

Agricultural Use of Biosolids Generated in Wastewater Treatment of a Food Industry

Sandra Santacoloma-Londoño; María-Eugenia Buitrago-González;
Karen Colorado-Molina; Isabella Suárez-Pineda; Mónica-Andrea
Martínez-Martina; Luis-Carlos Villegas-Méndez

Citación: S. Santacoloma-Londoño, M.-E. Buitrago-González, K. Colorado-Molina, I. Suárez-Pineda, M.-A. Martínez-Martina, and L.-C. Villegas-Méndez, “Agricultural Use of Biosolids Generated in Wastewater Treatment of a Food Industry,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10666, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10666>

Recibido: Enero 28, 2020; **Aceptado:** Marzo 16, 2020;

Publicado: Marzo 28, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agricultural Use of Biosolids Generated in Wastewater Treatment of a Food Industry

Sandra Santacoloma-Londoño¹
María-Eugenia Buitrago-González²
Karen Colorado-Molina³
Isabella Suárez-Pineda⁴
Mónica-Andrea Martínez-Martina⁵
Luis-Carlos Villegas-Méndez⁶

Abstract

Biosolids generated as waste from a Wastewater Treatment Plant (WTP) are a pollution problem by the provision of large volumes in landfills and the waste of their potential as an agricultural input. The research conducted trials to analyze the agricultural use of biosolids in a food company's WTP, their effects on the germination and development of the vegetal plant species *Coriandrum sativum* were assessed through trials that mixed different amounts of biosolids, land soil and commercial fertilizer, and took into account: planting site characteristics, biosolid and *Coriandrum sativum*. Random block design was made to compare treatments under study and resulted in the combination of 50% biosolids with 50% land soil was the best test by germination, height, mass and length of the roots of the plant studied. In the evaluation of results, the behavior of dependent variables was analyzed:

¹ M. Sc. Unidad Central del Valle del Cauca (Tuluá-Valle del Cauca, Colombia). ssantacoloma@uceva.edu.co. ORCID: [0000-0002-7997-3512](https://orcid.org/0000-0002-7997-3512).

² M. Sc. Unidad Central del Valle del Cauca (Tuluá-Valle del Cauca, Colombia). mbuitrago@uceva.edu.co. ORCID: [0000-0002-3242-9421](https://orcid.org/0000-0002-3242-9421).

³ Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (Tuluá-Valle del Cauca, Colombia). ORCID: [0000-0001-9660-3743](https://orcid.org/0000-0001-9660-3743).

⁴ Eduambiental S.A.S (Palmira-Valle del Cauca, Colombia). ORCID: [0000-0002-5551-8742](https://orcid.org/0000-0002-5551-8742).

⁵ Ph. D. (c) Unidad Central del Valle del Cauca (Tuluá-Valle del Cauca, Colombia). mamartinez@uceva.edu.co. ORCID: [0000-0003-4545-4615](https://orcid.org/0000-0003-4545-4615).

⁶ M. Sc. Unidad Central del Valle del Cauca (Tuluá-Valle del Cauca, Colombia). lvillegas@uceva.edu.co. ORCID: [0000-0002-5423-6444](https://orcid.org/0000-0002-5423-6444).

germination, height, mass and length with respect to the four test types with their respective repetitions using ANOVA and Fisher's significant minimum difference (LSD) to determine the effect the biosolid had on the plant and to know the optimal dose for its development. The germination rate (GR) was also determined in the trials, and 98.3% was found for the best treatment indicating that the substrate does not contain phytotoxic elements.

Keywords: biosolid; block design; *Coriandrum sativum*; germination; organic fertilizer; wastewater.

Uso agrícola de biosólidos generados en el tratamiento de agua residual de una industria de alimentos

Resumen

Los biosólidos generados como residuo de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son un problema de contaminación por la disposición de grandes volúmenes en los rellenos sanitarios y el desperdicio de su potencial como insumo agrícola. En la investigación se realizaron ensayos para analizar el uso agrícola de los biosólidos de la PTAR de una empresa de alimentos; se evaluaron efectos en la germinación y desarrollo de la especie vegetal *Coriandrum sativum* mediante ensayos que mezclaron diferentes cantidades de biosólidos, suelo del terreno y fertilizante comercial, y se tuvieron en cuenta: características del lugar de siembra, del biosólido y de *Coriandrum sativum*. Se diseñaron bloques al azar para comparar los tratamientos bajo estudio y se obtuvo como resultado que la combinación de 50% biosólidos con 50% suelo del terreno fue el mejor ensayo por germinación, altura, masa y longitud de las raíces de la planta estudiada. En la evaluación de resultados se analizó el comportamiento de las variables dependientes: germinación, altura, masa y longitud, con respecto a los cuatro tipos de ensayo con sus respectivas repeticiones mediante ANOVA y diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para determinar el efecto que tuvo el biosólido sobre la planta y conocer la dosis óptima para su desarrollo. También se determinó el índice de germinación (IG) en los ensayos, y se encontró para el mejor tratamiento 98.3% que indica que el sustrato no contiene elementos fitotóxicos.

Palabras clave: agua residual; biosólido; *Coriandrum sativum*; diseño de bloques; fertilizante orgánico; germinación.

Uso agrícola de biosólidos gerados no tratamento de água residual de uma indústria de alimentos

Resumo

Os biosólidos gerados como resíduo de uma Planta de Tratamento de Águas Residuais (PTAR) são um problema de contaminação pela disposição de grandes volumes nos aterros sanitários e o desperdício de seu potencial como insumo agrícola. Na pesquisa realizaram-se ensaios para analisar o uso agrícola dos biosólidos da PTAR de uma empresa de alimentos; avaliaram-se efeitos na germinação e desenvolvimento da espécie vegetal *Coriandrum sativum* mediante ensaios que misturaram diferentes quantidades de biosólidos, solo do terreno e fertilizante comercial, e levaram-se em conta: características do lugar de plantio, do biosólido e de *Coriandrum sativum*. Desenharam-se blocos aleatoriamente para comparar os tratamentos sob estudo e obteve-se como resultado que a combinação de 50% biosólidos com 50% solo do terreno foi o melhor ensaio por germinação, altura, massa e longitude das raízes da planta estudada. Na avaliação de resultados analisou-se o comportamento das variáveis dependentes: germinação, altura, massa e longitude, com respeito aos quatro tipos de ensaio com suas respectivas repetições mediante ANOVA e diferença mínima significativa (LSD) de Fisher para determinar o efeito que teve o biosólido sobre a planta e conhecer a dose ideal para seu desenvolvimento. Também se determinou o índice de germinação (IG) nos ensaios, e encontrou-se para o melhor tratamento 98,3% que indica que o substrato não contém elementos fitotóxicos.

