioresource Technology*, 101(21), 8280-8286.

- Hsu J.H. y Lo S.L. (1999). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution*, 104, 189-196.
- Huang Z, Lu Q., Wang J., Chen X., Mao X., He Z. (2017). Inhibition of the bioavailability of heavy metals in sewage sludge biochar by adding two stabilizers. *PLoS ONE* 12(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183617>.
- Iglesias J.E. y Pérez G.V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity: A review. *Biological Waste*, 27, 115-142. [doi.org/10.1016/0269-7483\(89\), 90039-6](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90039-6).
- Ittis, H. H. y Benz B.F. (2000). *Zea nicaraguensis* (Poaceae), a new teosinte from Pacific Coastal Nicaragua, *Novon*, 10, 382-390. doi : 10.2307 / 3392992.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2008). Agrobiodiversidad en México: el caso del Maíz. Dirección de Economía Ambiental, INE. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO. Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, SAGARPA. [En línea: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/agrodiversidad.pdf>] [Consulta: 02 Septiembre 2014].
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2014). [En línea: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/16/parte2.html>] [Consulta: 10 Octubre 2014].
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). Prontuario de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Zinacantepec, México. Clave geoestadística 15118.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015).Temas: Topografía. Cartas topográficas. [En línea:<http://buscador.inegi.org.mx/>] [Consulta: 15 Octubre 2015].
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agricultura y Pecuarias. (2010). Centro de investigación regional del Centro. La clasificación FAO-WRB y los suelos del Estado de México. Editores: Sotelo Ruiz Erasto Domingo, González Hernández Antonio, Cruz Bello Gustavo Manuel, Moreno Sánchez Francisco y Ochoa Estrada Salvador. ISBN: 975-607-425-283-5.
- Isely D. (1957). Vigor tests. *Proceedings of the Association of Official Seed Analysts*, 47, 176-182.
- ISTA, International Seed Testing Association. (2011). Rules. Seed of vigor test methods. (2 ed.). Zurich. ISTA, 117. ISSN online: 2310-3655.
- Izsáki Z. 2017. Effect of Potassium Supplies on the Nutritional Status of Maize (*Zea mays* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*.48(19), 2347-2358. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411513>.
- Jolanun B. y Towprayoon S. (2010). Novel bulking agent from clay residue for food waste composting. *Bioresource Technology*, 101, 4484-4490.
- Juárez R.B. (2014). Obtención de composta a partir de biosólidos y residuos sólidos orgánicos con una relación carbono nitrógeno entre 4 y 8, y en tiempo menor a 3 meses (tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Toluca. México.
- Jugenheimer R.W. (1981). Maíz Variedades mejoradas. Métodos de Cultivos y Producción de semillas. México. Limusa. 552

- .Kabirinejad S. y Hoodaji M. (2012). The effects of biosolid application on soil chemical properties and Zea mays nutrition. *International Journal Of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 1(4). doi:10.1186/2251-7715-1-4.
- Kiely G. (1999). Tratamientos de Residuos Sólidos. En: Ingeniería Ambiental de España. España: Mc Graw Hill interamericana. 843-931.
- Kobus J. y Pacewiczowa T.(1966). Effect of clay minerals on the biological activity of light soils. (In Polish) *Roczniki .alebozn*, 16, 53.
- Kulikowska D. y Gusiatin Z. M. (2015). Sewage sludge composting in a two-stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment. *Waste Management*, 38, 312-320.
- Kuncoro P.H., Kog K., Satta N y Muto Y. (2014). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 143, 172-9.
- Labrador M.J. (2001). La materia orgánica en los agrosistemas. México: Mundi-Prensa. 297.
- Leita L. y De Nobili. (1999). Water- Soluble Fractions of Heavy Metals during Composting of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Quality*, 20, 73-78.
- LGPGIR. Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos. (2013). Última reforma publicada DOF 19-03-2014. [En línea:<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>] [Consulta: 02 abril 2014].

- Liang X., Zhang L., Natarajan S.K. y Becker D.F. (2013). Proline mechanisms of stress. *Antioxidants y Redox Signaling*, 19(9), 998-1011.
- Liang Y-L y Lur H-S. (2002). Conjugated and free polyamine levels in normal and aborting maize kernels. *Crop Science*, 42, 1217–122.
- Lim T.K. (2013). Edible Medicinales and non-medicinales plants. *Springer+Business Media B.V*, 5, 416-447.
- Lloret, E., Pascual, J.A., Brodie, E.L., Bouskill, N.J., Insam, H., Fernández-Delgado, M., Goberna, M. (2016). Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. *Applied Soil Ecology*, 101, 37-46.
- López Dávila, Edelbis, Calero Hurtado, Alexander, Gómez León, Yamilet, Gil Unday, Zuleiqui, Henderson, Deborah, & Jimenez, Janet. (2017). Efecto agronómico del biosólido en cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*): control biológico de *Rhizoctonia solani*. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 13-23.
- López P.P., Prieto F.; Gaytan, M. y Roman, A.D. (2007). Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la región del centro de México. *Revista Chilena de Nutrition*, 37,1-13.
- Losák T., Hlusek J., Filipcik R., Pospisilová L., Manasek J., Prokes K., Bunka F., Kracmar S., Martensson A. y Orosz E. (2010). Effect of nitrogen fertilization on metabolisms of essential and non-essential amino acids in field-grown grain maize (*Zea mays L.*). *Plant soil environ*, 56(12), 574-579.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Stahl D. y Clark D.P. (2004). Brock: biología de los microorganismos (10 ed). New Jersey EEUU: Prentice Hall. ISBN: 8420536792, 9788420536798. 1011.

- Mahamud M., Gutiérrez A. y Sastre H. (1996). Biosólidos generados en la depuradora de agua: (II). Métodos de tratamiento. *Ingeniería del Agua*, 3(3), 45.
- Mathews C.K., Van Holde K.E. y Ahern K.G. (2002). Bioquímica. Ed. Wildson Wesley-Pearson Educación S.A. 1335.ISBN: 84782900532.
- Manahan S.E. (2007). Introducción a la química ambiental. Ed. Reverté. ISBN: 968-6708-60-X. 547.
- Martín J.P. y Haider K. (1971). Microbial activity in relation to soil humus formation. *Soil Science*, 111, 54
- Martínez H.E., Fuentes E.J. P. y Acevedo H.E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Mazen, Ahmed, Faheed, Fayza A, y Ahmed, Atef F. (2010). Study of potential impacts of using sewage sludge in the amendment of desert reclaimed soil on wheat and jews mallow plants. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(4), 917-930. doi.org/10.1590/S1516-89132010000400022.
- Mechthild T. (2012). Transporters for amino acids in plants cell: some functions and many unknowns. *Current opinion in plant biology*, 15, 315-321.
- Mehlich, A. 1985. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Sciences Plant Analysis*, 15, 1409–1416. doi.org/10.1080/00103628409367568
- Mendez-Montevalvo G, Solorza-Feria J, Vázquez del Valle M, Gómez-Montiel N, Paredes-López O. y Bello-Pérez LA. (2005). Composición química y

caracterización calorimétrica de híbridos y variedades de maíz cultivadas en México. *Agrociencia*, 39, 267-274.

