



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería Química

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

*“Biodegradación de poliestireno expandido
utilizando bacterias promotoras del crecimiento
vegetal”*

Tesis

Para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Presenta: Carol Meritxell Molina Monteleón

Directora: Dra. Janette Arriola Morales

Co-Directora: Dra. Maribel Castillo Morales

Puebla, Puebla. 29 de Julio 2021

CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
JUSTIFICACIÓN.....	5
OBJETIVOS	6
HIPÓTESIS	6
MARCO TEÓRICO.....	7
Residuos	7
Generación de residuos sólidos urbanos	7
Importancia ambiental de los residuos poliméricos.	8
Degradación biológica:.....	9
Composteo	10
Microorganismos presentes:.....	12
Tipos de composteo	13
Variables de importancia.....	15
Tipos de desechos utilizados.....	17
Aplicaciones del compostaje.....	18
Poliestireno	19
Poliestireno expandido	20
Usos.....	21
Bacterias promotoras del crecimiento vegetal	22
Mecanismos de acción	22
Géneros más comunes.....	23
METODOLOGÍA.....	25
Primera etapa: bacterias promotoras de crecimiento vegetal.	25
• Preparación de Inóculo Bacteriano.....	25
• Preparación de las unidades experimentales	26
• Inoculación de las unidades experimentales	27
• Observación.....	27
Segunda etapa: consorcio de bacterias promotoras de crecimiento vegetal	28
• Inoculación de las unidades experimentales	29
• Observación.....	29

• Análisis.....	29
RESULTADOS Y DISCUSION.....	32
Análisis cualitativo del poliestireno después de los tratamientos.....	32
Análisis cuantitativo del poliestireno después de los tratamientos	49
Gráficos del porcentaje de degradación del consorcio 113-134	49
Gráficos del porcentaje de degradación del consorcio 113-135	50
Gráficos del porcentaje de degradación del consorcio 113-K120	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56

Índice de figuras

Figura 1. Composición de los RSU en México, 2017.	8
Figura 2: Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje.	11
Figura 3. Estructura química del poliestireno.....	19
Figura 4. Artículos de poliestireno expandido. Fuente: Valor Compartido, 2020.....	20
Figura 5. Preparación de caldo LB.	26
Figura 6. Composta con restos vegetales.	26
Figura 7. Composta con restos de cáscara de naranja.....	26
Figura 8. Análisis en microscopio óptico.	28
Figura 9. Unidades Experimentales	29
Figura 10. Imagen del consorcio 113+K120 para el sustrato de Naranja (10 x).....	30
Figura 11. Imagen del consorcio 113+K120 para el sustrato de Naranja (10x) durante su análisis en el software Image Tool for Windows V. 3.0.....	31

Índice de tablas

Tabla 1. Sistemas de compostaje.....	14
Tabla 2. Propiedades físicas del poliestireno expandido	21
Tabla 3. Arreglo de las unidades experimentales en la primera etapa.....	27
Tabla 4. Arreglo de las unidades experimentales en la segunda etapa	28
Tabla 5. Observación al microscopio óptico de la cepa 119 con sustrato de naranja	32
Tabla 6. Observación al microscopio óptico de la cepa 119 con sustrato vegetal.	33
Tabla 7. Observación al microscopio óptico de la cepa 134 con sustrato de naranja.	35
Tabla 8. Observación al microscopio óptico de la cepa 134 con sustrato vegetal	38
Tabla 9. Observación fotográfica de la cepa 119.....	40
Tabla 10. Observación fotográfica de la cepa 134.....	41
Tabla 11. Observación fotográfica del consorcio 113+134.....	43
Tabla 12. Observación fotográfica del consorcio 113+135.....	45
Tabla 13. Observación fotográfica del consorcio 113+k120.....	47

Índice de gráficos

Gráfico 1. Porcentaje de degradación Blanco 113-134.....	49
Gráfico 2. Porcentaje de degradación Unidad 1, 113-134.....	50
Gráfico 3. Porcentaje de degradación U2 113-134.....	50
Gráfico 4. Porcentaje de degradación U3 113-134.....	50
Gráfico 5. Porcentaje de degradación Blanco 113-135.....	51
Gráfico 6. Porcentaje de degradación U1 113-135.....	51
Gráfico 7. Porcentaje de degradación U2 113-135.....	52
Gráfico 8. Porcentaje de degradación U3 113-135.....	52
Gráfico 9. Porcentaje de degradación Blanco 113-k120.....	53
Gráfico 10. Porcentaje de degradación U1 113-k120.....	53
Gráfico 11. Porcentaje de degradación U2 113-k120.....	54
Gráfico 12. Porcentaje de degradación Blanco 113-k120.....	54

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) ha incrementado más del 90% en los últimos años; en 1992 se registraron 21.9 millones de toneladas, aumentando a 41.1 millones de toneladas en el 2012 (Jiménez, 2015). Para el 2017, la generación de RSU en México alcanzó 0.98 kilogramos en promedio por habitante (SEMARNAT, 2019). En las ciudades medias y zonas metropolitanas es dónde se genera mayor cantidad de residuos, y en los últimos años las ciudades pequeñas han incrementado los volúmenes de generación de residuos en un 84% (SEMARNAT, 2016), estando relacionado el incremento con el aumento en la capacidad de consumo y la urbanización.

Los residuos poliméricos tienen impactos negativos en la salud humana, flora, fauna y el medio ambiente en general: Aportan emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, tiene dificultad para degradarse, por lo que se acumulan en los diferentes ecosistemas.

Debido a esto, se han buscado diferentes alternativas para solucionar la problemática y lograr una incorporación más rápida al medio ambiente de los residuos de poliestireno expandido. Dentro de las diferentes técnicas que se han explorado se encuentran el aglutinamiento, reciclado mecánico e incineración para la generación de energía eléctrica, ambas técnicas logran solucionar el problema de los residuos sólidos, pero emplean bastante energía y emisiones a la atmósfera (Arthuz, 2019). Para reducir el volumen de los residuos, se han estudiado la disolución del material con solventes químicos, pulverización y reducción del volumen por calor (Maharana, 2007).

Otras técnicas que se han trabajado son en el área de la biorremediación, dónde se buscan procesos biodegradativos utilizando microorganismos con la capacidad de metabolizar y degradar el poliestireno expandido, ocupándolo como fuente de carbono. Algunos de los microorganismos que han demostrado resultados positivos son de los géneros *Vibrio*, *Comamonas*, *Pseudomonas*, *Aeromona* y *Shewanella*, logrando biodegradar poliestireno expandido tratado previamente con solventes orgánicos (Hernández, 2015). Otro estudio demostró la capacidad degradativa de los géneros *Bacillus spp* y *Clostridium spp*, estas bacterias presentes en humus de lombriz alcanzaron un porcentaje de biodegradación total de 9.4%, trabajando con rectángulos de poliestireno expandido dentro de una maceta llena de humus (Cabrejos, 2016). Incluso se han observado deterioro de poliestireno expandido causado por los hongos *Aureobasidium pullulans var. Melanogenum* (Castiglia, 2015).

La problemática expuesta nos lleva a formular la pregunta de investigación: *¿Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal tienen capacidad para degradar poliestireno expandido en un proceso de compostaje?*

JUSTIFICACIÓN

El crecimiento acelerado de la población, la urbanización, la industrialización y el desarrollo económico han causado un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos durante los últimos años. A nivel mundial, se estima que la producción de residuos sólidos urbanos alcanzó, aproximadamente, 1300 millones de toneladas diarias en 2010 (SEMARNAT, 2019). Tan sólo en México, en el año 2017, la generación de residuos sólidos urbanos alcanzó 44.6 millones de toneladas, representando un aumento del 35.6% respecto a 2003 (SEMARNAT, 2019). Esto ha convertido a la gestión de residuos sólidos urbanos en uno de los problemas ambientales de mayor importancia en los últimos años. A grandes rasgos, la composición de los residuos sólidos urbanos puede clasificarse en residuos de comida y materiales orgánicos, cartón, papel, plástico, vidrio, textiles, aluminio, metales ferrosos y metales no ferrosos. En 2017, un 11% del total de los residuos sólidos urbanos generados en México fueron plásticos, dónde encontramos el poliestireno expandido (SEMARNAT, 2019).

El poliestireno expandido es ampliamente utilizado debido a sus propiedades que lo hacen muy ligero y de bajo costo. Se utiliza principalmente en el sector del embalaje, aprovechando que se puede adaptar a las necesidades de cada producto a proteger, permitiendo que sea utilizado para una gran diversidad de productos (alimentación, electrodomésticos, hardware, etc.). También figura su aplicación en el sector de la construcción, dónde se utiliza como placa de aislamiento térmico (Samper, 2008).

El uso del poliestireno ha ocasionado un gran número de problemas debido a la degradación lenta en su entorno; la ausencia de un sustituto; la producción, el manejo incorrecto y la gestión inadecuada de sus residuos; su proceso de producción en el que se utiliza petróleo y otros insumos químicos nocivos para el ambiente, al ser utilizado en gran parte como plástico de un solo uso se acumula y altera los ecosistemas. Otro factor importante radica en la presencia de dioxinas, sustancias tóxicas que pueden causar problemas de reproducción, desarrollo y alteraciones en el sistema inmunitario del ser humano, así como también pueden ser cancerígenas. En este sentido, se han buscado estrategias para reducir el impacto ambiental que provocan los residuos de poliestireno expandido, mediante distintas técnicas, dónde encontramos la biodegradación.

OBJETIVOS

General

- Evaluar la capacidad de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal como degradadoras de poliestireno expandido.

Particulares

- Analizar cualitativamente la degradación de poliestireno expandido utilizando bacterias promotoras del crecimiento vegetal en presencia de dos sustratos orgánicos.
- Comparar cualitativamente la efectividad de las bacterias promotoras y de los consorcios bacterianos para degradar poliestireno expandido en presencia de dos sustratos orgánicos.

