



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
RECURSOS NATURALES
FACULTAD DE CIENCIAS**

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE BIOSÓLIDOS EN LAS PROPIEDADES
BIOQUÍMICAS DE UN SUELO Y EN EL ESTRÉS OXIDATIVO DE PLANTAS DE
ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.)**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECUROS NATURALES**

PRESENTA:

NADIA DE LA PORTILLA LÓPEZ

Tutora Académica

Dra. Rocío Vaca Paulín

Tutores Adjuntos

Dr. Jorge Alberto Lugo de la Fuente

Dr. Pedro del Águila Juárez

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. Mayo 2016



Índice General

Resumen	
1. Introducción	1
2. Antecedentes.....	3
2.1. Aguas Residuales	3
2.2. Biosólidos.....	3
2.3. Suelo.....	5
2.4. Propiedades físicas del suelo.....	6
2.4.1. Textura.....	7
2.4.2. Densidad aparente (ρ_s).....	8
2.5. Propiedades químicas del suelo.....	9
2.5.1. pH.....	9
2.5.2. Conductividad eléctrica.....	10
2.5.3. Materia orgánica	10
2.5.4. Capacidad de Intercambio Catiónico	11
2.5.5. Cationes intercambiables.....	11
2.5.6. Micronutrientos.....	13
2.5.7. Metales Pesados.....	14
2.6. Propiedades bioquímicas	16
2.6.1. Mineralización de Nitrógeno.....	18
2.6.2. Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM).....	19
2.6.3. Respiración del suelo (RB)	21
2.6.4. Coeficiente metabólico (qCO_2).....	22
2.6.5. Actividades enzimáticas.....	23
2.6.6. Catalasa.....	24
2.7. Albahaca (<i>Ocimum basilicum</i> L.).....	25
2.8. Estrés oxidativo	26
2.8.1. Compuestos fenólicos.....	27
2.8.2. Antocianinas	28
2.8.3. Flavonoides.....	29
2.8.4. Actividad enzimática de las peroxidasas (POX).....	31
2.8.5. DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)	32

3. Objetivos.....	34
General	34
Particulares	34
4. Materiales y Métodos.....	35
4.1. Muestreo	35
4.2. Diseño experimental.....	35
4.3. Análisis de Laboratorio.....	36
4.3.1. Propiedades físicas del suelo	37
4.3.2. Propiedades químicas de suelo y biosólido	37
4.3.3. Propiedades Bioquímicas del Suelo.....	37
4.3.4. Estrés oxidativo.....	37
4.4. Análisis estadístico.....	38
5. Resultados y discusión	39
5.1. Mineralización del Nitrógeno	40
5.1.2. Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM)	43
5.1.3 Respiración basal.....	44
5.1.4. Coeficiente metabólico (qCO_2).....	47
5.1.5. Actividad enzimática de la catalasa	49
5.2. Estrés oxidativo	50
5.2.1. Contenido fenólico total.....	50
5.2.2. Antocianinas	52
5.2.3. Flavonoides.....	54
5.2.4. Actividad de las peroxidasas (POX).....	55
5.2.5. DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)	58
6. Conclusiones	61
7. Bibliografía.....	62
Anexos	81

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de suelo y biosólido.....	39
Tabla 2. Carbono de la biomasa microbiana de un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días y 7 meses de la aplicación del tratamiento.....	43
Tabla 3. Propiedades bioquímicas de un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días y 7 meses de la aplicación del tratamiento.....	48
Tabla 4. Catalasa de un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días y 7 meses de la aplicación del tratamiento.....	49

Índice de figuras

Figura 1. Mineralización de N en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹) después de 10 días de la aplicación del tratamiento.....40

Figura 2. Mineralización de N en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido después de 7 meses de la aplicación del tratamiento (40 t ha⁻¹).....42

Figura 3. Mineralización de C en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹) después de 10 días de la aplicación del tratamiento.....45

Figura 4. Mineralización de C en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹) después de 7 meses de la aplicación del tratamiento.....47

Figura 5. Compuestos fenólicos totales en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).....51

Figura 6. Antocianinas en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo

+ fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).....52

Figura 7. Contenido de flavonoides en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).....54

Figura 8. DPPH en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).....56

Anexos

Tabla 1. Mineralización de N en un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días de la aplicación del tratamiento.....83

Tabla 2. Mineralización de N en un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 7 meses de la aplicación del tratamiento.....83

Tabla 3. Capacidad antioxidante de un cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) acondicionado con biosólido y fertilizante a diferentes dosis.....84

Resumen

Una forma de disposición de los biosólidos es su adición al suelo debido a que estos materiales son ricos en C, N, P y materia orgánica capaces de mejorar el crecimiento y la actividad microbiana del suelo así como sus propiedades físicas, químicas y bioquímicas lo que mantendría la fertilidad del mismo. Sin embargo, la presencia de metales pesados puede estimular la producción de especies reactivas de oxígeno en las plantas lo que alteraría su metabolismo al generarse un estrés oxidativo. Debido a lo anterior el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de biosólido y fertilizante inorgánico a diferentes dosis en las propiedades bioquímicas de un suelo cultivado con albahaca (*Ocimum basilicum* L.) a nivel invernadero y en el estrés oxidativo de esta planta. 5 tratamientos fueron los utilizados y consistieron en : S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹), para el caso del fertilizante NPK, este se aplicó 3 veces cada 10 días. La toma de muestra se hizo 10 días y 7 meses (corte de la planta) después de la aplicación de cada uno de los tratamientos. Los resultados obtenidos mostraron que a los 10 días de haber aplicado el tratamiento la mineralización de C y N aumentaba con la dosis de biosólido sin fertilizante (SB₄₀) a diferencia de 7 meses. En carbono de la biomasa microbiana no se tuvieron diferencias significativas ($p > 0.05$) a los 10 días de incorporar la enmienda orgánica, sin embargo, hubo una tendencia que mostró que al aumentar la dosis de biosólido se incrementaba la biomasa microbiana, después de 7 meses se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en SB₄₀ respecto a los demás tratamientos el cual mostró un incremento. En lo que respecta a $q\text{CO}_2$ los valores bajos se tuvieron igualmente a los 10 días de la incorporación de la enmienda orgánica, lo que sugiere un balance positivo de la materia orgánica. Finalmente en estrés oxidativo se tuvo un descenso de la capacidad antioxidante antocianinas, DPPH, flavonoides y compuestos fenólicos totales lo que sugiere de acuerdo a lo que se ha reportado una disminución en el estrés oxidativo ante la presencia del biosólido.

Abstract

In the present study we investigate changes generated in the soil cultivated with basil plants caused by biochemical activity (*Ocimum basilicum* L.) added with biosolids and inorganic fertilizer in greenhouse level, as well as evaluated the oxidative stress of the plants. The results showed that mineralization of C and N increased with the higher dose of biosolid after 10 days of its application. At 7 months don't showed changes in the mineralization of C and N. Regarding the low metabolic quotient values (qCO_2) also have been 10 days of incorporating with the organic amendment, suggesting a positive balance of organic matter. In relation to the oxidative stress in plants, a decrease in anthocyanin antioxidant capacity, DPPH, total flavonoids and phenolic compounds was observed in soils treated with biosolids (SF₅₀B₁₀, SF₂₅B₂₀ and SB₄₀).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

1. Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales producen un efluente líquido de calidad adecuada, el cual puede ser devuelto a la superficie con un impacto mínimo en el ambiente y en la salud pública, a su vez, el tratamiento de los efluentes domésticos llevados a cabo en estas plantas produce biosólidos (Bourioug *et al.*, 2014).

Los grandes volúmenes de biosólidos deben ser eliminados o tratados de alguna manera. Una forma de disposición de estos residuos orgánicos es su adición al suelo, esto se ha convertido en una práctica común debido a que estos materiales mejoran las propiedades del suelo, el contenido de nutrientes y aumentan la productividad de la planta (Wang *et al.*, 2008; Selivanovskaya *et al.*, 2011).

Los principales beneficios que aportan los biosólidos a los suelos son: fuente de nutrientes para las plantas (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn); además, por su alto contenido en MO, mejoran la densidad aparente y estabilidad estructural, aumentan la porosidad y enriquecen el suelo con C orgánico. El contenido de nutrientes mantiene la fertilidad del suelo y a su vez, los componentes orgánicos mejoran las propiedades físicas, químicas y bioquímicas de este (Motta y Maggiore, 2013; Latare *et al.*, 2014).

Diversos trabajos han demostrado los efectos benéficos de la adición de biosólidos en diferentes cultivos entre los cuales se tiene al haba (*Vicia faba*), maíz (*Zea mays*), coliflor (*Brassica oleracea*), cebada (*Hordeum vulgare*), lechuga (*Lactuca sativa*), fenogreco (*Trigonella foenum graecum*) incluso plantas ornamentales como es el caso de peonía (*Paeonia suffruticosa*) (Sonmez y Bozkurt, 2006; Jurado *et al.*, 2007; Fernández *et al.*, 2009; Xue y Huang, 2013).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

A pesar de que la aplicación de biosólidos al suelo se ha considerado como una de las mejores alternativas para darles un buen uso, se debe tomar en cuenta que esta práctica puede generar problemas de contaminación por la presencia de elementos potencialmente tóxicos que puedan estar presentes en estos residuos orgánicos, los cuales pueden ser movilizados hacia la solución del suelo. Además, el exceso de metales induce niveles elevados de especies reactivas de oxígeno (ERO), a su vez estas generan estrés oxidativo que afecta adversamente el crecimiento y rendimiento de las plantas (Dimkpa *et al.*, 2009; González *et al.*, 2009).

Los efectos de los biosólidos en la calidad del suelo pueden ser expresados por medio del uso de indicadores como contenido de biomasa microbiana, coeficiente metabólico (qCO_2), respiración basal y actividades enzimáticas que estudian la biodiversidad de la comunidad microbiana nativa del suelo (Sciubba *et al.*, 2014).

Respecto a la aplicación de biosólidos se sabe que estos pueden tener dos efectos en el suelo, por un lado, pueden estimular la actividad microbiana debido a un incremento en la disponibilidad de C y nutrientes, o bien, inhibir su actividad a causa de la presencia de metales pesados y otros contaminantes (Sciubba *et al.*, 2014).

2. Antecedentes

2.1. Aguas Residuales

Son aquellas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-002-SEMARNAT-1996).

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida (NOM-002-SEMARNAT-1996).

Existen tratamientos a los que son sometidas las aguas residuales los cuales son: pretratamiento, tratamiento primario, secundario, avanzado y varios tratamientos especiales que se pueden utilizar después de todos ellos tales como: filtración, desinfección y lodos activados (NOM-002-SEMARNAT-1996).

2.2. Biosólidos

El tratamiento de aguas residuales produce un efluente líquido de calidad adecuada que puede ser regresado a las aguas superficiales con un impacto mínimo en el ambiente o en la salud pública. Este efluente doméstico a su vez produce biosólidos que han sido utilizados como una fuente de macro y micronutrientes para suelos agrícolas (Bourioug *et al.*, 2014).

El uso de los biosólidos puede ser considerado como una estrategia cada vez más atractiva para reducir el depósito en vertederos y mantener la fertilidad del suelo. En suelos agrícolas, promueven la formación de agregados estables y mejoran la aireación del suelo, la capacidad de almacenamiento de agua, la capacidad de

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

intercambio catiónico y el almacenamiento de C orgánico en el suelo. Igualmente de importante es que estos residuos proporcionan nutrientes e incrementan la actividad enzimática del suelo involucrada en los ciclos biogeoquímicos como C, N y P; además, de promover la proliferación de la vegetación (Mattana *et al.*, 2014; Nicolás *et al.*, 2014).

Los efectos de los biosólidos en la calidad del suelo pueden ser expresados por medio del uso de indicadores como: contenido de biomasa microbiana, cociente metabólico, relación $C_{org}:C_{mic}$, actividades enzimáticas, o bien, estudiando la biodiversidad de la comunidad microbiana autóctona, a su vez, estos indicadores se encargan de evaluar la aplicación de biosólidos la cual es capaz de estimular la actividad microbiana del suelo debido a un incremento de carbono disponible y nutrientes, o inhibir su actividad, debido a la presencia de metales pesados y otros contaminantes (Sciubba *et al.*, 2014).

Como se ha mencionado, la aplicación agrícola de biosólidos es una alternativa común para el tratamiento de estos residuos debido a razones económicas y prácticas; sin embargo, esta práctica no está exenta de amenazas al ambiente, debido las concentraciones relativamente altas de metales pesados que pudiesen estar presentes en estos compuestos orgánicos generados a partir de áreas urbanas e industriales (Mahapatra *et al.*, 2013; Xue y Huang, 2013).

La transferencia de metales del biosólido al suelo y posteriormente a las aguas subterráneas y plantas representa riesgos potenciales a la salud y ambiente. La acumulación de metales pesados en el suelo puede resultar en una pérdida de las funciones de este pudiendo plantear problemas acerca de la protección de la calidad del ambiente y mantenimiento y productividad de la salud humana. La contaminación del suelo puede tener implicaciones en fitotoxicidad a altas concentraciones y resultar en la transferencia de metales pesados a la dieta humana por medio del consumo de cultivos o a través del pastoreo de ganado; por otra parte,

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

los biosólidos no sólo se limitan a la presencia de metales pesados ya que también contienen agentes potencialmente dañinos tales como: compuestos orgánicos tóxicos y fitotóxicos y patógenos los cuales pueden limitar severamente su disposición ambiental o su uso seguro en la agricultura (Mahapatra *et al.*, 2013; Xue y Huang, 2013; Mattana *et al.*, 2014).

Así mismo, el tamaño y actividad de las poblaciones microbianas del suelo se pueden modificar; por lo tanto, los efectos del biosólido en la actividad biológica del suelo han sido ampliamente estudiados, y las determinaciones de las actividades enzimáticas han sido utilizadas para establecer índices de la fertilidad biológica del suelo (Marando *et al.*, 2011).

2.3. Suelo

El suelo es la capa superficial de material mineral y orgánico, no consolidado, que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas; además, presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se formó. Por ello, el suelo ya no es roca ni sedimento geológico, sino un producto proveniente de las alteraciones e interacciones que experimentan estos materiales (Summer, 2000).

El suelo es una zona crítica de la tierra y tiene diversos papeles importantes en la superficie de la misma. La capacidad de este para llevar a cabo cualquiera de sus funciones dependerá de sus características físicas, químicas y biológicas (Ferrara *et al.*, 2014; Akumu *et al.*, 2015).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Entre las funciones del suelo (pero no solo se limitan a ello) se incluyen (Paz-Ferreiro, 2006):

- a) Regular procesos bióticos, incluyendo los aportes de agua y nutrientes minerales para construir la biomasa que será luego utilizada para iniciar una nueva cadena trófica.
- b) Construir una interfase entre la biósfera y la geósfera manteniendo, regulando y controlando algunos flujos y el cambio de sustancias.
- c) Regular el intercambio de gases entre la atmósfera y la fase porosa del suelo por absorción de O₂, liberación de CO₂ y otros gases tales como CH₄, H₂, H₂S, NH₃ y NO.
- d) Actuar como redistribuidor de algunos de los flujos del ciclo hidrológico, transformando la precipitación e infiltración, escurrimiento superficial y subsuperficial.
- e) Generar un manto específico y estratificado de la superficie de la tierra protegiéndola de impactos destructivos.

Por lo tanto, se puede afirmar que el suelo es un recurso vivo y dinámico cuya condición es clave para la producción de alimentos y para el buen funcionamiento del ecosistema global.

2.4. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas son aquellas que reflejan la manera en que el suelo acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial,

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

capacidad de almacenamiento de agua y conductividad hidráulica saturada son las propiedades físicas del suelo (Bautista *et al.*, 2004).

2.4.1. Textura

Los distintos horizontes de un suelo pueden estar formados por fragmentos de roca de más de un metro, hasta partículas menores de un micrómetro. Atendiendo al tamaño cabe distinguir (Porta *et al.*, 2003):

Elementos gruesos	diámetro aparente > 2mm
Bloques	25 a 60 cm y más
Cantos	6 a 25 cm
Grava gruesa	2 a 6 cm
Grava media	0.6 a 2 cm
Gravilla	0.2 a 0.6 cm
Tierra fina	diámetro aparente a \leq 2mm
Arena	
Limo	
Arcilla	

El estudio de las partículas minerales puede llevarse a cabo con distintos enfoques, atendiendo al tamaño y forma de las partículas, a su mineralogía, grado de meteorización, relaciones entre ellas, etc. Un planteamiento mucho más sencillo y, por ello más generalizado, consiste en determinar la granulometría de la fracción mineral.

La granulometría expresa las proporciones relativas de las distintas partículas minerales inferiores a 2mm, agrupadas por clases de tamaños en fracciones granulométricas, tras la destrucción de los agregados; mientras que, la textura es una expresión sintética de las características de cada horizonte dependientes del tamaño de las partículas.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

El interés en conocer la granulometría reside en que permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo (Porta *et al.*, 2003):

Capacidad de retención de agua disponible para las plantas y de suministro

Facilidad para la circulación del agua

Facilidad para el laboreo

Riesgo de formación de sellado y de costra superficial: deficiente velocidad de entrada de agua en el suelo y mala nacencia

Riesgo de erosión hídrica

Capacidad para almacenar nutrientes

Capacidad para admitir aguas residuales, purines y otros residuos líquidos

Orden de magnitud de la superficie específica

2.4.2. Densidad aparente (ρ_s)

La densidad aparente del suelo (ρ_s) se utiliza a menudo como un parámetro de la calidad física del suelo ya que varía de acuerdo a los cambios en la estructura de este medio poroso. Afecta la productividad del sitio y es un indicador de la compactación y porosidad del suelo. La compactación del suelo es estudiada debido a sus efectos en diversas cuestiones agrícolas incluyendo los rendimientos de los cultivos y su calidad (Suuster *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2014).