Palavras chave: água residual; biosólido; *Coriandrum sativum*; desenho de blocos; fertilizante orgânico; germinação.

I. INTRODUCCIÓN

Cualquier actividad humana que requiere de agua genera residuos líquidos conocidos como aguas residuales, las cuales se clasifican de acuerdo a su origen en industrial, agrícola-ganadera y doméstica. Estas aguas residuales deben de ser tratadas para poder reincorporarse parcial o totalmente [1]. Dicho tratamiento genera subproductos conocidos como lodos residuales, que son el residuo sólido, semisólido o líquido [2]; su composición depende principalmente de las características del agua residual afluyente y del proceso de tratamiento utilizado en la planta que lo genera [3]. El volumen de lodo que se produce depende de las características del agua residual, del tratamiento previo, del tiempo de sedimentación, de la densidad de sólidos, del contenido de humedad, del tipo de equipo o método de remoción de lodos y de la frecuencia de remoción de los mismos [4-5]. El lodo puede contener un gran número de patógenos, dependiendo de los procesos de tratamiento utilizados [6]. Los agentes patógenos más importantes que existen en el agua y que se han encontrado en los lodos son las bacterias (como la Salmonella), los virus (principalmente enterovirus), los protozoos, los trematodos, los cestodos y los nematodos [7], que pueden propagar enfermedades si se tiene contacto directo con ellos.

En cuanto a la composición de los biosólidos, es una mezcla de compuestos orgánicos ricos en nitrógeno, y comúnmente presentan una relación baja de carbono a nitrógeno (C/N) [8]. Además, existen factores que influyen en su calidad como es el caso de los metales, principalmente: Zinc (Zn), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Cromo (Cr) [9]. Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación son características que generan preocupación; los metales están presentes en concentraciones bajas en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones altas son las que se encuentran principalmente en las aguas residuales industriales [10].

La preocupación actual en relación con los lodos, es intentar reducir su volumen y que los compuestos y elementos que contienen estén en concentraciones que permitan gestionarlos sin problemas ni impactos ambientales negativos [3, 11]. Las estimaciones de la tasa de producción mundial de biosólidos son del orden de 25 a 60 millones de toneladas de sólidos secos por año [12], con gran parte de esto

aplicado al suelo [13]. Debido a que los biosólidos son ricos en nutrientes, su aplicación en el suelo como fertilizante es una opción atractiva para el manejo sostenible de nutrientes del suelo y el secuestro de carbono [14].

En cuanto a la composición agronómica del lodo, se tienen en cuenta características asimilables a las habituales en un fertilizante comercial, siendo importantes los nutrientes y los oligoelementos necesarios para el correcto desarrollo de las plantas [15]. Los elementos que confieren estas propiedades son Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), algunos metales en determinadas cantidades (Zinc (Zn) y Cobre (Cu)) y compuestos orgánicos húmicos [16-17]. Desde un punto de vista práctico, el lodo es una fuente de carbono orgánico, N, P, así como de algunos compuestos inorgánicos tales como silicatos, aluminatos, etc., que pueden ser reciclados y utilizados para fines industriales o agrícolas [12].

El término biosólido es el producto resultante de la estabilización de los materiales orgánicos (lodos) generados en el tratamiento de aguas residuales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten ser reutilizados con restricción de acuerdo con la normativa de cada país. Un ejemplo de reutilización es su reincorporación al terreno para suministro de nutrientes y materia orgánica [18].

La calidad de los biosólidos depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales que pueden presentarse: agentes patógenos, metales pesados, nutrientes y materia orgánica, y contaminantes orgánicos [19]. El uso agrícola se ha convertido en el principal método de eliminación de los lodos de depuradora [20]. Las estadísticas muestran que entre 40% y 50% del lodo seco se utiliza en agricultura [21]. Aproximadamente entre el 7% y el 22% del lodo desecado producido por la Unión Europea y los Estados Unidos, respectivamente, se dirige a la incineración o secado térmico. Entre el 14 y el 17% de los lodos producidos se destina a vertedero [22], mientras que el 12% se utiliza en otras áreas como la forestal, silvicultura, recuperación de suelos, entre otros. El aprovechamiento del lodo como insumo para cultivo de hortalizas se convierte en la mejor opción, ya que, debido a sus propiedades, otorga a las prácticas agrícolas un manejo de nutrientes en sus cultivos que permiten disminuir el impacto ambiental que se genera con el uso de fertilizantes químicos [23]. Además de las citadas, existen otras posibilidades,

algunas de ellas derivadas de las anteriores, como la restauración de canteras, y otras como la utilización del lodo después de diferentes tratamientos en la fabricación de materiales de construcción e, incluso, como alimento de animales mediante la obtención de proteínas [24].

Actualmente es común incorporar lodos residuales en suelos agrícolas, ya que reduce la adición de fertilizantes comerciales, mejora su fertilidad, aumenta la capacidad de retención de agua y reduce la erosión del suelo [25]. El lodo actúa como acondicionador del suelo para facilitar el transporte o aportar nutrientes, aumentar la retención de agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo [26]. El lodo también sirve como un sustitutivo parcial de fertilizantes químicos costoso [4]. Los lodos de depuradora son un recurso renovable que contiene importantes nutrientes que se pueden usar para sustituir a los fertilizantes fabricados a partir de combustibles fósiles [27], pero es necesario tratarlos previamente de manera adecuada.