HIPÓTESIS

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal si degradan poliestireno expandido en presencia de sustratos orgánicos.

MARCO TEÓRICO

Residuos

La “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos” define la palabra “residuos” como aquel material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final.

De igual manera, la “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos” clasifica los residuos de la siguiente manera:

- **Residuos de Manejo Especial:** Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.
- **Residuos Peligrosos:** Son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.
- **Residuos Sólidos Urbanos:** Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos. Los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos.

Generación de residuos sólidos urbanos

Se estima que la producción mundial de residuos sólidos urbanos alcanzó, aproximadamente, 1300 millones de toneladas diarias en 2010 (SEMARNAT, 2019). En México la generación de residuos sólidos urbanos ha incrementado más del 90%, tan sólo en 2012 se generaron 41.1 millones de toneladas (Jiménez, 2015) y en 2017 se generaron 44.6 millones de toneladas (SEMARNAT, 2019).

En las ciudades medias y zonas metropolitanas es dónde se genera mayor cantidad de residuos, y en los últimos años las ciudades pequeñas han incrementado los volúmenes de generación de residuos en un 84% (SEMARNAT, 2016). En el estado de Puebla, la generación estimada de residuos sólidos urbanos para el municipio alcanzó 1,894.35 miles de toneladas en 2012 (Compendio de estadísticas ambientales 2018, 2018). Y se relaciona el incremento en la generación de residuos con el aumento en la capacidad de consumo y la urbanización. El crecimiento

acelerado de la población, la urbanización, la industrialización y el desarrollo económico han causado un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos durante los últimos años.

A grandes rasgos, la composición de los residuos sólidos urbanos puede clasificarse en residuos de comida y materiales orgánicos, cartón, papel, plástico, vidrio, textiles, aluminio, metales ferrosos y metales no ferrosos.

En 2012, la generación estimada de residuos plásticos en México fue de 4,584.99 miles de toneladas (Compendio de estadísticas ambientales 2018, 2018), y en 2017, un 11% del total de los residuos sólidos urbanos generados en México fueron plásticos (figura 1), donde encontramos el poliestireno expandido por ser un derivado del petróleo (SEMARNAT, 2019).

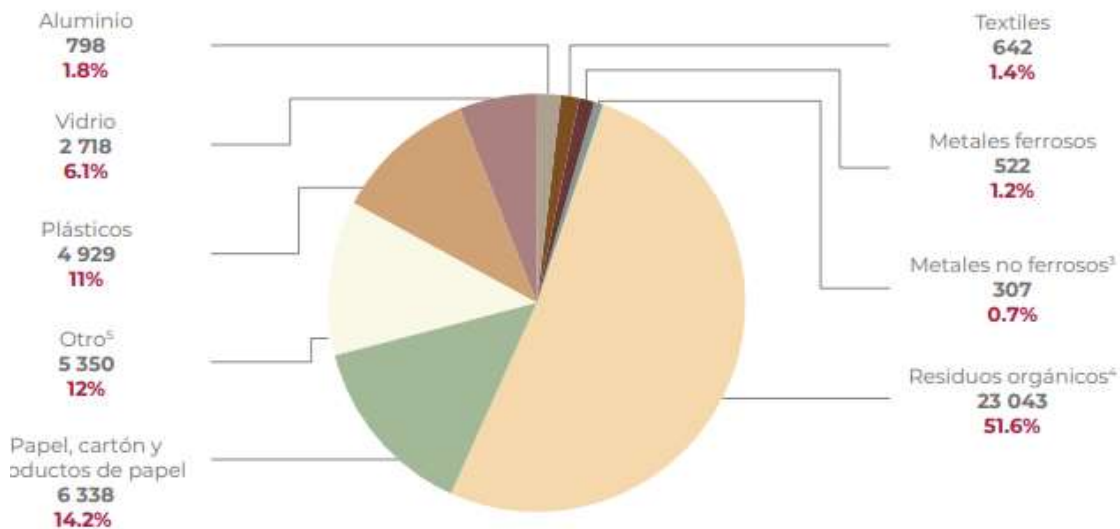


Figura 1. Composición de los RSU en México, 2017.
Fuente: SEMARNAT, 2019.

Importancia ambiental de los residuos poliméricos

Los residuos poliméricos aportan 2000 millones de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera a nivel mundial, entre otros impactos negativos que varían de acuerdo al tipo de polímero. Estos residuos pueden ser encontrados en los océanos, rellenos sanitarios y otros compartimientos terrestres, afectando la vida silvestre y la salud humana (Lithner, 2011).

En cuanto al poliestireno expandido, es considerado como un residuo nocivo para el medio ambiente debido a los siguientes puntos (Arthuz, 2019):

- Degradación lenta y ausencia de un sustituto.
- Producción de residuos.
- La fuente de generación es el petróleo, materia prima no renovable.
- Algunos de los insumos químicos utilizados para producirlos son nocivos para el ambiente.

En 1950, se registró una producción de 1.7 millones de toneladas de plástico a nivel mundial, y desde entonces, la producción de plástico se ha mantenido en crecimiento constante. Ha tenido un incremento de 13.6% promedio anual durante 26 años. Desde 1976, el crecimiento ha sido más moderado, pero aún se pueden observar tasas de producción relativamente altas (Góngora, 2014).

El poliestireno expandido tiene importancia ambiental porque no se degrada debido a su naturaleza inerte y se acumula en los ecosistemas, puede ser ingerido por animales y al no ser digerible, produce en ellos muerte por inanición. Además, contiene dioxinas, sustancias tóxicas que provocan problemas de salud en el ser humano (problemas de reproducción, desarrollo, alteraciones en el sistema inmune, cáncer).

El impacto ambiental de la producción de poliestireno expandido puede resumirse en los siguientes puntos (EPS Industry Alliance Packaging, 2013):

- Residuos sólidos: Se refiere a los lodos de tratamiento de aguas residuales, recortes o materiales de desechos de las operaciones de fabricación, sólidos recolectados en dispositivos de control de contaminación del aire.
- Emisiones atmosféricas: Incluyen dióxido de carbono y otras sustancias clasificadas como contaminantes: óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, óxidos de azufre y monóxido de carbono.
- Contaminación acuática: Por sustancias como sólidos disueltos y suspendidos, hierro, cromo, ácidos, amoníaco, y alteraciones en los valores de demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno.

Degradación biológica

La degradación sucede cuando los materiales o sustancias pierden sus características iniciales para transformarse en algo más simple. Biológicamente, la naturaleza se encarga de convertir los elementos para poder absorberlos, ya sea como mecanismo de defensa o utilizándolos como fuente de energía, carbono, nitrógeno, hierro y potasio, para realizar sus funciones metabólicas, encargándose de eliminar o convertir elementos que son producidos por el ser humano. Por esto, comenzaron a desarrollarse técnicas biológicas basadas en la degradación de compuestos contaminantes complejos hasta compuestos simples. Los factores que intervienen en el proceso de biodegradación son (Cabrera, 2015):

- Temperatura

- Humedad del suelo
- pH
- Disponibilidad de oxígeno

La degradación de polímeros está determinada por el tipo de microorganismo, la estructura química, disponibilidad de grupos hidrofílicos, peso molecular, densidad del polímero, cantidad de regiones cristalinas y amorfas, enlaces fáciles de romper, o enlaces éster o amidas o su naturaleza física (Hernández, 2015). La degradación sucede en sistemas biológicos, mediante hidrólisis, seguido por oxidación y, en general, estos cambios resultan en alteraciones en las propiedades ópticas, mecánicas y eléctricas, que pueden observarse en forma de grietas, descoloración, deslaminación, división, entre otras (Janczak, 2018). Actualmente, se estima que más de 400 especies de microorganismos han sido identificadas como degradadoras de polímeros (Lear, 2021).

Composteo

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) define como compostaje a la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes (Pantoja, 2013). Mediante procesos biológicos y en las condiciones adecuadas de temperatura, humedad y presencia de oxígeno se asegura la transformación de restos orgánicos en un producto final homogéneo asimilable por las plantas.

Otra forma de interpretar el compostaje es como la serie de procesos metabólicos realizados por microorganismos que aprovechan el nitrógeno y carbono presentes para producir su propia biomasa en presencia de oxígeno. Los microorganismos generan calor al descomponer el Carbono (C), Nitrógeno (N) y toda la materia orgánica inicial, lo que permite el desarrollo de temperaturas termófilas, generando variaciones de temperatura a lo largo de todo el proceso, hasta obtener un sustrato sólido más estable llamado "compost".

La variación de temperatura durante el proceso permite reconocer 3 etapa iniciales y una etapa de maduración de duración variable, tal como se muestra en la Fig. 2:

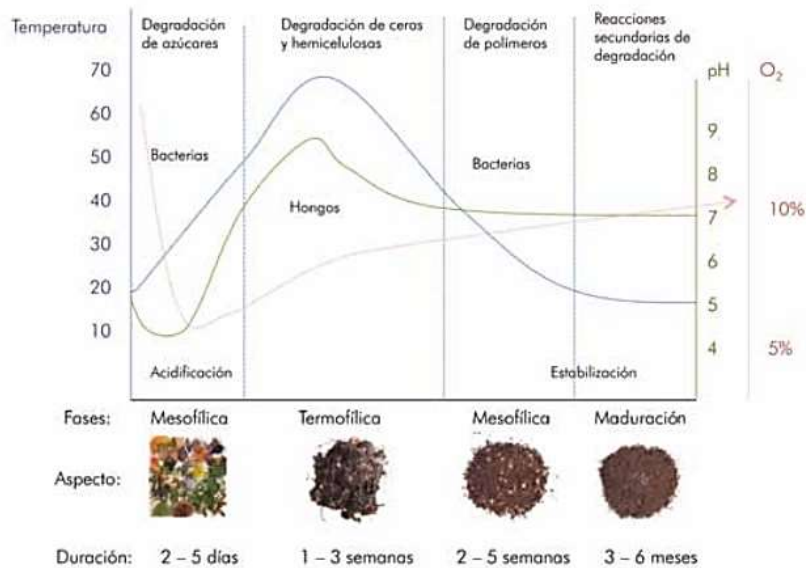


Figura 2: Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje.
Fuente: Pantoja, 2013

1. Fase mesófila:

El material inicial aumenta desde la temperatura ambiente hasta los 45°C en pocos días. La actividad microbiana es responsable de este aumento, puesto que los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor. En esta fase puede bajar el pH (hasta 4 o 4.5) por producción de ácidos orgánicos en la descomposición de compuestos solubles. Esta fase dura entre 2 y 8 días.