Se usa como una variable de entrada en varios modelos predictivos y descriptivos del suelo. Esta medida es una propiedad física del suelo y se utiliza para la conversión de peso a volumen, esencial para la evaluación de los nutrientes del suelo y las reservas de carbono (Suuster *et al.*, 2011).

Es importante por su efecto directo sobre algunas propiedades del suelo tales como: porosidad, humedad y conductividad hidráulica, así como sus efectos indirectos sobre el crecimiento de las raíces y el rendimiento de cultivos. Además, es necesaria para convertir el peso del suelo en volumen, por lo que es un componente

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

crucial en de la evaluación de agua presente en el suelo, nutrientes y reservas de carbono (Mora y Lázaro, 2014; Sequeira *et al.*, 2014).

2.5. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas de un suelo son aquellas que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y microorganismos. Algunas propiedades son pH, conductividad eléctrica, cambios en la materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico capacidad de adsorción de fosfatos y la disponibilidad de nutrimentos como carbono orgánico total y carbono orgánico lábil, (Bautista *et al.*, 2004).

2.5.1. pH

Considerado como un indicador clave de las propiedades químicas del suelo. La medida del hidrógeno disociado (H^+) en la solución del suelo directamente impacta en su acidez y alcalinidad, influenciando una amplia variedad de condiciones del suelo (Sharma *et al.*, 2014).

Se sabe que los suelos no se comportan como soluciones simples; por lo tanto, no es posible definir exactamente el pH. Normalmente, dicho valor varía entre 3 y 9; sin embargo, se presentan valores más bajos en suelos de pantanos ciénagas que contienen piritita, que al oxidarse produce ácido sulfúrico. En cambio los valores altos ocurren por la presencia de carbonato de sodio (Luters y Salazar, 2000).

A su vez, esta propiedad puede verse afectada por procesos tales como uso de suelo y deposición ácida; además, puede afectar los procesos que se llevan a cabo en los suelos y las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo (Cheng *et al.*, 2013).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Un exceso de acidez o alcalinidad será capaz de cambiar los nutrientes disponibles y resultar en un desequilibrio de elementos presentes en las plantas (Mao *et al.*, 2014). El pH, tiene una profunda influencia en la disponibilidad relativa de los nutrientes presentes en las plantas; condiciones ligeramente ácidas generalmente se consideran óptimas para la disponibilidad de macro y micronutrientes (Sharma *et al.*, 2014).

2.5.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es el parámetro más utilizado para describir la salinidad del suelo, se caracteriza por estimar la concentración de iones en el suelo y consiste predominantemente de los cationes Na^+ , Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} y de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . Es un indicador fiable de la concentración del soluto (cationes o aniones) de 1dS/m aproximadamente equivalente a 10meq/L (Friedman, 2005; He *et al.*, 2012).

Para suelos salinos, la CE se encuentra ampliamente relacionada a la concentración de sal, para suelos no salinos, es una herramienta muy valiosa que proporciona información sobre la evaluación de la calidad del suelo y en aplicaciones agrícolas precisas debido a que es principalmente una función de la textura del suelo, contenido de agua, cantidad de materia orgánica, porosidad del suelo, densidad aparente y capacidad de intercambio catiónico (Hu *et al.*, 2014; Naderi-Boldaji *et al.*, 2014).

2.5.3. Materia orgánica

La materia orgánica (MO), del suelo está compuesta por todos los materiales orgánicos muertos, de origen animal o vegetal y por productos orgánicos producidos en su transformación. Una pequeña fracción de la MO incluye materiales ligeramente transformados, y otros transformados por completo, de color oscuro y de alto peso molecular, llamados compuestos húmicos (Crespo, 2011).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Es indicador clave de la fertilidad y calidad del suelo ya que afecta sus funciones físicas, químicas y biológicas y, a su vez, influye en la productividad del mismo (Qiyong *et al.*, 2014; St. Luce *et al.*, 2014).

Medidas como N total del suelo, carbono orgánico y la relación C/N representan la cantidad y calidad de la MO y son algunos de los indicadores ampliamente recomendados en cuanto a su evaluación, ya que es considerada como un factor clave para mantener la productividad biológica, la calidad del ambiente y promover la salud animal y vegetal (Mao *et al.*, 2014; St. Luce *et al.*, 2014).

2.5.4. Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una propiedad fundamental de los minerales arcillosos. Se define como una medida de la capacidad de una arcilla o un suelo para adsorber cationes de tal forma que puedan ser fácilmente desorbidos por competencia iónica. Esta capacidad de retención de cationes está relacionada con la cantidad de coloides del suelo con cargas negativas tales como el humus y las arcillas. La CIC es reversible y es un parámetro comparable con el pH del suelo (Dohrmann, 2006; Aran *et al.*, 2008).

El conocimiento de la CIC y la distribución catiónica de las superficies de intercambio se puede utilizar como una herramienta para la caracterización de minerales arcillosos especialmente para la cuantificación de estos, su origen y su génesis en el suelo; además de utilizarse entre otros parámetros como coloide y contenido de nutrientes, para hablar de la fertilidad del suelo (Dohrmann, 2006; Aran *et al.*, 2008).

2.5.5. Cationes intercambiables

Los cationes intercambiables proceden de la meteorización del material originario, de la mineralización de la materia orgánica y de aportes externos superficiales y

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

subterráneos. En la naturaleza raramente se puede encontrar un complejo de cambio como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} y K^{+} como una especie iónica. Los más frecuentes son menos de diez y la presencia y predominio de unos u otros dependerá de las condiciones del medio y de las interacciones en la interface. Se hallan en una proporción considerablemente mayor que los cationes en solución. Representan el 1% o menos, excepto en los suelos salinos (Porta *et al.*, 2003).

Ca^{+2} proviene de materiales procedentes del material parental, como el fosfato de calcio y carbonato de calcio. Su concentración es diez veces más alta que la del potasio; sin embargo, su tasa de absorción es más baja que la del potasio, esto es debido a que es absorbido solamente por la punta de raíces jóvenes donde la pared celular aún no está endurecida (Arias, 2001).

Este catión es utilizado por la planta para la tensión y elongación celular, para la permeabilidad y estabilidad de la membrana celular; además, forma parte de la pared celular que es específica de los vegetales, lo cual les proporciona sostén (Arias, 2001).

Mg^{+2} Se encuentra en el centro de la molécula de la clorofila, pigmento esencial para que las plantas verdes puedan llevar a cabo la fotosíntesis; pese a ello, la fracción del Mg total asociada a la clorofila es relativamente pequeña, pues sólo representa entre 15 y 20%. Es absorbido por las plantas como ion Mg^{+2} , constituye normalmente cerca de 0,5% de la biomasa total de las plantas; sin embargo, las diferentes especies vegetales pueden presentar un intervalo relativamente amplio en su contenido total (entre 0,07 y 9%) (Sadeghian, 2012).

Na^{+} Fijado débilmente en todos los tipos de suelos y unido al que existe en la solución del suelo, constituye la fuente de suministro para los cultivos anuales. Representa una fracción importante de los cationes intercambiables en los suelos salinos y alcalinos, en los que se presenta; además, forma diferentes sales sódicas.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

El contenido de Na^+ de los suelos de las regiones húmedas depende ampliamente de su proximidad a los océanos y de la importancia de su posible lixiviación (Jalali, 2006).

K⁺ Elemento esencial para el crecimiento de la planta. Aunque la distribución de las formas de potasio difiere de un suelo a otro en función de los minerales presentes, las reservas totales generalmente son ampliamente grandes. El potasio del suelo se encuentra típicamente en cuatro formas: en la solución del suelo, intercambiable, no intercambiable y en los minerales del suelo. La forma no intercambiable puede ser un importante reservorio de este elemento en el suelo. Se sabe que, para que se dé el crecimiento de los cultivos la solución del suelo y el potasio intercambiable necesitan ser repuestos continuamente con K^+ a través de la liberación de K^+ no intercambiable (Jalali, 2006).

2.5.6. Micronutrientes

Se encuentran de manera natural en suelos y son importantes micronutrientes; sin embargo, sus concentraciones naturales o pedogeoquímicas son generalmente bajas ya que en suelos no contaminados el intervalo observado va de 2 a 109 mg kg^{-1} para Cu y de 10 a 100 mg kg^{-1} para Zn. Valores elevados se deben a anomalías naturales o a la contaminación, siendo las actividades humanas las que contribuyen a un incremento significativo de estos dos micronutrientes en el suelo, si se presentan en exceso, estos metales comienzan a ser tóxicos para los organismos (Fekiacova *et al.*, 2015).

Cu

Se encuentra presente en las redes cristalinas de los minerales primarios y secundarios. Se encuentra contenido en compuestos orgánicos o en las superficies de intercambio catiónico y en la solución del suelo. Como micronutriente en la planta actúa como componente estructural de las proteínas, participa en funciones catalíticas de diversas enzimas involucradas en los procesos de fotosíntesis y

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

respiración, sin embargo, un exceso de Cu en el suelo puede incrementar los niveles en los tejidos de las plantas, siendo capaz de afectar la fotosíntesis alterando el contenido de agua y el potencial osmótico, dando como resultado un desbalance nutricional y como consecuencia una reducción en el crecimiento de la planta (FAO, 1995; Ferreira *et al.*, 2015).

Zn

Se presenta de manera natural en los suelos como resultado del desgaste de su material parental, el contenido total de este micronutriente va de 40 a 120 mg kg¹ dependiendo de su litología. Es un nutriente esencial para las plantas, aunque los suelos generalmente presentan deficiencias, su contenido suele ser elevado debido a la adición de fertilizantes y materiales encalados o abonos. Puede acumularse en los suelos llegando a presentarse valores considerablemente más altos a la concentración óptima como nutriente, esto puede llegar a ser tóxico para los organismos del suelo. La disponibilidad de este micronutriente hacia la planta está influenciada por diversos factores, los más importantes son el pH y la MO del suelo (Behera *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013).

2.5.7. Metales Pesados

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga relativamente alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el mercurio, cadmio, arsénico, cromo, talio y plomo, entre otros (Prieto *et al.*, 2009).

Se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Prieto *et al.*, 2009).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Plomo

En el suelo tiene una gran afinidad con las sustancias húmicas y el pH y depende de ellos para fijarse, pero debido a que es poco móvil permanece en los horizontes superiores y no es asimilado en grandes cantidades por las plantas (Acosta y Montilla, 2011).

Níquel

Sus concentraciones en el suelo varían de 1 a 100 mg/kg, esto depende principalmente de la roca madre y, en algunos casos de los factores formadores del suelo como el clima. En el suelo se adhiere fuertemente a partículas que contienen hierro o manganeso, las condiciones ácidas favorecen su movilización del níquel en el suelo y facilitan su filtración hacia el agua subterránea, es muy móvil durante los procesos de intemperismo y precipita principalmente con los óxidos de hierro y manganeso; además, es muy afín a la materia orgánica (Ospina y Zapata, 2012).

Cadmio

Es un elemento natural de la corteza terrestre, generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales como oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio). Todos los suelos y rocas, incluso el carbón y abonos minerales, contienen una cantidad de este metal. Es introducido en el suelo por el uso de agroquímicos en la agricultura, el contacto con aguas residuales, el uso de aguas de riego que contengan este elemento o por la deposición sobre la superficie de partículas húmedas y secas que son arrastradas por el aire provenientes de procesos industriales. Se moviliza a través del suelo dependiendo de factores como el pH y el contenido de materia orgánica, a este último se adhiere fuertemente hasta entrar en contacto con la superficie radical de las plantas a través de una difusión de iones (Acosta y Montilla, 2011).

2.6. Propiedades bioquímicas

Las propiedades bioquímicas del suelo cada vez son más reconocidas como importantes para la evaluación de la sostenibilidad de los ecosistemas ya que los microorganismos del suelo presentan un papel crucial en el ciclo de nutrientes, en el flujo de energía y en la descomposición de la materia orgánica. A consecuencia de esto, tales propiedades han sido consideradas como un componente integrativo de la calidad del suelo (Xue y Huang, 2013).

Debido a que los microorganismos responden rápidamente al estrés para el ajuste de sus tasas de actividad, biomasa y la estructura de su comunidad, los indicadores de la actividad microbiana pueden ser de utilidad para la evaluación de la calidad del suelo ya que además son más sensibles a las alteraciones presentadas en el ambiente (a diferencia de las propiedades físicas o químicas), debido a que estas propiedades miden las reacciones microbianas involucradas en los ciclos de nutrientes, además se caracterizan por su fácil medición (Andrés *et al.*, 2011; Paz-Ferreiro *et al.*, 2012).

Por lo anterior, la medida de las actividades biológicas ha sido sujeta a investigación, no sólo por su importancia en el funcionamiento y estructura del suelo, sino también por los cambios en la actividad biológica que pueden ser usados como indicadores de la contaminación del mismo (Sciubba *et al.*, 2014).

Biomasa microbiana, respiración, coeficiente metabólico (qCO_2) y actividades enzimáticas pueden ser utilizados como indicadores para cambios en la calidad del suelo, debido a que los microorganismos responsables de la descomposición y mineralización de la fracción orgánica usan parte de los compuestos contenidos en los residuos como fuente de nutrientes y energía para la formación de biomasa. Por lo tanto, estas propiedades resultan ser indicadores adecuados para la actividad microbiana y de modificaciones ocurridas en el suelo debido a la adición de residuos de plantas o animales, opciones de manejo y contenido de contaminantes en el

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

suelo; por lo tanto, estas propiedades resultan ser óptimas para evaluar los efectos de la aplicación de los biosólidos (Fernandes *et al.*, 2005).

Además, se sabe que CBM, RB y las actividades enzimáticas han sido empleadas a nivel nacional e internacional en programas de monitoreo debido a su gran sensibilidad ante perturbaciones antropogénicas y cambios ambientales, ya que están directamente involucradas con la dinámica de la materia orgánica lo que a su vez se correlaciona con los niveles de C orgánico del suelo (Álvaro *et al.*, 2013; Xue y Huang, 2013).

Debido a lo antes ya mencionado el carbono de la biomasa microbiana y la respiración del suelo han sido usadas para determinar el efecto de la adición del biosólido como enmienda en las propiedades microbiológicas del suelo (Marando *et al.*, 2011).

Respecto a la incorporación de biosólidos al suelo se ha encontrado un incremento en la actividad biológica y enzimática del mismo, debido a que los microorganismos estimulan el crecimiento de las plantas por medio de sustancias como hormonas y vitaminas, las cuales mejoran la estructura y disponibilidad de nutrientes y reducen la erosión. De acuerdo a investigaciones los biosólidos como fertilizantes y/o regeneradores orgánicos son una opción interesante para agregar componentes orgánicos y nutrientes (Celis *et al.*, 2011)

Finalmente cabe mencionar que se ha encontrado que el incremento de la biomasa microbiana del suelo, contenido de carbohidratos y actividad biológica a causa de la incorporación de biosólidos depende de 2 aspectos (Jiménez *et al.*, 2007): 1) la tasa de aplicación del biosólido y 2) la proporción de MO en descomposición presente en estos compuestos

2.6.1. Mineralización de Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento que se encuentra presente en la atmósfera principalmente en forma de gas de fórmula N_2 que es inerte y no puede ser empleado por la mayor parte de los organismos. La mayor parte del nitrógeno presente en el suelo está en forma de nitrógeno orgánico. Este nitrógeno orgánico representa una importante reserva de nutrientes y está constituido en aproximadamente 40% por material proteico (proteínas, péptidos y aminoácidos), aunque también abundan los compuestos heterocíclicos de nitrógeno (aproximadamente 35%) (Paz-Ferreiro, 2006).

El nitrógeno es un macronutriente esencial para las plantas, este forma parte de ácidos nucleicos y aminoácidos, sirviendo su función en la señalización y regulación de proteínas. Además, es de gran importancia en la bioquímica de compuestos como enzimas, pigmentos, metabolitos secundarios y poliaminas (Rubio *et al.*, 2011).

Los microorganismos presentan gran importancia al describir el ciclo del nitrógeno en el suelo, ya que intervienen en un gran número de procesos. La amonificación se produce debido a la acción de un gran número de microorganismos, tanto aerobios como anaerobios, y diversos tipos de organismos como bacterias y hongos; mientras que, la nitrificación (conversión de amonio a nitrato por oxidación enzimática) es un proceso que ocurre en dos etapas: conversión de amonio a nitrito y su posterior transformación en nitrato. La primera de estas etapas transcurre principalmente debido a la acción de bacterias pertenecientes al género *Nitrosomonas*, aunque también se encuentran implicadas bacterias pertenecientes a otros géneros como son las *Nitrosolobus* y las *Nitrospira*; mientras que, la transformación final en nitrato se produce por medio de la acción de bacterias pertenecientes al género *Nitrobacter*. Este tipo de bacterias presentan un intervalo de condiciones mucho más estrecho que las bacterias amonificantes (Paz-Ferreiro, 2006).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

La mineralización del nitrógeno consiste en convertir el amoníaco a su forma más oxidada de nitrato, que es un ion más fácilmente asimilado por las plantas. Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. Cuando dichos organismos se mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo. Este ciclo es complejo e involucra una serie de reacciones y organismos con diferentes metabolismos. Siempre comienza con compuestos orgánicos sencillos (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , N_2 , NH_3) y termina con compuestos orgánicos complejos; que a través de la descomposición regresan a la etapa de compuestos sencillos (Fernández *et al.*, 2006; Salazar *et al.*, 2012).

El síntoma principal de deficiencia de N en las plantas es senescencia foliar provocada por peroxidación lipídica y la pérdida de pigmento, así como la degradación de proteínas que conducen a la inhibición de la capacidad fotosintética (Rubio *et al.*, 2011).

Respecto a la aplicación de biosólidos al suelo se ha encontrado que después de la adición del mismo se presenta un incremento en los niveles de MO, nitrógeno total y nitratos comparados con sus respectivos controles, este incremento parece estar especialmente correlacionado con la dosis de biosólido agregada. Así mismo, la producción de nitratos está relacionada con el proceso de mineralización de nitrógeno, el cual también mejora con la adición del biosólido (Roig *et al.*, 2012).