El principal objetivo de este trabajo fue estudiar el aprovechamiento de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales al usarlo como insumo agrícola en varias concentraciones. Se utilizó para la siembra de una planta de rápido crecimiento y se comparó su desarrollo en cuanto a germinación, masa y longitud de la planta y de las raíces con el uso de fertilizante de uso comercial y con una muestra control.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se realizaron las siguientes acciones:

A. Identificación de las características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos residuales

Se realizaron los siguientes análisis en un laboratorio certificado:

- Caracterización de Nitrógeno (N-NH₄, N-NO₃, N-NO₂)
- COT, N-total, Ca, Mg, K, Fe total, Mn total, Cu total, Zn total, B total, S total.
- Composición de metales pesados (As, Cd, Cu, Hg, Mb, Ni, Pb, Se, Zn) y su reactividad, corrosividad, inflamabilidad, toxicidad y ecotoxicidad.
- Coliformes totales, mesófilos, salmonella, E. Coli, mohos y levaduras.

B. Implementación del ensayo piloto

La elección de la planta se hizo teniendo en cuenta factores como: la facilidad de obtención de la semilla, el clima con el que cuenta la zona de estudio y el tiempo en el cual la planta germina y crece.

Para iniciar el ensayo, se busca el terreno y se escoge la zona exacta donde se harán los bloques, para ello se tuvo en cuenta que todos los bloques estuvieran expuestos a las mismas condiciones de temperatura, sombra, pendiente, entre otras. El terreno que se escoge se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Imágenes de la prueba: a) terreno por bloques, b) señalización para tratamientos, c) lodos para tratamientos, d) *Coriandrum sativum* obtenido después de 30 días, e) fertilizante NPK utilizado, f) medición de la masa vegetal, g) medición de la longitud de la raíz de la planta después de 30 días.

Se seleccionó un área de siembra, teniendo en cuenta los factores medioambientales del sitio como lo son la temperatura, humedad, exposición al sol, tipo de suelo, etc. Con base en estos factores se escoge el tipo de planta a sembrar *Coriandrum sativum* [28].

Se estudió el efecto de 3 variables independientes (concentración de biosólido del 50% y 100% y fertilizante NPK conocido como Triple 15) sobre las variables dependientes (% germinación, altura, número de hojas, longitud de raíz, y masa).

En este diseño se buscó que fueran constantes todos los factores medioambientales que pudieran afectar las variables dependientes para tener la certeza del efecto que causan las variables independientes. Para la adición de los lodos se tuvo en cuenta la fenología de la planta (período de germinación y cosecha). Se utilizaron diferentes cantidades de lodos, lo cual indica cuatro tipos de tratamiento:

- Tratamiento 1 (T₁): Compuesto por suelo del terreno (prueba control).
- Tratamiento 2 (T₂): Compuesto de 100% lodo
- Tratamiento 3 (T₃): Compuesto de 50% lodo + 50% suelo del terreno.
- Tratamiento 4 (T₄): Compuesto por suelo más la adición de fertilizante comercial Triple 15 NPK.

C. Diseño de bloques al azar

El uso de este diseño permite comparar los tratamientos bajo estudio. La selección de cada tratamiento se sorteó para definir su respectiva ubicación en cada bloque [29-31].

En la Tabla 1 se observa el diseño de bloques completos al azar que se utilizó. Las mediciones de las variables dependientes se desarrollaron 15 y 30 días después de la siembra (dds).

Tabla 1. Esquema del ensayo.

Bloques	Tratamientos			
1	T ₄	T ₂	T ₁	T ₃
2	T ₁	T ₃	T ₂	T ₄
3	T ₁	T ₄	T ₃	T ₂

T₁: Muestra control T₂: 100% Lodo. T₃: 50% lodo + 50% suelo T₄: Suelo del terreno + fertilizante

D. Especificaciones técnicas del ensayo

- Cada bloque tuvo las siguientes dimensiones: Ancho: 1m; Largo: 5.5m.
- Cada bloque se dividió en 4 filas, y cada fila tuvo las siguientes dimensiones: Ancho: 1m; Largo 1m.
- Al espacio entre cada fila se le llama surco; cada surco tuvo 0.50m, siendo 3 surcos por cada bloque.

- La distancia entre cada bloque fue de 0.50m, para tener espacio al realizar las respectivas observaciones.
- Cada fila tuvo 4 hileras por tratamiento, la distancia entre cada una de las hileras fue 0.25m, la distancia entre plantas (hoyo) tuvo alrededor de 0.05m.
- Las semillas escogidas tenían % de germinación del 70% y, por ser un poco bajo, se utilizaron 3 semillas por cada hoyo de siembra.
- Para cada tratamiento se realizaron camas de tierra con alrededor de 0.10m de ancho, ya que las semillas son pequeñas.
- Cada tratamiento tuvo señalización donde se indicaba el tipo de tratamiento (T₁, T₂, T₃, T₄), como se observa en la Fig. 1.
- El riego se realizó a diario con el uso de una manguera.

E. Determinación de resultados del efecto en variables biométricas de *Coriandrum sativum*

La frecuencia de evaluación fue así: una a los 5 días después de la siembra y luego cada 15 días durante un período de tiempo de 1 mes. Los parámetros a determinar fueron los siguientes:

- Porcentaje (%) de germinación: en cada unidad experimental se evaluó el número de semillas germinadas sobre el total de sembradas.
- Altura de la planta: desde la base del tallo hasta la ramificación más alta.
- Longitud de las raíces: se mide la longitud de las raíces de cada planta.
- Número de hojas: a los 15 dds (días después de siembra), 30 dds se les contó el número de hojas por planta.

El número de datos que se tomaron a los 15 dds fue el siguiente:

- % germinación: 10 datos por cada tratamiento, 40 datos por bloque y 120 datos en total.