2. Fase termófila o de higienización:

Los microorganismos mesófilos son reemplazados por aquellos que se desarrollan a mayores temperaturas, como bacterias termófilas. Esto vuelve más fácil la degradación de fuentes más complejas de C (ejemplo la celulosa y la lignina) y el material aumenta su temperatura a más de 45°C. El pH del medio sube debido a la transformación de nitrógeno en amoníaco que efectúan las bacterias. En las temperaturas por encima de los 55°C se eliminan los quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material inicial. Después de los 60°C se presentan las bacterias que producen esporas y actinobacterias, encargadas de descomponer las ceras, hemicelulosa y otros compuestos de carbono complejos. El calor generado en esta fase también destruye bacterias y contaminantes de origen fecal, obteniendo un producto

higienizado y permitiendo que esta fase sea conocida también con el nombre de “fase de higienización”. Dependiendo del material inicial, las condiciones climáticas y otros factores, la duración de esta fase puede variar desde unos días hasta meses.

3. Fase de enfriamiento o mesófila II:

La temperatura desciende hasta los 40-45°C al agotarse las fuentes de carbono y nitrógeno en el material en compostaje, continua la degradación de polímeros como la celulosa y se observa la aparición de hongos visibles a simple vista. Cuando la temperatura llega a 40°C los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH se mantienen ligeramente alcalino, descendiendo levemente. Esta fase dura varias semanas y es comúnmente confundida con la fase de maduración.

4. Fase de maduración:

Se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados que dan pie a la formación de ácidos húmicos y fúlvicos, el calor que se genera es mucho menor. La fase de maduración puede demorar meses a temperatura ambiente.

Microorganismos presentes

En las fases del proceso de compostaje se presentan diferentes microorganismos (Trautmann, 1996):

- **Bacteria:**

Las bacterias son los organismos de menor tamaño en la composta, así como los más numerosos (del 80 al 90%). Son las responsables de la mayor parte de la degradación de la materia orgánica y la generación de calor. Utilizan una amplia variedad de enzimas para descomponer químicamente los diferentes compuestos orgánicos.

Cuando la temperatura de la composta supera los 40°C se presentan las bacterias termofílicas, dominando el género *Bacillus*, aumentando cuando la temperatura llega a 50-55°C y la población desciende de forma drástica al alcanzar una temperatura de 60°C o mayor.

En las máximas temperaturas de la composta se pueden encontrar bacterias del género *Thermus*, y al disminuir la temperatura, vuelven a predominar las bacterias mesofílicas. En general, cuanto más larga sea la fase de maduración, se presenta mayor diversidad en la comunidad microbiana.

- **Actinomicetos**

Los actinomicetos son bacterias filamentosas responsables del olor característico del suelo. Carecen de núcleos, pero crecen filamentos

multicelulares como hongos. Son importantes en el proceso de compostaje porque se encargan de la degradación de compuestos orgánicos complejos (celulosa, lignina, quitina y proteínas), así como también pueden descomponer químicamente restos de tallos leñosos y corteza. Se pueden presentar durante la fase termofílica y en la fase de maduración más fría, en las últimas etapas de la formación de hummus en forma de largos filamentos ramificados que se extienden a través del compost, algunas veces se presentan como colonias circulares.

- **Hongos**

Como responsables de la descomposición de muchos polímeros vegetales complejos se encuentran los mohos y las levaduras. Los hongos que se encuentran en el compost, en su mayoría, son saprófitos y viven de material muerto, obteniendo energía al descomponer la materia orgánica: los hongos permiten a las bacterias continuar el proceso de descomposición una vez que la mayor parte de la celulosa se agota. Se propagan de manera rápida y son capaces de degradar los residuos orgánicos que son demasiado secos, ácidos o bajos en nitrógeno para la descomposición bacteriana. Se encuentran en las fases de compostaje mesófilas y termófilas, encontrándose en la capa externa de compost cuando la temperatura aumenta. Crecen como filamentos invisibles y como colonias difusas grises o blancas en la superficie.

- **Protozoos**

Animales microscópicos unicelulares que se presentan en las gotas de agua en la composta. Actúan como consumidores secundarios que ingieren bacterias y hongos, también obtienen sus alimentos de materia orgánica, por los que tienen un papel menor en la descomposición si se le compara con las bacterias y los hongos.

- **Rotíferos**

Son encontrados en películas de agua en la composta. Se alimentan de materia orgánica, así como bacterias y hongos.

Tipos de composteo

De acuerdo con lo señalado por Barrena (2006) se pueden distinguir los siguientes tipos de composteo:

- **Dinámicos:** provistos de algún sistema de agitación del material a lo largo del proceso.
- **Estáticos:** durante todo el proceso, el material permanece tal cual se dispone inicialmente, y no es agitado en ninguna ocasión.

- **Intensivos:** permiten tratar un gran volumen de residuo ocupando poca superficie.
- **Extensivos:** requieren de grandes extensiones de terreno.

Algunos de los sistemas de compostaje que existen son:

Tabla 1. Sistemas de compostaje

Sistema	Tipo	Características	Dimensiones
Pilas volteadas	Sistema dinámico extensivo	El material se dispone en hileras o pilas, de sección triangular, que son volteadas en repetidas ocasiones a lo largo del proceso. Se utilizan máquinas volteadoras para efectuar el volteo, oxigenando el material y mezclando la mezcla.	Altura: 1.2-1.8 m Ancho: 2.4-3.6 m
Canales	Sistema dinámico intensivo	Se alimenta el residuo fresco por un extremo y se obtiene el producto final por el extremo en el lado contrario. Se utilizan unos canales alargados de sección rectangular que tienen un sistema de inyección de aire. Con una maquina volteadora se voltea el material, homogeneizándolo y moviéndolo a través del canal. El tiempo que permanece el material en el canal depende del número de veces que pasa la máquina volteadora, de modo que, al llegar al final de canal se da por finalizada la etapa de descomposición.	
Túneles	Sistema estático intensivo	Consiste en un túnel cerrado con un sistema de aireación forzada. Al ser un sistema cerrado, permite controlar mejor las condiciones del proceso, gases y malos olores. Tiene un elevado coste de instalación y se utilizan en lugares cercanos a núcleos urbanos, por el control de olores y las dimensiones menores.	Altura: alrededor de 4 m, Ancho:5-6 m Longitud: Variable (20 m habitualmente)
Sistemas cerrados o en recipiente	Sistema intensivo dinámico	Se utilizan recipientes cerrados, comúnmente bidones de plástico. Este sistema brinda protección contra factores externos como lluvia, vientos fuertes, animales, etc., además facilita las labores de volteo, y extracción de lixiviado. Para llegar a la fase de maduración el producto toma de seis a diez semanas.	Las dimensiones son variables. En el caso de los bidones plásticos de 220 litros el

			diámetro suele ser de 60 cm.
--	--	--	------------------------------

Variables de importancia

Se deben tomar en cuenta los parámetros que afectan el crecimiento y reproducción de los microorganismos, ya que son los responsables de la transformación de la materia orgánica en el proceso de compostaje. También se toman en cuenta factores externos, ya que el proceso depende en gran parte de las condiciones ambientales, método utilizado, materias primas empleadas y otros elementos.

- **Temperatura**

La temperatura tiene un amplio rango de variación en función de la fase del proceso. El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 65°C sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo), para llegar nuevamente durante la fase de maduración a una temperatura ambiente. Es deseable que la temperatura no decaiga demasiado rápido, ya que, a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y mayor higienización (Pantoja, 2013).

La temperatura es consecuencia del tipo de proceso y por tanto un indicador de su funcionamiento. El incremento de la actividad biológica genera calor, que es retenido al considerarse el residuo una masa autoaislante que provoca un incremento general de la temperatura. El incremento de la temperatura en la primera parte del compostaje indica la presencia de materiales muy degradables y unas condiciones de trabajo adecuadas, mostrando el desarrollo correcto del proceso.

La temperatura que se alcanza en cada etapa depende de la energía desprendida, de las pérdidas (convección, radiación, conducción) y de la capacidad de almacenar calor que afecta sobre todo cuando el desprendimiento de energía es bajo (Barrena, 2006).

- **Oxígeno o aireación**

El compostaje es un proceso aerobio y se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración de los microorganismos, liberando a su vez, dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Así mismo, la aireación evita que el material se compacte o se encharque. Las necesidades de oxígeno varían durante el proceso, alcanzando la mayor tasa de consumo durante la fase termofílica. La saturación de oxígeno en el medio no debe bajar del 5%, siendo el nivel óptimo el 10%. Un exceso de aireación provocaría el descenso de temperatura y una mayor pérdida de la humedad por evaporación, haciendo que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua.

Las células de los microorganismos se deshidratan, algunos producen esporas y se detiene la actividad enzimática encargada de la degradación de los diferentes compuestos. Por el contrario, una baja aireación, impide la suficiente evaporación de agua, generando exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis. Se producen entonces malos olores y acidez por la presencia de compuestos como el ácido acético, ácido sulfhídrico (H_2S) o metano (CH_4) en exceso (Pantoja, 2013).