2.6.2. Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM)

La biomasa microbiana se caracteriza por ser la parte más activa de la materia orgánica del suelo; además, es importante en el ciclo de nutrientes y su liberación, también es considerada como un indicador sensible y temprano ante el estrés que se produce en el suelo (Silva *et al.*, 2014; Wen *et al.*, 2014).

Los microorganismos del suelo son los principales mediadores del ciclo del carbono, parte de la reserva de carbono y nutrientes orgánicos está conformada por la

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

biomasa microbiana. La cantidad de C en la biomasa microbiana representa entre 1% y 3% del C orgánico total del suelo. Debido a que la fracción microbiana cambia rápidamente, la biomasa microbiana puede proporcionar un índice temprano de los cambios lentos en el contenido de materia orgánica (Zhang *et al.*, 2005).

Las alteraciones, como el descenso de la misma, parecen estar determinadas por propiedades de las comunidades microbianas, su tipología y actividad, así como por las condiciones climáticas a las que se ve sometido el suelo, más que a sus características edáficas (Iglesias, 2008; Chen *et al.*, 2013).

Cabe mencionar que CBM es importante en el ciclo de nutrientes, ya que participa en los ciclos de C y N, y refleja el estado de la fertilidad del suelo debido a que los microorganismos presentes en el medio edáfico responden rápidamente a los factores de estrés ya que presentan ajustadas tasas de actividad; por lo tanto, puede ser útil para la evaluación de la calidad del suelo (Andrés *et al.*, 2011; Jaurixje *et al.*, 2013; Wen *et al.*, 2014).

Debido a lo anterior, ha sido incluida en programas de monitoreo del suelo, ya que como antes se ha mencionado se relaciona directamente con la fertilidad del suelo, la estructura y la estabilización del mismo (Andrés *et al.*, 2011).

Respecto a la incorporación de residuos orgánicos como los biosólidos, se ha encontrado un aumento inicial de CBM después de la aplicación de MO, el cual se relaciona con la entrada de carbono fácilmente disponible hacia los microorganismos presentes en el suelo y también debido al nuevo CBM que se está formando en los biosólidos adicionados, siendo estos materiales capaces de estimular la microbiota autóctona del suelo debido a la mayor disponibilidad de fuentes de energía, a consecuencia de esto la actividad del suelo aumentaría mejorando la respiración basal y la mineralización del C (Fernández *et al.*, 2009; Andrés *et al.*, 2011; Marando *et al.*, 2011).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Se ha observado un aumento en CBM al incrementar la dosis de biosólido aplicada al suelo. Por lo tanto, se atribuye un efecto positivo por parte del biosólido hacia los microorganismos heterótrofos del suelo debido a la incorporación de microorganismos adicionales dentro del sistema que estimulan el crecimiento de la microbiota autóctona por medio de la incorporación de C, MO y N los cuales actúan como fuentes de energía para los microorganismos heterótrofos y los elevados valores de CBM (Selivanovskaya *et al.*, 2001; Celis *et al.*, 2011; Sciubba *et al.*, 2014; Mondal *et al.*, 2015).

2.6.3. Respiración del suelo (RB)

La RB se define como la velocidad constante de la respiración en el suelo, que se origina a partir de la mineralización de la materia orgánica, y se estima a partir de la evolución del CO₂ o por medio de la captación de O₂. Comprende tanto la respiración heterotrófica por microorganismos que descomponen los residuos orgánicos y las sustancias húmicas mineralizables, y la respiración autótrofa, que representa la producción de CO₂ asociada con el crecimiento y metabolismo de las raíces. Tanto la respiración de las raíces como la respiración del suelo son controlados por una serie de factores bióticos y abióticos como la disponibilidad de agua, la actividad fotosintética, la temperatura del suelo, el suministro de sustratos metabólicos, el contenido de carbono y la gestión de prácticas de manejo (Creamer *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2014).

Es el principal componente del ciclo del C, esta propiedad depende del tipo de ecosistema en donde se encuentre presente, generalmente el promedio de la respiración del suelo varía entre 1.4 y 2.6 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, se caracteriza por medir el carbono potencialmente mineralizable en el suelo y reflejar la actividad global o energía gastada por el pool microbiano lo que refleja una estimación de la actividad descomponedora de los microorganismos del suelo (Paz-Ferreiro, 2006; Prolingheuer *et al.*, 2014).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Para poder medir la actividad microbiana del suelo se determina la respiración basal, esta consiste en estimar la producción de O_2 en el medio o bien la concentración de CO_2 desprendido (función de la actividad biológica y del contenido del suelo en carbono orgánico fácilmente mineralizable), mediante la técnica de incubación estática que captura el producto de mineralización en una solución alcalina durante un periodo de tiempo bajo condiciones ambientales optimas (García y Hernández, 2007).

La medición de la respiración basal ha sido aplicada en una variedad de estudios de investigación y tanto la respiración como la mineralización de la materia orgánica han sido comúnmente aceptadas como indicadores clave para medir los cambios en la calidad del suelo (Creamer *et al.*, 2014).

Se ha encontrado que la respiración del suelo incrementa en relación directa con la dosis de lodo residual aplicada, este incremento se debe a la incorporación de nutrientes y MO fácilmente biodegradable las cuales estimulan la actividad microbiana del suelo lo que acelera la tasa de mineralización del C como resultado de la presencia de compuestos lábiles en los biosólidos; además de la incorporación de microorganismos exógenos que proporcionan nutrientes y sustratos orgánicos que estimulan a la microbiota de los suelos, lo que indica que habrá una mayor actividad microbiana que puede ser evaluada mediante la producción de CO_2 (Antolín *et al.*, 2005; Jiménez *et al.*, 2007; Tarrasón *et al.*, 2010).

2.6.4. Coeficiente metabólico (qCO_2)

En recientes años, diversos investigadores han propuesto índices derivados de las propiedades bioquímicas tales como: respiración basal por unidad de biomasa microbiana y la relación de respiración basal para inducir la respiración del suelo, para tener una clara idea de las relaciones entre el funcionamiento de la comunidad microbiana y las condiciones ambientales. La relación entre la respiración del suelo y la biomasa microbiana puede ser expresada usando qCO_2 . Este puede ser

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

considerado como un indicador de la perturbación ambiental de la población microbiana (Selivanovskaya *et al.*, 2001).

El coeficiente metabólico (qCO_2) relaciona la actividad microbiana a través de la respiración microbiana y la cantidad de biomasa microbiana por unidad de tiempo; éste fue descrito por primera vez por Anderson y Domsch (1990) como un índice sencillo de la actividad biológica del suelo; está basado en la hipótesis de la optimización energética de los ecosistemas, derivada de la teoría ecológica de Odum sobre la sucesión de los ecosistemas y la eficiencia metabólica de la microflora edáfica. Así, en ecosistemas jóvenes (inmaduros) el valor de qCO_2 debe ser elevado y es bajo al referirse a ecosistemas maduros; es decir, la relación entre la respiración total y la biomasa total de un ecosistema debe disminuir progresivamente a medida que el ecosistema alcanza el estado de equilibrio o de estabilidad, salvo que las condiciones sean adversas para el buen funcionamiento del mismo (García y Hernández, 2007).

Se ha observado que la aplicación de biosólidos aumenta o disminuye este índice, ya que depende de la alta labilidad de la materia orgánica o de la disminución del C orgánico respectivamente (Selivanovskaya *et al.*, 2001; Andrés *et al.*, 2011).

2.6.5. Actividades enzimáticas

Las enzimas son proteínas cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos. Los organismos y las plantas liberan enzimas al suelo por secreción y por lisis celular después de su muerte; un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas en interacción con los diferentes componentes de la fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales (Cerón y Malgarejo, 2005).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

La acción de las enzimas como catalizadores depende de factores como: pH, temperatura y la presencia (o ausencia) de inhibidores. El clima, el tipo de enmienda, las técnicas de cultivo, el tipo de cultivo y las propiedades edáficas también tienen un efecto en dichas reacciones (Kızılkaya y Bayraklı, 2005).

El crecimiento de las plantas depende positivamente de los nutrientes que se liberan durante las reacciones catalizadas por enzimas secretadas por microorganismos y plantas. Por lo tanto, la población microbiana interactúa estrechamente con el ambiente del suelo y la actividad de las enzimas extracelulares desempeña un papel crucial en las transformaciones de carbono, nitrógeno, fósforo y azufre a nivel fundamental de los ciclos de los nutrientes, por consiguiente, las enzimas han sido propuestas como indicadores sensibles para la calidad del suelo y las propiedades físico-químicas. Estudios sobre la actividad enzimática proporcionan información sobre los procesos bioquímicos que ocurren en el suelo. Las mediciones de diversas actividades se han utilizado para establecer los índices de la fertilidad del suelo (Kızılkaya y Bayraklı, 2005; Pandey *et al.*, 2014).

2.6.6. Catalasa

La catalasa es una enzima intracelular perteneciente a la familia de las oxido-reductasas. Se caracteriza por ser componente importante del mecanismo de defensa celular contra el estrés oxidativo ya que neutraliza el peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua evitando que las células presenten daños a causa de las especies reactivas de oxígeno (Stepniewska *et al.*, 2009; Sooch *et al.*, 2014).

La catalasa se presenta en una amplia variedad de plantas, animales y microorganismos, su actividad puede estar relacionada con la de los organismos aeróbicos; por lo tanto, se ha utilizado como un indicador de la fertilidad del suelo, sin embargo, algunos autores han señalado que su actividad no muestra una buena correlación con el número total de microorganismos del suelo, por lo que su empleo

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

como exponente del estado bioquímico del mismo sería limitado (Paz-Ferreiro, 2006; Stepniewska *et al.*, 2009; Sooch *et al.*, 2014).

2.7. Albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

El género *Ocimum* perteneciente a la familia Lamiaceae comprende hierbas anuales y perennes, así como arbustos nativos de regiones de la zona tropical y subtropical de Asia, África y América del Sur. Aproximadamente, 60 especies de albahaca son conocidas en todo el mundo, algunas otras especies que han sido relacionadas a esta familia se han clasificado en otros géneros (Telci *et al.*, 2006; Ekren *et al.*, 2012; Bernhardt *et al.*, 2014).

Es una planta herbácea, anual de tallos erectos y ramificados, que alcanza de 30 a 50 cm de altura, las flores son blancas o ligeramente purpúreas, dispuestas en espigas alargadas, axilares en la parte superior del tallo o en los extremos de la rama, el fruto está formado por cuatro aquenios pequeños y lisos (Briseño *et al.*, 2013).

Entre las especies del género, *Ocimum basilicum* L. (albahaca) es el principal cultivo de aceites esenciales en el mundo, ya que contiene linalool, eugenol, eugenol metílico, cervacrol y cariofilina, por ello, es cultivada en muchos países debido a que estos aceites la dan importancia económica en la industria perfumera y cosmética. Además algunos estudios han informado de que la albahaca dulce contiene altas concentraciones de compuestos fenólicos (rosmarínico y ácido cafeico), que se caracterizan por sus altas capacidades antioxidantes (González *et al.*, 2011; Filip *et al.*, 2014; Búfalo *et al.*, 2015).

Se ha informado que el aceite de albahaca tiene propiedades antimicrobianas, antioxidante, antifúngicas e insecticidas; además, algunos de sus componentes,

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

tales como 1,8-cineol, linalool, y alcanfor, son conocidos por ser biológicamente activos; sin embargo, sus constituyentes principales activos son afectados por

diversos factores como estrés hídrico, estrés salino, los procesos de extracción y métodos de secado, así como las prácticas de cultivo, como efecto de la nutrición de las plantas en la productividad de la albahaca dulce y composición del aceite esencial (Búfalo *et al.*, 2015).

Como planta medicinal se utiliza en tratamientos de ansiedad, diabetes, enfermedades cardiovasculares, dolores de cabeza, nervios, anticonvulsivo, antiinflamatorio, tos, asma, resfriado, migrañas, picaduras de insectos, dolores menstruales, sinusitis, diarrea, estreñimiento, verrugas, mal funcionamiento de los riñones y trastornos neurodegenerativos (Bora *et al.*, 2011; Govindarajan *et al.*, 2013; Filip *et al.*, 2014).

2.8. Estrés oxidativo

El estrés oxidativo se refiere a la sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ERO) en células de plantas; por lo que hay un desequilibrio entre la producción de ERO y su neutralización. Entre estas ERO se incluyen radicales superóxido, radical hidroxilo, oxígeno singlete y peróxido de hidrógeno, estos son generados a menudo como subproductos de reacciones biológicas o de factores exógenos (Wu *et al.*, 2008; Wyrwicka *et al.*, 2014).

Estudios recientes han investigado el potencial de los productos vegetales como antioxidantes contra diversas enfermedades inducidas por los radicales libres. Adicionalmente, se ha determinado que el efecto antioxidante de los productos presentes en las plantas se atribuye principalmente a los compuestos fenólicos, tales como flavonoides, ácidos fenólicos, taninos, y diterpenos fenólicos (Wu *et al.*, 2008; Wyrwicka *et al.*, 2014).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Los antioxidantes son compuestos o sistemas que pueden interactuar de forma segura con los radicales libres y terminar la reacción en cadena antes de que moléculas vitales se encuentren dañadas. Son capaces de utilizar varios

mecanismos como: (i) especies de barrido que inician la peroxidación, (ii) iones quelantes de metales de manera que sean incapaces de generar especies reactivas o se descomponen peróxidos, (iii) enfriamiento rápido en O_2 para prevenir la formación de peróxidos, (iv) rompimiento de la reacción en cadena auto-oxidativa, y / o (v) reducir las concentraciones localizadas de O_2 (Oroian y Escriche, 2015).

La producción de ERO es un fenómeno natural en los tejidos de la planta y acompaña a la fotosíntesis y respiración endógena sobreproduciendo ERO como un anión superóxido (O_2^-), radicales hidroxilo (OH) y radicales peroxilo (ROO), así como oxígeno singlete (1O_2) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que dañan de manera espontánea los lípidos de membrana, proteínas, ácidos nucleicos y otras moléculas biológicamente importantes que pueden reducir el crecimiento y desarrollo de la planta. Así mismo, la producción de ERO es una de las principales causas de disminuir la productividad; además, de lesiones y muerte que acompañan al estrés en la planta, mecanismos existentes en las células de las plantas pueden estimular la regulación de la sobreproducción de ERO, contrarrestando el estrés oxidativo que se produce. Estos mecanismos incluyen antioxidantes enzimáticos como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POD), ascórbato peroxidasa y dehidroascorbato reductasa y no enzimáticos como ácido ascórbico (AA, vitamina C), α -tocoferol (vitamina E), glutatión y β -caroteno (Mora-Herrera *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2013; Wyrwicka *et al.*, 2014).

2.8.1. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se consideran como uno de los grupos de compuestos bioactivos responsables de efectos beneficiosos para la salud. Aunque hay otros mecanismos de acción, los más citados de acción antioxidante de los compuestos

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

fenólicos son su capacidad para secuestrar especies reactivas de oxígeno y su capacidad para quelar iones metálicos. El conocimiento del contenido de compuestos fenólicos en alimentos vegetales es una importante herramienta para entender su papel en la salud humana. La biodisponibilidad y la actividad biológica de estos compuestos están relacionados con su composición química, su estructura y su biodistribución en el cuerpo humano (Da Silva *et al.*, 2013).

Son metabolitos secundarios de las plantas, de los que se han identificado más de 8000 que difieren en estructuras químicas y en actividad; su distribución de compuestos fenólicos en tejidos y células vegetales varía considerablemente entre compuestos. Presentan interés nutricional por su contribución al mantenimiento de la salud humana debido a las propiedades benéficas de su actividad antioxidante (Ruiz *et al.*, 2008).

La actividad antioxidante de los compuestos fenólicos se debe principalmente a sus propiedades redox, que les permiten actuar como agentes reductores, en la donación de hidrógeno y en la quelación de los singletes de oxígeno. Además, tienen un potencial quelante de metales (Akula y Odhav *et al.*, 2008).

Son considerados de gran importancia por sus efectos anticancerígenos en el organismo, además de presentar otros efectos como antibacteriales o antimutagénicos, debido a que son capaces de inactivar varias especies reactivas de oxígeno (Bautista *et al.*, 2013; Alia *et al.*, 2005).

2.8.2. Antocianinas

Las antocianinas pertenecen a los flavonoides que representan una amplia clase de metabolitos secundarios. Este grupo de flavonoides son pigmentos solubles en agua producidos en la mayoría de las especies del reino vegetal (Szymanowska *et al.*, 2015)

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Las antocianinas son pigmentos naturales derivados de flores, frutas y vegetales, están presentes exclusivamente como compuestos glucosídicos en las plantas. Dependiendo del pH, los pigmentos de las antocianinas son de color rojo a púrpura o azul. En la naturaleza, tienen un papel determinante en la atracción de animales como factores de polinización y dispersión de semillas; su presencia en partes diferentes a las flores, sirve posiblemente en la percepción o filtración de luz y respuesta a los factores de estrés, como el ataque microbiano. Se relacionan además con la resistencia contra plagas, protección de ADN y del aparato fotosintético (Cartaya y Reynaldo, 2001; Vargas-Simón *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2006).

Las propiedades biológicas de las antocianinas han sido principalmente atribuidas a las propiedades antioxidantes, así como extractos de plantas que contienen grandes cantidades de antocianinas para reaccionar con el radical oxígeno. Los mecanismos antioxidantes de las antocianinas no han sido establecidos, aunque hay indicios de que la donación de hidrógenos, la quelación de metales y las proteínas de unión están involucradas (Da Costa *et al.*, 2000).

En la industria, las antocianinas tienen un potencial considerable en la rama alimentaria como aditivo, por su carácter inocuo, también contribuyen a la salud y bienestar de los consumidores. Un atributo importante de estos pigmentos es que son potentes antioxidantes en la dieta (Vargas-Simón *et al.*, 2002; Lachman y Hamouz, 2005).