- Altura: 5 datos por tratamiento, 20 datos por bloque y 60 datos en total

- Número de hojas: 5 datos por tratamiento, 20 por bloque y 60 datos en total.

A los 30 dds se tomaron 5 datos por tratamiento para un total de 20 datos por bloque de las siguientes variables dependientes:

- Altura

- Número de hojas
- Longitud de raíces
- Masa de plántula

F. Evaluación de la información

Se tomó registro fotográfico (Fig. 1), se hicieron observaciones y se realizó el análisis de varianza ANOVA de un factor, tabla de medias, y dispersión de datos.

La hipótesis sobre la que se trabajó fue que la variación entre las concentraciones de lodo residual afecta las variables dependientes del ensayo.

El análisis ANOVA plantea dos hipótesis: Ho: hipótesis nula y Ha: hipótesis alternativa. La Ho afirma que no existieron efectos de la variable independiente sobre las variables dependientes; es decir que las diferentes concentraciones de lodo en los ensayos no tienen efecto en germinación, masa, altura y longitud.

La Ha afirma que sí existieron efectos de la variable independiente sobre las variables dependientes; las diferentes concentraciones sí tuvieron un efecto.

Como interpretación de los resultados se tiene que cuando $P < 0.05$ se acepta la hipótesis alternativa y cuando $P > 0.05$ se acepta la hipótesis nula.

También se determinó el índice de germinación de Zucconi para evaluar la germinación y crecimiento de semillas de plantas de respuesta rápida, el cual se obtiene al multiplicar el porcentaje de germinación y el porcentaje de crecimiento de las raíces, ambos respecto al control (Ecuación 1).

$$IG (\%) = \% G \times \% L \quad (1)$$

Donde, IG: Índice de Germinación, G: Germinación y L: Longitud de la raíz.

De acuerdo con [32-33], cuando los valores de IG son superiores al 80%, el sustrato no contiene elementos fitotóxicos; valores de IG entre 80 y 50% indican presencia moderada, mientras que valores por debajo de 50% revelan una fuerte presencia de fitotoxinas.

III. RESULTADOS

Las características químicas y microbiológicas del lodo fueron identificadas y los resultados se presentan en las Tablas 2 a 5.

Tabla 2. Caracterización de Nitrógeno en el lodo.

Parámetro	N-NH ₄	NH ₄	N-NO ₃	NO ₃	N-NO ₂	NO ₂
Expresado como	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Resultado	2878	3690	124	537	1.15	3.78

Tabla 3. Caracterización del lodo.

Parámetro	COT	N	P	Ca	Mg	K	Fe	Mn	Cu	B	S
Expresado como	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Resultado	328	30.4	6.08	7.64	3.10	6.48	41314	529	262	36.09	6288

Tabla 4. Resultados de la caracterización del lodo comparados con la legislación colombiana.

Parámetro	Expresado como	Resultados	Decreto 1076 de 2015 Título 6 Sección 3 (Colombia)
Corrosividad (pH)	Unidades	5.8	< 2.0 ó >12.5
Inflamabilidad	-	No inflamable	No inflamable
Reactividad	L/kg*H	<0.1	Velocidad menor 1.0 L/Kg*H
Bario	mg Ba/L	0.19	100
Cromo	mg Cr/L	<0.1	5.0
Arsénico	mg As/L	<0,001	5.0
Plata	mg Ag/L	<0.1	5.0
Cadmio	mg Cd/L	<0.006	1.0
Selenio	mg Se/L	<0.001	1.0
Plomo	mg Pb/L	<0.01	5.0
Mercurio	mg Hg/L	0.03	0.2
Cianuros	mg/Kg	0.072	-
Sulfuros	mg/Kg	60.67	-
Antimonio	mg/L	<0.001	-
Berilio	mg/L	<0.001	-
Cobre	mg/L	0.05	-
Talio	mg/L	0.02	-
Zinc	mg/L	0.12	-
Toxicidad aguda (48 horas)	%	38.3	< 50

Tabla 5. Características microbiológicas del lodo.

Parámetro	Resultados	Decreto 1287 of 2014 (Colombia). Valor máximo
Recuento total aerobios mesofilos UFC/g	500.000	-
Recuento de Mohos y levaduras UFC/g	12.000	-
Recuento de Coliformes Totales UFC/g	19.000	1.000
Recuento de E. Coli UFC/g	<1.000	1.000
Detección de Salmonella Ssp/25g	Ausencia	Ausencia

Los ensayos fueron evaluados y se obtuvieron resultados a los 15 dds, y a los 30 dds. Luego se procedió a la validación estadística de los datos obtenidos para, finalmente, obtener la síntesis que se presenta a continuación en las Tablas 6 a 9.

Tabla 6. % Germinación de la planta por Tratamiento.

Bloque	Resultados por Tratamiento (% germinación)			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
1	70.0	60.0	64.0	62.0
2	36.0	60.0	82.0	58.0
3	84.0	70.0	78.0	70.0
% de Germinación promedio	63.3	63.3	74.7	63.3

T₁: Muestra control T₂: 100% Lodo T₃: 50% lodo + 50% suelo T₄: Suelo + fertilizante**Tabla 7.** Altura de la planta por Tratamiento.

Bloque	Resultados por Tratamiento (Altura x 10 ⁻² m)			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
1	7.7	10.6	10.9	8.2
2	6.4	13.0	11.6	10.8
3	8.6	9.6	10.6	7.9
Altura promedio	7.6	11.1	11.0	9.0

T₁: Muestra control T₂: 100% Lodo T₃: 50% lodo + 50% suelo T₄: Suelo + fertilizante**Tabla 8.** Masa de la planta por Tratamiento.

Bloque	Resultados por Tratamiento (Masa x 10 ⁻³ kg)			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
1	0.436	0.902	1.280	0.342
2	0.464	0.712	1.238	0.886
3	0.414	0.712	0.608	0.410
Masa promedio	0.438	0.775	1.042	0.546

T₁: Muestra control T₂: 100% Lodo T₃: 50% lodo + 50% suelo T₄: Suelo + fertilizante**Tabla 9.** Longitud de la raíz de la planta por Tratamiento.