El suministro de oxígeno al material en descomposición se realiza mediante los sistemas de aireación y/o volteo de cada tecnología. La aireación también puede producirse de forma natural por ventilación pasiva cuando la mezcla tiene una porosidad y una estructura que favorece el intercambio de gases por fenómenos físicos: difusión, evaporación, diferencias de temperatura (Barrena, 2006).

- **Humedad y porosidad**

La humedad es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular. La humedad óptima para el compost se sitúa alrededor del 55%, aunque varía dependiendo del estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema empleado para realizar el compostaje (ver sección sobre Tamaño de Partícula). Si la humedad baja por debajo de 45%, disminuye la actividad microbiana, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (>60%) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material. En procesos en que los principales componentes sean substratos tales como aserrín, astillas de madera, paja y hojas secas, la necesidad de riego durante el compostaje es mayor que en los materiales más húmedos, como residuos de cocina, hortalizas, frutas y cortes de césped. El rango óptimo de humedad para compostaje es del 45% al 60% de agua en peso de material base (Pantoja, 2013).

- **Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)**

Generalmente, los nutrientes que aportan los residuos son suficientes para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos. Para conseguir un proceso que se desarrolle correctamente es necesario lograr un equilibrio entre los diferentes nutrientes, especialmente entre el nitrógeno y el carbono. De esta relación depende si el proceso es más lento (en relaciones C/N altas), y también es importante en las condiciones de inicio de compostaje, así como en la cinética y desarrollo de las fases de descomposición y maduración. La relación C/N de un residuo puede ajustarse al mezclarlo con otro residuo que presente características complementarias.

La relación C/N varía en función del material de partida y se obtiene la relación numérica al dividir el contenido de C (%C total) sobre el contenido de N total (%N total) de los materiales a compostar. Esta relación también varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, desde 35:1 a 15:1 (Pantoja, 2013).

- **pH**

El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso (desde 4.5 a 8.5). En los primeros estadios del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoniaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro. El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0- 7,5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de 5,8 a 7,2 (Pantoja, 2013).

El pH, además de condicionar la presencia de vida microbiana y ser indicador de la evolución del proceso, las subidas bruscas de pH pueden facilitar la liberación de nitrógeno amoniacal, ya que un pH básico extremo afecta a los equilibrios ácido-base que influyen en la conservación del nitrógeno (Barrena, 2006).

- **Tamaño de partícula**

La actividad microbiana está relacionada con el tamaño de la partícula, esto es, con la facilidad de acceso al sustrato. Si las partículas son pequeñas, hay una mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. El tamaño ideal de los materiales para comenzar el compostaje es de 5 a 20 cm. La densidad del material, y por lo tanto la aireación de la pila o la retención de humedad, están estrechamente relacionados con el tamaño de la partícula, siendo la densidad aproximadamente 150 -250 kg/m³, conforme avanza el proceso de compostaje, el tamaño disminuye y, por tanto, la densidad aumenta, 600-700 kg/m³ (Pantoja, 2013).

Tipos de desechos utilizados (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, 2013).

Dentro de los tipos de desechos que son particularmente utilizados o procesados en el proceso de compostaje, podemos distinguir los siguientes:

- **Domésticos:**

Son los que provienen de la preparación de comidas, desechos de origen animal, alimentos caducados o estropeados, cáscaras de frutas, restos de café, té e infusiones, cáscaras de huevo, cortes de cabello que no esté teñido, virutas de serrín, productos de papel y cartón que no se encuentren

impresos, coloreados ni mezclados con plástico y desechos de cocina en general.

- **De jardín y subproductos agrícolas:**
En estos se incluyen los restos de césped o pasto, restos de cultivos, hojarasca y ramas trituradas, flores muertas, tallos y otros desechos procedentes de podas.
- **Desechos del ganado:**
Se refieren a las deyecciones de los animales (estiércoles, orina, etc.), contienen un gran porcentaje de nutrientes.
- **Forestales:**
Son los desechos que provienen de los árboles: hojas y ramas caídas. Poseen una gran cantidad de celulosa y lignina, que continúan el proceso de mineralización después de ser aplicado el compost en el suelo.

Aplicaciones del compostaje

El proceso de compostaje es utilizado para degradar compuestos orgánicos y disminuir su presencia en rellenos sanitarios o tiraderos al suelo abierto. Una vez que se completa el proceso y se logra la descomposición total o parcial de la materia orgánica, el compost se agrega al suelo como abono o fertilizante para obtener características más deseables y mejorar la calidad de éste. Entre los beneficios que otorga están los siguientes:

- Mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
- Mejora la capacidad de retención de humedad del suelo y la capacidad de intercambio de cationes en el mismo.
- Amortigua los cambios de pH en el suelo.
- Disminuye los cambios bruscos de temperatura.
- Permite a las plantas absorber más nitrógeno como consecuencia de la relación C/N.

Debido a estas propiedades, el producto de la composta se utiliza para lo siguiente:

- Como alternativa a otras enmiendas orgánicas (estiércoles, purines) para mantener o incrementar el contenido de materia orgánica (Junta de Andalucía, s.f).
- Como alternativa o complemento a la fertilización inorgánica para incrementar el rendimiento de las cosechas (Junta de Andalucía, s.f).
- Se utiliza en los viveros como sustituto parcial o complemento de las turbas, favorece al desarrollo, crecimiento y supervivencia de la planta.

- En jardinería y paisajismo es utilizado para aumentar la resistencia de los céspedes ante heladas. También se utiliza como sustituto de la tierra vegetal en el diseño de jardines porque enriquece el suelo.
- Si se encuentra en la fase de enfriamiento y es aplicado brinda a las plantas un porcentaje de nutrientes fácilmente asimilables, pero no debe ser utilizado para germinar semillas puesto que aún no presenta un pH estable y puede afectar negativamente la germinación.

También se utiliza en menor medida para la degradación de algunos compuestos agrotóxicos y remoción de contaminantes. En la biorremediación de sitios con suelos muy perturbados o contaminados, y como medio para la biofiltración. Algunos de los contaminantes que se han degradado durante un proceso de composteo son gasolina, combustible diésel, aceite, grasa, insecticidas y herbicidas, preservadores de la madera, residuos de refinera, nitrocelulosa, TNT y RDX (Sauri, 2002).

Poliestireno

El poliestireno es un polímero de origen hidrocarbúrico que tiene al estireno como monómero base. Es posible sintetizar el poliestireno por diferentes métodos y copolimeriza con diferentes monómeros, produciendo materiales de amplia aplicación.

Su cadena principal es la del polietileno: cada dos unidades $-CH_2-$ se presenta un anillo aromático sustituyente, otorgándole el carácter amorfo y su peculiar reactividad, como puede observarse en la Figura 3.

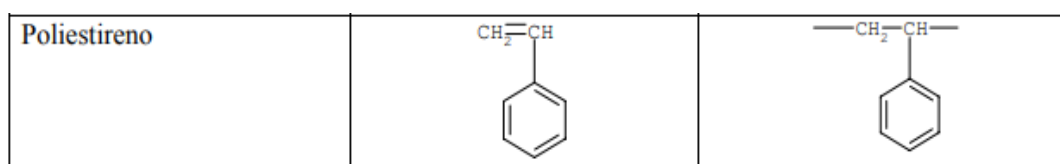


Figura 3. Estructura química del poliestireno.

Fuente: León, 2007.

De este material existen cuatro tipos principales (ECOPLAS, 2011):

- **Poliestireno Cristal:** el producto de la polimerización del estireno puro se denomina poliestireno cristal o poliestireno de uso general (GPPS General Purpose Polystyrene, siglas en inglés). Es un sólido transparente, duro y frágil. Es vítreo por debajo de 100 °C. Por encima de esta temperatura es fácilmente procesable y puede dársele múltiples formas que es transparente, rígido y quebradizo.

- **Poliestireno de Alto impacto:** para mejorar la resistencia mecánica del material, se puede añadir en la polimerización hasta un 14% de caucho (casi siempre polibutadieno). El producto resultante se llama poliestireno de alto impacto (HIPS, High Impact Polystyrene, siglas en inglés). Es más fuerte, no quebradizo y capaz de soportar impactos sin romperse. Su inconveniente principal es su opacidad, si bien algunos fabricantes venden grados especiales de poliestireno impacto translúcido.
- **Poliestireno Expandido:** otro miembro de esta familia es el poliestireno expandido (EPS, siglas en inglés). Consiste en 95% de poliestireno y 5% de un gas, generalmente pentano que forma burbujas que reducen la densidad del material. Su aplicación principal es como aislante en construcción y para el embalaje de productos frágiles, muy ligero.
- **Poliestireno Espumado mediante extrusión:** a partir de poliestireno cristal fundido se puede obtener, mediante inyección de gas, una espuma rígida denominada poliestireno extrudado (XPS). Sus propiedades son similares a las del EPS, con el cual compite en las aplicaciones de aislamiento, pero a diferencia del EPS, el poliestireno extrudado presenta burbujas cerradas, por lo que puede mojarse sin perder sus propiedades aislantes.

Poliestireno expandido

El poliestireno expandido (EPS), conocido comúnmente como “unicel” o “hielo seco”, es un material plástico celular y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible (derivado del petróleo) o uno de sus copolímeros, que contienen al pentano como agente expansor. Se produce en perlas blancas que consisten en una serie de celdas cerradas, sólidamente soportadas y termoselladas tangencialmente entre sí, que contienen aire ocluido en su interior (Barrera, 2017), donde aproximadamente el 98% del volumen es aire y 2% de materia sólida (Martínez, 2013).



Figura 4. Artículos de poliestireno expandido. Fuente: Valor Compartido, 2020

Es preparado con el método de suspensión y en presencia de sustancias capaces de liberar gases durante el proceso de polimerización, produciendo la expansión de la masa polímera (Perdomo, 2002).

