

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SEIS ESPECIES DE CRASULÁCEAS EN TRES SUSTRATOS DERIVADOS DE RESIDUOS ORGÁNICOS

COMPARATIVE ANALYSIS OF SIX SPECIES OF CRASSULACEAN ON THREE SUBSTRATES DERIVED FROM ORGANIC WASTE

¹ Mairalejandra Ramírez Cuenca

² Daniel Rodríguez Acosta

Recibido: 08-03-2022

Aceptado: 11-04-2022

Artículo original derivado del proyecto de investigación Análisis comparativo de seis especies de crasuláceas en tres sustratos derivados de residuos orgánicos, realizado en la Universidad de Manizales, entre mayo y diciembre de 2019, financiado por el Servicio Nacional de Aprendizaje- Sennova- Grupo de Investigación Nova.

- 1 Mg. en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente – Universidad de Manizales, pregrado en Ingeniería forestal – Universidad del Tolima. Correo: maramirez@senae.edu.co ORCID: 0000-0001-9184-1582
- 2 Mg. en Ingeniería y Gestión Ambiental – Universidad Surcolombiana, pregrado en Ingeniería Forestal – Universidad del Tolima Correo: darodriguez@senae.edu.co ORCID: 0000-0003-4167-1444

Autor para correspondencia: maramirez@senae.edu.co

Resumen

Este estudio contribuye a la generación de conocimientos sobre el desarrollo de la flora crasulácea, a través de la evaluación del desarrollo de seis especies de esta familia en sustratos (bocaschi, vermicompost y tierra preparada en vivero como sustrato comparativo), derivados de residuos orgánicos, con características fisicoquímicas potenciales para el desarrollo de la flora crasulácea, resultando condiciones distintas de desarrollo para cada especie, establecidos en diseño experimental para la aplicación de nueve tratamientos con tres repeticiones, con el fin de determinar la efectividad de enraizamiento y el desarrollo de las especies evaluadas. La información se recolectó en campo, se procesó en el software Design Expert. Concluyendo que los sustratos obtenidos de residuos orgánicos son una buena opción para la reproducción de crasuláceas, teniendo en cuenta que cada especie tiene sus propios requerimientos de sustrato, los cuales al combinarse con granito y arena determinan en gran medida el enraizamiento y desarrollo de las plantas.

Palabras Clave —Crasuláceas, residuos orgánicos, bocaschi, vermicompost, diseño experimental.

Abstract

This study contributes to the generation of knowledge about the development of the crasulacean flora, through the evaluation of the development of six species of this family in substrates (bocaschi, vermicompost and soil prepared in the nursery as a comparative substrate), derived from organic waste, with potential physicochemical characteristics for the development of the crassulacean flora, resulting in different development conditions for each species, established in an experimental design for the application of nine treatments with three repetitions, in order to determine the effectiveness of rooting and the development of the species. evaluated. The information was collected in the field, it was processed in the Design Expert software. Concluding that the substrates obtained from organic waste are a good option for the reproduction of crasulaceae, taking into account that each species has its own substrate requirements, which when combined with granite and sand largely determine the rooting and development of plants

Keywords: crassulacean flora, organic waste, bokashi, vermicompost, experimental design.

INTRODUCCIÓN

Este estudio generó conocimientos sobre el desarrollo de la flora crasulácea, con relación a los sustratos de residuos orgánicos (RO) (Beneficio del café, ganadería de la zona rural y residuos de cocina de la zona urbana), contaminantes que afectan la biosfera, dado a la inadecuada eliminación de residuos sólidos del ganado, que a su vez genera contaminación por metales pesados, antibióticos en el suelo y agua, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Ba, *et al.*, 2020); (Kuppusamy, *et al.*, 2018); (Qi, *et al.*), fitotoxinas, patógenos vegetales, animales (Nasini, *et al.*, 2016; Taeporamaysamai y Ratanatamskul,

2016). De esta forma se debe fomentar el interés en aprovechar los RO como medio eficiente de reciclaje racional de nutrientes y así ayudar al crecimiento de las plantas y devuelva al suelo muchos de los elementos extraídos durante el proceso productivo (Cerrato, 2007).

Para lo anterior, existe una alternativa mediante el proceso de biodegradación (compostaje), en el que los desechos orgánicos se descomponen y se forman productos finales estabilizados, inofensivos y de alta calidad, actuando como excelentes nutrientes y enmiendas del suelo (Zhao, *et al.*, 2020; Tran, *et al.*, 2015); (Qi, *et al.*, 2020).

Así mismo, la diversidad de residuos agroindustriales puede ser utilizada principalmente como alternativa para la producción de compost, que puede reducir o incluso eliminar el uso de fertilizantes químicos por su capacidad de mejorar las características fisicoquímicas del suelo (Rosas, *et al.*, 2016; Hernández, *et al.*, 2016). Al igual que los RO de tipo doméstico separados en la fuente pueden ser convertidos en biofertilizantes y acondicionadores de suelos (Rodríguez, 2015).

El presente estudio se desarrolló en dos fases: En la primera un proceso de reutilización de los RO para implementar estrategias de producción limpia a fin de generar compostaje tipo bocaschi – vermicompost y en la segunda, generar conocimientos sobre el enraizamiento y desarrollo de seis especies de la familia de las crasuláceas en sustratos derivados de RO.

Para lo anterior se construyó una biofábrica con el fin de procesar los RO de la zona urbana y rural, convirtiéndolos en un mejorador de suelo (bocaschi), teniendo en cuenta que los RO del beneficio del café poseen una importante carga de nutrientes reutilizables en el proceso de compostaje y pueden ser aplicados como abono orgánico (Hernández, *et al.*, 2016), (Varnero, *et al.*, 2011). También se utilizó boñiga de la zona rural en la obtención de vermicompost, usando lom-

briz roja californiana (*Eisenia foetida*).

A continuación, se seleccionaron especies de crasuláceas, tomando como referente que son comunes en regiones áridas templadas y templado-cálidas (Cronquist, 1981), aunque se encuentran ausentes en los verdaderos desiertos (Hart, 1997). La familia de las crasuláceas cuenta con aproximadamente 35 géneros que han sido divididos en seis subfamilias basándose en una variedad de caracteres morfológicos (Acevedo, *et al.*, 2004).