Bloque	Resultados por Tratamiento (Longitud de la raíz x 10 ⁻² m)			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
1	0.436	0.902	1.280	0.342
2	0.464	0.712	1.238	0.886
3	0.414	0.712	0.608	0.410
Longitud de la raíz promedio	0.438	0.775	1.042	0.546

T₁: Muestra control T₂: 100% Lodo T₃: 50% lodo + 50% suelo T₄: Suelo + fertilizante

Todos los resultados fueron analizados mediante ANOVA simple de un factor (Tratamientos 1, 2, 3 y 4) para el análisis de las variables:

- Variables dependientes: % germinación, altura, masa, longitud de la raíz
- Factor: Tipo de ensayo Tratamientos 1, 2, 3 y 4

En el análisis de varianza de un factor para % germinación, altura, longitud y masa se compara con los 4 diferentes niveles de Tipo de ensayo. La prueba-F en la tabla ANOVA determina si hay diferencias significativas entre las medias (Tabla 10).

Tabla 10. Valores P del ANOVA para variables dependientes.

Variable dependiente	Valor P
% Germinación	0.353
Altura	0.000
Masa	0.000
Longitud de la raíz	0.297

De acuerdo con el ANOVA simple, cuando $P < 0.05$ se acepta la hipótesis alternativa; es decir que los tipos de ensayo T_1 , T_2 , T_3 y T_4 tienen efectos sobre los resultados de altura y masa. Por otro lado, cuando $P > 0.05$ se acepta la hipótesis nula; la cual afirma que no existieron efectos significativos de los tipos de ensayos T_1 , T_2 , T_3 y T_4 sobre % germinación y longitud de las raíces. Siguiendo con los resultados, en la tabla 11 se muestra la media de las mediciones de las variables dependientes para cada tipo de ensayo.

Tabla 11. Valores promedio para las variables dependientes de acuerdo al tipo de ensayo.

Tipo de ensayo	% Germinación	Altura $\times 10^{-2}$ m	Masa $\times 10^{-3}$ kg	Longitud de la raíz $\times 10^{-2}$ m	Índice de Germinación $IG = \%G \times \%L$
T ₁	66.7	7.57	0.431	6.97	100
T ₂	64.0	10.9	0.775	7.49	96.0
T ₃	77.3	11.0	1.045	6.85	98.3
T ₄	65.3	8.97	0.546	6.52	91.6
Promedio	68.3	9.63	0.699	6.96	95.3
Error estándar	5.79	0.459	0.069	0.357	

T₁: Muestra control T₂: 100% Lodo T₃: 50% lodo + 50% suelo T₄: Suelo + fertilizante

La Fig. 2 muestra el comportamiento de las variables medidas por cada ensayo.

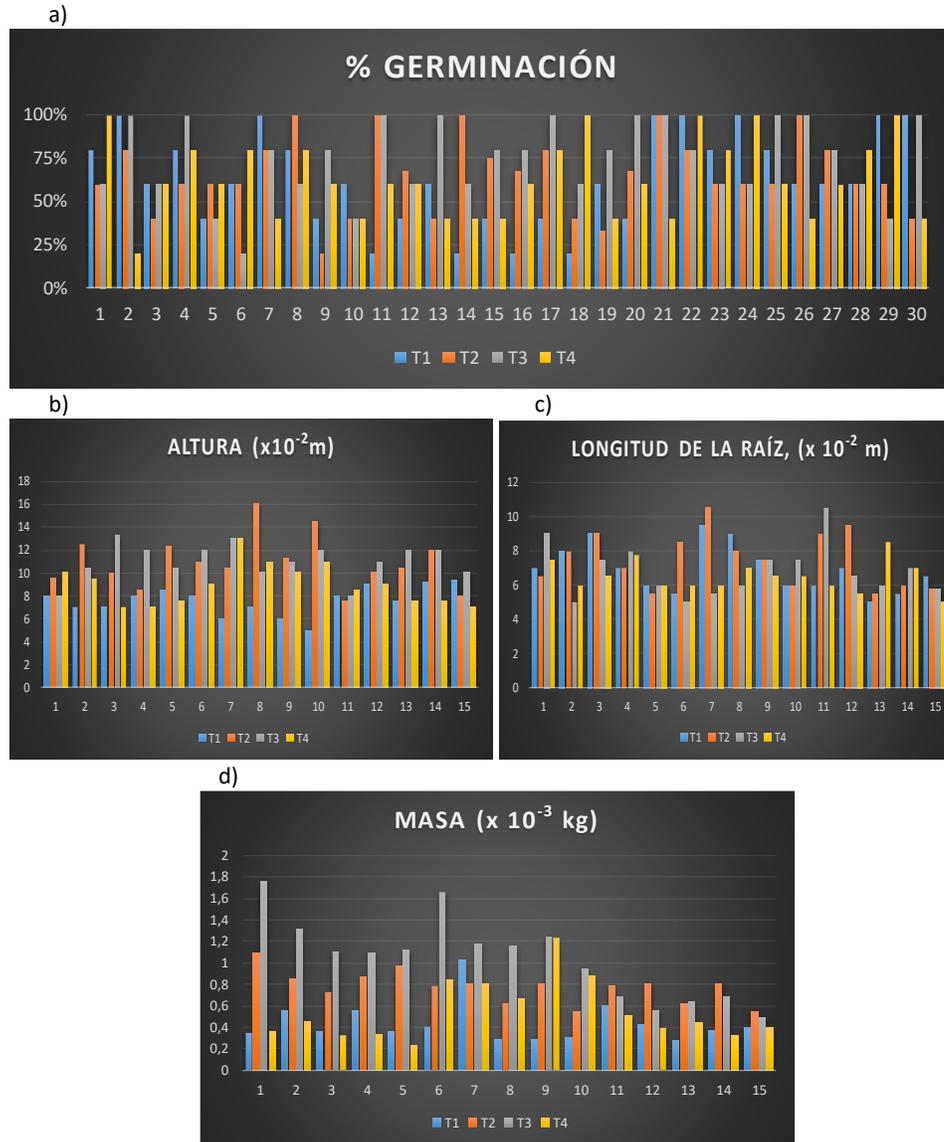


Fig. 2. a) % Germinación por tratamiento, b) Altura por tratamiento, c) longitud por tratamiento, d) masa por tratamiento.