2.8.3. Flavonoides

Los flavonoides, muchos de los cuales son pigmentos vegetales, son abundantes en la naturaleza. Los flavonoides se pueden dividir en varias subclases, de las cuales las más representativas son: flavonas, flavanonas, flavonoles, flavanoles, antocianidinas y las isoflavonas (Oroian y Escriche, 2015).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Son un grupo de polifenoles distribuidos ubicuamente en vegetales, frutas, semillas, raíces y tallos ya sea en forma aglicona o derivados de glicona, se caracterizan por presentar potentes propiedades antioxidantes que se deben a la presencia de grupos hidroxil fenólicos en su estructura (Pahari *et al.*, 2012; Selvaraj *et al.*, 2015).

Los compuestos de naturaleza fenólica presentes en hortalizas y frutos contribuyen a dar una fuerte capacidad antioxidante; por su diversidad y amplia distribución constituyen el grupo más importante de metabolitos con actividad antioxidante natural. Hay evidencias epidemiológicas convincentes que muestran los beneficios de los flavonoides en la salud y de su contribución en retardar algunos procesos degenerativos. Son compuestos con habilidad para atrapar radicales libres, quelatar metales pesados y modular la actividad de ciertas enzimas, y además se ha observado que los flavonoides poseen propiedades anticancerígenas, cardiotónicas, antitrombóticas, vasculares, que disminuyen el colesterol y contribuyen a la protección del hígado, entre otras (Barrón-Yáñez *et al.*, 2011).

Está comprobado que los flavonoides son importantes para el desarrollo y buen funcionamiento de las plantas al protegerlas contra agentes agresores externos, como la radiación UV, microorganismos, animales herbívoros y del medio ambiente. Pueden actuar como señalizadores químicos, indicando a los insectos que planta es apropiada para su alimentación, oviposición o simplemente guiándolos y facilitando así la polinización (Gracia *et al.*, 2002).

En su relación con el hombre, se utilizan para tratar enfermedades relacionadas con procesos inflamatorios y desordenes cardiovasculares debido a la actividad que ejercen sobre el sistema circulatorio mejorando la circulación periférica, la movilización del colesterol y disminuyendo la fragilidad capilar. Algunos flavonoides pueden presentar actividad hepática protectora, antialérgica, antitrombótica, anticancerígena, antibacteriana, antifúngica, e incluso pueden ejercer efectos inhibidores sobre algunas enzimas (Gracia *et al.*, 2012).

Otra de las propiedades de los flavonoides es su capacidad para contribuir a las propiedades de los alimentos, como el sabor o la dulzura, también son utilizados en la industria de los cosméticos por su actividad desodorante y reductora de la hiperpigmentación causada por la vejez (Gracia *et al.*, 2012).

2.8.4. Actividad enzimática de las peroxidasas (POX)

Las peroxidasas están ampliamente distribuidas entre las plantas superiores, parte de su importancia se debe a que catalizan la oxidación de varios fenoles donadores de electrones en presencia de peróxido de hidrógeno, generando radicales libres que reaccionan entre sí y producen dímeros (Rivas *et al.*, 2007)

Dentro de las EROS el H_2O_2 tiene un papel importante ya que tiene ciertas funciones vitales en células vegetales, como son su participación en la síntesis de la pared celular y en la respuesta hipersensible ante el ataque de microorganismos; sin embargo, sus niveles deben ser controlados por cuanto puede originar los OH que son los principales agentes oxidantes de las proteínas, ácidos nucleicos y lípidos (Castro *et al.*, 2006).

En el control del H_2O_2 participan enzimas la guayacol peroxidasa (POD) que necesita de un compuesto de carácter fenólico como donador de protones para generar la respectiva quinona (Castro *et al.*, 2006). Las peroxidasas son conocidas por estar implicadas en diversos procesos fisiológicos y de desarrollo, incluyendo defensas contra infecciones causadas por patógenos, heridas y estrés biológico. Además, controlan el crecimiento celular ya sea por restricción o promoción de la elongación celular, se caracterizan por presentar un rol en el catabolismo de las auxinas, la destrucción de flavonoides y la biosíntesis de etileno y metabolitos secundarios (Bela *et al.*, 2015).

2.8.5. DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

Este método fue dado por Brand-Williams, Cuvelier y Berset (1995) y posteriormente modificado por Sánchez-Moreno, Larrauri y Saura-Calixto (1998).

Es uno de los antioxidantes más ampliamente utilizados para determinar la capacidad antioxidante de las plantas. Este método se basa en el barrido del 1,1-difenil-2- radical picrilhidrazil (DPPH) a partir de los antioxidantes. Cuando una solución de DPPH se mezcla con una sustancia que puede donar un átomo de hidrógeno, la forma reducida del radical se genera acompañada de pérdida de color. Esta deslocalización es también responsable del profundo color violeta, caracterizada por una banda de absorción en solución de etanol a aproximadamente que va de los 515 a los 520 nm (Sharif *et al.*, 2008).

El DPPH es un radical libre estable con un electrón de valencia no apareado en el puente de un átomo de nitrógeno. La prueba DPPH se basa en la medida de la capacidad secuestradora de antioxidantes hacia radicales libres en extractos alimenticios o compuestos individuales. Los radicales libres DPPH que muestran una absorción a 517nm, se reducen a lo que corresponde una hidracina donde reacciona con donadores de hidrógeno (Fadda *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014)

Su capacidad antioxidante es expresada frecuentemente en EC₅₀, como porcentaje de la inhibición de radicales libres o como equivalentes de L- ácido ascórbico y esta capacidad no viene dada sólo por la suma de las capacidades antioxidantes de cada uno de sus componentes; también depende del microambiente en que se encuentra el compuesto. Los compuestos interactúan entre sí produciendo efectos sinérgicos o inhibitorios (Fadda *et al.*, 2014).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Justificación

El incremento de la industrialización y urbanización genera día a día grandes cantidades de biosólidos (lodos residuales) provenientes de las plantas tratadoras de aguas residuales, estos residuos orgánicos deben tener algún método de disposición para su uso, actualmente uno de estos métodos es su adición al suelo ya que se ha encontrado un efecto benéfico en el incremento de la materia orgánica y sus nutrientes, por lo tanto, esto contribuirá a mejorar el rendimiento y crecimiento de los cultivos.

Hipótesis

Las propiedades bioquímicas del suelo incrementarán su actividad microbiana a causa de cantidad de materia orgánica presente en el biosólido, en el caso del estrés en las plantas de albahaca, se espera que sea bajo debido a una capacidad antioxidante menor a causa de la incorporación del biosólido.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

3. Objetivos

General

Evaluar el efecto de la aplicación de mezclas de biosólido y fertilizante en las propiedades bioquímicas de suelo cultivado con albahaca (*Ocimum basilicum* L.) a nivel invernadero y en el estrés oxidativo de esta planta como una alternativa de enmienda orgánica.

Particulares

Evaluar el efecto que tiene la incorporación de biosólido y fertilizante a diferentes dosis en la mineralización de C y N.

Conocer el estrés en la actividad microbiana del suelo a causa de la incorporación de biosólido y fertilizante calculando el cociente metabólico (qCO_2).

Conocer el efecto del biosólido y fertilizante en la actividad enzimática de Catalasa.

Evaluar el estrés oxidativo en plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) por efecto de la adición del biosólido con fertilizante como mejorador de suelo.

4. Materiales y Métodos

4.1. Muestreo

El suelo se colectó en la Unidad Académica el Cerrillo perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de México ubicada en el municipio de Toluca. Se colectaron muestras compuestas del suelo del horizonte Ap. (0-20 cm) con pala aplicando un muestreo sistemático. De acuerdo a INEGI (2016) el suelo se clasificó como Andosol.

El biosólido se obtuvo del filtro prensa de la planta tratadora de aguas residuales municipales Toluca Norte, perteneciente a Operadora Ecosistemas S.A de C.V.

Las muestras de suelo y biosólido se depositaron en bolsas de polietileno para ser transportadas al laboratorio, posteriormente una parte de cada una se homogenizó, secó a temperatura ambiente, molió y tamizó (malla 2mm) para los análisis físicos y químicos, la otra parte fue utilizada para el montaje del experimento descrito más adelante.

4.2. Diseño experimental

El fertilizante químico NPK utilizado consistió en: Urea (N), Cloruro de Potasio (K) y Fosfato de Calcio (P), con los cuales se realizaron 3 fertilizaciones cada 10 días.

Se utilizaron 5 tratamientos que fueron conformados por diferentes proporciones de biosólido y fertilizantes NPK, estos fueron:

S, suelo (control)

SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40)

SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹)

SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹)

SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹)

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Se emplearon 6 repeticiones para cada tratamiento bajo un diseño en bloques completamente aleatorio. El experimento se dispuso en un invernadero perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Con el fin de asegurar el crecimiento de las plantas, se pusieron a germinar semillas de albahaca fina verde con número de lote 9442 de la marca "Vita" durante un mes hasta obtener plántulas.

Una vez que se obtuvieron plántulas de 4 a 6 hojas se trasplantaron en cada una de las macetas que contenían suelo y tezontle para una mejor aireación (aproximadamente 5 plántulas por maceta para asegurar las repeticiones).

Para realizar los análisis bioquímicos se tomó muestra 10 días después de la aplicación de cada tratamiento y 7 meses después de la aplicación del tratamiento (tras haber realizado el corte de la planta).

Para el estrés oxidativo se pesaron 0.2g de hoja de albahaca por repetición de cada uno de los tratamientos para posteriormente realizar la extracción con 10 mL de metanol al 50%, y, posteriormente realizar los análisis descritos más adelante. Es importante mencionar que todo esto se realizó inmediatamente después de haber realizado el corte a la planta, es decir en fresco.

4.3. Análisis de Laboratorio

Las propiedades físicas y químicas del suelo y biosólido (caracterización) se realizaron en base a la NOM-021-SEMARNAT- 2001.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

4.3.1. Propiedades físicas del suelo

- Textura por el método de Bouyoucos AS-09.
- Densidad Aparente “Método de la probeta”

4.3.2. Propiedades químicas de suelo y biosólido

- pH en agua relación 1:2.5 método AS-02.
- Conductividad eléctrica (CE) método AS-18.
- Materia orgánica (MO) del suelo método AS-07, de Walkley y Black (1947).
- Materia orgánica del lodo por el método de ignición (Davies, 1974) y diferencia de peso (Ludmila *et al.*, 2007).
- Capacidad de Intercambio (CIC) Catiónico y bases intercambiables del suelo método AS-12, con acetato de amonio.
- Determinación de micronutrientes (Zn, Cu, Cd, Pb y Ni)
- Nitrógeno Total por digestión Kjeldahl, método AS-25.

4.3.3. Propiedades Bioquímicas del Suelo

- Nitrógeno Inorgánico mediante extracción con KCl 2N, método AS-08.
- Carbono de la Biomasa Microbiana por el método de Fumigación-Extracción (Vance *et al.*, 1987).
- Respiración por el método de Nannipieri (1995).
- Actividad de la Catalasa (Johnson-Temple, 1964).

2.1

4.3.4. Estrés oxidativo

- Compuestos Fenólicos (Waterman y Mole, 1994).
- Antocianinas (Giusti y Wrolstad, 2001).
- Flavonoides (Chang *et al.*, 2002).
- Actividad enzimática de las peroxidasas (POX) (Anderson *et al.*, 2005).
- DPPH (Abe *et al.*, 1998).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

4.4. Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA para un diseño en bloques completamente aleatorio, una vez que se encontraron diferencias significativas se realizó una prueba LSD para comparar las medias de los tratamientos, también se realizaron correlaciones múltiples, todo llevado a cabo en el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI, utilizando un nivel de confianza del 95%.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

5. Resultados y discusión

La tabla 1 muestra las propiedades físicas y químicas del suelo y biosólido utilizados para la realización del experimento.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de suelo y biosólido

Parámetro	Suelo	Biosólido
Clase Textural	Franco-arcilloso	ND
Arena (%)	43.29	ND
Limo (%)	23.96	ND
Arcilla (%)	32.75	ND
Densidad Aparente (g/ml)	1.25	ND
pH	6.45 ± 0.05	5.88 ± 0.005
CE (ds/cm)	0.013 ± 0.004	0.028 ± 0.002
MO (%)	5.28 ± 0.60	46.28 ± 0.91
CIC (cmol Kg ⁻¹)	25.95 ± 0.03	33.95 ± 5.28
K ⁺	3.66 ± 0.57	6 ± 1
Zn (ppm)	0.29 ± 0.03	2.61 ± 0.90
Cu (ppm)	0.02 ± 0.005	1.91 ± 0.41
Cd (ppm)	0.003 ± 0.01	0.11 ± 0.002
Pb (ppm)	0.09 ± 0.005	0.77 ± 0.05
Ni (ppm)	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.08
N total (%)	0.35 ± 0.01	9.72 ± 0.01

Promedio ± desviación estándar, CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; ND: No Determinado.

La clase textural del suelo utilizado en el experimento fue de tipo franco-arcilloso. La densidad aparente que obtuvo el suelo fue de 1.25 g/ml. El pH para suelo fue de 6.45 de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2001 se clasifica como moderadamente ácido y para el biosólido fue de 5.88. Respecto a la conductividad eléctrica los valores resultantes fueron 0.013 (con efectos despreciables de salinidad) y 0.028 ds/cm para suelo y biosólido respectivamente. La materia orgánica fue de clase alta para suelo (5.28%), por su parte el biosólido contó con un 46.28% de MO. La capacidad de intercambio catiónico fue de 25.95 cmol Kg⁻¹ para el suelo (clase alta) y de 33.95 cmol Kg⁻¹ para el caso del biosólido.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

5.1. Mineralización del Nitrógeno

La figura 1 muestra la mineralización de nitrógeno tras 10 días de haber incorporado la mezcla biosólido-fertilizante. Nitrógeno inorgánico y N-NH_4^+ incrementaron en la dosis que consistió en biosólido y sin fertilizante (SB_{40}), mientras que NO_2^- y NO_3^- mostraron diferencias significativas y valores elevados de estas formas de mineralización en los tratamientos acondicionados con biosólidos respecto a S y SF ($p < 0.05$).

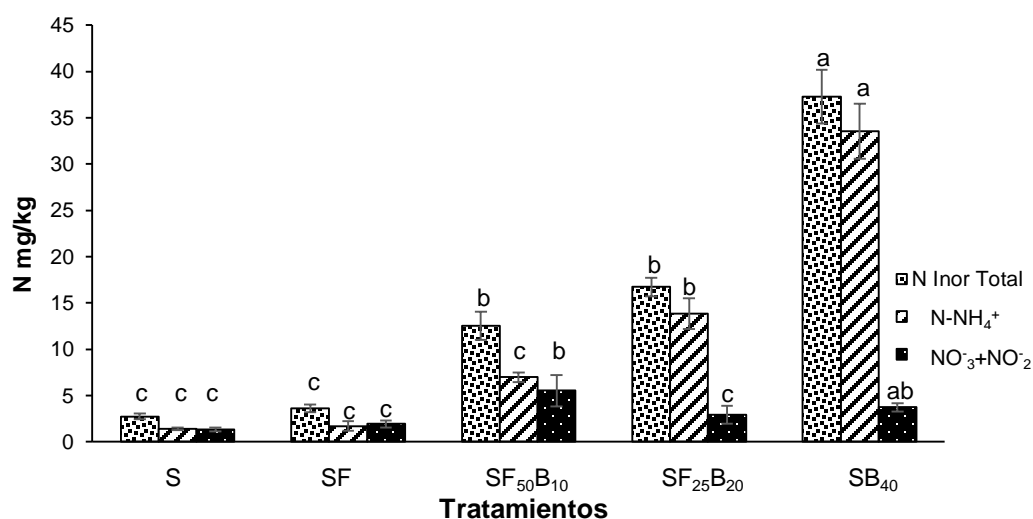


Figura 1. Mineralización de N en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹) después de 10 días de la aplicación del tratamiento. Promedio ± error estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas LSD ($p < 0.05$).

Incrementos en la producción mineral de N como una respuesta a la aplicación de biosólidos ya que se ha informado de un marcado flujo de mineralización durante las primeras semanas en respuesta a un modelo exponencial que depende del tiempo y del nitrógeno potencialmente mineralizable (Rodríguez *et al.*, 2003).

Se ha reportado, que la adición de biosólidos se encuentra directamente relacionada con la tasa y contenido de N presente en ellos, además, se ha encontrado que estos compuestos son ricos en nitrógeno orgánico y amonio, observándose después de la adición de biosólidos una tendencia de incremento en los niveles de materia

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

orgánica y nitrógeno inorgánico total, lo que favorece los procesos de mineralización, conllevando a un aporte de nutrientes y energía para la vida microbiana; por lo tanto, se tendrá un efecto benéfico en el ciclo del N. También se ha encontrado que los biosólidos al ser mineralizados mejoran su degradabilidad y su capacidad para liberar nutrientes (Hernández *et al.*, 2002; Tognetti *et al.*, 2008; Utria *et al.*, 2008; Roig *et al.*, 2012; Bouriou *et al.*, 2014).

Sumado a lo anterior, se ha observado que las tasas de mineralización del N han sido mayores durante las dos primeras semanas tal y como sucedió con los resultados obtenidos 10 días después de la adición del biosólido y fertilizante (Rodríguez *et al.*, 2003).

Para nitratos y nitritos los tratamientos enmendados con biosólidos presentaron el mayor contenido de estas formas de mineralización respecto a S y SF, esto se puede deber a que estas formas suelen ser menos fáciles de asimilar ya que los costos energéticos suelen ser mayores en la células de los microorganismos (Bouriou *et al.*, 2014).