Mengel K. y Kirkby E.A. (2001). Pinciples of plant nutrition. (5 ed.) *Springer Science + Business*. ISBN 978-1-1020-0008-9.

Meraz F.M.L. (2014). Valoración agronómica morfológica y bioquímica de líneas de maíz con el carácter tallos gemelos.(tesis de grado). Colegio de Posgraduados. Chapingo, México 181.

Miralles, R.; Beltrán, E.; Porcel, M. A.; Delgado, M.; Beringola, M. L.; Valero, J.; Calvo, R. y Walter I. (2002). Emergencia de seis cultivos tratados con lodo, fresco y compostado, de estaciones depuradoras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 18(3), 139-146.

Moeller G. (2000). Tratamientos Anaerobios de lodo Residual. En: Curso Teórico – Práctico de Tratamiento de Lodos Residuales. Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. (IMTA), Cuernavaca Morelos. México. 41.

Moreno C.J. y Moral H.R. (Ed.). (2007). Compostaje. Madrid, España: Mundi-Prensa. 530.

Muslera, P.E. y Ratera, G. (1991). Praderas y forrajes, producción y aprovechamiento. (2 ed). Madrid España: Mundi-Prensa. 674.

Nadgórska-Socha A., Kafel A., Kandziora-Ciupa M., Gospodarek J. y Zawisza-Raszka A. (2013). Accumalation of heavy metals and antioxidant responses in *Vicia faba* plantas grown on monometallic contaminated siol. *Environmental science pollution research*, 20, 1124-1134.

- Naidu, R., Bolan, N.S., Megharaj, M., Juhasz, A.L., Gupta, S.K., Clothier, B.E. y Schulin, R., (2008). Chemical bioavailability in terrestrial environments. *Developments in soil science*, 32, 1-6.
- Nankar A., Holguin F.O., Scott P.M. y Pratt R.C. (2017). Grain and nutritional quality Traits of southwestern U.S. Blue Maize Landraces. *Cereal Chemistry AACC International*. 94(6), 950-955. doi.org/10.1094/CCHEM-04-17-0079-R.
- Navarro-Aviño J.P., Aguilar Alonso I. y López-Moya J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10-25.
- Navarro M., Febles G. y Herrera R.S. (2015). Vigor: essential element for seed quality. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49 (4). 447-458.
- Nebel B. y Wright R.T. (1999). Ciencias Ambientales Ecología y desarrollo sostenible. (6 ed.). Editorial Pearson Prentice Hall, 348-349.
- Nelson D.L, Lehninger A.L. y Cox M.M. (2009). Lehninger Principles of Biochemistry. (2 ed). New York EEUU: Omega. 1296. ISBN 8428214867.
- Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008. SCFI. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2008). Lombricomposta. Especificaciones y método de prueba [En línea:http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5044562&fecha=10/06/2008].[Consulta: 15 Octubre 2012].
- Norma Mexicana NMX-AA-021-RECNAT-2000. SEMARNAT. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). Especificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. [En línea: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/documents/html>] [Consulta: 15 Octubre 2012].

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. SEMARNAT. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Protección ambiental.-. Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. [En línea: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/documents/html/lodos.html>] [Consulta: 15 Octubre 2012].

Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008. SEMARNAT. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2008). Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba [Consulta: Junio, 2016].

Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006. SMA, Secretaria del Medio Ambiente. (2006). Que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelo elaborados a partir de residuos orgánicos. [En línea: <http://www.edomex.gob.mx/legistelfon/doc/pdf/gct/2009/may211.PD>][Consulta:12abril 2013].

Nuss E.T. y Tanumihardjo S.A. (2010). Maize: A paramount staple crop in the context of global nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Safety*. 9. 417-436. doi: 10.1111/j.1541-4337.2010.00117.x

Obi I U. (1982). Application of 2,4,6-trinitrobenzene-1-sulfonic acid (TNBS) method for determination of available lysine in maize seed. *Agricultural and Biological Chemistry*, 46, 15-20.

Okumoto S. y Pilot G. (2011). Amino acid export in plants: a missing link in nitrogen cycling. *Molecular Plant*, 4(3), 453-463.

- Ortega R.A., Sánchez J., Castillo G.F. y Hernández J.M. (1991). Estado actual sobre los maíces nativos de México. In: Avances en el Estudio de los Recursos Filogenéticos de México. Ortega R., P.G. Palomino, H.F. Castillo, G.V.A. González y M. Livera (eds). SOMEFI, A.C. México. 161-196.
- Ortiz-Cereceres, J. Ortega-Paczka, R., Molina-Galan J., Mendoza-Rodríguez y Mendoza Castillo M. (2007). Análisis de la problemática de la producción nacional de maíz y propuesta de acción. Grupo Xilon en, Universidad Autónoma Chapingo. Colegio de Posgraduados. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, México. 29.
- Ortiz H.M.L. (1994). Caracterización y propuesta de manejo de los lodos residuales de las plantas de tratamiento CIVAC, Estado de Morelos (tesis de maestría). UNAM. 25-80.
- Ortiz H.M.L., Sánchez S.E. y Gutiérrez R.M. (1999). Efectos de la adición de lodos residuales sobre un suelo agrícola y un cultivo de maíz. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15(2), 69-77.
- Paponov IA, Sambo P, Erley GSA, Presterl T, Geiger HH y Engels C. (2005). Kernel set in maize genotypes differing in nitrogen use efficiency in response to resource availability around flowering. *Plant and Soil*. 272.101-110.
- Park, J.H., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N. y Chung, J.W. (2011). Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 185, 549-574.

- Pask, A.J.D. Pietragalla, J., Mullan, D.M., Chávez-Dulanto P.N. y Reynolds, M.P. (Eds.) (2013) Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo. México, D.F.: CIMMYT.
- Penn, C.J. y Sims J.T. (2002). Formas fósforo en los suelos y las pérdidas por arrastre enmendadas-biosólidos. *Journal of Environmental Quality*. 31, 1349-1361. doi: 10.2134 / jeq2002.1349.
- Pérez M.A.B., Ortuño J.F., Aguliar m.i., Mseguer V.F., Sáez J. y Lloréns M. (2010). Used of chemical modification to determine the binding of Cd (II), Zn (II) and Cr (III) ions by orange waste. *Biochemical Engineering Journal*, 53, 2-6.
- Petruzzelli G. (1989). Recycling wastes in agricultura: heavy metal bioavailability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 27, 493-503.
- Pires, A.M.M., Andrade, C.A., Souza, N.A.P., Carmo, J.B., Coscione, A.R. y Carvalho, C.S. (2015). Disponibilidade e mineralização do nitrogênio após aplicações sucessivas de lodo de esgoto no solo, estimadas por meio de incubação anaeróbica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 50(4), 333–342. doi: 10.1590/S0100-204X2015000400009.
- Porta J., López-Acevedo M. y Roquero C. (1994) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid, España: Mundi-Prensa. 203-230.
- Prasana B.M., Vasal S.K., Kassahun B. y Singh N.N. (2001). Quality protein maize. *Current Science*, 81(10), 1308-1319.
- Pratelli R. y Pilot G. (2013). Regulation of amino acid metabolic enzymes and transporters in plants. *Journal of Experimental Botany*, 65(19), 5535-5556.