Se incluyen aproximadamente 1500 especies de herbáceas de tallo, hojas suculentas y pequeños arbustos. La funcionalidad más importante de las plantas suculentas o crasuláceas con respecto a la sequía se basa en el metabolismo CAM (Metabolismo Ácido de las crasuláceas), caracterizado por el ritmo estomatal invertido que consiste en la asimilación nocturna de CO₂, su fijación en ácido málico y la descarbolización de este ácido en el día para liberar el CO₂ requerido en el proceso de fotosíntesis (Gil, *et al.*, 2006).

con unas 300 especies (Hart, 1997), sur de África (Mort, *et al.*, 2001) con unas 250 especies, la región Mediterránea y Macaronésica, con más de 200 especies y el sudeste de Asia con aproximadamente 200 especies (Hart, 1997), siendo muy común en regiones áridas, templadas y templado-cálidas (Cronquist, 1981), aunque se encuentra ausente de los verdaderos desiertos. Crasulácea es una familia de aproximadamente 35 géneros que ha sido dividida en seis subfamilias basándose en una variedad de caracteres morfológicos (Acevedo, *et al.*, 2004). Incluye aproximadamente 1500 especies de herbáceas de tallo, hojas suculentas y pequeños arbustos. Análisis moleculares filogenéticos indican que la familia es monofilética (Mort, *et al.*, 2001). La funcionalidad más importante de las plantas suculentas o crasuláceas con respecto a la sequía se basa en el metabolismo CAM (Metabolismo Ácido de las crasuláceas), caracterizado por el

ritmo estomatal invertido que consiste en la asimilación nocturna de CO₂, su fijación en ácido málico y la descarbolización de este ácido en el día para liberar el CO₂ requerido en el proceso de fotosíntesis (Gil, *et al.*, 2006).

Al término de 40 días de iniciado el proceso de transformación de RO, se generó el vermicompost. Es importante tener en cuenta que, a mayor número de lombrices utilizadas en el proceso, se tendrá un mayor rendimiento. A los 23 días se obtuvo el bocaschi, de manera paralela se acondicionó tierra preparada en vivero como sustrato comparativo en cantidades representativas de 500 kg. cada uno.

Posteriormente, a cada sustrato se le extrajo una muestra de 1 kg. que fue llevada al laboratorio de suelos para realizar los análisis físicoquímicos.

En la segunda fase del estudio se procedió a recolectar el material vegetal de seis especies de crasuláceas seleccionadas: *Sedum clavatum*, *Graptopetalum paraguayense*, *Sedum morganianum*, *Echeveria prolífica*, *Echeveria elegans albicans* y *Sedum rubrotinctum*, para realizar el proceso de propagación mediante hojas y evaluar el porcentaje de enraizamiento y desarrollo de cada una de ellas en los sustratos obtenidos de RO.

Se estableció un diseño multivariado en el cual se trabajó con nueve tratamientos derivados de tres sustratos con tres repeticiones, aplicados a seis especies de crasuláceas. Como resultado se evidenció la efectividad de los sustratos en el enraizamiento y desarrollo de cada una de las especies.

Materiales y métodos

El proceso de investigación se desarrolló en el Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila (CDATH) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), en la sede de la vereda

La Azufrada del municipio de La Plata Huila, con coordenadas Norte 02°22'50,1' y Oeste 75°52'02,9', altitud de 1.157 m.s.n.m.

Para el proceso metodológico se contemplaron dos fases de la siguiente manera:

2.1 Fase 1. Procedimiento para la obtención de sustratos a partir de residuos orgánicos

2.1.1 Construcción de biofábrica

En las instalaciones de SENA en la vereda La Azufrada, se estableció una biofábrica con 6 camas para la producción de bocaschi y vermicompost, con las dimensiones de 6.20 m. de largo x 2.20 m. de ancho x 50 cm. de alto, con una distancia de 40 cm. entre calles, el lugar se encerró con malla de anejo y estacas de guadua para evitar el ingreso de animales al sitio y su posible alteración a los procesos que en él se desarrollaron.

2.1.2 Identificación, recolección y transformación de residuos orgánicos

Se seleccionaron los residuos orgánicos contaminantes generados del proceso productivo, principalmente a fuentes hídricas, suelos y atmósfera.

Para lo anterior, se recolectaron en la zona rural residuos de: Pulpa de café y boñiga de ganado, siendo estos potencialmente contaminantes en el departamento del Huila. Respecto a la zona urbana se seleccionaron los residuos orgánicos de cocina: Cáscaras de tomate, papa, yuca, plátano, cebolla, cáscaras de huevo y sobrantes de fruta por ser los de mayor generación.

Esta gestión fue realizada por el semillero de investigación de Biodiversidad y los programas de formación Control Ambiental y Gestión Sostenible de la Biodiversidad Vegetal del CDATH.

2.1.3 Proceso de transformación de residuos orgánicos para bocaschi

Mosquera, (2010) indica que la preparación del bocaschi varía considerablemente y se adecua a las condiciones y materiales existentes de cada productor; es decir, no hay una fórmula fija para su elaboración. Por tanto, para la obtención de una mezcla de 500 kg de bocaschi, se utilizaron los siguientes materiales teniendo en cuenta la disponibilidad que se tenía en la sede del SENA: 40 kilos de estiércol bovino, 25 kg de gallinaza, 15 kg de cáscara de café, 5 kg de carbón, 5 kg de ceniza, 25 kg de cascarilla de arroz, 2 kg de melaza, 25 kg de mogolla, 1 lb de levadura, 250 kg de tierra, 2 kg de micorrizas, 50 kg de residuos de cosecha, 50 kg de pasto picado.

Se trozaron los residuos de cosecha para facilitar el proceso de aireación, seguido de esto se mezcló la levadura con la melaza y se diluyó en 10 litros de agua, se agregaron capas de 10 cm de cada uno de los materiales. El proceso de volteo se realizó con herramienta manual garantizando la homogeneidad de la mezcla y el suministro de agua con melaza y levadura hasta obtener una humedad ideal del 60%. Luego se apilo la mezcla a una altura de 1 metro, se registró la temperatura inicial de 23°C, luego se cubrió con un plástico negro para promover el aumento de temperatura y la actividad de los microorganismos en el proceso de descomposición de la materia orgánica. Este proceso de volteo se realizó durante 15 días, 2 veces diarias tiempo en el que se disminuyó la altura de la pila. A los 23 días de realizado el proceso se verificó la culminación de la fase de maduración.