En la figura 2 se observa la mineralización de nitrógeno 7 meses después de la incorporación del biosólido y fertilizante. No se presentaron diferencias significativas en ningún tratamiento, incluso los valores fueron bajos respecto a 10 días ($p > 0.05$).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

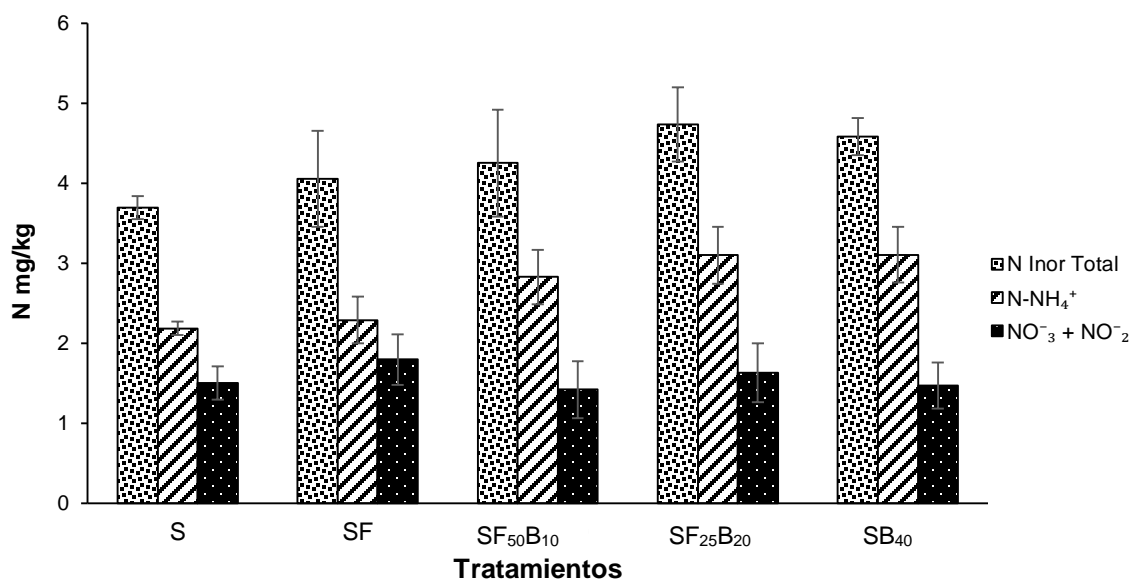


Figura 2. Mineralización de N en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido después de 7 meses de la aplicación del tratamiento (40 t ha⁻¹). Promedio ± error estándar.

De acuerdo a Rodríguez y colaboradores (2003) las tasas de mineralización del nitrógeno son más altas durante las primeras dos semanas y disminuyen con el tiempo mientras el nitrógeno lábil se va agotando.

Cabe mencionar que la fijación de N es un proceso que consume energía y, la adición de los compuestos orgánicos disponibles presentes en los biosólidos puede mejorar su función. Si se aplican biosólidos a tasas agrícolas, el N orgánico es convertido gradualmente a N inorgánico y, posteriormente es absorbido por el cultivo. En consecuencia, es menos probable que el nitrógeno liberado de los biosólidos contamine las aguas subterráneas a diferencia del N presente en los fertilizantes químicos; sin embargo, la tasa de aplicación debe ser cuidadosamente calculada teniendo en cuenta la mineralización de los biosólidos con tal de evitar adicionar mucho N, que puede ser/estar lixiviado fuera del suelo en forma de nitrato y degradar el ambiente (Selivanovskaya *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2003; Mahapatra *et al.*, 2013).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

5.1.2. Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM)

La tabla 2 muestra el contenido de carbono de la biomasa microbiana tras 10 días y 7 meses después de la incorporación de la mezcla biosólido-fertilizante. Después de 10 días no se presentaron diferencias significativas en ningún tratamiento ($p>0.05$), sin embargo, se tuvo una tendencia de aumento al incrementar la dosis de biosólido aplicada. Con respecto a 7 meses si se tuvieron diferencias significativas en SB₄₀, además de que este tratamiento fue el que presentó el mayor contenido de CBM respecto a los demás ($p<0.05$).

Tabla 2. Carbono de la biomasa microbiana de un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días y 7 meses de la aplicación del tratamiento.

Tratamiento	Carbono de la biomasa microbiana (µg/g)	
	10 días	7 meses
S	895.7 ± 71.4 ^a	265.4 ± 40.2 ^b
SF	879.0 ± 69.7 ^a	328.0 ± 37.2 ^b
SF ₅₀ B ₁₀	924.3 ± 81.0 ^a	348.2 ± 66.8 ^b
SF ₂₅ B ₂₀	1029.9 ± 129.5 ^a	388.2 ± 60.1 ^{ab}
SB ₄₀	1059.1 ± 160.7 ^a	626.9 ± 160.0 ^a

Promedio ± error estándar; letras diferentes denotan diferencias significativas LSD ($p<0.05$) en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).

Tras 10 días de haber aplicado la enmienda orgánica se presentó un incremento en el contenido de CBM en relación al control y la dosis aplicada de biosólidos, sin embargo, no se presentaron diferencias significativas ($p>0.05$). Esto se puede atribuir a la presencia de una alta concentración de carbono orgánico fácilmente degradable en las enmiendas lo que da lugar a un elevado crecimiento en la población microbiana. El crecimiento inicial de CBM después de la aplicación de materia orgánica se relaciona con la entrada de carbono fácilmente disponible hacia la biomasa microbiana autóctona y a la nueva biomasa que está creciendo debido a que se ha encontrado que los biosólidos son una fuente importante de materia

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

orgánica fácilmente biodegradable presente en el material adicionado (Sánchez-Monedero *et al.*, 2004; Paul y Solaiman, 2004; Pedra *et al.*, 2007).

Después de 7 meses de haber aplicado los tratamientos, el CBM disminuyó su contenido respecto a 10 días, aunque de nuevo se presentó una tendencia que mostró que a mayor dosis de biosólido mayor biomasa; sin embargo, las diferencias significativas sólo las presentó SB₄₀ respecto a los demás tratamientos siendo el que tuvo el mayor contenido de CBM.

Se ha reportado que el material orgánico añadido (en este caso serían los biosólidos) al suelo suministra energía tras la descomposición por parte de los microorganismos; por lo tanto, se estimula la actividad microbiana y aumenta la multiplicación del número de células. Debido a que la biomasa microbiana y la actividad microbiana están estrechamente relacionadas con el contenido de materia orgánica del suelo, se verán influenciadas positivamente por las enmiendas orgánicas (Selivanovskaya *et al.*, 2001; Paul y Solaiman, 2004; Mondal *et al.*, 2015).

Respecto a la disminución de biomasa en los tratamientos a los cuales se les adicionó fertilizante inorgánico (SF, SF₅₀B₁₀ y SF₂₅B₂₀) se ha encontrado que grandes adiciones de este conducen a una reducción en la actividad microbiana, debido a los cambios parciales de pH (Fernández *et al.*, 2009).

5.1.3 Respiración basal

La figura 3 muestra los valores de CO₂ producidos como resultado de la mineralización del C por parte de los microorganismos 10 días después de aplicar cada una de las mezclas. Se puede observar que la mayor mineralización se dio en SF₂₅B₂₀ y SB₄₀ encontrándose entre estos tratamientos diferencias significativas ($p < 0.05$). En general el contenido de carbono aumento a partir de los 11 y 14 días de incubación principalmente en SB₄₀.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

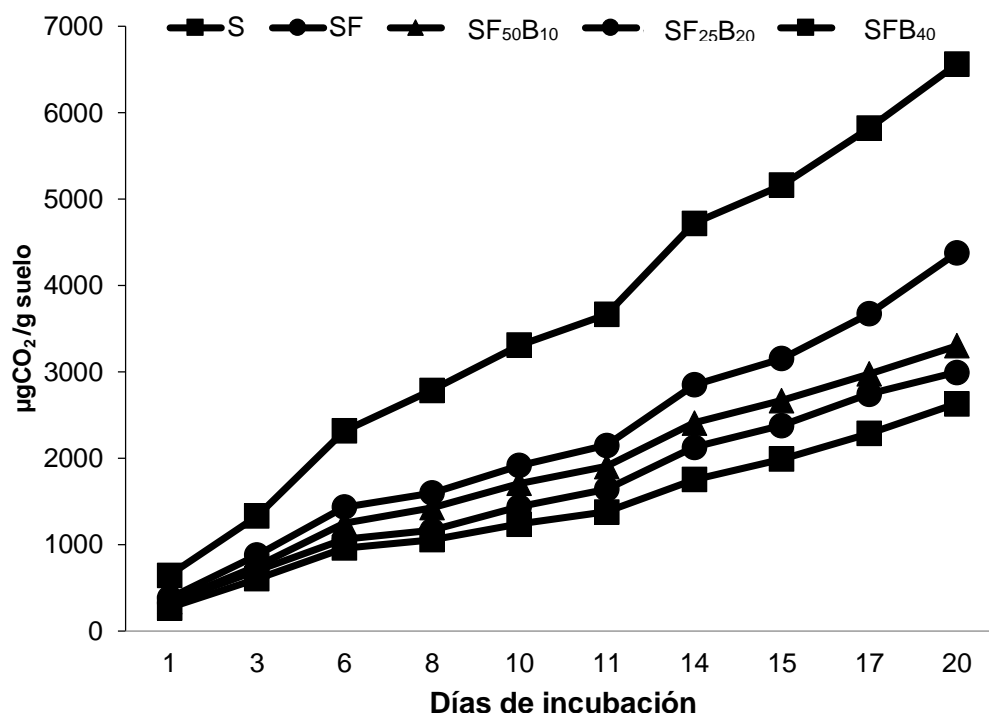


Figura 3. Mineralización de C en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹) después de 10 días de la aplicación del tratamiento.

Diez días después de la aplicación de biosólidos incrementó la tasa de respiración al aumentar la adición del biosólido. Esto se ha asociado a que el incremento de la actividad biológica del suelo depende de la tasa de aplicación del residuo orgánico y de la proporción de materia orgánica lábil presente en los biosólidos (Jimenez *et al.*, 2007; Sciubba *et al.*, 2014).

Celis y colaboradores (2010), encontraron un incremento en la respiración microbiana conforme aumentaba la dosis de biosólido aplicada. Estos resultados coinciden con lo encontrado en este trabajo, y lo que han asociado a este incremento es un aumento en la cantidad de MO y nutrientes incorporados en el suelo, esto se debe a la gran cantidad de residuos enmendados que estimulan la

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

actividad microbiana. Se ha reportado que un incremento inicial en la respiración puede ser atribuido a la incorporación de material fácilmente biodegradable la cual estimula la actividad microbiana natural del suelo, así como los microorganismos exógenos del biosólido (Celis *et al.*, 2011).

Los efectos de la adición del biosólido en la respiración, debido al suministro de biomasa y nutrientes han sido descritos en diversos trabajos que usualmente han reportado altos incrementos en la tasa de respiración, especialmente a elevadas dosis. Pedra y colaboradores (2007), mencionan que la tasa de evolución de CO₂ es más grande durante la primera semana de incubación con diferentes tipos de materia orgánica adicionados, incluso se ha encontrado que la respiración es más alta en los tratamientos con respecto al control después de 2 semanas de incubación, también se ha reportado que en corto tiempo se produce un efecto positivo en la respiración basal al enmendar con biosólido.

La figura 4 muestra la respiración del suelo 7 meses después de la incorporación del biosólido y fertilizante. Los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas ($p>0.05$).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

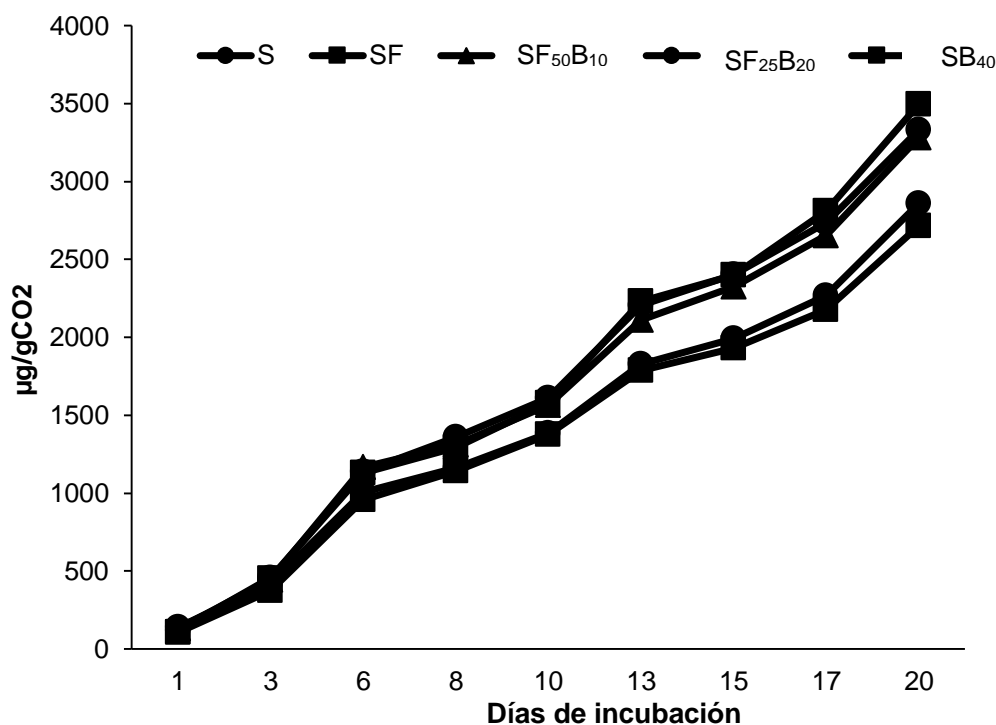


Figura 4. Mineralización de C en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹) después de 7 meses de la aplicación del tratamiento.

Torri y Lavado (2002), mencionan que 60 días después de la incorporación de enmiendas orgánicas el contenido de C disminuye rápidamente indicando la existencia de una elevada proporción de compuestos orgánicos fácilmente degradables, incluso se ha hallado que después de 8 semanas de incubación la respiración de los tratamientos no difiere del control tal y como sucedió 7 meses después de la incorporación del biosólido (Lopes, 2001; Pedra, 2007; Mardomingo *et al.*, 2013).

5.1.4. Coeficiente metabólico (qCO_2)

La tabla 3 muestra los valores de qCO_2 obtenidos después de 10 días y 7 meses de la incorporación de la mezcla biosólido-fertilizante. Tras 10 días de haber incorporado la enmienda, los valores de qCO_2 incrementaron con la adición de

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

biosólidos respecto a S y SF. Sin embargo, después de 7 meses dicho valor fue menor respecto al suelo (control, S).

Tabla 3. Propiedades bioquímicas de un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días y 7 meses de la aplicación del tratamiento.

Tratamientos	Carbono de la biomasa microbiana ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Respiración del suelo ($\mu\text{g CO}_2/\text{g suelo}$)	$q\text{CO}_2$ (μg)	Carbono de la biomasa microbiana ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Respiración del suelo ($\mu\text{g CO}_2/\text{g suelo}$)	$q\text{CO}_2$ (μg)
S	895.7 \pm 71.4 ^a	2628.0 \pm 102.7 ^c	1.67	265.4 \pm 40.2 ^b	2858.3 \pm 202.6 ^a	6.12
SF	879.0 \pm 69.7 ^a	2995.5 \pm 174.4 ^c	1.94	328.0 \pm 37.2 ^b	2716.2 \pm 156.5 ^a	4.71
SF ₅₀ B ₁₀	924.3 \pm 80.0 ^a	3302.3 \pm 137.0 ^c	2.03	348.2 \pm 66.8 ^b	3282.0 \pm 276.7 ^a	5.36
SF ₂₅ B ₂₀	1029.9 \pm 129.5 ^a	4376.3 \pm 342.3 ^b	2.41	388.2 \pm 60.1 ^{ab}	3331.5 \pm 278.3 ^a	4.88
SB ₄₀	1059.1 \pm 160.7 ^a	6564.7 \pm 306.1 ^a	3.52	626.9 \pm 160.0 ^a	3495.2 \pm 183.3 ^a	3.17

Promedio \pm error estándar; letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD ($p < 0.05$) en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).

Se ha reportado que cuando se presenta una elevada mineralización de carbono con un $q\text{CO}_2$ bajo (tal y como se obtuvieron los resultados de respiración basal y carbono de la biomasa microbiana) el balance de la materia orgánica del suelo será positivo. Pues una alta mineralización de carbono junto con un $q\text{CO}_2$ bajo en suelos enmendados con enmiendas orgánicas sugiere el aumento en la mineralización del C del suelo lo que seguirá conduciendo a una acumulación de materia orgánica (Tian *et al.*, 2013).

Tarrason y colaboradores (2010) indicaron que la presencia de materia orgánica menos estable puede incrementar los valores del coeficiente metabólico.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

5.1.5. Actividad enzimática de la catalasa

Diferencias significativas en la catalasa fueron encontradas en SB₄₀ en comparación con los demás tratamientos 10 días después de la incorporación de la enmienda ($p < 0.05$). Después de 7 meses de la incorporación de la mezcla biosólido-fertilizante no se presentaron diferencias significativas en ninguno de los tratamientos ($p > 0.05$) (Tabla 4).

Tabla 4. Catalasa de un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días y 7 meses de la aplicación del tratamiento.

Tratamiento	Catalasa (moles H ₂ O ₂ consumido g ⁻¹ h ⁻¹)	
	10 días	7 meses
S	0.28 ± 0.05 ^b	0.48 ± 0.03 ^a
SF	0.25 ± 0.04 ^b	0.41 ± 0.04 ^a
SF₅₀B₁₀	0.32 ± 0.07 ^b	0.45 ± 0.03 ^a
SF₂₅B₂₀	0.32 ± 0.05 ^b	0.36 ± 0.05 ^a
SB₄₀	0.70 ± 0.10 ^a	0.51 ± 0.03 ^a

Promedio ± error estándar; letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD ($p < 0.05$) en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).

La adición del biosólido sin fertilizante influyó significativamente en la actividad de la catalasa, SB₄₀ presentó el valor más elevado 10 días después de su adición. Se ha reportado que cuando se tiene poca actividad de la catalasa se puede deber a la presencia de compuestos que inhiben la actividad microbiana (Pascual *et al.*, 1998).