Propiedades químicas

Es estable frente a muchos productos químicos, pero no es estable frente a ácidos concentrados al 100%, disolventes orgánicos (acetona, esteres), hidrocarburos alifáticos saturados, aceite de diésel y carburantes (Carrillo, 2019).

Propiedades físicas

De acuerdo con lo que menciona Carrillo (2009) las propiedades dentro de las propiedades del poliestireno expandido se tienen las siguientes:

Tabla 2. Propiedades físicas del poliestireno expandido

Propiedad	Valor
Densidad	1.04 g/cm ³ pero puede variar en función de la aplicación, por lo que la densidad se sitúa en un intervalo de 10 kg/m ³ a 50 kg/m ³
Aislamiento térmico	Excelente capacidad de aislamiento térmico frente al calor y el frío.
Comportamiento frente al agua	No es higroscópico. Los niveles de absorción son mínimos (1% y 3%).
Estabilidad dimensional	Sometido a variaciones dimensionales debido a la influencia térmica: entre 0.05 y 0.07 mm por metro de longitud y por grado centígrado.
Estabilidad frente a la temperatura	Puede mantener sus propiedades hasta los 100°C, para acciones de corta duración y 80°C para acciones continuas y con el material sometido a una carga de 80°C.
Comportamiento frente a factores atmosféricos	La superficie se vuelve frágil y amarillenta bajo la exposición prolongada a la luz UV, esto facilita la erosión por parte de la lluvia y el viento.

Usos

En los últimos años se ha incrementado el uso de poliestireno expandido, debido a sus ventajas de ser liviano, fácil de formar, aislante térmico y acústico, económico de producir, amortiguador, dimensionalmente estable, resistente al calor y la humedad (Barrera, 2017).

Conforme lo señalado por NOVA Chemicals Corporation (2005), por sus propiedades físicas y químicas el poliestireno expandido es utilizado ampliamente

en diferentes áreas y de maneras distintas, como aislante térmico y acústico principalmente, algunos de sus usos son:

- Espumas de especialidad: Contenedores para alimentos, copas, tazas para café, recipientes para comida para llevar, vajillas desechables.
- Embalajes: Neveras y embalajes para fines generales, bandejas divisorias de refrigeración, aislamiento de aire acondicionado, protección de ordenadores contra impactos, contenedores farmacéuticos, expositores en puntos de venta.
- Construcción: Aislamiento de suelos, techos y paredes, paneles aislados estructurales, cubiertas, núcleos de puertas, formas de hormigón aislante, sistema de aislamiento de tejados, aislamiento exterior y sistemas de acabado.
- Deportes: Elementos de flotación, juguetes, ropa deportiva, cascos para ciclistas.

Bacterias promotoras del crecimiento vegetal

Se definen como bacterias promotoras del crecimiento vegetal al conjunto de bacterias habitantes de la rizosfera de las plantas, que estimulan el crecimiento de éstas (Ahmad, 2008). Potencian el crecimiento al mejorar la disponibilidad de nutrientes y ayudando a la producción de hormonas necesarias para el desarrollo de las plantas, las protegen de posibles agentes patógenos y tienen la habilidad de producir o cambiar la concentración de reguladores del crecimiento vegetal (Ahmad, 2008). Son una alternativa al uso de fertilizantes y agroquímicos puesto que además pueden ampliar el espectro de suelos que se pueden utilizar para el cultivo.

Mecanismos de acción

Los mecanismos de acción de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal encierran varios procesos en los cuales las bacterias alteran el desarrollo vegetal. Se pueden clasificar, de manera general, en extracelulares (que ocurren en el exterior de la rizosfera) y en intracelulares. Según su acción, se dividen en directos e indirectos (Benjumeda, 2017):

- **Mecanismos de acción directos:** Ocurren dentro de la planta y afectan su metabolismo
 - **Fijación de nitrógeno:** Se encuentran las bacterias simbióticas y las bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre (Géneros *Azospirillum* o *Azoarcus*). Aumenta la cantidad de nitrógeno disponible y los rendimientos de las plantas.
 - **Solubilización de fosfato:** Las bacterias solubilizan el fosfato mediante la secreción de ácidos producidos en el metabolismo de los azúcares o mediante unas enzimas producidas por determinados tipos

de bacterias (fosfatasa). Este mecanismo permite a las plantas absorber el fósforo.

- **Producción de fitohormonas:** Se producen hormonas vegetales que regulan parámetros como el crecimiento, división celular o extensión de la raíz. Las principales son auxinas, giberelinas, citoquininas y etileno.
- **Mecanismos de acción indirectos:** Ocurren fuera de la planta
 - **Producción de sideróforos:** Los sideróforos son compuestos sintetizados por bacterias y que poseen grupos funcionales (hidroxamatos y catecoles) con la capacidad de unir el hierro de manera reversible. Mejoran la absorción del hierro y funcionan como mecanismo de defensa frente al estrés biótico.
 - **Producción de quitinasa y glucanasa:** Estas enzimas líticas se encargan de degradar la pared celular de hongos patógenos.
 - **Producción de antibióticos:** Se excretan como metabolitos secundarios y protegen a la planta de bacterias y hongos perjudiciales.
 - **Producción de cianuro de hidrógeno y amoníaco:** El cianuro es un agente fitotóxico y se utiliza como método de biocontrol. El amoníaco se asocia con la fijación de nitrógeno.

Otra clasificación de acuerdo con *Camelo, 2011* divide los mecanismos de acción de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal de acuerdo a dos procesos esenciales:

- Producción de sustancias promotoras del crecimiento vegetal: La producción de sustancias orgánicas, producto del metabolismo secundario de las bacterias, que son capaces de promover respuestas fisiológicas específicas en las células vegetales.
- La intervención directa de los microorganismos en los ciclos biogeoquímicos, en los cuales pueden hacer disponibles compuestos orgánicos e inorgánicos que son aprovechados por las plantas.

Géneros más comunes

Dentro de los géneros más comunes de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal se tienen a los siguientes:

- *Azotobacter*

Las especies más reconocidas son *armeniacus*, *chroococcum*, *vinelandii*, se encuentran en la rizosfera principalmente y sus mecanismos para promover el crecimiento vegetal son producción de fitohormonas, vitaminas y sideróforos, así como solubilización de fósforo.

- *Bacillus*
Las especies de mayor importancia son *amyloliquefaciens*, *subtilis*, su hábitat es la rizosfera y sus mecanismos son promoción del crecimiento vegetal y biocontrol.
- *Rhizobium*
Entre las especies más reconocidas se encuentran *leguminosarum*, *meliloti* y *phaseoli*. Su hábitat es en el endófito y promueve el crecimiento vegetal mediante producción de fitohormonas, absorción de nutrientes, solubilización de fósforo y producción de vitaminas y sideróforos.
- *Pseudomonas*
Las especies más estudiadas son *fluorescens*, *aurantiaca* y *putida*. Este género se encuentra en la rizosfera y su mecanismo de acción consiste en la producción de fitohormonas, producción de sideróforos e incremento en la absorción de nutrientes, como la solubilización del fósforo.
- *Azospirillum*
Las especies más reconocidas de este género son *amazonense*, *brasiliense*, *irakense* y *lipoferum* (Puente, 2010).
Provoca cambios en parámetros de crecimiento: incremento en peso seco total, concentración de nitrógeno en follaje y grano, número total de espigas, espigas fértiles y mazorcas, floración y aparición de espigas más temprana, incremento en el número de espigas y granos por espiga, plantas más altas e incremento en el tamaño de la hoja, tasas de germinación más altas, incremento en el desarrollo del sistema de raíces (longitud y volumen). En algunos trabajos se observó un incremento en el rendimiento total de la cosecha: de 50 a 270% (Ferrera-Cerrato, 2007), comparando el rendimiento con plantas no inoculadas.
Este género tiene la capacidad de colonizar la parte interna o externa de la raíz. En la primera, las células de *Azospirillum* penetran a través de espacios radiculares y logran invadir las raíces. En la parte externa, las bacterias forman pequeños agregados y se pueden encontrar células aisladas a lo largo de la superficie radicular. En ambos casos pueden colonizar raíces vivas o muertas, tendiendo a colonizar las zonas de elongación de la raíz y de pelos radiculares, algunas cepas pueden inocular los espacios intercelulares de la corteza.
Aún no se conoce con certeza el mecanismo de penetración, pero se tienen diversas teorías: invasión bacteriana vía tejidos corticales destruidos donde las ramificaciones de raíces laterales emergen a partir de raíces principales, invasión a través de pelos radiculares lisados y heridas mecánicas ocasionadas durante el crecimiento de la planta, y penetración directa a través de lamelas intermedias, seguida de degradación de la pectina

una vez que la bacteria logra penetrar por hendiduras de la zona cubierta por epidermis donde emerge la raíz lateral. El mecanismo específico por el cual se adhiere a las raíces también se desconoce (Ferrera-Cerrato, 2007).

Se proponen diferentes mecanismos de acción por los cuales *Azospirillum* promueve el crecimiento vegetal: i) fijación de nitrógeno, lo cual contribuye con nitrógeno a la planta; ii) efectos hormonales, los cuales promueven el metabolismo y crecimiento vegetal; iii) incremento en el crecimiento del sistema completo de raíces, lo cual puede estar relacionado con cambios hormonales y que origina una mayor capacidad de absorción de agua y minerales; iv) alteración del funcionamiento de la membrana por medio de moléculas de comunicación celular (moléculas de este tipo de bajo peso molecular, pueden ser responsables de alterar actividad y funciones de membrana relacionadas con la absorción de iones); y v) la hipótesis aditiva, la cual propone la intervención de todos los mecanismos mencionados arriba (Ferrera-Cerrato, 2007). La magnitud de adhesión de *Azospirillum* al suelo está condicionada por las condiciones fisicoquímicas del suelo: pH, grado de humedad y disponibilidad de nutrientes.