2.1.4 Proceso de transformación para la obtención de vermicompost

El vermicompost es una tecnología sencilla y de bajo costo en donde se involucran lombrices y numerosos grupos microbianos (Domínguez, *et al.*, 2019 y 2010). Además, el intestino de las

lombrices de tierra y microorganismos asociados pueden secretar diferentes tipos de enzimas digestivas como lipasa, amilasa, proteasa, celulasas, manasa, fosfatasa y ureasa que mejoran el proceso de degradación (Gusain y Suthar, 2020; Ravindran, *et al.*, 2015; Soobhany, 2019).

Para obtener aproximadamente 500 kilos de vermicompost se recolectaron los residuos de cosecha de café (pulpa y mucilago) utilizando 7 bultos de estiércol bovino de 50 kg cada uno y 7 bultos de pulpa de café de 50 kg, el mucilago se utiliza como fuente de energía en reemplazo de la melaza, el material se apiló por 25 días y luego se pasó a las camas de lombricultivo para proceder con la transformación de los RO, al obtener el lixiviado este se hizo recircular tres veces en las camas hasta alcanzar el sustrato final. A los cuarenta días de establecido, se inició el proceso de separación de la lombriz del sustrato, el cual se llevó a cabo por medio de una malla de polietileno que se utilizó como trampa para las lombrices, ubicando en la superficie alimento semicompostado el cual promovía el ascenso de estas.

2.1.5 Proceso de obtención de tierra preparada en vivero

La tierra utilizada se obtuvo de la sede del SENA La Plata, se prepararon 500 kilos bajo los siguientes criterios: 8 bultos de tierra de 50 kg cada uno, 15 kg de aserrín, 15 kg de gallinaza compostada, 18 kg de estiércol bovino pulverizado, 50 kg de cascarilla de arroz y 2 kg de cal. Todo lo anterior se mezcló en finas capas para obtener un sustrato homogéneo.

2.1.6 Análisis de laboratorio

Con el fin de determinar los valores agregados que se generaban con la obtención de sustratos a partir de RO, se realizó una caracterización de parámetros fisicoquímicos de cada uno de los sustratos obtenidos.

2.2 Fase 2. Recolección y reproducción de crasuláceas

2.2.1 Selección de especies crasuláceas

Se realizó un diagnóstico general para ubicar la flora suculenta del municipio de La Plata, mediante un sondeo en jardines, viveros, invernaderos, domicilios y parques. Con base en el diagnóstico realizado se escogieron 6 especies de crasuláceas (Figura 1), teniendo en cuenta factores como representatividad, ritmo de brotación y facilidad para la adquisición.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Especies de crasuláceas seleccionadas

2.2.2 Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial en el que se probaron seis especies de la familia crasulácea (*Sedum clavatum*, *Graptopetalum paraguayense*, *Sedum morganianum*, *Echeveria prolífica*, *Echeveria elegans albicans*, *Sedum rubrotinctum* (ver Figura 1) y nueve tratamientos dispuestos completamente al azar (T1 bocaschi 100%, T2 bocaschi 75% granito 25%, T3 bocaschi 75% arena 25%, T4 vermicompost 100%, T5 vermicompost 75% granito 25%, T6 vermicompost 75% arena 25%, T7 tierra preparada en vivero 100%, T8 tierra preparada en vivero 75% granito 25%, T9 tierra preparada en vivero 75% arena 25%) con tres repeticiones y parcelas de cinco individuos. Por lo cual en el presente estudio se analizaron 162 unidades experimentales que contenían 810 unidades de muestreo.

2.2.3 Establecimiento en campo

Los tratamientos se ubicaron en vasos de icopor usados y sometidos a un proceso de lavado para su reutilización. Se escogieron plantas madre de crasuláceas en estado vegetativo, luego de un periodo de 10 días de aclimatación se seleccionaron las plantas de mayor vigor para el deshoje bajo la precaución de no lastimar el tejido meristemático que es el responsable del crecimiento, para ello se tomaron las hojas con el dedo pulgar y el dedo índice haciendo leves movimientos hacia arriba y hacia abajo con el fin de garantizar la propagación por este método. Luego tuvieron un proceso de suberización de 3 días de forma similar al método seguido por (Reyes, 2003). Las unidades experimentales se distribuyeron en nueve tratamientos con tres repeticiones aplicadas a seis especies de crasuláceas, cada especie estaba representada en cada tratamiento con 5 individuos para un análisis total de 810 individuos.

2.2.4 Monitoreo

El seguimiento se realizó día de por medio a través de la técnica de observación directa durante 90 días y se tuvieron en cuenta variables como: prendimiento y desarrollo reflejado en número de hojas de cada especie.

2.2.5 Procesamiento estadístico

Se procedió a registrar la información recolectada en campo durante 3 meses en una base de datos de Excel, para luego procesar la información en el software Desing Expert versión 2.0, teniendo en cuenta las variables de respuesta de enraizamiento y desarrollo de las 6 especies de crasuláceas en cada uno de los tratamientos estudiados.

RESULTADOS

Se obtuvieron los siguientes resultados del análisis fisicoquímico de los sustratos procesados, el pH de las muestras fue óptimo porque osciló entre 6 y 7, siendo ideal para cultivos en general, el sustrato con mayor contenido de materia orgánica fue el vermicompost con 48,1% seguido del bocaschi con 33,6% y el suelo de vivero con 7,5%, considerándose como valores altos de materia orgánica, ninguno presentó contenido de aluminio, en cuanto a nitrógeno total el bocaschi fue el que presentó la mayor cantidad con 3816,3 ppm, seguido del vermicompost 2061,7 ppm y el suelo de vivero 421,7 ppm, el fósforo en el vermicompost fue de 84,4 ppm y bocaschi 74,4 ppm y 8,4 ppm en suelo de vivero siendo este muy bajo. La fertilidad del suelo se midió con la relación de Calcio, Magnesio y Potasio determinando así que el sustrato más óptimo fue el vermicompost, seguido de bocaschi y por último suelo de vivero. (Ver tabla 1).