Después de 7 meses de la aplicación del tratamiento no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

De manera general la actividad de la catalasa aumentó con el tiempo, de manera que a los 7 meses los valores fueron más altos respecto a 10 días. Se ha reportado que la actividad aumenta significativamente 30 días después debido a la activación de organismos aerobios causada por la alta carga orgánica de los materiales orgánicos, encontrándose una tendencia de incremento (Pascual *et al.*, 1998; Mardomingo *et al.*, 2013).

5.2. Estrés oxidativo

La capacidad antioxidante se evaluó con el objeto de determinar el grado de estrés oxidativo que tuvieron las plantas de albahaca a causa de la incorporación de cada uno de los tratamientos ya mencionados.

5.2.1. Contenido fenólico total

La figura 5 muestra el contenido fenólico total de la albahaca (*Ocimum basilicum*) cultivada en un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico. Se presentaron diferencias significativas entre S y SF; además, en estos tratamientos fue donde se tuvo un mayor contenido de fenoles a diferencia de los tratamientos enmendados con biosólido y fertilizante ($p < 0.05$).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

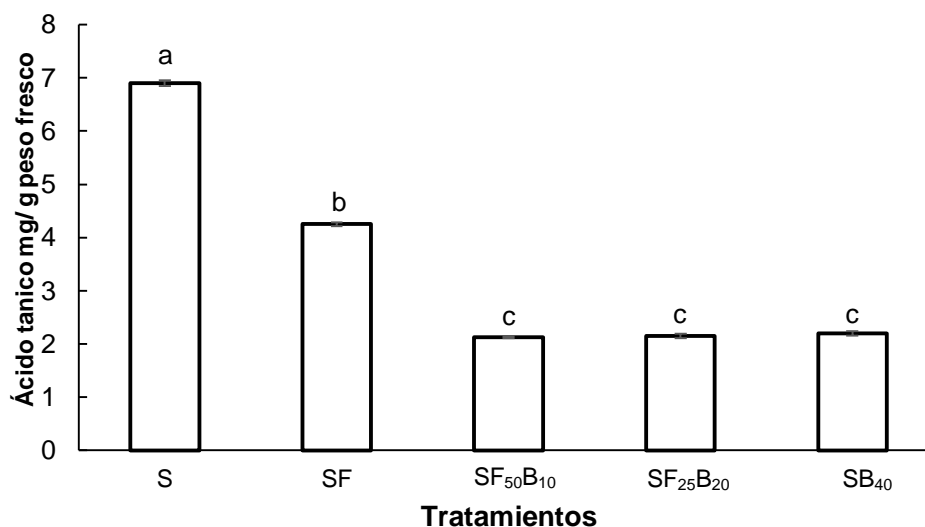


Figura 5. Compuestos fenólicos totales en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹). Promedio ± error estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD (p<0.05).

Investigaciones previas han mostrado que la albahaca contiene altas concentraciones de fenoles, los cuales se asocian a su potente capacidad antioxidante y como quelantes de metales, sin embargo, también se ha encontrado que la concentración de estos compuestos se ve influenciada por factores genéticos y ambientales (cultivo, iluminación y temperatura, radiación solar etc) (Nguyen *et al.*, 2010; Sgherri *et al.*, 2010; Murugan *et al.*, 2013; Szymanowska *et al.*, 2015).

En general, una planta con mayor contenido de compuestos fenólicos totales presenta una mayor actividad antioxidante, sin embargo, se puede observar que algunas plantas presentan una actividad antioxidante superior a lo esperado, o por el contrario, una baja actividad que no se correlaciona con el contenido de compuestos fenólicos, lo que pudo haber influido en la disminución que se tuvo en los tratamientos SF₅₀B₁₀, SF₂₅B₂₀ y SB₄₀. Esto es indicativo de que la capacidad antioxidante de una planta se debe al efecto combinado de diversos factores, como puede ser la presencia de otro tipo de metabolitos antioxidantes, o bien, una actividad, pro-oxidativa que se contrapone al potencial antioxidante. Cabe

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

mencionar que la importancia de los compuestos fenólicos se debe su capacidad para captar radicales libres, por lo tanto, contribuyen a la capacidad antioxidante de manera determinante (Gutiérrez *et al.*, 2008; Morillas-Ruíz y Delgado-Alarcón, 2012).

Michalak (2006), informó un aumento de fenoles correlacionados con el incremento de la actividad de las enzimas implicadas en el metabolismo de estos antioxidantes, lo que sugiere la síntesis de novo de compuestos fenólicos bajo estrés por metales pesados. Esto sugiere que los biosólidos usados no afectan el contenido de fenoles ya que el contenido de metal pesado es adecuado.

5.2.2. Antocianinas

Antocianinas presentó diferencias significativas en el tratamiento S con respecto a los tratamientos SF, SF₅₀B₁₀, SF₂₅B₂₀ y SB₄₀, siendo S el que contó con el contenido más elevado de estos antioxidantes ($p < 0.05$) (Figura 6).

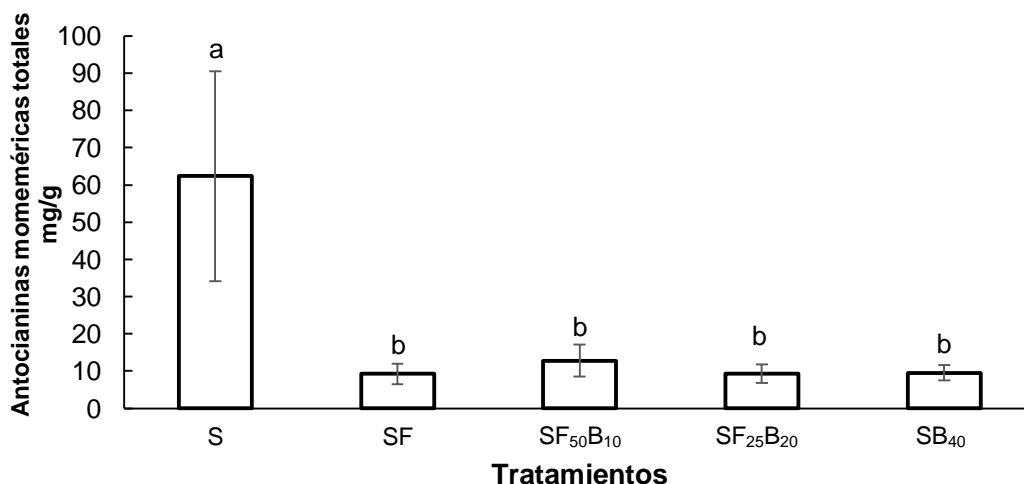


Figura 6. Antocianinas en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹). Promedio ± error estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD ($p < 0.05$).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

De acuerdo a los resultados obtenidos, se ha reportado que ciertas variedades de albahaca y en especial la púrpura tienen importantes niveles de antocianinas, las cuales son un tipo de fenol solubles en agua que se caracterizan por ser responsables de la pigmentación roja y azul en las plantas. Dentro de su papel antioxidante, las antocianinas tienen diversas funciones dentro de las plantas, que van de los mecanismos de protección y defensa a facilitar el crecimiento, desarrollo y la reproducción de la planta (Flanigan y Niemeyer, 2014).

Además de sus beneficios para las plantas, las antocianinas poseen propiedades antioxidantes que se han correlacionado con la prevención de enfermedades en humanos. Por ejemplo, afectan la función endotelial y su consumo en la dieta se asocia con efectos neuroprotectores, en particular con la disminución en el riesgo de la enfermedad de Parkinson (Flanigan y Niemeyer, 2014).

En relación a su capacidad antioxidante, se ha reportado que las antocianinas presentan cierta tolerancia a diferentes tipos de estrés ambiental, tales como, calor o frío, contaminación por metales pesados, desecación y heridas, sin embargo, en los resultados obtenidos se pudo observar que el tratamiento S que no tuvo ningún tipo de enmienda fue quién presentó la mayor capacidad a diferencia de los tratamientos restantes, los cuales fueron sometidos a tratamientos de fertilización orgánica e inorgánica, en estos últimos la capacidad antioxidante disminuyó lo que pudo ser a causa del tipo de enmienda incorporada o algún tipo de estrés como los mencionados antes o a condiciones de crecimiento como temperatura, exposición a la luz UV y a las deficiencias minerales. Incluso el método de cuantificación de estos antioxidantes es capaz de influir en su contenido pues se han encontrado variaciones en tres métodos diferentes para determinarlas los cuales han sido: espectrofotometría, método diferencial de pH y cromatografía líquida de alta resolución (Nguyen *et al.*, 2010; Flanigan y Niemeyer, 2014; Szymanowska *et al.*, 2015).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

5.2.3. Flavonoides

El contenido de flavonoides presentó diferencias significativas únicamente en el tratamiento S respecto a los tratamientos SF, SF₅₀B₁₀, SF₂₅B₂₀ y SB₄₀, siendo S quién presentó el contenido más elevado de este tipo de antioxidantes ($p < 0.05$) (Figura 7).

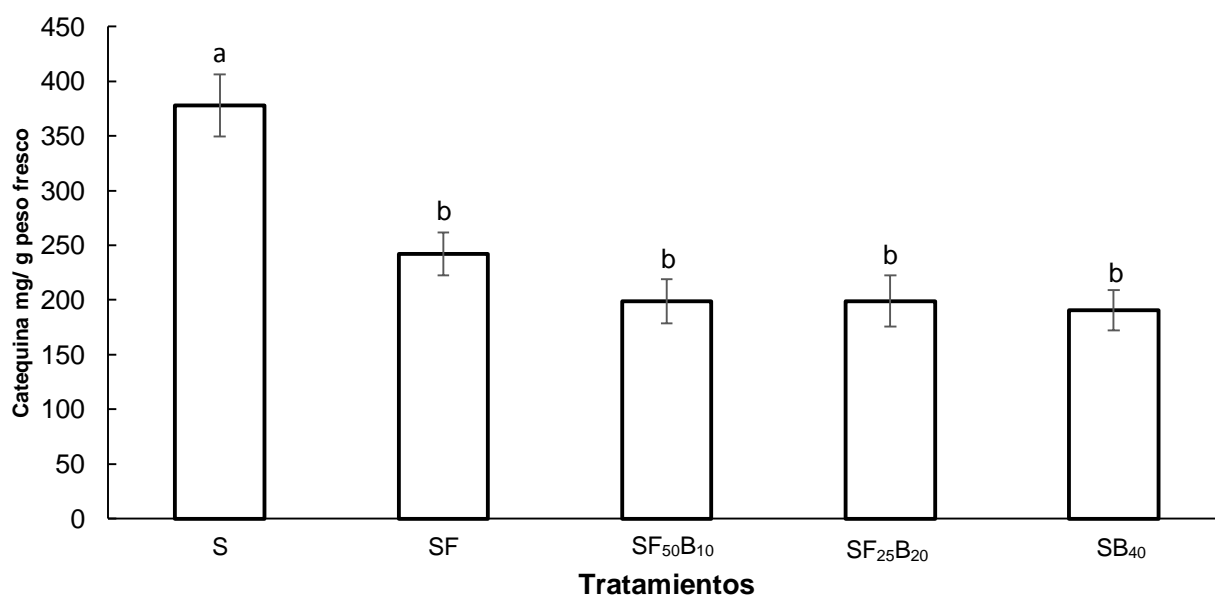


Figura 7. Contenido de flavonoides en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹). Promedio \pm error estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD ($p < 0.05$).

Se sabe que las plantas pertenecientes a la familia Lamiaceae tienen una fuerte capacidad antioxidante. La albahaca contiene compuestos fenólicos y flavonoides tales como ácido cinámico, ácido cafeico, ácido ferúlico y ácido sinápico. Estos compuestos fenólicos y flavonoides son antioxidantes fuertes captadores de radicales libres y quelantes de metales (Carlo *et al.*, 2013).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Los flavonoides son uno de los grupos más diversos y amplios de compuestos naturales y son probablemente los compuestos fenólicos naturales más importantes. Estos compuestos juegan un papel en la defensa de las plantas frente a agentes agresores externos. Entre estos agentes se puede mencionar la radiación UV de los rayos solares, los microorganismos tanto bacterias, como hongos e insectos y otros animales herbívoros, las otras plantas (efecto alelopático) y el entorno (ambiente agresivo). De hecho, el metabolismo fenólico se activa en las plantas a nivel de transcripción como una respuesta a diferentes condiciones de estrés tanto biótico como abiótico lo que pudo influir en los resultados obtenidos (Cartaya y Reynaldo, 2001; Yesiloglu y Sit, 2012).

Durante mucho tiempo se ha reconocido que algunas sustancias de origen natural en las plantas superiores que poseen actividad antioxidante son de naturaleza compleja, de manera general, los antioxidantes detienen el progreso de las reacciones en cadena presentes en los radicales libres, ayudando a prevenir el desarrollo de eventos patológicos. La determinación de la capacidad antioxidante en productos naturales está influenciada por muchos factores, y del mismo modo no hay ninguna metodología única que puede ser utilizado para reflejar todas las interacciones presentes en el proceso (Sgherri *et al.*, 2010; Jiménez *et al.*, 2015).

Antocianinas y flavonoides se caracterizan por ser fuertes antioxidantes, eliminadores de radicales libres y quelantes de metales (Shaban *et al.*, 2016), esto puede explicar el bajo contenido de flavonoides y antocianinas obtenidos en los tratamientos con biosólidos por lo tanto, la capacidad antioxidante de la albahaca no se ve afectada.

5.2.4. Actividad de las peroxidasas (POX)

La actividad de la peroxidasa (POX) presentó diferencias significativas en los tratamientos S y SB₄₀ respecto a los tratamientos SF, SF₅₀B₁₀ y SF₂₅B₂₀. Las

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

diferencias encontradas también corresponden a los tratamientos con la mayor actividad de POX ($p < 0.05$) (Figura 8).

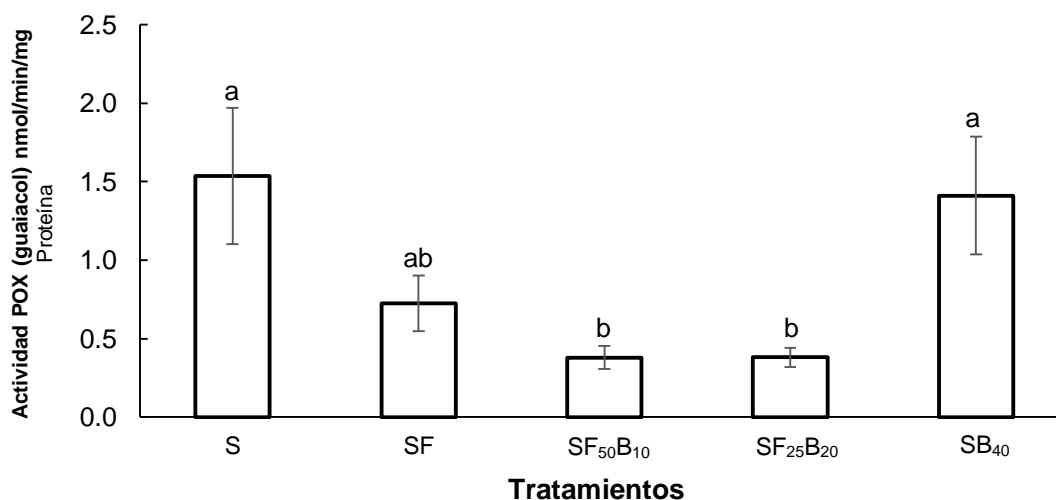


Figura 8. Actividad de POX en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹). Promedio \pm error estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD ($p < 0.05$).

Patel y colaboradores (2015), encontraron que la actividad de la peroxidasa en aceite esencial de albahaca incrementaba conforme se aumentaba la cantidad de lodo proveniente de la industria de la curtiduría, a pesar de que los biosólidos incorporados en el cultivo de la albahaca son de tipo municipal, estos sí pudieron haber influido en el aumento de la actividad de la enzima sobre todo en el tratamiento con la mayor dosis aplicada (SB₄₀), sin embargo lo anterior no aplica en el tratamiento S (control) pues este no fue acondicionado con ninguna enmienda y también se encontraron valores elevados de POX (1.41 guaiacol/nmol/min/mg proteína).

Sumado a lo anterior, se ha encontrado que el estrés aumenta el estado de oxidación de la célula, lo cual induce un incremento en la síntesis de antioxidantes

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

enzimáticos y no enzimáticos para contrarrestar los efectos de dicha oxidación, dentro de los enzimáticos tenemos a las enzimas POX (peroxidasa), CAT (catalasa), SOD (superóxido dismutasa) y glutatión S-transferasa. Por lo que el tratamiento con la mayor dosis (SB₄₀) pudo haber ocasionado cierto grado de estrés al aumentar la actividad de la peroxidasa, además se ha reportado que el aumento de las peroxidases y otros antioxidantes enzimáticos como catalasa y superóxido dismutasa en albahaca se ha considerado como una respuesta de adaptación de las plantas a ambientes tóxicos (Mora-Herrera *et al.*, 2011; Patel *et al.*, 2015).

Asimismo la importancia de esta enzima (POX) radica en su participación en varias funciones fisiológicas de las plantas tales como: lignificación, entrecruzamiento de polisacáridos de la pared celular, oxidación del ácido indolacético, regulación de la elongación celular y oxidación de fenoles ligados al crecimiento (Mora-Herrera *et al.*, 2011).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

5.2.5. DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

El antioxidante DPPH presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en los tratamientos S y SF respecto a SF₅₀B₁₀, SF₂₅B₂₀ y SB₄₀, en donde se encontraron las diferencias significativas se tuvieron los valores más elevados de DPPH.