Se observa que el Tratamiento 3 (T_3), arrojó los mejores valores en promedio en cuanto a germinación, masa y altura de las plantas. Esos resultados también estuvieron por encima de la prueba control o testigo (T_1).

Los intervalos obtenidos están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher y se incluyen en la Fig. 3.

En la Fig. 3 se observa que la germinación se vio favorecida en el T_3 con más de 10 puntos porcentuales con respecto al Control.

En cuanto a la altura, los valores medios para T₂ y T₃ fueron muy similares, pero al analizar la dispersión de los datos obtenidos, los datos del T₂ se dispersan entre 7.5 y 16, mientras que los datos del T₃ se dispersan entre 8 y 13.5 y resulta más confiable porque no están tan dispersos.

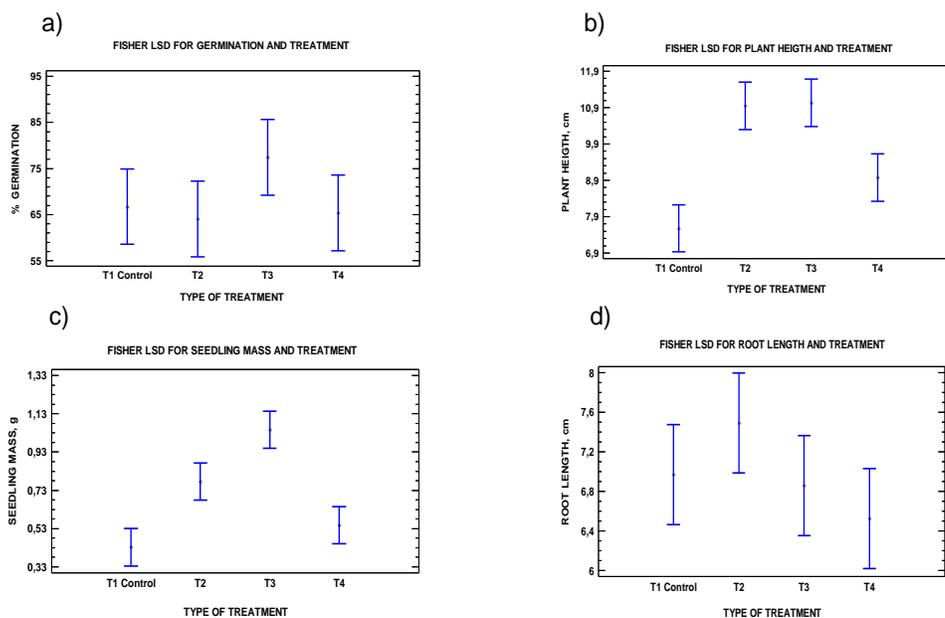


Fig. 3. Medias e intervalos 95% de Fisher LSD para: a) % Germinación, b) Altura, c) Masa, d) longitud de la raíz.

El T₃ arrojó en promedio el mejor valor para la masa, seguido del T₂. Al analizar la dispersión de datos para T₂ y T₃ que obtuvieron en promedio los mejores valores, 1.045 y 0.775, respectivamente, estuvieron más dispersos los valores de T₃ entre 0.5 y 1.7 comparados con los del T₂ entre 0.55 y 1.1. Estos resultados destacan el T₂ como es más confiable en este caso.

El T₂ arrojó en promedio el mejor valor para la longitud, seguido del T₄. Al analizar la información obtenida de acuerdo con la dispersión de datos para T₂ y T₄ que obtuvieron en promedio los mejores valores, 7.4 y 7.0, respectivamente, estuvieron más dispersos los valores de T₂ entre 5.6 y 10.6 comparados con los del T₄ entre 5.0 y 9.5. Estos resultados destacan el T₄ como el más confiable en este caso.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización mostraron que: el lodo no es corrosivo, no es inflamable y no es reactivo. El análisis de elementos como Bario, Cromo, Arsénico, Plata, Cadmio, Selenio, Plomo y Mercurio demostró que están por debajo de los límites permisibles de acuerdo con la legislación colombiana, que es un aspecto favorable.

Con respecto al análisis microbiológico, el recuento total de Coliformes supera el valor máximo permitido en la legislación colombiana. Además, según el análisis, se demostró que los lodos analizados se consideran no ecotóxicos.

Se encontró que, a nivel biológico, en el ensayo de germinación todos los sustratos son un medio adecuado para la germinación de las semillas, pero en el sustrato identificado como tratamiento T₃ con 50% lodo + 50% suelo, se obtuvieron las mejores condiciones en cuanto a % de germinación y altura del *Coriandrum sativum* con un valor de 77.3% ± 0.2 siendo este valor incluso más alto que la prueba control, lo cual podría atribuirse al poder nutritivo del lodo estudiado. En cuanto al % de germinación, la comparación con estudios similares se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación valores de porcentaje de germinación en diferentes estudios [34-36].