METODOLOGÍA

Primera etapa: bacterias promotoras de crecimiento vegetal

- **Preparación de Inóculo Bacteriano**

Las cepas seleccionadas fueron aisladas de la rizosfera de las plantas de jales mineros y previamente caracterizadas como bacterias promotoras de crecimiento vegetal, correspondiendo a *Serratia* K120 y *Serratia* MC119 se crecerán masivamente en Caldo Luria Bertani (LB); mientras que *Pantoea* 113, *Pantoea* 134, *Pantoea* 135 y *Pantoea* 144 crecerán masivamente en caldo Rojo Congo. Las cepas bacterianas se separarán por centrifugación a 8000 rpm durante 20 minutos para posteriormente realizar un ajuste con buffer de fosfatos 0.1 M (pH 7.4) a 0.5 Å equivalente a 1×10^9 UFC/mL.



Figura 5. Preparación de caldo LB.

- **Preparación de las unidades experimentales**

Cada unidad experimental estaba formada por: una capa de 25 g de sustrato orgánico comercial, seguida capa con 20 g de restos orgánicos, posteriormente se colocaron 5 cuadrados de poliestireno expandido de 1 cm por 1 cm, y se cubrió con una capa superior de 25 g de sustrato. Se utilizaron un total de 16 unidades experimentales, 8 con residuos de cáscaras de naranja y los 8 restantes, con restos de calabazas, zanahoria y papa. Los cuadros de 1 cm de lado antes de colocarlos en los tratamientos se fotografiaron con una distancia focal de 1x y 10x con ayuda de una cámara fotográfica marca “CANON” modelo “EOS REBEL T6” .



Figura 6. Composta con restos vegetales.



Figura 7. Composta con restos de cáscara de naranja.

- **Inoculación de las unidades experimentales**

Se inocularon 8 unidades experimentales con 10 mL de la cepa 119 y 8 unidades más con 10 mL de la cepa 134. El arreglo de las unidades experimentales utilizado quedó conformado de la siguiente manera:

Tabla 3. Arreglo de las unidades experimentales en la primera etapa

119		134	
Naranja	Vegetal	Naranja	Vegetal
Blanco	Blanco	Blanco	Blanco
Réplica 1	Réplica 1	Réplica 1	Réplica 1
Réplica 2	Réplica 2	Réplica 2	Réplica 2
Réplica 3	Réplica 3	Réplica 3	Réplica 3

Esta primera etapa del experimento duró un periodo de 16 semanas, para lo cual se monitoreó y se mantuvieron las condiciones óptimas de humedad en las unidades experimentales para la actividad de las bacterias, para esto se adicionaron 20 mL de agua cada 2 días.

- **Observación**

Al finalizar las 16 semanas, se abrieron las unidades experimentales y se observó si la degradación de los residuos orgánicos se llevó a cabo con normalidad, así como el aspecto que tenían los cuadros de poliestireno expandido a simple vista.

Después se observaron los cuadros de poliestireno expandido de manera individual en un microscopio óptico “*Microscopio Binocular modelo LX400 marca LaboMed*”. Para determinar la degradación, se examinó y se buscó alguna alteración en la forma y el tamaño del cuadro: borde con forma irregular, agujeros, cambios de nivel y esquinas con forma circular. Los cuadros de 1 cm de lado después de los tratamientos se fotografiaron con distancia focal del objetivo de 1x y 10x apoyándose de una cámara fotográfica marca “CANON” antes descrita.



Figura 8. Análisis en microscopio óptico.

Segunda etapa: consorcio de bacterias promotoras de crecimiento vegetal

Posterior al análisis se procedió a realizar la preparación de las unidades experimentales de la misma manera que en la primera etapa, pero ahora utilizando las cepas que mostraron la capacidad de degradación del poliestireno expandido, con los consorcios bacterianos C1, C2 y C3 conformados con el siguiente arreglo experimental:

Tabla 4. Arreglo de las unidades experimentales en la segunda etapa

C1		C2		C3	
113+134		113+135		113+K120	
Naranja	Vegetal	Naranja	Vegetal	Naranja	Vegetal
Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco
Réplica 1	Réplica 1	Réplica 1	Réplica 1	Réplica 1	Réplica 1
Réplica 2	Réplica 2	Réplica 2	Réplica 2	Réplica 2	Réplica 2
Réplica 3	Réplica 3	Réplica 3	Réplica 3	Réplica 3	Réplica 3



Figura 9. Unidades Experimentales

- **Inoculación de las unidades experimentales**

Para la conformación de los consorcios se agregaron 5 mL de cada una de las cepas involucradas en cada consorcio.

Esta segunda etapa del experimento durará un periodo de 16 semanas, para lo cual se monitoreó y mantuvo las condiciones óptimas de humedad en las unidades experimentales para la actividad de las bacterias, esto adicionando 20 mL de agua cada 2 días.

- **Observación**

Se continuó con el proyecto durante las 16 semanas siguientes, al finalizar éstas, se abrieron las unidades experimentales y se observó que la degradación de los residuos orgánicos ocurriera de acuerdo con lo esperado, de la misma manera se observó el aspecto que tenían los cuadros de poliestireno expandido. Los cuadros de 1 cm de lado después de los tratamientos se fotografiaron con con distancia focal del objetivo de 1x y 10x apoyándome de una cámara fotográfica marca “CANON” antes descrita.

Debido a la contingencia sanitaria por motivo del COVID-19 no fue posible realizar la observación con el microscopio óptico, por lo que en esta segunda etapa sólo presento las imágenes fotográficas.

- **Análisis**

Para obtener datos cualitativos de las imágenes del poliestireno expandido utilizado en las dos etapas de los tratamientos (1 cm por 1 cm), se utilizó el programa

IMAGE TOOL for windows versión 3, con el cual se procesaron las fotografías tomadas antes y después de las etapas experimentales.

El programa se alimenta de imágenes digitales cuyos objetos deberán incluir una escala de referencia (10 mm) la cual sirve a éste para calibrar las mediciones que se realizarán posteriormente.

Para este caso de estudio se requiere hacer las mediciones de cada lado, de los cuadros de poliestireno expandido utilizados en las unidades experimentales de los tratamientos.

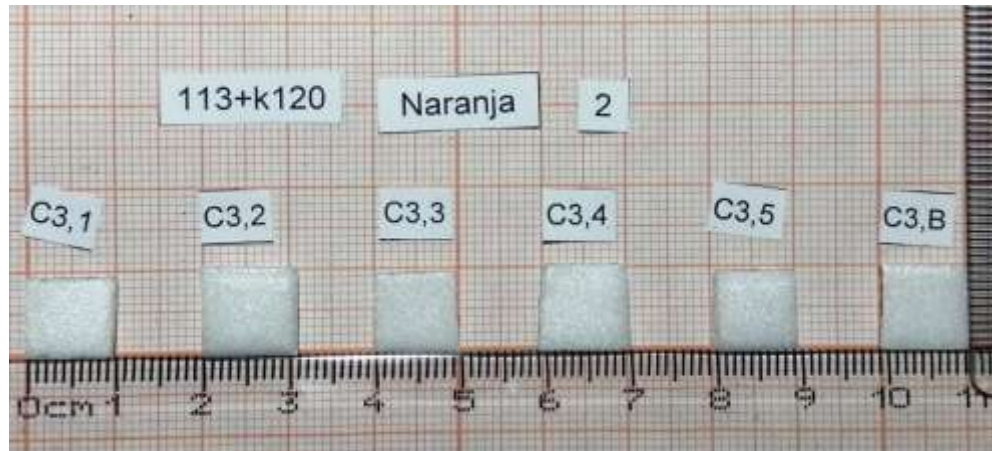


Figura 10. Imagen del consorcio 113+K120 para el sustrato de Naranja (10 x)

El programa (Figura 10) calcula la longitud de cada lado con base a la medición de calibración introducida inicialmente al programa.

Las longitudes en milímetros de cada lado de los cuadrados de poliestireno expandido se almacenaron automáticamente en una base de datos, generada por el propio programa al momento de la realización de las mediciones.

Este procedimiento se hizo antes y después de los tratamientos, lo cual permite cuantificar la superficie del material al inicio y al final. A partir de estos datos es posible obtener el porcentaje de degradación del poliestireno expandido por la presencia de los consorcios bacterianos.