Tabla 1. Resultados de análisis de laboratorio de sustratos (Bocaschi, Vermicompost, Tierra preparada en vivero)

Elemento	Unidades	Bocaschi Valor unidad clave	Vermi- compost Valor unidad clave	Tierra preparada en vivero Valor unidad clave	Método
pH:		7,2	6	6,6	Potenciométrico en relación sustrato agua 1:1
Materia Orgánica	%	33,6	48,1	7,5	Calcinación
Aluminio:	meq/100 gr	0	0	0	Aluminon
Amonio (N-NH ₄):	ppm	101,8	9,3	4,9	Nessler
Nitratos (N-NO ₃):	ppm	3559,5	2011,4	406,8	Cadmium Reduction
Nitritos (N-NO ₂):	ppm	155	41	10	Ferrous sulfate
Nitrógeno total:	ppm	3816,3	2061,7	421,7	Sumatoria
Fósforo (P ₂ O ₅):	ppm	78,4	84,4	8,4	Amino acid
Potasio(K ₂ O):	meq/100 gr	28,12	13,59	2,32	Turbidimetric
Calcio (Ca ⁺⁺):	meq/100 gr	0,51	1,96	8,4	Oxalate
Magnesio (Mg ⁺⁺):	meq/100 gr	5,67	4	3	Calmagite
Azufre (SO ₄ =):	ppm	1420	86	4	Turbidimetric
Hierro (Fe):	ppm	0,2	0,1	0,1	Phenantroline
Manganeso (Mn):	ppm	0,7	0,1	0,5	Periodate Oxidation
Cobre (Cu):	ppm	0,3	0	0,1	Bicinchoninate
Zinc (Zn):	ppm	0	0,1	0,2	Zincon
Boro (B):	ppm	0	0	0,3	Titration
Densidad Aparente:	gr/cc	0,6	1,1	1,6	Parafina
Densidad Real	gr/cc	1	1,6	2,3	Picnómetro
% Saturación de Humedad	%	40,4	30,8	31	Test laboratorio
C.E.:	µS/cm	24200	6510	1150	Cuantificación por Potenciometría

Fuente: Elaboración propia

3.1 ANOVA para el modelo factorial (sustratos – especies) con respuesta a crecimiento en número de hojas.

Los resultados para el análisis de varianza ANOVA (ver tabla 2), generaron el valor F de 169,19, lo que implica que el modelo es significativo con valor $P > 0,0001$; para especies generó el valor de 1108,97 lo que muestra que el modelo es significativo con un valor $P -0,0001$. Así como para sustratos con un valor de 127,24. Los valores de "Prob > F" inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. Por lo tanto, A, B AB son términos de modelo significativo

como se puede ver a continuación:

El resultado para ANOVA sustratos generó el valor de 127,24 lo que implica que el modelo es significativo con un valor $P -0,0001$ lo que indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término.

Los resultados para ANOVA especies generó el valor de 1108,97 lo que implica que el modelo es significativo con un valor $P -0,0001$ lo que indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término.

Tabla 2. ANOVA para el modelo factorial (sustratos – especies) con respuesta a crecimiento en número de hojas.

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	80591,78	53	1520,60	169,19	< 0.0001 significant
A-Sustratos	9148,56	8	1143,57	127,24	< 0.0001
B-Especies	49835,33	5	9967,07	1108,97	< 0.0001
AB	21607,89	40	540,20	60,10	< 0.0001
Pure Error	970,67	108	8,99		
Cor Total	81562,44	161			

Fuente: Elaboración propia

En la figura 2. se puede apreciar la interacción de los 9 tratamientos utilizados con las 6 especies de crasuláceas estudiadas en el cual se evidencia el crecimiento en número de hojas.

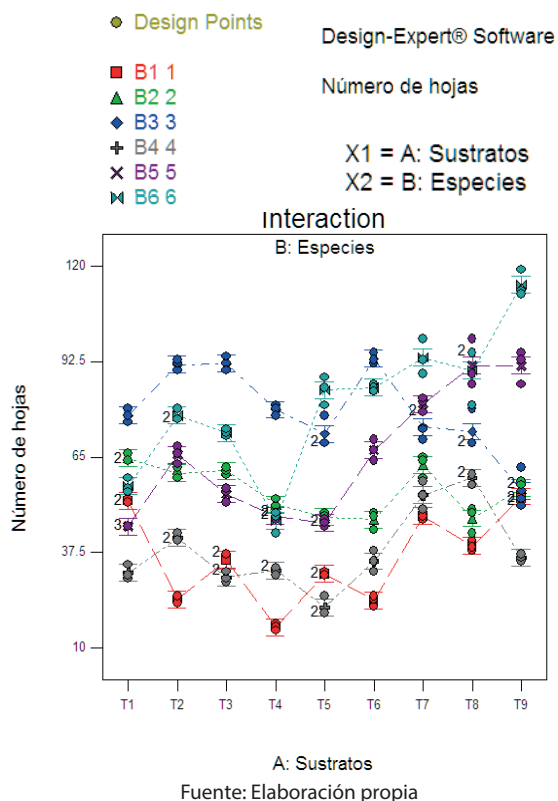


Figura 2. Comportamiento del desarrollo de seis especies crasuláceas en los tratamientos objeto de estudio

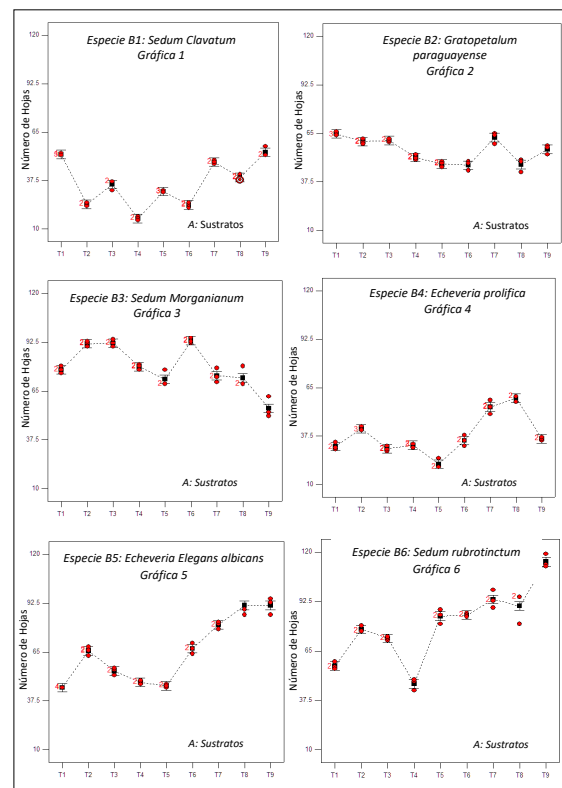


Figura 3. Comportamiento del crecimiento individual en número de hojas de cada una de las especies de crasuláceas frente a los tratamientos

En la figura 3 se evidencia que la especie *Sedum clavatum* (B1 – gráfica 1) presentó el mejor comportamiento en cuanto a crecimiento y desarrollo de número de hojas (H) en el T9 (Tierra preparada en vivero al 75% con arena al 25%) con 53 H promedio, seguido del T1 (Bocaschi 100%) con 52 H, T7 (Tierra preparada en vivero 100%) con 48 H. No se recomienda utilizar el T4 (vermicompost 100%) teniendo en cuenta que se presenta un deficiente desarrollo con 14 H, sin embargo, la mezcla del (75% de vermicompost con granito al 25%) T5 mejora significativamente el sustrato para su desarrollo con 31 H, mas no es competente frente al T9. Los tratamientos 9, 7 y 8 compuestos de tierra preparada en vivero son sustratos adecuados para el desarrollo y crecimiento de la B1.