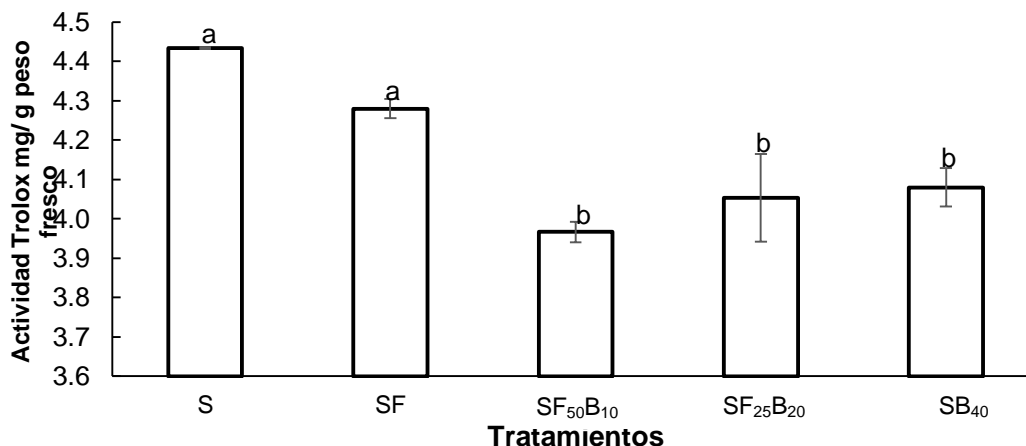


Figura 9. DPPH en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en un suelo con los tratamientos S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹). Promedio \pm error estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas, LSD ($p < 0.05$).

Las diferencias en la actividad antioxidante que se presentaron en los tratamientos pueden ser explicadas por la desigualdad en el contenido de linalool y eugenol, como dos compuestos principales responsables de la actividad antioxidante que forman parte del aceite esencial de la albahaca, en especial, linalool presenta diversas actividades biológicas antimicrobianas, antiinflamatorias y antioxidantes, siendo un compuesto principal de la síntesis de vitaminas A y E (antioxidantes no enzimáticos), estas son responsables de la capacidad antioxidante del extracto de hoja, que fue de donde se determinó cada uno de los antioxidantes (Sgherri *et al.*, 2010; Filip IN PRESS).

También, se ha encontrado que los constituyentes principales activos en el aceite esencial de la albahaca son afectados por estrés hídrico, estrés salino, procesos de

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

extracción, prácticas de cultivo, efecto en la nutrición y productividad de la albahaca y en la composición del aceite esencial de la planta, respecto a la disminución presentada en SF₅₀B₁₀, SF₂₅B₂₀ y SB₄₀, se ha reportado que bajos valores de IC₅₀ (DPPH) representan altas capacidades antioxidantes lo que se pudo deber al efecto por parte del biosólido, al generar cierto grado de estrés, disminuir el valor de DPPH y aumentar la capacidad antioxidante de la planta (Búfalo *et al.*, 2015; Hoffman *et al.*, 2015).

Ocimum basilicum (albahaca) es una de las hierbas más comunes que se consumen como especia y es una fuente rica en compuestos fenólicos, especialmente ácidos fenólicos (como el ácido rosmarínico, ácido chicórico, ácido vanílico, ácido p-cumárico, ácido benzoico, hidroxibenzoico, ácido siríngico, ácido ferúlico, protocatéquico ácido, ácido cafeico y ácido gentísico), flavonoles-glucósidos y antocianinas los cuales se encuentran en altas concentraciones en numerosas variedades de esta planta y contribuyen decisivamente a sus propiedades antioxidantes conocidas, por lo que ha sido considerada como antioxidante natural debido a su aceptación como una de las especies con una fuerte capacidad antioxidante (Ben-Ali *et al.*, 2014; Flanigan y Niemeyer, 2014; Złotek *et al.*, 2015).

Es conocido que las plantas generan más EROS (Especies Reactivas de Oxígeno) cuando se exponen a condiciones de estrés tales como: temperaturas subóptimas, intensidad de luz, sales e infecciones por patógenos, sin embargo, los compuestos antioxidantes son capaces de reducir el estrés oxidativo producido por las EROS, pero también es importante mencionar que la concentración de estos antioxidantes suele verse afectada o influenciada por factores bióticos (infecciones por patógenos) y abióticos (temperatura, luz, riego, deficiencias minerales) del medio (Hernández-Sánchez, 2002; García-Sánchez *et al.*, 2012; Jiménez *et al.*, 2015).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

De manera general y con toda la información antes expuesta se pudo observar en los resultados obtenidos que la capacidad antioxidante de antocianinas, DPPH, fenoles y flavonoides tuvo valores bajos (excepto POX), lo que se puede atribuir a un estrés bajo, debido a que se ha encontrado que cuando se presenta estrés se aumenta el contenido de estos antioxidantes, ya que se ha reportado que en general una planta con mayor contenido de compuestos fenólicos totales (antocianinas, fenoles, flavonoides) presenta una mayor actividad antioxidante, por lo que el biosólido no tuvo un efecto significativo en el estrés de la planta (Gutiérrez *et al.*, 2008; Salama *et al.*, 2015).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

6. Conclusiones

La adición del biosólido sin fertilizante (SB₄₀) incrementó la mineralización de C y N 10 días después de la aplicación de los tratamientos.

La incorporación del biosólido aumentó el coeficiente metabólico (qCO_2) 7 meses después de su adición.

La actividad de la catalasa incrementó 7 meses después de la aplicación de los biosólidos en todos los tratamientos excepto en SB₄₀.

La capacidad antioxidante de compuestos fenólicos, DPPH, flavonoides y antocianinas disminuyó ante la presencia del biosólido sin fertilizante (SB₄₀), lo que podría ser indicativo de una reducción en el estrés oxidativo de la albahaca (*Ocimum basilicum* L.).

7. Bibliografía

Abe, N; Murata, T. y Novel, H. 1998. 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl-radical scavengers, bisorbicillin and demethyltrichodimerol, from a fungus. *Bioscience Biotechnology Biochemistry* 62: 661-662.

Akula, U. y Odhav, V. 2008. *In vitro* 5-Lipoxygenase inhibition of polyphenolic antioxidants from undomesticated plants of South Africa. *Journal of Medicinal Plants Research* 2: 207-212.

Akumu, C; Johnson, J; Etheridge, D; Uhlig, P; Woods, M; Pitt, D. y Mc Murray, S. 2015. GIS-fuzzy logic based approach in modeling soil texture: Using parts of the Clay Belt and Hornepayne region in Ontario Canada as a case study. *Geoderma* 239-240: 13-24.

Albiach, R; Canet, R; Pomares, F y Ingelmo, F. 2001. Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years. *Bioresource Technology* 77: 109-114.

Alia, I; Soto, R; Colinas, M. y Martínez, M. 2005. Análisis preeliminar de carotenoides y compuestos fenólicos en frutos de zapote mamey (*Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11: 225-231.

Alvaro, J; Morell, F; Madejon, E; Lampurlanes, J; Arrue, J. y Cantero, C. 2013. Soil biochemical properties in a semiarid Mediterranean agroecosystem as affected by long-term tillage and N fertilization. *Soil & Tillage Research* 129: 69-74.

Anderson, M; Prasad, T. y Stewart, C. 1995. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings. *Plant Physiology* 109:1247-1257.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Andrés, P; Mateos, E; Tarrasón, D; Cabrera, C. y Figuerola, B. 2011. Effects of digested, composted, and thermally dried sewage sludge on soil microbiota and mesofauna. *Applied Soil Ecology* 48: 236-242.

Antolín, M; Pascual, I; García, C; Polo, A. y Sánchez, M. 2005. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 94: 224-237.

Aran, D; Maul, A. y Masfaraud, J. 2008. A spectrophotometric measurement of soil cation exchange capacity based on cobaltihexamine chloride absorbance. *Geoscience* 340: 865-871.

Barron-Yanez, R; Garcia, M; Soto, M; Colinas, T. y Kite, G. 2011. Flavonoides y actividad antioxidante de *Calia secundiflora* (Ort.) Yakovlev. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34: 151-157.

Bautista, A; Etchevers, J; Del Castillo R. y Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.

Bautista, M; Gómez, Y. y Balderas, J. 2013. Determinación de la actividad biológica *in vitro* del romero (*Rosmarinus officinales*) y la chaya (*Jatropha ureas*). XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Chetumal, México.

Behera, S; Singh, M; Singh, K. y Todwal, S. 2011. Distribution variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. *Geoderma* 162: 242-250.

Bela, K; Horváth, E; Gallé, A; Szabados, L; Tairi, I. y Csiszár, J. 2015. Plant glutathione peroxidases: Emerging role of the antioxidant enzymes in plant development and stress responses. *Journal of Plant Physiology* 176: 192-201.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Ben-Ali, M; Dhouib, K; Damak, M y Allouche, N. 2014. Stabilization of sunflower oil during accelerated storage: use of basil extract as a potential alternative to synthetic antioxidants. *International Journal of Food Properties*, 17:1547–1559.

Bernhardt, B; Fazekas, G; Ladányi, M; Inotai, K; Zámboi-Németh, E; Bernáth, J. y Szabó K. 2014. Morphological-, chemical- and RAPD-PCR evaluation of eight different *Ocimum basilicum* L. gene bank accessions. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* 1:23-29.

Briseño, S; Aguilar, M. y Villegas, J. 2013. El cultivo de la albahaca. Edit. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México. 33 p.

Bora, K; Arora, S. y Shri, R. 2011. Role of *Ocimum basilicum* L. in prevention of ischemia and reperfusion-induced cerebral damage, and motor dysfunctions in mice brain. *Journal of Ethnopharmacology* 137: 1360– 1365.

Bourioug, M; Alaoui-Sossé, L; Laffray, X; Raouf, N; Benbrahim, M; Badot, P. y Alaoui-Sossé, B. 2014. Evaluation of Sewage Sludge Effects on Soil Properties, Plant Growth, Mineral Nutrition State, and Heavy Metal Distribution in European Larch Seedlings (*Larix decidua*). *Arab J Sci Eng*.

Bufalo, J; Cantrell, C; Astatkie, T; Zheljaskov, V; Gawde, A y Fernandes, C. 2015. Organic versus conventional fertilization effects on sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) growth in a greenhouse system. *Industrial Crops and Products* 74: 249–254.

Carlo, N; Santagata, S; Bona, S y Sambo, P. 2013. Influence of cut number on qualitative traits in different cultivars of sweet basil. *Industrial Crops and Products* 44: 465– 472.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Cartaya, O y Reynaldo, I. 2001. Flavonoides: Características químicas y aplicaciones. *Cultivos Tropicales* 22: 5-14.

Castro, J; Baquero, L. y Narváez, C. 2006. Catalasa, peroxidasa y polifenoloxidasas de pitaya amarilla (*Acanthocereus pitajaya*). *Revista Colombiana de Química* 35: 91-101.

Celis, J; Machuca, A; Sandoval, M. y Morales, P. 2011. Biological activity in a degraded alfisol amended with sewage sludge. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71:164-172.

Cerón, L. y Melgarejo, L. 2005. Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana* 10: 5-8.

Chang, C; Yang, M; Wen, H. y Chern, J. 2002 Estimation of total flavonoids content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal Food Drug Analysis* 10:176-182.

Chen, Y; Day, S, Wick, A; Strahm, B; Wiseman, P y Daniels, W. 2013. Changes in soil carbon pools and microbial biomass from urban land development and subsequent post-development soil rehabilitation. *Soil Biology & Biochemistry* 66:38-44.

Cheng, Y; Wang, J; Mary, B; Zhang, J; Cai, Z. y Chang, S. 2013. Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada. *Soil Biology & Biochemistry* 57:848-857.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Costa, J; Borges, J. y Pires, L. 2014. Effect of collimator size and absorber thickness on soil bulk density evaluation by gamma-ray attenuation. *Radiation Physics and Chemistry* 95: 333-335.

Creamer, R; Schulte, R; Stone, D; Gal, A; Krogh, P; Lo Papa, G; Murray, P; Pérès, G; Foerster, P; Rutgers, M; Sousa, J. y Winding, A. 2014. Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter. *Ecological Indicators* 36: 409-418.

Da Silva, P; Campos, R; Teixeira, H y Alexandre, M. 2013. The phenolic compounds and the antioxidant potential of infusion of herbs from the Brazilian Amazonian región. *Food Research International* 53: 875–881.

Davies, B.E. 1974. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *The Soil Science Society of America* 38:150-151.

Dimkpa, C; Merten, D; Svatos, A; Büchel, G y Kothe, E. 2009. Metal-induced oxidative stress impacting plant growth in contaminated soil is alleviated by microbial siderophores. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 154–162.

Dohrmann, R. 2006. Cation exchange capacity methodology: An efficient model for the detection of incorrect cation exchange capacity and exchangeable cation results. *Applied Clay Science* 34: 31-37.

Ekren, S; Sönmez, C; Ozcakil, E; Yasemin S. Kukul, Y; Bayram, E. y Gürgülü, H. 2012. The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum* L.). *Agricultural Water Management* 109:155-161.

Fadda, A; Sierra, M; Molinu, M; Azara, E; Barberis, A. y Sanna, D. 2014. Reaction time and DPPH concentration influence antioxidant activity and kinetic parameters

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

of bioactive molecules and plant extracts in the reaction with the DPPH radical. *Journal of Food Composition and Analysis* 35: 112-119.

Fekiacova, Z; Cornu, S y Pichat, S. 2015. Tracing contamination sources in soils with Cu and Zn isotopic ratios. *Science of the Total Environment* 517: 96-105.

Fernández, L; Rojas, N; Roldán, T; Ramírez, M; Zegarra, H; Uribe, R; Reyes, R; Flores, D. y Arce, J. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Instituto Nacional de Ecología. México.

Fernández, J; Plaza, C; García, J. y Polo, A. 2009. Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge. *Applied Soil Ecology* 42:18-24.

Ferrara, C; Salvati, L. y Tombolini, I. 2014. An integrated evaluation of soil resource depletion from diachronic settlement maps and soil cartography in peri-urban Rome, Italy. *Geoderma* 232-234:394-405.

Filip, S; Vidovic, S; Adamovic, D. y Zekovic, Z. 2014. Fractionation of non-polar compounds of basil (*Ocimum basilicum* L.) by supercritical fluid extraction (SFE). *The Journal of Supercritical Fluids* 86: 85-90.

Filip, S; Vidović, S; Vladić, J; Pavlić, B; Adamović, D y Zeković, Z. IN PRESS. Chemical composition and antioxidant properties of *Ocimum basilicum* L. extracts obtained by supercritical carbon dioxide extraction: Drug exhausting method. *Supercritical fluids*.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Flanigan, P y Niemeyer, E. 2014. Effect of cultivar on phenolic levels, anthocyanin composition, and antioxidant properties in purple basil (*Ocimum basilicum* L.). *Food Chemistry* 164:518–526.

Friedman, S. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 45-70.

García-Sánchez, M; Garrido, I; Casimiro, I; Casero, P; Espinosa, F; García-Romera, I y Aranda, E. 2012. Defence response of tomato seedlings to oxidative stress induced by phenolic compounds from dry olive mill residue. *Chemosphere* 89: 708–716.

Giusti, M. y Wrolstad, R. 2001. Characterization and measurement of anthocyanins by UV–visible spectroscopy. In R.E. Wrolstad, T. E. Acree, H. An, E. A. Decker, M. H. Penner, D.S. Reid, S. J. Schwartz, C. F. Shoemaker, & P. Sporns (Eds.), *Current protocols in food analytical chemistry* (pp. F1.2.1–F1.2.13). New York: Wiley.

Gong, J; Wang, Y; Liu, M; Huang, Y; Yan, X; Zhang, Z. y Zhang, W. 2014. Effects of land use on soil respiration in the temperate steppe of Inner Mongolia, China. *Soil & Tillage Research* 144: 20-31.

Govindarajan, M; Sivakumar, R; Rajeswary, M. y Yogalakshmi, K. 2013. Chemical composition and larvicidal activity of essential oil from *Ocimum basilicum* (L.) against *Culex tritaeniorhynchus*, *Aedes albopictus* and *Anopheles subpictus* (Diptera: Culicidae). *Experimental Parasitology* 134: 7-11.

Gutiérrez, D; Ortiz, C y Mendoza, A. 2008. Medición de Fenoles y Actividad Antioxidante en Malezas Usadas para Alimentación Animal. Simposio de Metrología 2008 Santiago de Querétaro, México, 22 al 24 de Octubre.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Han, K; Sekikawa, M; Shimada, K; Hashimoto, M; Hashimoto, N; Noda, T; Tanaka, H. y Fukushima, M. 2006. Anthocyanin-rich purple potato flake extract has antioxidant capacity and improves antioxidant potential in rats. *British Journal of Nutrition* 96:1125-1133.

He, Y; DeSutter, T; Prunty, L; Hopkins, D; Jia, X. y Wysocki, D. 2012. Evaluation of 1:5 soil to water extract electrical conductivity methods. *Geoderma* 185-186: 12-17.

Hernández, T; Moral, R; Perez, A; Moreno, J; Perez, D. y García, C. 2002. Nitrogen mineralisation potential in calcareous soils amended with sewage sludge. *Bioresource Technology* 83: 213-219.

Hernández, E; Soto, M; Rodríguez, J y Colinas, T. 2002. Contenido de fenoles y actividad enzimática asociados con el daño provocado por cenicilla en hojas de durazno. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 153-159.

Hofmann, H; Nebehaj, E; Stefanovits-Bányai, E y Albert, L. 2015. Antioxidant capacity and total phenol content of beech (*Fagussylvatica* L.) bark extracts. *Industrial Crops and Products* 77: 375–381.

Hu, W; Shao, M; Wan, L. y Si, B. 2014. Spatial variability of soil electrical conductivity in a small watershed on the Loess Plateau of China. *Geoderma* 230-231: 212-220.

Huang, L; Lu, Y; Gao, X; Du, G; Ma, X; Liu, M; Guo, J y Chen, Y. 2013. Ammonium-induced oxidative stress on plant growth and antioxidative response of duckweed (*Lemna minor* L.). *Ecological Engineering* 58: 355– 362.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Jalali, M. 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma* 135: 63-71.

Jiménez, P; Ortiz, O; Tarrasón, D; Ginovart, M. y Bonmatí, M. 2007. Effect of differently post-treated dewatered sewage sludge on β -glucosidase activity, microbial biomass carbon, basal respiration and carbohydrates contents of soils from limestone quarries. *Biology and Fertility of Soils* 44: 393-398.