- Qasim, M., Javed, N., Himayatullah y Subhan, M. (2001). Effect of sewage sludge on the growth of maize crop, *Journal Biology Science*, 1(2), 52-54.
- Radwanski E. R y Last R.L. (1995). Tryptophan biosynthesis and Metabolism: Biochemical and molecular genetics. *The plant cell. American Society of Plant Physiologists*, 7, 921-934.
- Ramírez C.E. y Cardoso V.L. (2000). Composteo de Lodos. En: Curso Teórico – Práctico de Tratamiento de Lodos Residuales. Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. (IMTA), Cuernavaca Morelos. México. 17.
- Ramos-Hernández S.G. y Flores-Román D. (2008). Comparación de dos fuentes fosfatadas en suelos volcánicos cultivados con café del soconusco, Chiapas, México. *Agrociencia*, 42(4), 391-398.
- Rana V., Ram S., Nehra K. (2017). Review proline biosynthesis and its role in abiotic stress. *International journal of agriculture innovations and research*. 6(3). 473-478.
- Reyes B. (2009). Biosorption of Chromium (III) by agro-waste materials: characterization, sorption-desorption studies, mechanism and adsorption kinetic experiments, Trabajo de grado. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. San Luis Potosí S.L.P.
- Rodríguez D., Ruiz A., Martínez Salgado M. y Matiz A. (2007). Uso de inoculante termofílico en la transformación de residuos sólidos urbanos. *Universitas Scientiarum*, 12(2), 57-67.
- Rojas R.R. y Mendoza E.L.G. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.

- Rojas-Tapias D., Moreno-Galván A., Pardo-Díaz S., Obando M., Rivera D. y Bonilla R. (2012). Effect of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) on amelioration of saline stress in maize (*Zea mays*). *Applied Soil Ecology*, 61, 264-272.
- Sadovnikova L.K., Reshetnikov J. y Ladonin D.V. (1993). The Heavy Metal Content of Activated sludge Used as Organic Fertilizant: *Eurasian soil Science*, 25(11), 60-70.
- Salazar S.E., Fortis H.M., Vázquez A.A. y Vázquez V.C. (2003). Agricultura. Abonos Orgánicos y Plasticultura. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. COCYTED. 64-86.
- Santoro M.M., Liu., Khan M.A., Hou L.X, and Bolen D.W. (1992). *Biochemistry*, 31 (23), 5278–5283. DOI: 10.1021/bi00138a006.
- SAGARPA, Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. (2016). [En línea: <http://www.siap.gob.mx/avance-de-siembras-y-cosechas-por-estado/>]. [Consulta: junio 2016].
- Salinas-Moreno Y., Martínez-Bustos V., Soto-Hernández M., Ortega-Paczka, R. y Arellano-Vázquez J. (2003). Efecto de la nixtamalización sobre las antocianinas del grano de maíces pigmentados. *Agrociencia*, 37, 617-628.
- Sánchez G.J.J., Kato Y.T.A., Aguilar M.S.M., Hernández C.J.M., López C.A.R. y Ruiz J.A.C. (1998). Distribución y caracterización del teocintle. Libro Técnico No. 2 del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Sánchez E., López-Lefebre R., García P.C., Rivero R.M., Ruiz J.M. y Romero L. (2001). Poline metabolism in response to highest nitrogen dosages in

green vean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike). *Journal of plant physiology*, 58, 593-598.

Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Paredes C. y Bernal M.P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresouce Technology*, 78(3), 301-308.

Sciascia L., Turco M.L., Merli M. (2011). Kinetic and equilibrium studies for the adsorption of acid nucleic bases onto k10 montmorillonite. *Applied Clay Science*. 53(4). 657-668. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.021>

Scott, M.P, S. y Bertran B.J. (2004). Los niveles de triptófano y metionina en programa de mejoramiento de maíz de calidad proteínica. *Maydica*, 49, 303-311.

Scotti, R., Bonanomi G., Scelza R., Zoina A., y Rao M.A. (2015). Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 333-352. doi.org/10.4067/S0718-95162015005000031.

Seebauer J.R., Moose S.P., Fabbri B.J., Crossland L.D. y Below F.E. (2004). Amino acid metabolism in maize earshoots. Implications for assimilate preconditioning and nitrogen signaling. *Plant Physiology*. 136, 4326-433. doi: 10.1104/pp.104.043778

Seebauer J.R, Singletary G.W., Krumpelman P.M., Ruffo M.L. y Below F.E. (2010). Relationship of source and sink in determining kernel composition of maize. *Journal of Experimental Botany*. 61(2), 511-519. doi:10.1093/jxb/erp324.

- Sepulveda-Varas A., Onostroza C., Encima-Montoya F. (2011). Effects of the incorporation of biosolids on soil quality: temporal evolution in a degraded inceptisol (typic endoaquepts). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11 (3), 33-44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162011000300003>
- Sethy, S. K., & Ghosh, S. (2013). Effect of heavy metals on germination of seeds. *Journal of natural science, biology, and medicine*, 4(2), 272-5.doi: 10.4103/0976-9668.116964.
- Shewry, P.R. (2002). Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53, 947-958.
- SIAP. Servicio de Información agroalimentaria y Pesquera. (2012). [En línea:<http://www.siap.gob-mx/cierre-de-la-producción-agrícola-por-estado/>] [Consultado: 28 octubre 2014].
- Singletary G.W., Doehlert D.C., Wilson C.M., Muhitch M.J. y Below F.E. (1990). Response of enzymes and storage proteins of maize endosperm to nitrogen supply. *Plant Physiology*. 94,858–864.
- Skerman P.J. y Riveros F. (1999). Gramíneas Tropicales. FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. 796.
- Smith, S.R. (1996). *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment*. Biddles Ltd., Guildford.
- Smith S.R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal soil waste compost compared to sewage sludge. *Environment International*, 35, 142-156.