La especie *Graptopetalum paraguayense*, (B2 – gráfica 2) presenta un alto potencial para desarrollarse en cualquier tipo de sustrato, teniendo en cuenta que en los 9 tratamientos se presentó un óptimo rendimiento, resaltando el T1 (Bocaschi 100%) con 64 H, seguido del T7 (Tierra preparada en vivero 100%) con 62 H. Se evidencia que el sustrato que mejor favorece el comportamiento de B2 es el Bocaschi en todas sus combinaciones, seguido de la tierra preparada en vivero y por último el vermicompost. La mezcla en las diferentes combinaciones con granito y arena no genera impedimento para el desarrollo de B2.

La especie *Sedum morganianum* (B3 – gráfica 3) presentó un óptimo comportamiento en el T6 (Vermicompost 75% arena 25%) con 93 H, seguida del T3 (Bocaschi 75% arena 25%) y T2 (Bocaschi 75% granito 25%) con 92 H, indicando de esta forma que se desarrolla mejor en sustratos con mayor cantidad de nutrientes, combinados con granito y arena que favorecen el desarrollo y a su vez beneficia el requerimiento de drenaje que presenta la B3.

Es importante resaltar que frente a los diferentes tratamientos utilizados es la segunda espe-

cie que mejor comportamiento obtuvo de las seis variedades de crasuláceas objeto de estudio. Aunque todos los tratamientos tuvieron un comportamiento óptimo para el desarrollo de la especie, el bocaschi y el vermicompost en sus combinaciones con arena y granito son los más ideales.

El mejor rendimiento para la especie *Echeveria prolifica* (B4 – gráfica 4) se presentó en el T8 (Tierra preparada en vivero 75% granito 25%) con 59 H, T7 (Tierra preparada en vivero 100%) con 54 H y T2 (Bocaschi 75% granito 25%) con 41 H, se comporta mejor en sustratos sueltos en cuanto a Tierra preparada en vivero combinada con granito y arena, lo cual indica que los requerimientos nutricionales no son tan altos como la necesidad de establecerse en un medio con buen drenaje.

La especie *Echeveria elegans albicans* (B5 – gráfica 5) evidencia un requerimiento alto de drenaje, desarrollándose de manera óptima en los sustratos sueltos T8 y T9 (Tierra preparada en vivero 75% y granito 25%, tierra preparada en vivero 75% y arena 25%) con 91 H en ambos tratamientos, seguido del T7 (Tierra preparada en vivero 100%) con 80 H. En cuanto al sustrato que contiene vermicompost el mejor tratamiento para la especie es el T6 (vermicompost 75% arena 25%) con 67 H, seguido del T2 (Bocaschi 75% granito 25%) con 65 H.

La especie *Sedum rubrotinctum* (B6 – gráfica 6) evidenció el mejor desarrollo en el T9 (Tierra preparada en vivero 75% arena 25%) con 114 H, seguida del T7 (Tierra preparada en vivero 100%) con 93 H y T8 (Tierra preparada en vivero 75% granito 25%) con 90 H, mostrando que en definitiva el mejor sustrato es la tierra preparada en vivero en combinación con arena. Los tratamientos T6 (Vermicompost 75% arena 25%) con 85 H y T5 (Vermicompost 75% granito 25%) con 84 H son efectivos, sin embargo, se resalta que este pierde toda la efectividad al presentarse sin combinaciones como se evidencia en el T4 (Ver-

micompost 100%) con 46 H. En cuanto al sustrato Bocaschi los mejores desarrollos de la especie se presentaron en T2 (Bocaschi 75% granito 25%) con 75 H y T3 (Bocaschi 75% arena 25%) con 72 H que son tratamientos combinados y presentan buen drenaje, a diferencia del T1 (Bocaschi 100%) que disminuye el desarrollo de la especie con 56 H.

A nivel general para todas las especies en promedio se evidenció: los sustratos que mayor rendimiento generaron son los que presentan combinaciones con granito y arena. La tierra preparada en vivero tuvo un comportamiento representativo en todos sus tratamientos y se ubican en el siguiente orden decreciente, tierra preparada en vivero, bocaschi y vermicompost. Resaltando que no existen diferencias significativas entre los tratamientos compuestos por tierra preparada en vivero, mostrándose con mayor grado de efectividad el T7; respecto al vermicompost no existen diferencias significativas entre el T4 y T5 sin embargo su comportamiento mejora en el T6.

3.2 Porcentaje (%) de individuos enraizados (IEN) por especie en cada tratamiento

Los resultados para el análisis de varianza ANO-

VA (ver tabla 2), generaron el valor F de 169,19, lo que implica que el modelo es significativo con valor $P > 0,0001$; para especies generó el valor de 1108,97 lo que muestra que el modelo es significativo con un valor $P < 0,0001$. Así como para sustratos con un valor de 127,24. Los valores de "Prob > F" inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. Por lo tanto, A, B AB son términos de modelo significativo como se puede ver a continuación:

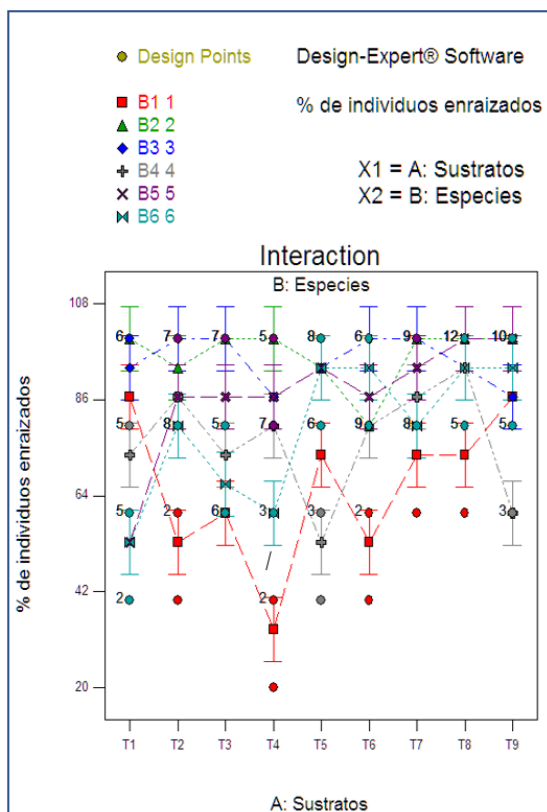
Los resultados para el análisis de varianza ANOVA (Tabla 3), generaron el valor F de 9,51 lo que implica que el modelo es significativo con valor $P > 0,0001$. Los valores de "Prob > F" inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. Por lo tanto, A B AB son términos de modelo significativo como se puede observar en la (Tabla 3). Para especies generó el valor de 44,10 lo que muestra que el modelo es significativo con un valor $P < 0,0001$ lo que indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término. Para sustratos se obtuvo un valor de 6,95 lo que establece que el modelo es significativo con un valor $P < 0,0001$, esto indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término.

Tabla 3. ANOVA para el modelo factorial (sustratos – especies) con respuesta a porcentaje de individuos enraizados. en número de hojas.

ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	42333,33	53	798,74	9,51	0.0001
A-Sustratos	4666,67	8	583,33	6,95	0.0001
B-Especies	18511,11	5	3702,22	44,10	0.0001
AB	19155,56	40	478,89	5,70	0.0001
Pure Error	9066,67	108	83,95		
Cor Total	51400.00	161			

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se pueden evidenciar los comportamientos de cada una de las especies de acuerdo a los tratamientos, teniendo en cuenta la información presentada en la figura 4.

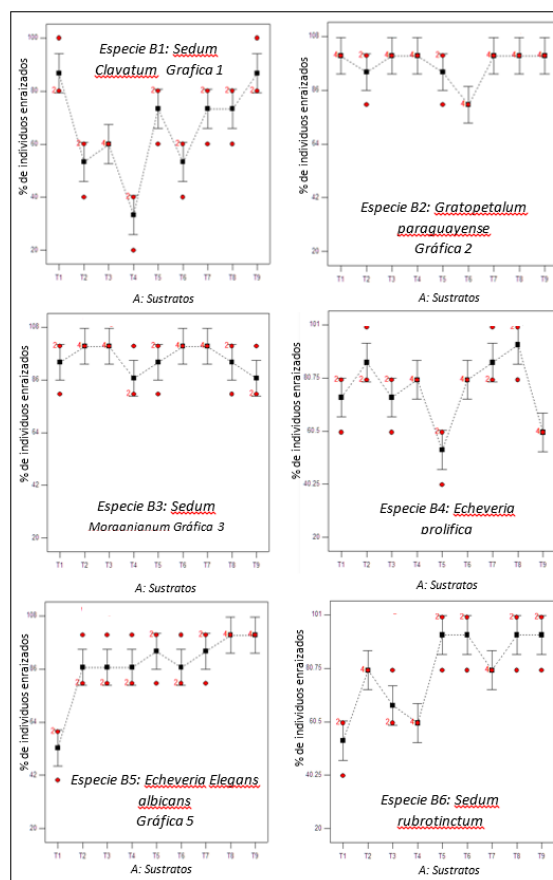


Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Comportamiento de las especies enraizadas en cada uno de los tratamientos

3.2.1 *Sedum clavatum* vs. tratamientos

En la figura 5 (Gráfica 1) se evidencia que *Sedum clavatum* presentó mayor % de individuos enraizados IEN, en el T1 y T9 con 86,6%, seguido de T8, T7 y T5 con 73,3%, T3 con 60%, T6 y T2 con 53,3%, T4 con 33%. Por tanto, las hojas de *Sedum clavatum* tuvieron mayor capacidad de enraizamiento en el T1 y T9. El tratamiento que menos favoreció el enraizamiento fue el T4. En ningún tratamiento se obtuvo el 100% de enraizamiento de las hojas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Comportamiento individual del enraizamiento de cada una de las especies de crasuláceas frente a los tratamientos

3.2.2 *Graptopetalum paraguayense* vs. tratamientos

En la figura 5 (Gráfica 2) se evidencia que *Graptopetalum paraguayense* presentó mayor porcentaje de IEN en T1, T3, T4, T7, T8 y T9 con 100% de enraizamiento, seguido de T2 y T5 con 93,3%, T6 con 80%, de esta manera se estableció reacción de manera positiva en todos los tratamientos estudiados.

3.2.3 *Sedum morganianum* vs. tratamientos

En la figura 5 (Gráfica 3) se evidencia que *Sedum morganianum* presentó mayor porcentaje de IEN en el T2, T3, T6 y T7 con 100% seguido del T1, T5 y T8 con 93,3%, T4 y T9 con 86,6% esta especie se acopla a los diferentes sustratos orgánicos objeto de estudio, puesto que en todos los tratamientos se presentó un enraizamiento por encima del 80%.

3.2.4 *Echeveria prolifica* vs. tratamientos

En la figura 5 (Gráfica 4) se evidencia que *Echeveria prolifica* presentó mayor % de IEN en T8 con 93,3%, seguido de T7 y T2 con 86,6%, T4 y T6 con 80%, T1 y T3 con 73,3%, T9 con 60%, T5 con 53,3% indicando de esta manera que T8 es el sustrato que mejor favorece el enraizamiento de la especie.

3.2.5 *Echeveria elegans albicans* vs. tratamientos

En la figura 5 (Gráfica 5) se evidencia que *Echeveria elegans albicans* presentó mayor porcentaje de IEN en T8 y T9 con el 100%, seguido de T5 y T7 con el 93,35% T2, T3, y T4 con 86,6%, T1 con 60% indicando que T8 y T9 son los mejores tratamientos para el enraizamiento de la especie.

3.2.6 *Sedum rubrotinctum* vs. tratamientos

En la figura 5 (Gráfica 6) se evidencia que *Sedum rubrotinctum* presenta mayor % de IEN en T8, T9, T6 y T5 con 93,3%, seguido del T7 y T2 con 80%, T3 con 66,6%, T4 con 60%, T1 con 53,3% indicando que en ningún tratamiento se produjo el 100% de enraizamiento.