Jurado, P; Arredondo, T; Flores, E; Olalde, V. y Frías, J. 2007. Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrientes del suelo y la producción de forraje en pastizales semiáridos. *TERRA Latinoamericana* 25: 211-218.

Jiménez, N; Carrillo-Hormaza, L; Pujol, A; Álzate, F; Osorio, E y Lara-Guzman, O. 2015. Antioxidant capacity and phenolic content of commonly used anti-inflammatory medicinal plants in Colombia. *Industrial Crops and Products* 70: 272–279.

Kızılkaya, R y Bayraklı, B. 2005. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology* 30: 192–202.

Kukumägi, M; Ostonen, I; Kupper, P; Truu, M; Tulva, I; Varik, M; Aosaar, J; Sõber, J. y Lõhmus, K. 2014. The effects of elevated atmospheric humidity on soil respiration components in a young silver birch forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 194: 167-174.

Kuskoski, M; Asuero, A; Troncoso, A; Mancini-filho, J. y Fett, R. 2005. Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*, 25: 726-732.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Lachman, J. y Hamouz, K. 2005. Red and purple coloured potatoes as a significant antioxidant source in human nutrition – a review. *Plant Soil Environmental* 51: 477-482.

Latore, A; Kumar, O; Singh y Gupta, A. 2014. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. *Ecological Engineering* 69: 17-24.

Liu, M; Li, Y; Zhang, W. y Wang, Y. 2013. Assessment and Spatial distribution of zinc pollution in agricultural soils of Chaoyang, China. *Procedia Environmental Sciences* 18: 283-289.

Luce, M; Ziadi, N; Zebarth, B; Grant, C; Tremblay, G. y Gregorich, E. 2014. Rapid determination of soil organic matter quality indicators using visible near infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma* 232-234: 449-458.

Luters, A. y Salazar, J. 2000. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA). EUA.

Mahapatra, K; Ramteke, D; Paliwal, L. y Naik, N. 2013. Agronomic application of food processing industrial sludge to improve soil quality and crop productivity. *Geoderma* 207-208: 205-211.

Mao, Y; Sang, S; Liu, S. y Jia, J. 2014. Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China. *Comptes Rendus Biologies* 337: 332-337.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Marando, G; Jimenez, P; Hereter, A; Julia, M; Ginovart, M. y Bonmati, M. 2011. Effects of thermally dried and composted sewage sludges on the fertility of residual soils from limestone quarries. *Applied Soil Ecology* 49: 234-241.

Mattana, S; Petrovicová, B; Landi, L; Gelsomino, A; Cortés, P; Ortiz, O y Renella, G. 2014. Sewage sludge processing determines its impact on soil microbial community structure and function. *Applied Soil Ecology* 75: 150– 161.

Mondal, S; Singh, R; Patra, A. y Dwivedi, B. 2015. Changes in soil quality in response to short-term application of municipal sewage sludge in a typical haplustept under cowpea-wheat cropping system. *Environmental Nanotechnology Monitoring and Management*. IN PRESS.

Mora-Herrera, M; Peralta-Velázquez, J; López-Delgado, H; García-Velasco, R y González-Díaz, J. 2011. Efecto del ácido ascórbico sobre crecimiento, pigmentos fotosintéticos y actividad peroxidasa en plantas de crisantemo. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 2: 73-81.

Mora, J. y Lázaro, R. 2014. Seasonal changes in bulk density under semiarid patchy vegetation: the soil beats. *Geoderma* 235-236: 30-38.

Morillas-Ruiz, J y Delgado-Alarcon J. 2012. Análisis nutricional de alimentos vegetales con diferentes orígenes: Evaluación de capacidad antioxidante y compuestos fenólicos totales. *Nutrición clínica y dietética hospitalaria* 32:8-20.

Motta, S. y Maggiore, T. 2013. Evaluation of nitrogen management in maize cultivation grows on soil amended with sewage sludge and urea. *European Journal Agronomy* 45: 59-67.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Murugan, S; Deepika, R; Reshma, A y Sathishkumar, R. 2013. Antioxidant perspective of selected medicinal herbs in India: A probable source for natural antioxidants. *Journal of Pharmacy Research* 7: 271 -274.

Naderi-Boldaji, M; Sharifi, A; Hemmat, A; Alimardani, R. y Keller, T. 2014. Feasibility study on the potential of electrical conductivity sensor Veris® 3100 for field mapping of topsoil strength. *Biosystems engineering* 126: 1-2.

Nannipieri, P. y Kassem, A. 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. EUA.

Nguyen,P; Kwee, H y Niemeyer, E. 2010. Potassium rate alters the antioxidant capacity and phenolic concentration of basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Food Chemistry* 123:1235–1241.

Nicolás, C; Kennedy, J; Hernández, T; García, C. y Six, J. 2014. Soil aggregation in a semiarid soil amended with composted and non-composted sewage sludge—A field experiment. *Geoderma* 219-220: 24-31.

Norma Oficial Mexicana 002-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Norma Oficial Mexicana 021-RECNAT-2001. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Oroian, M y Escriche, I. 2015. Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Research International* 74: 10–36.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Pahari, B; Chackraborty, S; Chaudhuri, S; Sengupta, B. y Sengupta P. 2012. Binding and antioxidant properties of therapeutically important plant flavonoids in biomembranes: Insights from spectroscopic and quantum chemical studies. *Chemistry and Physics of Lipids* 165: 488-496.

Patel, A; Pandey, V y Patra, D. 2015. Influence of tannery sludge on oil yield, metal uptake and antioxidant activities of *Ocimum basilicum* L. grown in two different soils. *Ecological Engineering* 83: 422–430.

Paul, G y Solaiman, A. 2004. Changes of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Upland Sugarcane Soil Amended with Different Organic Materials. *Communications in soil science and plant analysis* 35: 2433-2447.

Pavan, S; Bettiol, W. y Clementi, C. 2005. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. *Applied Soil Ecology* 30: 65-77.

Paz-Ferreiro, J; Gascó, G; Gutiérrez, B y Méndez, A. 2012. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biol Fertil Soils* 48:511–517.

Pedra, F; Polo, A; Ribeiro, A y Domingues, H. 2007. Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 1375–1382.

Porta, J; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003. Edafología: para la agricultura y medio ambiente. Ed. Mundi-prensa. 3ª edición. España.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Prolingheuer, N; Scharnagl, B; Graf, A; Vereecken, H. y Herbst, M. 2014. On the spatial variation of soil rhizospheric and heterotrophic respiration in a winter wheat stand. *Agricultural and Forest Meteorology* 195-196: 24-31.

Qi-yong, Y; Zhong-cheng, J; Wen-jun, L. y Hui, L. 2014. Prediction of soil organic matter in peak-cluster depression region using kriging and terrain indices. *Soil & Tillage Research* 144: 126-132.

Rivas, J; Baltasar, M; Moreno V. y Sánchez, L. 2007. Determinación de Actividad peroxidasa en extractos crudos de diferentes vegetales. XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Morelia, México.

Roig, N; Sierra, J; Martí, E; Nadal, M; Schuhmacher, M. y Domingo, J. 2012. Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158: 41-48.

Rubio-Wilhelmi, M; Sanchez-Rodriguez, E; Rosales, M; Begoña, B; Rios, J; Romero, L; Blumwald, E y Ruiz, J. 2011. Effect of cytokinins on oxidative stress in tobacco plants under nitrogen deficiency. *Environmental and Experimental Botany* 72: 167–173.

Ruiz, Norma; Rincón, F; Hernández, V; Figueroa, J y Loarca, G. 2008. Determinación de compuestos fenólicos y su actividad antioxidante en granos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 29-34.

Salama, Z; El Baz, F; Gaafar, A y Fathy, M. 2015. Antioxidant activities of phenolics, flavonoids and vitamin C in two cultivars of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) in responses to organic and bio-organic fertilizers. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 14: 91–99.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Salazar, I; Millar, D; Lara, V; Núñez, M; Parada, M; Alvear, M. y Baraona, J. 2012. Effects of the application of biosolids on some chemical, biological and physical properties in an Andisol from southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12: 441-450.

Sánchez-Monedero, M; Mondini, C; Nobili, M; Leita, L y Roig, A. 2004. Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter. *Waste Management* 24: 325–332.

Sciubba, L; Cavani, L; Negroni, A; Zanaroli, G; Fava, F; Ciavatta, C. y Marzadori, C. 2014. Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates. *Geoderma* 221-222: 40-49.

Sgherri, C; Cecconami, S; Pinzino, C; Navari-Izzo, F y Izzo, R. 2010. Levels of antioxidants and nutraceuticals in basil grown in hydroponics and soil. *Food Chemistry* 123: 416–422.

Sharif, S; Kasoju, N; Luthra, A; Singh, A; Sharanabasava, H; Sahu, A y Bora, U. 2008. Indian medicinal herbs as sources of antioxidants. *Food Research International* 41:1–15.

Sharma, A; Weindorf, D; Man, T; Abdalsatar, A; Aldabaa, A. y Chakraborty, S. 2014. Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH). *Geoderma* 232-234: 141-147.

Selivanovskaya, S; Latypova, V; Kiyamova, S. y Alimova, F. 2001. Use of microbial parameters to assess treatment methods of municipal sewage sludge applied to grey forest soils of Tatarstan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86: 145-153.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Selvaraj, S; Krishnaswamy, S; Devashya, V. y Sethuraman, S. 2015. Influence of membrane lipid composition on flavonoid-membrane interactions: Implications on their biological activity. *Progress in Lipid Research* 58: 1-13.

Sequeira, C; Wills, S; Seybold, C. y West, L. 2013. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma* 213: 64-73.

Silva, M; Barajas, M; Araujo, A; Araujo, F. y Melo, w.2014. Soil Microbial Biomass After Three-Year Consecutive Composted Tannery Sludge Amendment. *Pedosphere* 24: 469-475.

Sonmez, F. y Bozkurt, M. 2006. Lettuce grown on calcareous soils benefit from sewage sludge. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 56: 17-24.

Sooch, B; Singh, B. y Puri, M. 2014. Recent insights into microbial catalases: Isolation, production and purification, *Biotechnology Advantages*. IN PRESS

Stepniewska, Z; Wolinska, A. y Ziomek, J. 2009. Response of soil catalase activity to chromium contamination. *Journal of Environmental Sciences* 21: 1142-1147

St. Luce, M; Ziadi, N; Zebarth, B; Grant, C; Tremblay, G. and Gregorich, E. 2014. Rapid determination of soil organic matter quality indicators using visible near infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma* 232-234: 449-458.

Suuster, E; Ritz, C; Roostalu, H; Reintam, E; Kõlli, R. y Astover, A. 2011. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma* 163: 74-82.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Szymanowska, U; Złotek, U; Karas, M y Baraniak, B. 2015. Anti-inflammatory and antioxidative activity of anthocyanins from purple basil leaves induced by selected abiotic elicitors. *Food Chemistry* 172: 71–77.

Tarrasón, D; Ojeda, G; Ortiz, O. y Alcañiz, J. 2010. Effects of Different Types of Sludge on Soil Microbial Properties: A Field Experiment on Degraded Mediterranean Soils. *Pedosphere* 20: 681-691.

Telci, I; Bayram, E; Yılmaz, G. y Avci, B. 2006. Variability in essential oil composition of Turkish basils (*Ocimum basilicum* L.). *Biochemical Systematics and Ecology* 34: 489-497.

Tian, G; Franzluebbers, A; Granato, T; Cox, A. and Connor C. 2013. Stability of soil organic matter under long-term biosolids application. *Applied Soil Ecology* 64: 223-227.

Tognetti, C; Mazzarino, M. y Laos, F. 2008. Compost of municipal organic waste: Effects of different management practices on degradability and nutrient release capacity. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 2290-2296.

Utria, E; Reynaldo, I; Cabrera, J; Morales, D. y Goffe, S. 2008. Los biosólidos de aguas residuales urbanas aplicados con diferentes frecuencias en las propiedades químicas y microbiológicas del suelo, el rendimiento y la calidad de los frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill). *Cultivos tropicales* 29: 5-11.

Vance, E. D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An Extraction Method for Measuring Soil Microbial Biomass C. *Soil Biology Biochemistry* 19: 703-707.

Vargas, G; Soto, R. y González, M. 2002. Análisis preliminar de antocianinas en fruto de icaco (*Chrysobalanus icaco* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 261-264.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Wang, X; Chen, T; Ge, Y y Jia, Y. 2008. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. *Journal of Hazardous Materials* 160: 554–558.

Waterman, P. y Mole, S. 1994. Analysis of Phenolic Plant Metabolites. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 1-238.

Wen, L; Lei, P; Xiang, W; Yan, W. y Liu, S. 2014. Soil microbial biomass carbon and nitrogen in pure and mixed stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* differing in stand age. *Forest Ecology and Management* 328:150-158.

Wu, J; Huang, C; Tung, Y. y Chang, S. 2008. Online RP-HPLC-DPPH Screening Method for Detection of Radical-Scavenging Phytochemicals from Flowers of *Acacia confusa*. *Journal Agricultural and Food Chemistry* 56: 328-332.

Wu, H; Fang, J; Tang, L; Lu, P; Xu, H; Zhao, Y; Li, D; Zhang Y; Fu, M. y Yang, H. 2014. Quality evaluation of *Astragali radix* on DPPH radical scavevging and chemical analysis. *Chinese Herbal Medicines* 6: 282-289.

Xue, D. y Huang, X. 2013. The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties. *Chemosphere* 93: 583-589.

Yesiloglu, Y y Sit, L. 2012. Antioxidant properties of various solvent extracts from purple basil. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular. Spectroscopy* 95: 100–106.

Zhang, J; Guo, J; Chen, G. y Qian, W. 2005. Soil microbial biomass and its controls. *Journal of Forestry Research* 16:327-330.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Złotek, U; Mikulska, S; Nagajek, M y Swieca, M. 2015. The effect of different solvents and number of extraction steps on the polyphenol content and antioxidant capacity of basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) extracts. *Saudi Journal of Biological Sciences*.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Anexos

a)



b)



c)



Las imágenes muestran la germinación (a), el trasplante (b) y el crecimiento de la planta (c) utilizada en el experimento.

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Tabla 1. Mineralización de N en un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 10 días de la aplicación del tratamiento.

Tratamiento	N _{inorg}	NH ₄ ⁺		NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻
		(mg/Kg)		
S	2.75 ± 0.33 ^c	1.41 ± 0.16 ^c		1.34 ± 0.22 ^b
SF	3.63 ± 0.40 ^c	1.69 ± 0.52 ^c		1.94 ± 0.39 ^b
SF ₅₀ B ₁₀	12.54 ± 1.51 ^b	6.98 ± 0.53 ^c		5.53 ± 1.71 ^a
SF ₂₅ B ₂₀	16.74 ± 0.99 ^b	13.84 ± 1.64 ^b		2.90 ± 0.97 ^b
SB ₄₀	37.28 ± 2.91 ^a	33.53 ± 2.97 ^a		3.75 ± 0.44 ^{ab}

Promedio ± error estándar; letras diferentes denotan diferencias significativas (p<0.05) en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).

Tabla 2. Mineralización de N en un suelo acondicionado con biosólido y fertilizante inorgánico después de 7 meses de la aplicación del tratamiento.

Tratamiento	N _{inorg}	NH ₄ ⁺		NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻
		(mg/Kg)		
S	3.69 ± 0.14 ^a	2.19 ± 0.08 ^a		1.50 ± 0.21 ^a
SF	4.06 ± 0.60 ^a	2.29 ± 0.29 ^a		1.80 ± 0.32 ^a
SF ₅₀ B ₁₀	4.25 ± 0.67 ^a	2.83 ± 0.34 ^a		1.42 ± 0.35 ^a
SF ₂₅ B ₂₀	4.73 ± 0.47 ^a	3.10 ± 0.36 ^a		1.63 ± 0.37 ^a
SB ₄₀	4.58 ± 0.23 ^a	3.11 ± 0.35 ^a		1.47 ± 0.29 ^a

Promedio ± error estándar en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).

Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de un suelo y en el estrés oxidativo de plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.)

Tabla 3. Capacidad antioxidante de un cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) acondicionado con biosólido y fertilizante a diferentes dosis.

Tratamiento	POX Actividad POX (guaiacol) nmol/min/mg proteína	DPPH Actividad Trolox mg/g peso fresco	Antocianinas Antocianinas monoméricas totales mg/g	Compuestos fenólicos totales Ácido tánico mg/g peso fresco	Flavonoides Catequina mg/g peso fresco
S	1.54 ± 0.433 ^b	4.43± 0.002 ^b	62.35 ± 28.17 ^b	6.29 ± 0.05 ^c	377.83 ± 28.49 ^b
SF	0.73 ± 0.177 ^{ab}	4.28± 0.024 ^b	9.22 ± 2.81 ^a	4.25 ± 0.04 ^b	242.07 ± 19.80 ^a
SF₅₀B₁₀	0.38 ± 0.072 ^a	3.97 ± 0.026 ^a	12.79 ± 4.33 ^a	2.13± 0.02 ^a	198.93 ± 20.23 ^a
SF₂₅B₂₀	0.38 ± 0.063 ^a	4.05 ± 0.111 ^a	9.32 ± 2.46 ^a	2.15± 0.04 ^a	198.99 ± 23.27 ^a
SB₄₀	1.41 ± 0.375 ^b	4.08 ± 0.049 ^a	9.55 ± 2.11 ^a	2.20± 0.04 ^a	190.69 ± 18.32 ^a

Promedio ± error estándar; letras diferentes denotan diferencias significativas (p<0.05) en S, suelo (control); SF, suelo + fertilizante (N:P:K, 100:40:40); SF₅₀B₁₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 50:20:20) + biosólido (10 t ha⁻¹); SF₂₅B₂₀, suelo + fertilizante (N:P:K, 25:10:10) + biosólido (20 t ha⁻¹) y SB₄₀, suelo + biosólido (40 t ha⁻¹).