- Soliva, M. y Molina, N. (1999). Compostatge de residus sòlids urbans (RSU): aspectes relacionats amb el nitrogen. Dossiers Agraris. Problemes moderns en l'ús dels sòls: nitrats. ICEA.
- Soliva, M. y Felipó, M.T. (2003). Organic wastes as a resource for Mediterranean soils. In: Langenkamp, H. y Marmo, M. (Eds.) Biological Treatment of Biodegradable Wastes. Technical Aspects. Workshop in Brussels. 249-272.
- Soliva M., López M., Huerta O., Valero J. y Felipó M.T. (2004). Waste organic matter quality versus soil amendment effects. In: Bernal, M.P., Moral, R., Clemente, R. y Paredes, C. (Eds.) "Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety" Proceedings of 11th International Conference of the FAO Escorena Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture. RAMIRAN, Murcia. 1.
- Soto G. y Meléndez G. (2004). Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. 72. 91-97.
- Suthar S. y Singh S. (2008). Bioconcentrations of metals (Fe, Cu, Zn, Pb) in earthworms (*Eisenia fetida*) inoculated in municipal sewage sludge: do earthworms pose a possible risk of terrestrial food chains contamination. *Environmental Toxicology*, 24, 25–32.
- Szymańska G., Sulewska H., Śmiatacz K. (2013). Response of maize grown for silage on the application of sewage sludge. *Acta Sciintiarum Polonorum., Agricultura*, 12(3) 2013, 55-67.

- Takahashi T. y Dahlgren R.A. (2016). Nature, properties and function of Aluminum–humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*. 263, 110-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.032>
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1998). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Ed. Mc Graw Hill. 1087.
- Tegeder M. (2012). Transporters for amino acids in plant cells: some functions and many unknowns. *Current Opinion in Plant Biology*, 15, 315-321. doi: 10.1016/j.pbi.2012.02.001.
- Teng Y., Wu J., Lu S., Wang Y., Jiao X. y Song L. (2014). Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review. *Environmental International*, 69, 177-99.
- Tittarelli F., Petruzzelli G., Pezzarossa B., Civilini M., Benedetti A. y Sequi P. (2007). Chapter 7 Quality and agronomic use of compost. *Waste Management Series*, 8, 119-157. doi.org/10.1016/S1478-7482(07)80010-8.
- Tilsner J., Kassner N., Struck C. y Lohaus G. (2005). Amino acid contents and transport in oilseed rape (*Brassica napus* L.) under different nitrogen conditions. *Planta*. 221. 328-338.
- Totsche K.U., Rennert T., Gerzabek M.H., Kögel-Knabner I., Smalla K., Spiteller M. y Vogel H.J. (2010). Biogeochemical interfaces in soil: the interdisciplinary challenge for soil science. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173, 88-99.
- Tran, A.T.T. y James, B.J., (2012). A study the interaction forces between the bovine serum albumin protein and montmorillonite surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 414, 104-114.

- Turrent, F.A. (1994). Plan de investigación del sistema maíz-tortilla en la región centro. CIRCE, INIFAP, SARH. Publicación especial.12. Chapingo, México. 55.
- Turrent F.A. (2009). El potencial productivo del maíz. *Ciencias*, 92-93, 126-129.
- Torres P., Pérez A., Escobar J. C., Uribe I. E. y Imery R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*, 27 (1), 267-275.
- Tzafrir G., Yitzhak H. y Yona, C. (2007). Degradation and transformation of humic substances by saprotrophic fungi: processes and mechanisms. *Fungal Biology Reviews*, 21(4), 179-189.
- Tzin, V., y Galili, G. (2010). The Biosynthetic Pathways for Shikimate and Aromatic Amino Acids in *Arabidopsis thaliana*. *The Arabidopsis Book / American Society of Plant Biologists*, 8, e0132. doi.org/10.1199/tab.0132
- Uhart SA y Andrade FH. (1995). Nitrogen deficiency in maize. II. Carbon–nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Science*. 35,1384-1389.
- Uicab-Brito L.A y Sandoval C.C.A. (2003). Uso del contenido rumial y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 2(2), 45-63.
- Uriarte-Aceves PM, Cuevas-Rodríguez EO, Gutierrez-Dorado R., Mora-Rochín C., Reyes-Moreno C., Puangpraphant S. y Milán-Carrillo J. (2015). Physical, compositional, and Wet-Milling Characteristics of Mexican Blue Maize (*Zea mays L.*) Landrace.cereal chemistry. 92(5), 491-496. Doi:.org/10.1094/CCHEM-01-15-0001-R.

- Uribelarrea M., Below F.E. y Moose S.P. (2004). Grain composition and productivity of maize hybrids derived from the Illinois protein strains in response to variable nitrogen supply. *Crop Science*. 44,1593-1600.
- USDA. (2012). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. USDA national nutrient database for atandard reference, Release 24. Nutriente Data Laboratory Home Page. [En línea: <http://ars.usda.gov/ba/bhnrc/ndl>.]
- Vaca P.R., Lugo J., Martínez R., Esteller M. V. y Zavaleta H. (2011). Effects of sewage sludge and sewage sludge compost amendment on soil properties and *Zea mays* L. plants (heavy metals, quality and productivity). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), 303-311.
- Vasal S.K. (2000). The quality protein story. *Food y Nutrition Bulletin*, 21(4), 445-450.
- Vidal M.V.A., Vázquez CG., Coutiño E.B., Ortega C.A., Ramírez D.J.L., Valdivia B.R., Guerrero H.M. de J., Caro V.F. de J. y Cota A.O. (2008). Calidad proteínica en colectas de maíces criollos de la sierra de Nayarit, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(3). 15-21. ISSN 0187-7380
- Vogt, T. (2010). Phenylpropanoid biosynthesis. *Molecular Plant*. 3, 2-20. doi: [org/10.1093/mp/ssp106](https://doi.org/10.1093/mp/ssp106).
- Wang F., Wang Z., Kou C., Ma Z. y Zhao D. (2016). Responses of Wheat Yield, Macro- and Micro-Nutrients, and Heavy Metals in Soil and Wheat following the Application of Manure Compost on the North China Plain. *Plos One*. 11(1). 1-18. doi:10.1371/journal.pone.0146453.