El T8 fue el mejor tratamiento en general para promover el enraizamiento de las especies, con el 92,3% del total de H enraizadas, seguido del T7 con 88,9%, T9 con 87,78%, T5 y T2 con 83,4, %, T6 con 82,3%, T1 con 77,8% y finalmente T4 con el 74,5%, de acuerdo con lo anterior el tratamiento menos indicado para el enraizamiento de las

crasuláceas es el T4 (vermicompost al 100%) y el mejor es el T8 (tierra preparada en vivero al 75% con granito al 25%).

DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en el desarrollo de las especies se evidenció que *Sedum morganianum* y *Graptopetalum paraguayense* obtuvieron un excelente porcentaje promedio de enraizamiento en todos los tratamientos estudiados, resultados similares a los obtenidos por Rodríguez, (2012), en donde indica que la propagación vegetativa, es práctica en muchas especies de la familia crasulácea, como sucede con *Sedum rubrotinctum*, *Sedum morganianum* y *Graptopetalum paraguayense*, diferenciándose de la primera debido a que en este estudio *Sedum rubrotinctum* presentó un porcentaje bajo de enraizamiento (figura 3), especialmente en sustratos conformados por bocaschi 100%, bocaschi 75% arena 25% y vermicompost 100%, por lo cual indica que el desarrollo de esta especie se ve favorecido en mayor medida con sustratos sueltos que facilitan la entrada de la raíz y presenten un mayor drenaje.

De igual forma Rodríguez, (2012) afirma que existen especies del género *Echeveria* que presentan restricciones en la propagación vegetativa, tal cual como se muestra en este estudio en el que la especie *Echeveria prolifica* no alcanzó el 100% de enraizamiento en ninguno de los tratamientos, sin embargo, se resalta que la tierra preparada en vivero 75% granito 25% favorece el enraizamiento de esta especie.

Cada una de las seis especies estudiadas presenta requerimientos específicos para su desarrollo, a manera general las especies de la familia crasulácea presentaron un buen desarrollo en sustratos integrados por tierra preparada en vivero con adición de granito y arena (T7, T8 y T9) seguido de los que tenían bocaschi en combinación con granito

y arena (T1, T2 y T3). En los tratamientos con vermicompost los rendimientos en desarrollo fueron más bajos, debido a que como se pudo evidenciar en campo tiene alta capacidad de solidificación cuando pierde humedad impidiendo que las raíces profundizaran, por lo cual estas quedaban expuestas en la superficie siendo vulnerables a secarse y aumentando así la tasa de mortalidad, al relacionar esta dinámica en lo propuesto por Sánchez, (1969) quien indica que las crasuláceas crecen mejor en suelos muy pedregosos, se debe tener en cuenta la perspectiva de este argumento ya que una cosa es la dispersión del material pedregoso meteorizado para el desarrollo de las plantas y otra el desarrollo de las plantas sobre zonas de roca compacta.

(Singh y Suthar, 2012). Ravindran, et al., (2016) demostraron que el vermicompost contiene diferentes hormonas que promueven el crecimiento de las plantas, incluidas las citoquininas y auxinas, por lo tanto, se puede indicar que el limitante en este estudio para el desarrollo de las crasuláceas fue su alto grado de compactación resultando eficiente si se combina con elementos sueltos que faciliten la entrada de las raíces, aireación y drenaje.

Las especies más representativas por su desarrollo en este estudio son *Sedum rubrotinctum* y *Sedum morganianum* lo que indica que se pueden recomendar para la implementación en proyectos de paisajismo por su rápido desarrollo y adaptación a diferentes sustratos siempre y cuando están hayan sido previamente enraizadas por vía asexual como lo indica Guillot, et al., (2008).

CONCLUSIONES

- Los residuos orgánicos contaminantes de la zona urbana (RO de cocina) y la zona rural (RO del beneficio del café y estiércol bovino) se transformaron para la elaboración de bocaschi y vermicompost, obteniendo sustratos

con características fisicoquímicas que permiten el mejoramiento de los suelos y el desarrollo de las especies crasuláceas.

- El vermicompost es óptimo como complemento de sustrato para el desarrollo de las crasuláceas, sin embargo, al utilizarlo al 100% en el estudio desarrollado presentó limitantes en cuanto al enraizamiento de las especies ya que al estar expuesto directamente al sol se compacta demasiado, lo que genera que sus raíces se alarguen en la superficie y al no poder entrar al sustrato se sequen, por lo cual se sugiere utilizar otro tipo de sustrato para enraizar y luego realizar el proceso de trasplante y de esta forma evitar la mortalidad.
- El estudio permitió determinar cuáles tratamientos les permitían a las especies de la familia crasulácea presentar mejor desarrollo, mostrándose en el siguiente orden: *Sedum rubrotinctum* en el T9, seguida de *Sedum morganianum* en el T6, *Echeveria elegans albicans* en el T8 y T9, *Graptopetalum paraguayense* en el T1, *Echeveria prolífica* en el T8 y finalmente *Sedum clavatum* en el T9.
- Las especies que enraizaron al 100% y al tiempo tuvieron el máximo desarrollo en crecimiento fueron las siguientes: *Graptopetalum paraguayense* en el T7, *Sedum morganianum* en el T6 *Echeveria elegans albicans* T8 y T9.
- Para la especie *Sedum clavatum* existen diferencias significativas en todos los tratamientos con excepción del T9 y T1 cuyos valores en número de hojas son los más elevados. Por lo cual el T1 (bocaschi 100%) es un excelente sustrato para el desarrollo de esta especie igualando el potencial del T9 (Tierra preparada en vivero 75% arena 25%). Para la especie *Graptopetalum paraguayense* el T1 (bocaschi 100%) no presenta diferencias significativas con respecto al T7 (tierra preparada en vivero 100%) y el T3 (75% bocaschi y 25% arena) presentando el rendimiento más alto en número de hojas frente a los demás tratamientos. Por

lo cual se determina que el bocaschi es un excelente insumo para el desarrollo de esta especie de crasulácea.