Origen del sustrato	% germinación	Planta sembrada
Lodos de tratamiento de agua residual de empresa alimentos	77.3	<i>Coriandrum sativum</i>
Lodos de tratamiento de agua residual municipal	76.3	<i>Daucus carota L</i>
Humus de lodo residual vermicompustados	48.6	<i>Daucus carota L</i>
Humus de lodo residual con gallinaza vermicompostado	77.6	<i>Daucus carota L</i>
Lodos de tratamiento de agua residual de Industria cervecera tratados y fermentados	94.9	<i>Lactuca sativa</i>
Lodos de cría de pollos	93.0	<i>Coriandrum sativum</i>
Abono a partir de residuos orgánicos (Bocashi)	84.0	<i>Coriandrum sativum</i>
Compost de Centro de abastecimiento frutas y verduras	95.0	<i>Coriandrum sativum</i>
Urea	88.0	<i>Coriandrum sativum</i>

Al comparar este valor hallado de 77.3% ± 0.2 con el estudio de [34] que, utilizando compost de la central de abastos del Valle (CAVASA), obtuvo 95% de eficiencia en la germinación, se puede establecer que es favorable su uso como insumo agrícola. Al calcular el índice de germinación IG para los diferentes ensayos en los que se tiene en cuenta la germinación y longitud de las raíces con respecto a la prueba Control,

se coloca en primer lugar el T₃ con un 98.3% que indica que el sustrato no contiene elementos fitotóxicos; mientras que los Tratamientos 1 y 4 con valores de 64 % y 61.1% indican una presencia moderada de fitotoxinas.

Con el ANOVA se concluye que la altura y la masa de las plántulas sí se vieron afectadas de forma significativa al variarse los tipos de ensayo mientras que el % de germinación y longitud de la raíz no fueron afectados por el tipo de ensayo, ya que para todos los casos hubo germinación con porcentajes comparables.

En cuanto a la germinación, el presente estudio coincide con el de [35], que trabaja con lodos de PTAR de cervecería, mostrando que para las pruebas del Control y concentración baja de lodo no existe diferencia significativa. También existe coincidencia con este estudio en el sentido de que la germinación se da porque no hay efectos fitotóxicos del lodo en la planta.

En cuanto a la composición microbiológica del lodo, se pudo observar que los niveles obtenidos son demasiado altos, lo cual se convierte en un aspecto desfavorable y que es necesario tener en cuenta en caso de implementarse la utilización del lodo como insumo agrícola.

V. CONCLUSIONES

La caracterización de los lodos permite establecer su uso potencial de acuerdo con la concentración de contaminantes que afectan su biodegradabilidad según sea su toxicidad; en este caso, el análisis mostró su viabilidad como insumo agrícola.

La utilización del diseño de bloques completamente al azar ayudó a reducir y controlar la varianza del error experimental; las unidades experimentales (T₁, T₂, T₃ y T₄) fueron relativamente homogéneas con respecto a factores que pudieron afectar las variables de respuesta (germinación, altura, masa y longitud de raíces).

El uso de los lodos del tratamiento de agua residual es un aspecto ambiental favorable porque disminuye la gran cantidad que se lleva al relleno sanitario, a la vez que se está aprovechando su contenido nutricional.

En el caso de los lodos estudiados, que se generan en el tratamiento de aguas residuales, su uso como insumo agrícola es una opción viable y que ofrece buenos resultados siempre que se pueda controlar que su contenido de nutrientes, su

ecotoxicidad, sus condiciones microbiológicas y su contenido de elementos corrosivos y peligrosos se encuentren por debajo de los niveles máximos admisibles para este uso.

La combinación de suelo con lodos crudos del tratamiento de agua residual proporciona un material orgánico estable, semejante al humus, que se puede utilizar como una fuente de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de plantas. Se encontró que la mezcla de 50% suelo + 50% lodos es la opción que produjo los mejores resultados para el crecimiento y desarrollo de plántulas de la especie *Coriandrum sativum*

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores aportaron en la construcción y edición de este documento. Específicamente, Santacoloma-Londoño elaboró el diseño experimental y metodológico, desarrolló el análisis estadístico de la información recolectada e hizo la discusión de resultados. Buitrago-González consolidó el referente conceptual, hizo la identificación de condiciones de crecimiento y desarrollo de la especie utilizada. Colorado-Molina y Suárez-Pineda desarrollaron el trabajo de campo desde el acondicionamiento de terreno, la implementación de los ensayos por bloques y las mediciones. Martínez-Martina orientó la implementación del diseño de bloques al azar y contribuyó con la elaboración del referente conceptual del documento. Villegas-Méndez apoyó el seguimiento y evaluación a las condiciones de la planta utilizada.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo de investigación fue financiado por la Institución de Educación Superior: Unidad Central del Valle del Cauca (UCEVA), Tuluá - Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Profesor Heberth Caicedo Saldaña, Director del grupo de investigación - ILA- del Programa Lenguas Extranjeras de la Unidad Central del Valle

del Cauca UCEVA - Tuluá (Valle) Colombia por su apoyo en la traducción en inglés del artículo.

REFERENCIAS

- [1] Vera-Reza, E. Sánchez-Salinas, L. Ortiz-Hernández, J. Peña-Camacho, and M. Ortega-Silva. "Estabilización de lodos residuales municipales por medio de la técnica de lombricompostaje". Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México, 2015.
- [2] Aldana, and R. Pérez. "Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP convencional," Grade Thesis, Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia, 2017. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1701&context=ing_ambiental_sanitaria
- [3] J. Limón, "Los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?," 2013. http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_qualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf
- [4] R. Donado, "Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los llanos en el departamento del Meta," Master Thesis, Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2013. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1>
- [5] N. Bolívar, J. Betancur, and N. Rodríguez, "Estudio evaluativo del manejo de biosólidos para el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre," Master Thesis, Universidad de Manizales, Colombia, 2015. <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/2280>
- [6] E. Uggetti, I. Ferrer, S. Nielsen, C. Arias, H. Brix, and J. García, "Characteristics of biosolids from sludge treatment wetlands for agricultural reuse," *Ecological Engineering*, vol. 40, pp.210-216, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.030>
- [7] M. Vega, L. Bontoux, and D. Papameletiou, "Tratamiento de las aguas residuales urbanas en Europa: el problema de los lodos," *Dyna Ingeniería e Industria*, vol. 80 (1), pp.45–49, 2005.
- [8] Ch. Liu, H. Li, Y. Zhang, and C. Liu, "Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste," *Bioresource technology*, vol. 219, pp.252-260, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.130>
- [9] J. Vélez, "Los biosólidos ¿una solución o un problema?," *Rev Producción + Limpia*, vol. 2 (2), pp.57-71, 2007.
- [10] S. Mora-Ravelo, A. Alarcón, M. Rocandio, and V. Vanoye-Eligio, "Biorremediation of wastewater for reutilization in agricultural systems: a review," *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 15(1), pp.33-50, 2016. http://doi.org/10.15666/aeer/1501_033050
- [11] O. Herrero Chamorro, "Gestión de lodos, normativa y Destino final: aplicación agrícola," In *Conferencia Depuración de aguas residuales del Mediterráneo*, Zaragoza, 2013.
- [12] W. Zhang, X. Zhang, Z. Feng, J. Liu, M. Zhou and K. Wang, "The fitness-to-drive of shift-work taxi drivers with obstructive sleep apnea: an investigation of self-reported driver behavior and skill," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 59, pp. 545-554, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.12.004>