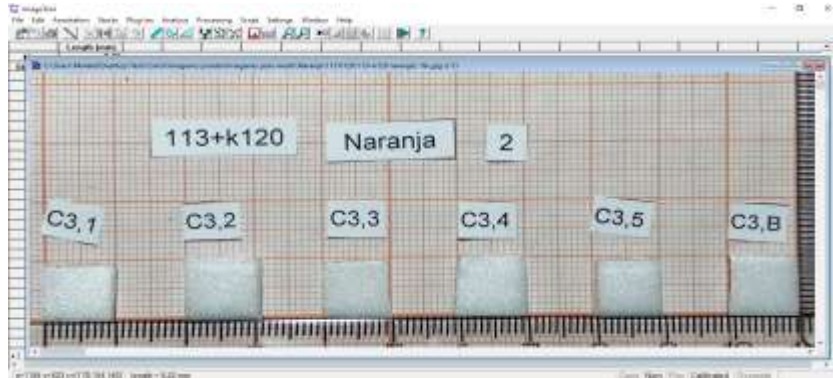
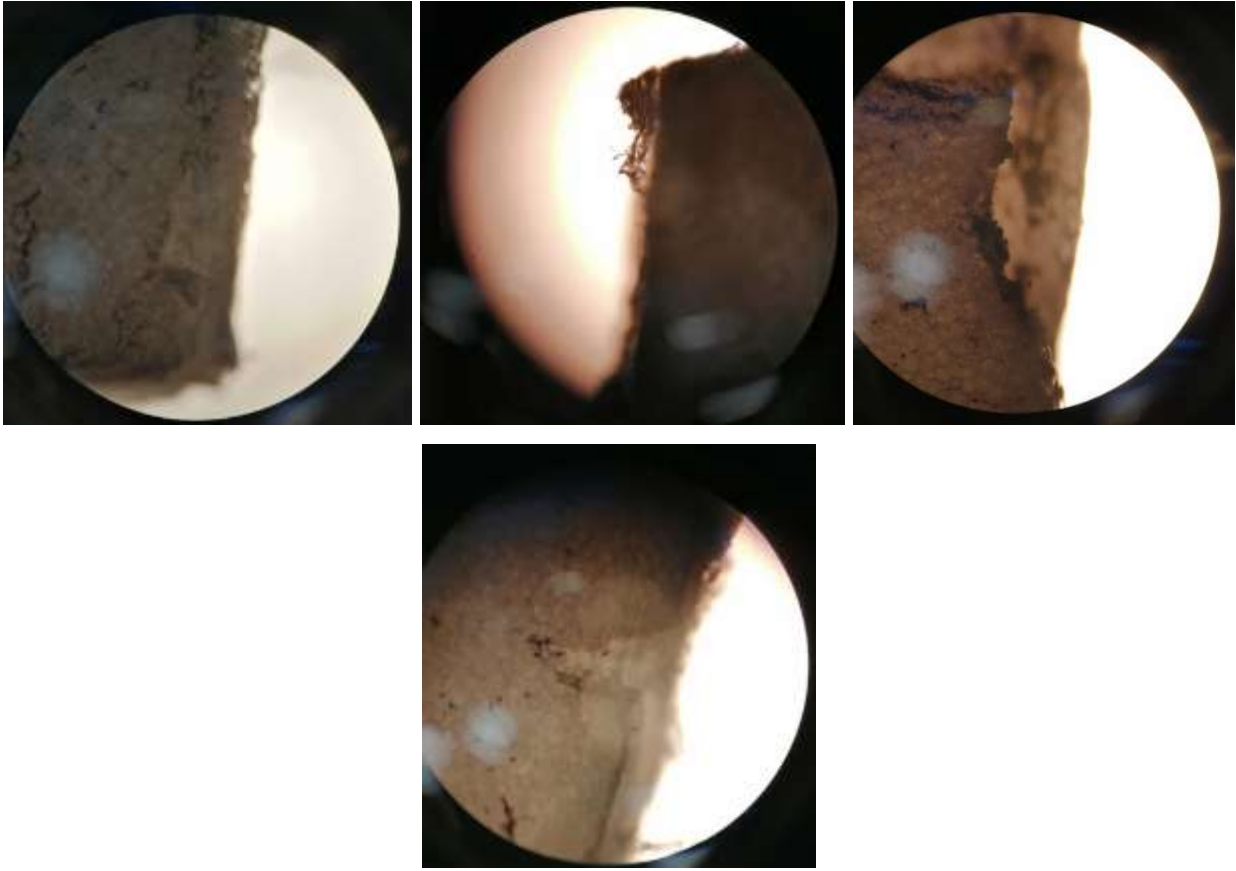


Figura 11. Imagen del consorcio 113+K120 para el sustrato de Naranja (10x) durante su análisis en el software Image Tool for Windows V. 3.0

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis cualitativo del poliestireno después de los tratamientos

Tabla 5. Observación al microscopio óptico de la cepa 119 con sustrato de naranja

119 naranja		
Unidad experimental	Degradación poliestireno expandido	Evidencia
Blanco	Bordes con alteraciones.	
Réplica 1	No se observaron alteraciones en la estructura.	
Réplica 2	Bordes con alteraciones.	

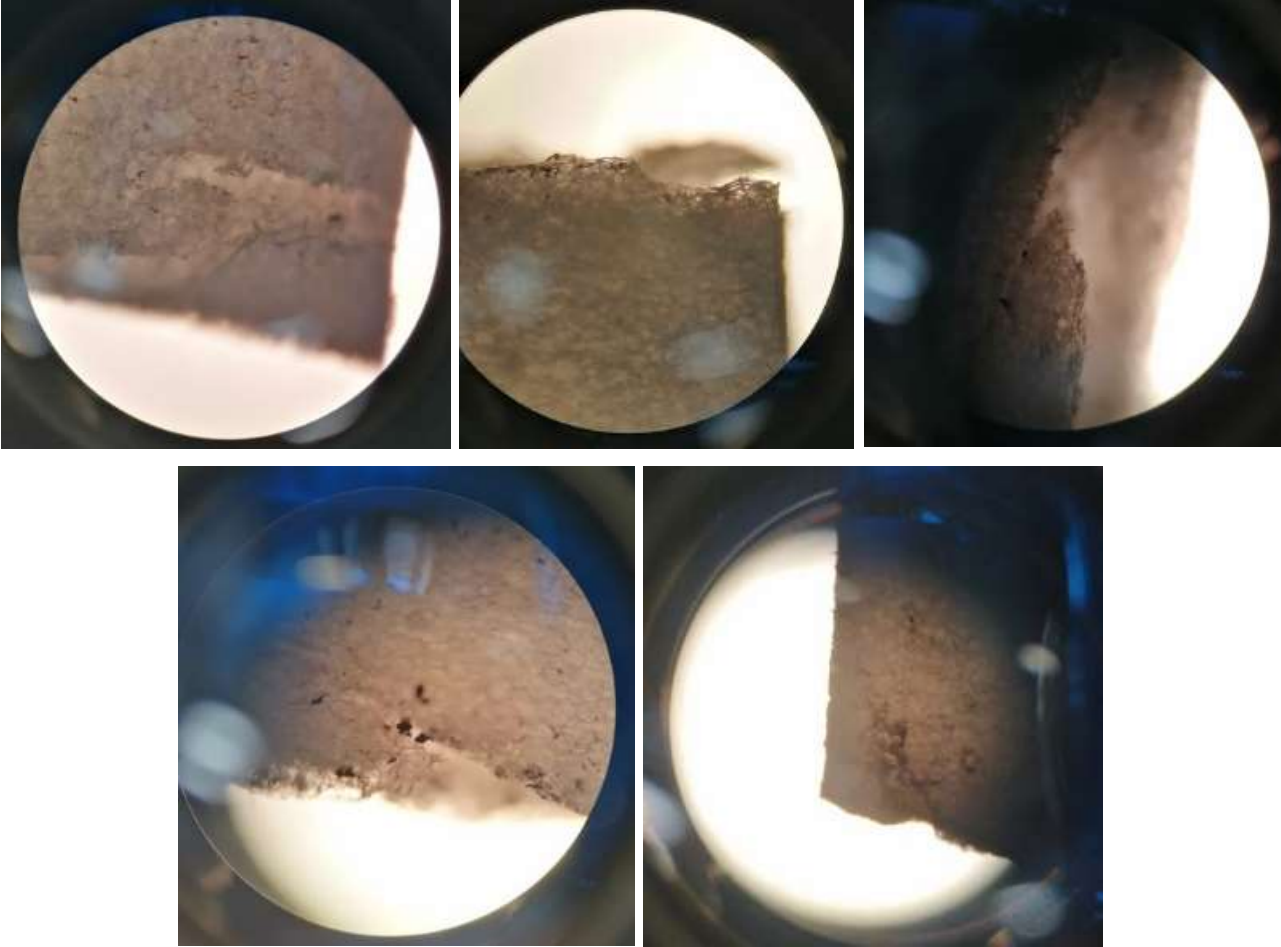
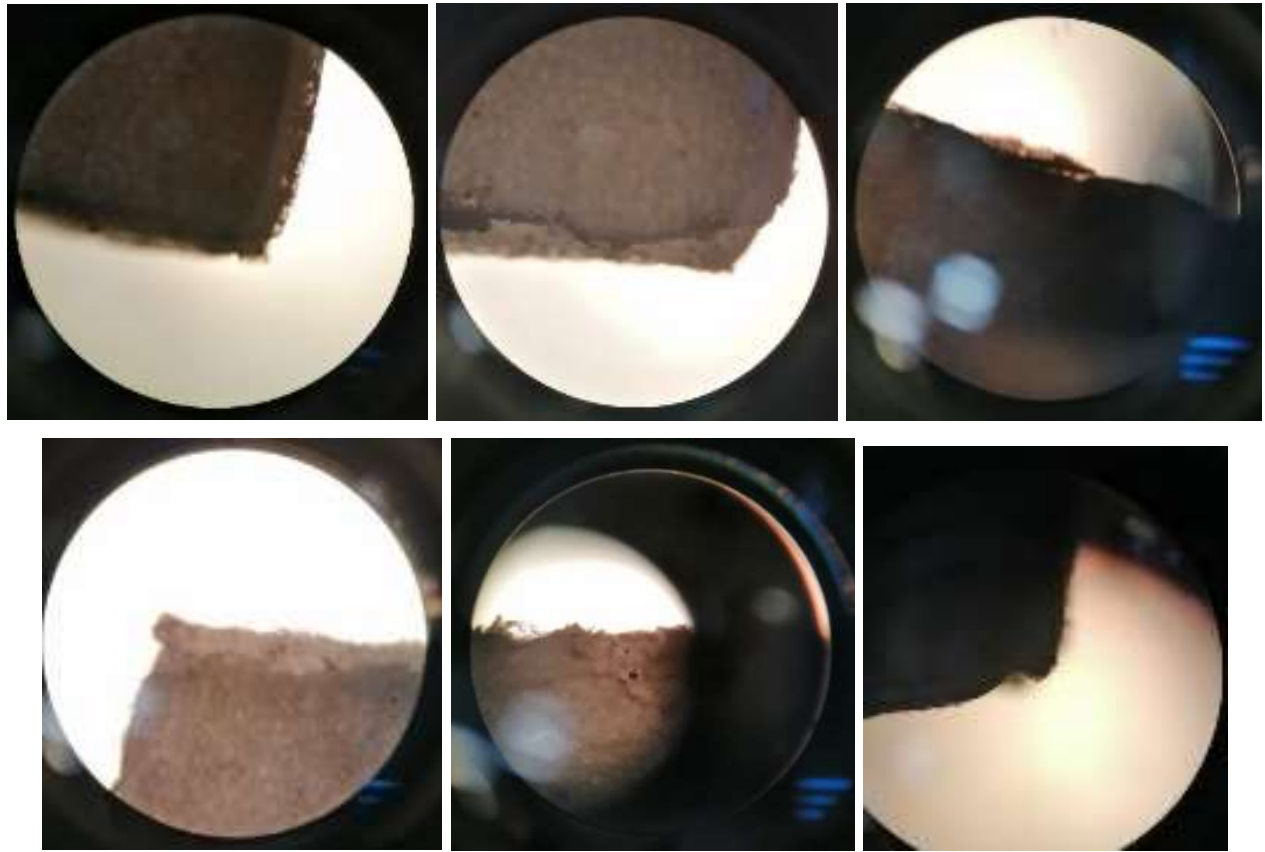
	
Réplica 3	No se observaron alteraciones en la estructura.