- Weerasinghe TK y De Silva HWK. (2017). Effect of applying different ratios of compost made of municipal solid waste on the growth of *Zea mays L.* (Corn). *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 8(3), 52-60. doi: 10.5897/JSSEM2016.0609.
- Wei H.Y., Na L., Dong S.T., Chun H.Z., Chun X.L. y Chuan Y.X. (2013). Adsorption of proteins and nucleic acids on clay minerals and their interactions: A review. *Applied Clay Science*, 80-81, 443-452.
- Wei Y, Zhao Y, Xi B, Wei Z, Li X y Cao Z. (2015). Changes in phosphorus fractions during organic wastes composting from different sources. *Bioresource Technology*, 189, 349-356.
- Wild A. (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel. España: Mundi Prensa. 860.
- Witter, E., Lopez-Real, J., 1988. Nitrogen losses during the composting of sewage sludges, and the effectiveness of clay soil, zeolite, and compost in adsorbing the volatilized ammonia, *Biological Wastes*, 23, 279-294.
- Yan F., Schubert S. y Mengel K. (1992). Effect of Low Root Medium pH on Net Proton Release, Root Respiration, and Root Growth of Corn (*Zea mays L.*) and Broad Bean (*Vicia faba L.*), *Plant Physiology*, 99, 415-421.
- Yangsheng L., Lanlan M., Yaqiong L. y Liting Z. (2007). Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge. *Chemosphere*, 67, 1025–1032.
- Yongha B.M., Germer J., Müller T. y Sauerborn J. (2013). Efecto comparativo de la aplicación de nitrato de amonio y la orina humana en el maíz (*Zea mays*

- L.) cultivado bajo diferentes sal (NaCl) concentraciones. *Diario de nutrición vegetal y edafología*, 176(5), 703-711.
- Zeng Y., De Guardia A., Ziebal C., Junqueira de M. F. y Dabert P. (2013). Impact of biodegradation of organic matters on ammonia oxidation in compost. *Bioresource Technology*, 136, 49–57
- Zepeda-Bautista R., Carballo-Carballo A., Muñoz-Orozco A., Mejía-Conteras A., Figueroa-Sandoval B., González Cossio V.F. y Hernández-Aguilar C. (2009). Protein, tryptophan, and structural kernel components in corn (*Zea mays L.*) hybrids cultivated under fertirrigation. *Agrociencia*, 43, 143-152.
- Zhang D., Zhou C.H., Lin C.X., Tong D.S. y Yu W.H. (2010). Synthesis of clay minerals. *Applied Clay Science*, 50, 1-11.
- Zhang F., Mackenzie A.F., Smith D.L. (1993). Corn yield and shifts among corn quality constituents following application of different nitrogen fertilizer sources at several times during corn development. *Journal of Plant Nutrition*, 16(7), 1317-1337.
- Zhang L. y Sun X. (2015). Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, 39, 119-129.
- Zhou C.H., Zhang D., Tong D.S., Wu, L.M., Yu, W.H. y Ismadji, S. (2012). Paper-like composites of cellulose acetate–montmorillonite for removal of hazardous anionic dye in water. *Chemical Engineering Journal*, 209, 223-234.
- Zhou, C.H. y Keeling, J. (2013). Fundamental and applied research on clay minerals: from climate and environment to nanotechnology. *Applied Clay Science*, 74, 3-9.

Zhu, B. y Alva K.A. (1993). The chemical formas of Zn and Cu extractable by Mehlich 1 mehlich 3, and amonium bicarbonate-DTPA extractions. *Soil Science*, 156(4). 251-258.

Zhu, Nengwu. (2006). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology*, 98(1), 9-13.

Ziemiecka J. y Kubus J. (1960). Influence of different compounds on the microbial activities in sandy soils. *7th International Congreses Soil Science*. 679.

Zorpas A.A. y Loizidou M. (2008). Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge. *Bioresource Technology*. 99. 7545-7552.

Zucconi, F. y De Bertoldi, M. (1987). Specifications for solid waste compost. *Biocycle*, 28(5-6), 56- 61.

Quality and time of biosolid compost when varying ratios and weight of substrates

Calidad y tiempo de compostaje de biosólidos al variar las proporciones y pesos de los sustratos

Beatriz Juárez-Robles¹; Isaías de la Rosa-Gómez^{1*}; Ma. del Consuelo Mañón-Salas¹; Ma. del Consuelo Hernández-Berriel¹; Rocío Vaca-Paulín²; Jorge Lugo-de la Fuente²

¹Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental. Av. Tecnológico s/n, col. Agrícola Bellavista. C. P. 52149. Metepec, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Edafología y Ambiente. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas. C. P. 50200. Toluca, Estado de México, México.

*Corresponding author: kivodelarosa@yahoo.com, tel.: +52 (722) 208 7236 ext. 3630.

Abstract

Introduction: Biosolids generated in the treatment of wastewater are an environmental problem due to their inadequate handling and disposal.

Objective: To know the effects when varying substrate ratios and pile weight on quality and time of biosolid compost.

Materials and Methods: The mixture of biosolids (BS) with clay soil (CS) and equine degraded manure (DM) was evaluated in the following ratios: 70:30:00, 65:30:05, 60:30:10 and 50:30:20 to determine the optimum ratio in piles of 250 kg and evaluate it in 500 and 2 000 kg. The parameters of quality were temperature, Ph, humidity, organic matter (OM), total Kjeldahl nitrogen (TKN), C/N ratio, K/Na ratio and phosphorus (P).

Results and Discussion: the ratio 65:30:05 had higher temperature (63.8 °C) and lower composting time (21 days). Significant differences ($P < 0.05$) were found in the parameters of quality with respect to the substrates and pile weight. The treatments of 250 kg had the shortest processing time (28 days) with higher OM, TKN, C/N and P.

Conclusion: The DM and CS favor BS composting by reducing the process to a maximum of 32 days. The ratio 65:30:05 in 250 kg increases the agronomic quality of the compost.

Resumen

Introducción: Los biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales son un problema ambiental debido a su manejo inadecuado y disposición.

Objetivo: Conocer los efectos de la variación de proporciones de los sustratos y pesos de los montículos sobre la calidad y tiempo de compostaje de biosólidos.

Materiales y métodos: La mezcla de biosólidos (BS) con suelo arcilloso (SA) y estiércol degradado (ED) de equino se evaluó en las proporciones: 70:30:00, 65:30:05, 60:30:10 y 50:30:20, para determinar la proporción óptima en pilas de 250 kg y evaluarla en 500 y 2 000 kg. Los parámetros de calidad medidos fueron temperatura, pH y humedad, materia orgánica (MO), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), relación C/N, relación K/Na y fósforo (P).

Resultados y discusión: La proporción 65:30:05 destacó con mayor temperatura (63.8 °C) y menor tiempo de compostaje (21 días). Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en los parámetros de calidad con respecto a los sustratos y pesos del montículo. Los tratamientos de 250 kg tuvieron el menor tiempo de proceso (28 días) con mayor contenido de MO, NTK, relación C/N y P.

Conclusión: El ED y SA favorecen el compostaje de BS al reducir el proceso a 32 días como máximo. La proporción 65:30:05 en pilas de 250 kg incrementa la calidad agronómica de la composta

Keywords: Biodegradation, composite, clay, aerated piles.

Palabras clave: Biodegradación, composta, arcilla, pilas aireadas.