- Para la especie *Sedum morganianum* el T6 (vermicompost 75% arena 25%) superó de manera considerable al T7 (Tierra preparada en vivero 100%). Los T2 y T3 con bocaschi no presentan diferencias significativas frente al T6 con el mejor rendimiento de crecimiento para esta especie, sin embargo, si hay diferencias significativas frente a los tratamientos control (T7, T8, y T9).
- Para la especie *Echeveria prolifica* el mejor tratamiento es el T8 (Tierra preparada en vivero 75% granito 25%) con diferencias estadísticamente significativas frente a los demás tratamientos.
- Para la especie *Echeveria elegans albicans* los tratamientos control con arena y granito (T8 y T9) presentan los mejores rendimientos de crecimiento en número de hoja ya que existen diferencias estadísticamente significativas frente los demás tratamientos.
- Para la especie *Sedum rubrotinctum* se determina que los tratamientos control (T7, T8 y T9) presenta los mejores rendimientos de crecimiento en número de hojas, los cuales son estadísticamente significativos frente a los demás tratamientos.
- En cuanto al enraizamiento no se presentan diferencias significativas entre los tratamientos para las diferentes especies.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo R, Cameron, V. Sosa y S. Pell, (2004). A molecular phylogenetic study of Graptopetalum (crassulaceae) based on ETS, ITS, RPL16, and TRNLF nucleotide sequences. American Journal of Botany 91(7): 1099-1104.
- Cerrato, M. E., H. A. Leblanc y C. Kameko. (2007). Potencial de mineralización de nitrógeno de Bokashi, compost y lombricompost producidos en la Universidad Earth. Tierra Tropical 3: 183-197

Cronquist, (1981). An Integrated System of Classification of Flowering Plants. Ed. Columbia University Press. 1062 p.

Domínguez, Aira, Kolbe, Gómez Brandón y Pérez Losada, (2019). Los cambios en la composición y función de las comunidades bacterianas durante el vermicompostaje pueden explicar las propiedades beneficiosas del vermicompost Sci. Rep., 9, pp. 1 - 11, 10.1038/s41598-019-46018-w

Guillot, D., E. Laguna y J. Rosselló, (2008). La familia crasulaceae en la flora alóctona valenciana. Monografías de la revista Bouteloua 4. 104 p. Consultado en octubre de 2020 en http://www.floramontiberica.org/bouteloua/monogbouteloua_04_crassulaceae.pdf

Gusain y Suthar, (2020). Vermicompostaje de lenteja de agua (*Spirodela polyrhiza*) empleando Eisenia fetida: cambios en el contenido de nutrientes, actividades de enzimas microbianas y biodinámica de las lombrices de tierra Bioresour. Technol. 123585, 10.1016/j.biortech.2020.123585

Hart, T. H., (1997). Diversity within Mediterranean crassulaceae. Lagasalia 19(1-2): 93100.

Hernández, Real, Delgado, Bautista y Velasco, (2016). Residuos agroindustriales con potencial de compostaje. Agroproductividad, 9(8):10-17

Sánchez, (1969). "La Flora del Valle de México", Herrero, México.

Kuppusamy, Kakarla, Venkateswarlu, Megharaj, Yoon y Lee, (2018). La contaminación por antibióticos veterinarios (AV) como problema agroecológico mundial: una visión crítica Agric. Ecosyst. Reinan. 10.1016 / j.agee.2018.01.026

Mort, Levens, Randle, E. Van Jaarsveld y A. Palmer, (2005). Phylogenetics and diversification of Cotyledon (crassulaceae) inferred from nuclear and chloroplast DNA sequence data. Am J Bot. Jul;92(7):1170-6. doi: 10.3732/ajb.92.7.1170. PMID: 21646139.

Mort, Soltis, Soltis, Ortega y Santos- Guerra, (2001). Phylogenetic relationships and evolution of crassulaceae inferred from matk sequence data. American Journal of Botany 88(1): 76-91

Mosquera, Byron, (2010). Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos [En línea]. El Salvador: FONAG- [Fecha de consulta: octubre de 2020]. Disponible en: http://www.fonag.org.ec/doc_pdf/

abonos_organicos.pdf

- Nasini, De Luca Ricci, Ortolani, Caselli, Massaccesi, Regni, Gigliotti, y Proietti, (2016). Emisiones de gases durante el compostaje de residuos de almazara en condiciones de pila estática En t. Biodeterior. Biodegrad. 107, págs. 70 – 76.
- Ravindran, Contreras-Ramos y Sekaran, (2015). Cambios en las enzimas asociadas al intestino de las lombrices de tierra y en la diversidad microbiana en el tratamiento de desechos fermentados de tenerías utilizando la lombriz de tierra epigeica *Eudrilus eugeniae* Ecol. Ing., 74, págs. 394-401, 10.1016/j.eco-leng.2014.10.014
- Ravindran, Wong, Selvam y Sekaran, (2016). Influencia de la diversidad microbiana y las hormonas de crecimiento de las plantas en el compost y el vermicompost de los desechos fermentados de tenerías. Bioresour. Technol., 217, págs. 200-204, 10.1016/j.biortech.2016.03.032
- Rodríguez, J.C., (2015). Manejo integral de residuos sólidos urbanos domiciliarios en Colombia:
- Mitos y Realidades. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ciencias Económicas. Ensayo. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7349/RodriguezContrerasJuanCarlos2015.pdf?sequence=1>
- Rodríguez Licon, J., (2012). Obtención y propagación in vitro de la crasulácea ornamental *Pachyphytum compactum* rose para su rescate y conservación. Maestría. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Rosas, Ortiz, Herrera y Leyva, (2016). Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas. Agroproductividad, 9(8):18-23.
- Singh y Suthar, (2012). Vermicompostaje de residuos de la industria farmacéutica a base de hierbas: crecimiento de lombrices, nutrientes disponibles para las plantas y calidad microbiana de los materiales finales. Bioresour. Technol., 112, pp. 179-185, 10.1016/j.biortech.2012.02.101.
- Soobhany, (2019). Información sobre la recuperación de nutrientes a partir de desechos sólidos orgánicos mediante procesos de conversión bioquímica para la producción de fertilizantes: una revisión J. Limpio. Pinchar. , 241, págs. 118413, 10.1016/j.jclepro.2019.118413
- Taeporamaysamai y Ratanatamskul, (2016). Co-compostaje de diversos sustratos orgánicos de residuos sólidos urbanos utilizando un prototipo de reactor de vermicompostaje in situ En t. Biodeterior. Biodegrad., 113, págs. 357 – 366 S0964830516301573
- Varnero, Galleguillos y Rojas, (2011). Sistemas de compostaje para el tratamiento de alperujo. Información Tecnológica, 22(5):49-56.
- Zhao, W. Tan, J. Peng, Q. Dang, H. Zhang, B. Xi, (2020). Vías sintéticas dependientes de fuentes de residuos biológicos de grupos funcionales redox dentro de ácidos húmicos que favorecen la decoloración del pentaclorofenol en el proceso de compostaje Reinar. En t., 135, artículo 105380