- [13] M. Yadav, C. Gerber, Ch. Saint, B. Van den Akker, and M. Short, "Understanding the Removal and Fate of Selected Drugs of Abuse in Sludge and Biosolids from Australian Wastewater Treatment Operations," *Engineering*, vol. 5, pp.872-879, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.012>
- [14] H. Wijesekara, N. Bolan, R. Thangavel, B. Seshadri, A. Surapaneni, C. Saint, and M. Vithanage, "The impact of biosolids application on organic carbon and carbon dioxide fluxes in soil," *Chemosphere*, vol. 189, pp.565-573, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.090>
- [15] I. Ciampitti, and F. García, "International Plant Nutrition Institute IPNI Requerimientos nutricionales," 2008. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1083>
- [16] E. Holguín, M. Morales, and V. De la Rosa, "Lodos residuales: métodos de tratamiento, estabilización y aprovechamiento," *Rev. Vidsupra Visión Científica*, vol 6 (2), pp.61-66, 2014.
- [17] L. Gómez, and A. Merchán, "Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas," Grade Thesis Universidad Católica de Manizales, Colombia, 2016. <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/handle/10839/1305>
- [18] United States Environmental Protection Agency, *Folleto informativo de tecnología de biosólidos*, 2000. <https://nepis.epa.gov>
- [19] K. Bedoya, J. Acevedo, C. Peláez, and S. Agudelo, "Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, (Antioquia, Colombia)," *Revista Salud pública*, vol. 15 (5), pp.778-790, 2013.
- [20] D. Fytili, and A. Zabaniotou, "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12 (1), pp.116-140, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>
- [21] A. Kelessidis, and A. Stasinakis, "Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries," *Waste Management*, vol. 32 (6) pp.1186-1195, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>
- [22] L. Bennamoun, P. Arlabosse, and A. Leonard, "Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp.29-43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.043>
- [23] J. Vásquez, and G. Vargas, "Aprovechamiento de lodos planta de tratamiento de aguas residuales municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo," Grade Thesis, Universidad Católica, Bogotá, Colombia, 2018. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16425/1/Trabajo%20de%20Grado%20-%20Lodos%20Funza.pdf>
- [24] I. C. González, "Generación, caracterización y tratamiento de Lodos de EDAR," Doctoral Thesis, Universidad de Córdoba, Spain, 2015. <https://helvia.uco.es/handle/10396/13199>
- [25] M. Potisek-Talavera, U. Figueroa-Viramontes, G. González-Cervantes, R. Jasso-Ibarra, and I. Orona-Castillo, "Soil applied biosolids and its effect on soil organic matter and nutrient content," *Terra Latinoamericana*, vol. 28 (4), pp.327-333, 2010.
- [26] I. Julio, C. Peláez, and F. Molina, "Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos," *Revista ion*, vol.29 (1), pp.63-70, 2016. <http://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>

- [27] W. Barber, "Influence of changing drivers on realising the value of sewage sludge as a resource," *Water Practice & Technology*, vol. 7 (4), 2012. <https://doi.org/10.2166/wpt.2012.067>
- [28] M. Sharma, and R. Sharma, "Coriander," *Handbook of Herbs and Spices*, 2012. <https://doi.org/10.1533/9780857095671.216>
- [29] M. Badii, M. Castillo, and A. Wong, "Experimental designs and scientific research," *Rev. Innovaciones de Negocios*, vol 4 (2), pp. 283-330, 2007.
- [30] A. Bustos, D. Rodríguez, and F. Cantor, "ANDEVA para diseño completamente al azar (DCA)," *Revista Facultad de ciencias básicas*, vol. 4 (1), pp.143-148, 2008.
- [31] S. Contreras, and P. López, "El diseño de bloques al azar en la investigación agroecológica," 2009. https://www.academia.edu/5210918/El_dise%C3%B1o_de_bloques_al_azar_en_la_investigaci%C3%B3n_agroecol%C3%B3gica
- [32] E. Emينو, and P. Warman, "Biological assay for compost quality Compost science & utilization," *Journal Compost Science & Utilization*, vol. 12 (4), pp.342-348, 2013. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702203>
- [33] M. Varnero, C. Rojas, and R. Orellana, "Indices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje," *J. Soil Sci Nutr.*, vol 7(1), pp.28-37, 2007.
- [34] D. Usman, C. Usman, C. Bonilla, and M. Sánchez, "Efecto de la fertilización orgánica sobre la producción de follaje y rendimiento de semilla de cilantro *Coriandrum sativum* L. Variedad Unapal Precoso," *Acta Agronómica*, vol. 52(1), pp.59-63, 2003.
- [35] B. Cupe, and J. Juscamaita, "Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico," *Revista Ecología aplicada*, vol. 17(1), pp.107-118, jul. 2018. <http://doi.org/10.21704/rea.v17i1.1179>
- [36] L. Pérez, and A. Chávez, "Evaluación del uso de sustratos preparados con lodos residuales en la germinación de semillas de zanahoria *Daus carota* L," Master Thesis, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2012. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7769/PerezRodriguezLicedJoana2012.pdf;jsessionid=895DF176D908A079889936305494717E?sequence=2>