Please cite this article as follows: Juárez-Robles, B., de la Rosa-Gómez, I., Mañón-Salas, M. C., Hernández-Berriel, M. C., Vaca-Paulín, R., & Lugo-de la Fuente, J. (2017). Quality and time of biosolid compost when varying ratios and weight of substrates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3),401-410

. doi: 10.5154/r.rchscfa.2016.12.065

Received: December 18, 2016 / Accepted: July 24, 2017.

www.chapingo.mx/revistas/forestales



ANEXOS

ANEXO A

Procedimiento del Anexo I apartado 2.2 de la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

Muestras sólidas. Para conformar las muestras se usa el método del cuarteo, se toman de 4 a 8 bolsas de polietileno de 0.70 m x 0.50 m o 1.10 m x 0.90 m, se selecciona aleatoriamente el mismo número de sitios diferentes. Posteriormente, se llena cada una de las bolsas con el material de cada sitio y se trasladan a un área plana horizontal de aproximadamente 4 m x 4 m, preferentemente de cemento pulido o similar y bajo techo y se deposita su contenido en montículo. Traspalear el material con pala o biello, para obtener una mezcla homogénea. A continuación, dividir en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D y eliminar las partes opuestas A y C o B y D. Repetir esta operación hasta dejar 10 kg aproximadamente de lodo o biosólido. La pila resultante sirve para determinar en el laboratorio el contenido de Coliformes fecales, *Salmonella ssp*, huevos de helmintos, contenido de sólidos totales y sólidos volátiles, As, Cd, Cr, Hg, Pb y Zn. Trasladar la muestra al laboratorio en bolsas de polietileno debidamente selladas e identificadas. Evitar que queden expuestas al sol durante su transporte, además tener cuidado en el manejo de la bolsa que contiene la muestra para que no sufra ninguna ruptura. El tiempo máximo de transporte de la muestra al laboratorio, no debe exceder de 8 horas.

Preparación de la muestra.

La secuencia del muestreo por parámetro se debe realizar conforme con lo descrito en los puntos correspondiente con el propósito de minimizar sesgos en los resultados.

Recipientes para cada parámetro:

a) Coliformes fecales y *Salmonella spp.* Los recipientes de polietileno o polipropileno inerte de 500 ml de capacidad, antes del muestreo deben ser esterilizados preferentemente en autoclave. Etiquetarlo y mantenerlo en refrigeración hasta su análisis.

b) Huevos de helminto viables. Los recipientes de polietileno o polipropileno inerte de 500 ml de capacidad, antes de la toma de muestra deben ser enjuagados primero con agua potable a chorro y luego con agua destilada, se llenan los recipientes hasta un 75% de su capacidad total, se cierran, etiquetan y mantienen en refrigeración, hasta su análisis.

c) Compuestos inorgánicos: As, Cd, Cr, Hg, Pb y Zn. El recipiente de polietileno o polipropileno inerte o vidrio de 50 ml de capacidad, antes de la toma de muestra se debe enjuagar primero con agua potable a chorro y luego destilada. Posteriormente, se deposita la muestra hasta el total de la capacidad, se cierra, se etiqueta y se mantiene en refrigeración hasta su análisis.

ANEXO B

El procedimiento para el análisis de calidad del grano se realizó en base a la norma NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados. Cereales, maíz (*Zea mays L.*) especificaciones y métodos de prueba.

Humedad de grano.

Fundamento.

Se somete una muestra de granos de peso conocido al secado y se calcula el porcentaje de humedad a través del peso que se pierde durante el secado. Es importante su determinación porque el grano con más de 13.5-14.0 % no puede ser almacenado en buenas condiciones.

Procedimiento:

Método directo. Se seca el grano, previa molienda, a 130 °C durante una hora, en estufa con circulación forzada de aire. Para obtener el porcentaje de humedad se divide la pérdida de peso de la muestra entre el peso original de ella y el resultado se multiplica por 100:

$$\text{Humedad(\%)} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

P_i = peso de la muestra antes del secado

P_f = peso de la muestra después del secado

Peso hectolítrico (densidad).

Fundamento.

Se define como el peso en kilogramos de un volumen de grano de 100 litros. Resume en un solo valor qué tan sano es el grano. Cuanto más sano sea (menor cantidad de impurezas, granos dañados o quebrados, picados o con presencia de cualquier enfermedad), mayor será la proporción de almidón en el grano, por lo tanto, se tendrá, mayor extracción de harinas. El peso hectolítrico es

una buena estimación tanto de la calidad física del grano, como de la calidad molinera; está relacionado con la densidad real del grano, así como con la textura del endospermo y el contenido de proteína. El peso hectolitro se encuentra determinado principalmente por factores como la morfología del grano, la variedad, las siembras tardías, la fertilización deficiente en nitrógeno y la deficiencia en el abasto de agua en la etapa de crecimiento del grano. Los granos húmedos, o consumidos, tienen pesos hectolítricos más bajos. Mientras que los granos vítreos o con mayor contenido de proteína poseen una mayor densidad aparente

Material

Rasero de madera de 30 cm de largo, 5 cm de ancho y 3 mm de espesor.

Instrumentos

Balanza de masa específica (peso específico) o densidad.

Procedimiento

Equilibrar la balanza de densidad; verter 1 000 g de maíz, desde una altura de 7 cm a 10 cm, a la tolva alimentadora; dejando caer libremente el grano al recipiente, rasar sin apretar el grano con tres movimientos en zig zag; colocar el recipiente al fiel de la balanza y determinar la masa específica del grano.

Resultado de la prueba. La masa del grano que se obtiene se reporta en kg hl^{-1} .

Vigor

La viabilidad de la semilla es uno de los principales atributos a considerarse en cualquier evaluación de calidad. Isely (1957) define el vigor como la “suma total de todos los atributos de la semilla que favorecen el establecimiento rápido y uniforme de plántulas en el campo”. El objetivo de una prueba de vigor de semillas es el de proveer información acerca del valor de siembra en un amplio rango de ambientes y/o el potencial de almacenamiento de lotes de semillas. Se expone a

las semillas, bajo condiciones controladas en el laboratorio, a los factores adversos (estrés) que se espera reduzcan la emergencia en el campo.

Pureza física

El objetivo del análisis de pureza es determinar: 1) la composición en peso de la muestra que se analiza y por consiguiente la composición del lote de semillas y 2) la identidad de las distintas especies de semillas y de las partículas de materia inerte constituyentes de la muestra.

Para la realización de análisis de pureza se utilizan cribas y luz reflejada para hacer la separación de los componentes de las muestras de trabajo. Como materia inerte se incluirá fragmentos de semillas, glumas, tierra, arena, piedras, tallos, hojas, escamas de conos, cascabillos, alas, trozos de corteza, flores y todas las demás materias que no sean semillas.

Método de germinación

Método sobre papel (Top paper - TP): Las semillas se distribuyen uniformemente sobre una o más capas de papel previamente humedecido y se colocan los papeles dentro de bandejas o cajas plásticas en las cámaras de germinación o en los germinadores. En el caso que el papel no retenga la cantidad de humedad suficiente para realizar el ensayo se puede colocar debajo del mismo una fina capa de algodón. Una vez germinadas se clasifican como plántulas normales y anormales. Las plántulas normales son aquellas que poseen el potencial de desarrollarse satisfactoriamente en plantas cuando crecen en suelos de buena calidad y bajo condiciones favorables de humedad, temperatura y luz.

ANEXO C

Formato muestreo de maíz

Información general

Fecha y hora de muestreo: _____

Miembros del equipo de muestreo:

Nombre del sitio: Parcela experimental de San Juan de las Huertas

Diseño estadístico: bloques completamente aleatorios Núm. de repeticiones 7

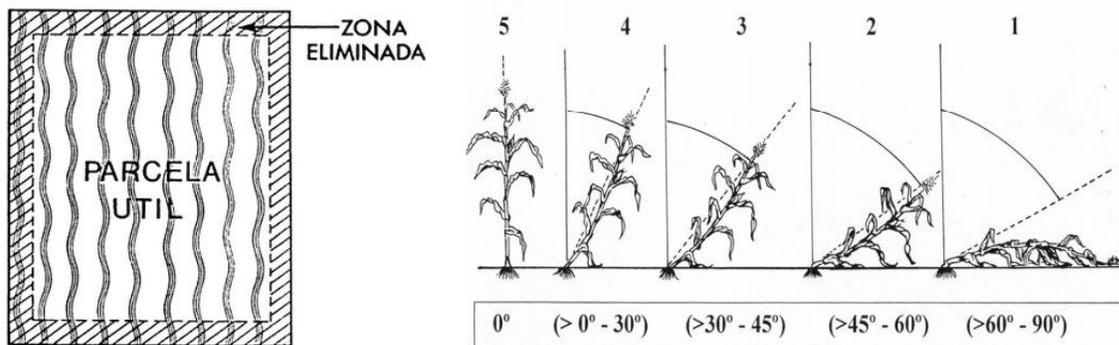
Datos de la subparcela:

Dimensiones _____ m x _____ m. Parcela útil: _____ m²

Núm. de surcos _____ distancia entre surcos _____

Existen áreas sin producción dentro de la parcela: si _____ no _____

Antes de realizar el muestreo delimitar la parcela útil y contabilizar el número de plantas acamadas de raíz y de tallo especificando la severidad de 1 a 5 de acuerdo a la imagen.



Bloque:	Lote:					No. total de plantas (NTP):									
Plantas acamadas en parcela útil:					severidad:										
Número total de mazorcas en parcela útil:															
Planta #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AP (cm)															
NMP															

TDP															
MND															

Nota: De forma aleatoria se elegirán las muestras con un total de 15 muestras por bloque.

Abreviaturas:

NTP- No. de plantas totales (parcela útil). Contar el número total de plantas en el interior de la parcela útil considerando las plantas acamadas o dañadas

AP-Altura de planta (se medirá en cm la longitud total de las plantas, desde la base del suelo hasta la base de la espiga)

NMP- Número de mazorcas por planta (formadas), independientemente de su tamaño (conteo) sanas y dañadas (podridas, plagadas, etc).

TDP-Tipo de daño mazorca (si presenta): A- mazorca roídas; B-podrida y/o con hongo; C- plagada; D- ausentes; E-otro. (especificar en observaciones. Se registra el número de mazorcas con el mismo daño y la letra que corresponda al tipo de daño. Eje: 2 mazorcas roídas y una podrida en planta muestreada, entonces se registra: 2-A,1-B.

MND- Mazorcas no desarrolladas

Observaciones y aspectos relevantes: _____

Toma de muestras para materia seca de planta (MSP): La recolección se llevará a cabo de forma manual, cogiendo una muestra de 15 plantas completas (raíz, tallo, hojas y mazorcas). Atar y depositar en costales (cuidar que no se pierda parte de la muestra en este proceso) e identificar con número de lote y bloque, ejem: BF-X-IV).

Cosecha de mazorcas: Cosechar y colocar en costales identificados con lote y bloque, no olvidar registrar el número de mazorcas pérdidas o ausentes en este formato. Por ejemplo, se encuentran mazorcas sin ningún grano. Otro caso es cuando se distingue claramente que el agricultor cosechó unas cuantas mazorcas. Considerar en el muestreo mazorcas sanas y dañadas de acuerdo al muestreo aleatorio. Colocar en costales e identificar.

ANEXO D

Determinación de materia seca

a. Fundamento

La humedad es la pérdida de peso experimentada por un alimento cuando se le somete a desecación en estufa de aire, a una temperatura de 100-105°C, hasta peso constante o durante 24 horas. La MS resulta de sustraer al total, el contenido en humedad. En base al procedimiento de la AOAC (2000).

b. Material

Crisoles

Estufa de desecación

Desecador

Balanza de precisión

c. Técnica

- Se toma un crisol vacío de la estufa (100-105°C), se lleva al desecador (15-25 minutos mínimo). Se pesa el crisol vacío en una balanza de precisión (Tara, T), una vez tarada, se pone la balanza de precisión a 0 g con el crisol encima, y se colocan entre 3 y 5 g de muestra fresca (MF).
- Se coloca el crisol en la estufa a 100-105°C y se mantiene hasta que alcance un peso constante (mínimo 4 horas) o durante 24 horas.
- Se retira el crisol de la estufa y se coloca en el desecador hasta que éste se enfríe (15-25 minutos)
- Se pesa de nuevo el crisol con la muestra seca (T + MS)

d. Cálculo

$$\% \text{ MS} = \frac{(T + \text{MS}) - T}{\text{MF}} \times 100$$

El contenido en agua de la muestra se calcula por diferencia de peso y se expresa en % de humedad (g de H₂O/100 g de muestra):

$$\% \text{ Humedad} = 100 - \% \text{ MS}$$

Determinación de humedad en harina de maíz

Se realizó de acuerdo a la AACC, 2000 (método 44-15). Se pesaron 3 gr de muestra completamente homogénea en capsulas de aluminio previamente secadas y taradas a peso constante. Se colocó la muestra en la estufa durante 12 h a 105 ± 1 °C y después se pasó a desecador y se pesó cuando alcanzó la temperatura ambiente. El cálculo de la humedad se realizó por la diferencia de pesos. Las determinaciones de humedad fueron determinadas por triplicado.

Determinación de cenizas en las harinas

Para la determinación, se utilizó el método AACC 08-01 (1995). El procedimiento consistió en poner capsulas de aluminio a masa constante, en el cual se pesaron 2 g de muestra; se colocó la capsula en una parrilla y se quemó lentamente el material hasta que ya no desprendió humo. Se llevó la capsula a una mufla para efectuar la calcinación completa a 550 °C por 5 h, hasta obtener cenizas grises o blancas. Se dejó enfriar en la mufla, y se transfirió al desecador para su completo enfriamiento, se determinó la diferencia de masa de la capsula de aluminio. Y se calculó el valor a través de la siguiente formula:

$$\% \text{ cenizas} = \frac{(P - p) * 100}{M}$$

Dónde:

P= masa del capsula de aluminio con cenizas en gramos

P= masa de capsula de aluminio vacía en gramos

M= masa de la muestra en gramos

Determinación de proteína cruda en harina

Se utilizó el método 979.0 de la AOAC (1990). El método Kjendahl determina la proteína bruta que es equivalente a la materia orgánica nitrogenada total mediante una digestión ácido (H_2SO_4), convirtiendo el nitrógeno presente en sal de amonio, que es destilada y transformada en amoniaco (digestión alcalina), que también se destila y se cuantifica por medio de una titulación indirecta de ácido sulfúrico que queda sin reaccionar. Para su determinación se pesaron 0.5 g de muestra previamente desengrasada y se pasó a un tubo digestor con 10 ml de H_2SO_4 concentrado y una pastilla de mezcla reactiva (1.5 g de sulfato de potasio y 0.15 g de sulfato cúprico), y se colocó en el sistema digestor, posteriormente a la unidad de destilación. El amoniaco fue capturado en una solución de ácido bórico al 4%. Y titulado con ácido clorhídrico 0.1 N. Se usó una solución indicadora de rojo de metilo-verde de bromocresol.

El porcentaje de nitrógeno se calculó con la siguiente formula:

$$\% N = \frac{(V1 - V2) * meqN * NormHCl * 100}{\text{peso de la muestra}}$$

Dónde:

% N = porcentaje de nitrógeno

V1 = Volumen en ml de HCl gastado en la muestra

V2 = Volumen en ml de HCl gastado en el blanco

Meq N = miliequivalente de nitrógeno (N_2)

Norm HCl = Normalidad de la solución de HCl para la titulación

Los resultados se reportaron como porcentaje de proteína, usando el valor de 6.25 como factor de conversión de porcentaje de nitrógeno a porcentaje de proteínas de maíz.

Extracción Soxhlet

El germen del maíz, contiene más del 85 % de los lípidos asociados con el grano entero, cantidades importantes de triglicéridos, ricos en ácidos linoleico y oleico, y de fosfolípidos como fosfatidil-colina, fosfatidil-inositol, fosfatidil-etanolamina y fosfatidil-serina. Los fosfolípidos ayudan a mantener una buena integridad de las membranas celulares. El aceite crudo de maíz contiene cantidades relevantes de derivados de tocoles, como tecoferoles y tocotrienoles, la principal función de éstos es prevenir el estrés oxidativo y la oxidación del ácido linoleico. El maíz es rico en fitoesteroles y compuestos cerosos como los policosanoles, antocianinas, compuestos fenólicos. El método determina el extracto etéreo por medio de una extracción en forma directa con solventes orgánicos (éter de petróleo, éter etílico, acetona, cloroformo, etcétera)

Se empleó el método AACC 30-10, 1995. Se pesan 5 gr de muestra, se colocó la muestra en un dedal de extracción y se puso dentro del Soxhlet, posteriormente se añadió 60 ml de acetona en el matraz redondo, que fue el solvente orgánico empleado; se calienta mediante una manta calefactora a la temperatura de ebullición de la acetona (50 °C). El líquido condensado gracias al refrigerante caerá en el dedal de extracción el cual extrae los aceites que son solubles en este vapor condensado y que es sifonado de regreso al matraz de ebullición. Este proceso se repite durante 6 horas.

Anexo F

Condiciones Instrumentales para la determinación de metales.

Tabla F1. Límites de cuantificación y detección del Espectrofotómetro de Absorción Atómica Thermo Scientific™ iCE™ 3300 AAS.

Elemento	Límite de detección Flama mg/L (ppm)	Límite de cuantificación mg/L	Longitud de onda
Cd	0.0028	0.10	228.8
Cr	0.0054	0.15	357.9
Cu	0.0045	0.20	324.8
Pb	0.0130	0.20	217.0
Ni	0.0080	0.20	232.0
Zn	0.0033	0.10	213.9
K	0.0009	0.10	766.5
Na	0.0037	0.10	589.0

Anexo G

Extracción de Mehlich 3

La relación del suelo con el extractante es 1:10, se le agrega la solución extractora Mehlich 3 cuya *composición del extractante* está compuesta por ácido acético, que es un conjunto de ácidos diluidos con un estabilizador EDTA.

Reactivos:

Extractante: Solución Mehlich 3 (CH_3COOH 0.2M + NH_4NO_3 0.25 M + NH_4F 0.15M + EDTA [ácido etilendiaminotetraacético]). Se prepara de la siguiente manera:

Solución madre: Fluoruro de amonio (NH_4F) y una solución EDTA de valores (NH_4F 3.75 M : EDTA 0.25 M):

1. Añadir 1.200 ml de agua destilada a un matraz aforado de 2 L.
2. Añadir 277.8 g de fluoruro de amonio y mezclar bien.
3. Añadir 146.1 g de EDTA a la solución anterior.
4. Haga una solución de 2 L, mezclar bien y guardar en una bombona de polietileno (solución de reserva para 10.000 muestras).

Solución Mehlich 3:

1. Añadir 8 L de agua destilada a una bombona de 10 L.
2. Disolver 200 g de nitrato de amonio en el agua destilada.
3. Añadir 40 ml de solución madre fluoruro de amonio-EDTA y mezclar bien.
4. Añadir 115 ml de ácido acético glacial (99.5%, 1.74 M).
5. Añadir 8.2 ml de ácido nítrico concentrado (68-70%, 15.5 M).
6. Añadir agua destilada hasta el volumen final de 10 L y mezclar bien (cantidad suficiente para la extracción de 400 muestras), el pH final debe ser de 2.5 ± 0.1 .

Procedimientos:

1. Pese 2 g de suelo y transferirlo a un matraz Erlenmeyer de 50 ml.
2. Añadir 20 ml de solución Mehlich 3 a cada matraz y agitar a 200 o más r.p.m. durante cinco minutos a una temperatura ambiente menor de 24° a 27° C:
3. Si es necesario para obtener un filtrado incoloro, agregue 1 cm^3 (aprox. 200 mg) de carbón vegetal a cada matraz.

4. Filtrar los extractos a través de un papel de filtro Whatman N° 42. Si los extractos no salen claros, filtrar nuevamente.

5. Analizar el P del blanco y los patrones por colorimetría.

Cálculos:

$P_{\text{extractable}}(\text{mg/kg}) = [\text{concentración de P en extracto Menlich 3 (mg/L)}] \cdot [0.020 \text{ L extracto} / 0.002 \text{ kg suelo}]$