Tabla 6. Observación al microscopio óptico de la cepa 119 con sustrato vegetal.

119 vegetal		
Unidad experimental	Degradación poliestireno expandido	Evidencia
Blanco		No se observaron alteraciones en la estructura.
Réplica 1		No se observaron alteraciones en la estructura.
Réplica 2		Bordes con alteraciones.



Réplica 3

Bordes con alteraciones

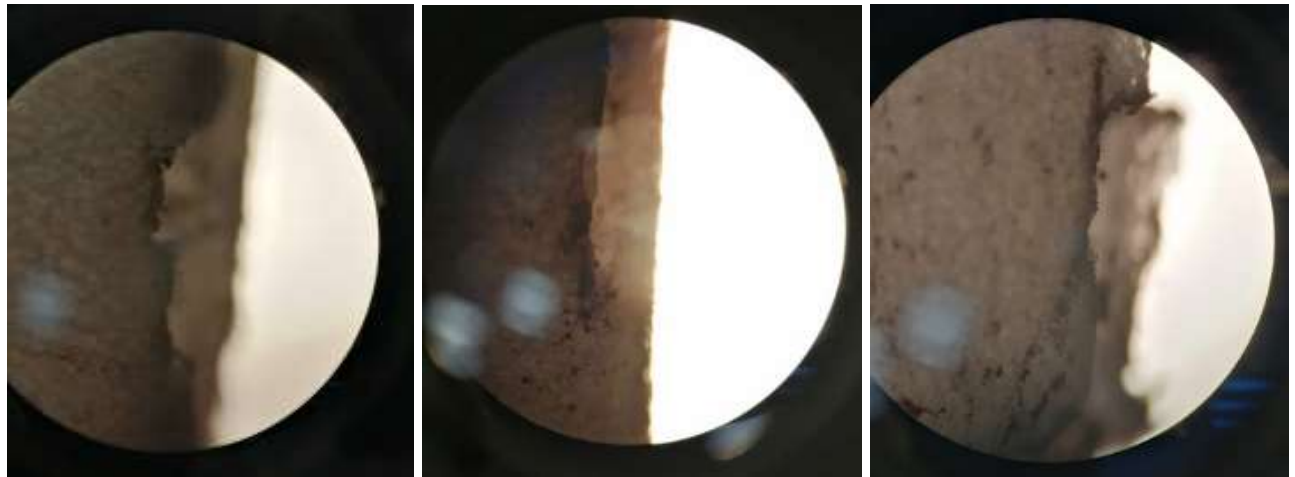
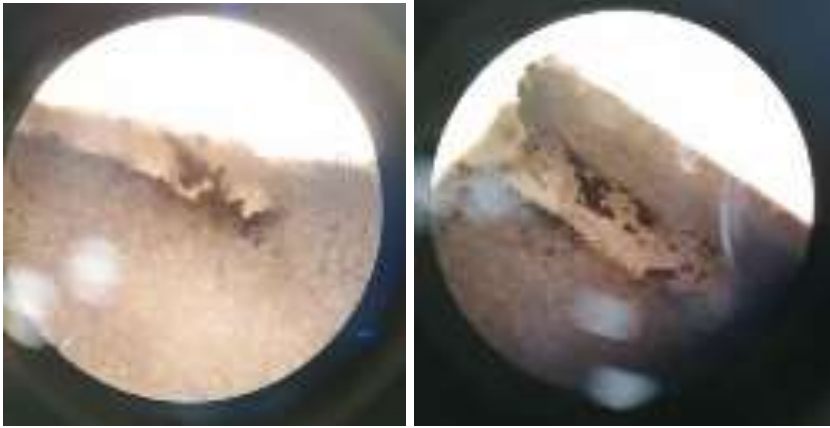
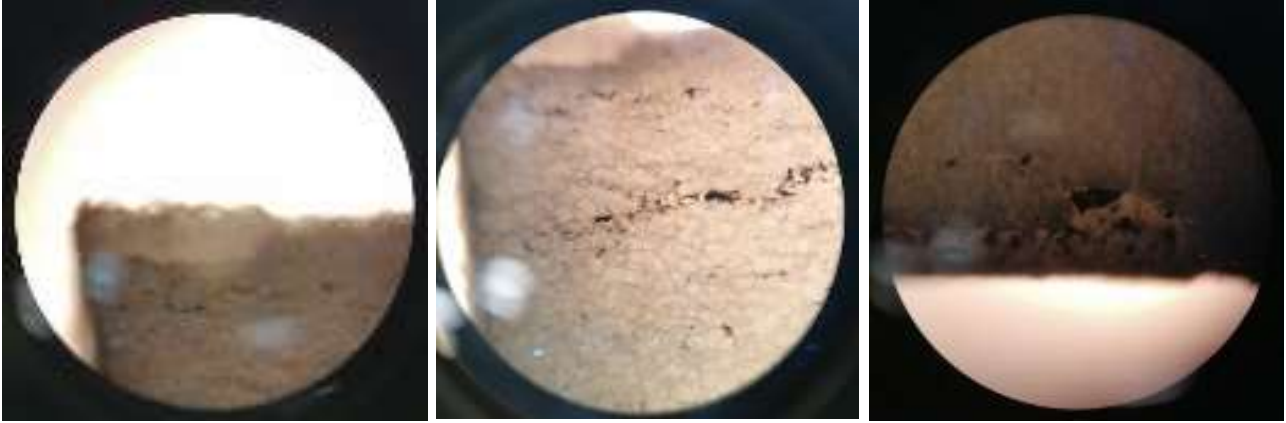
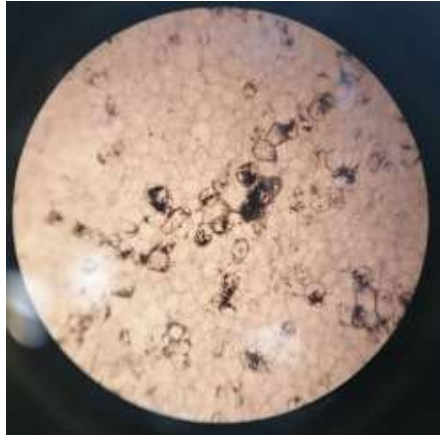
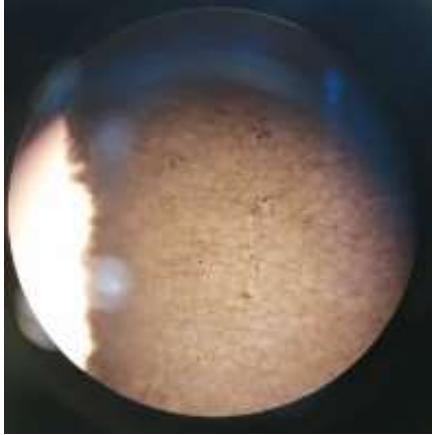


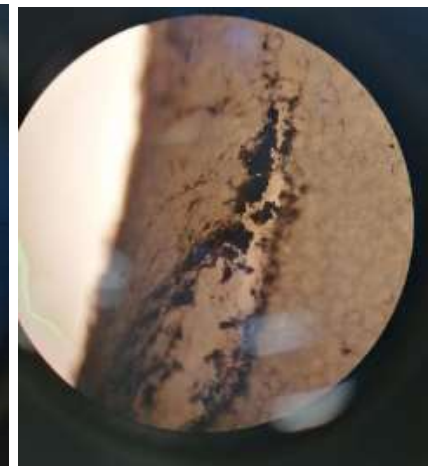
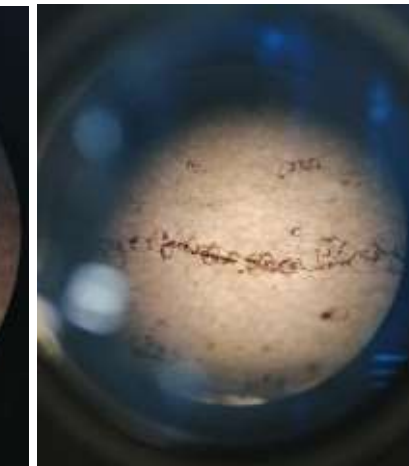
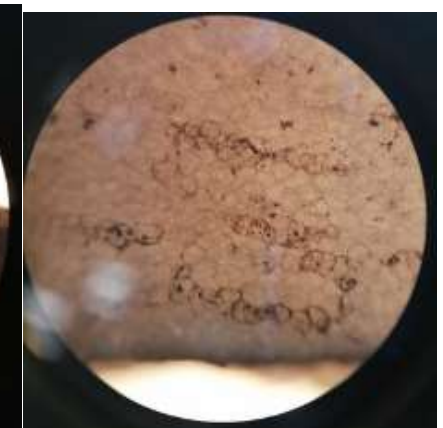
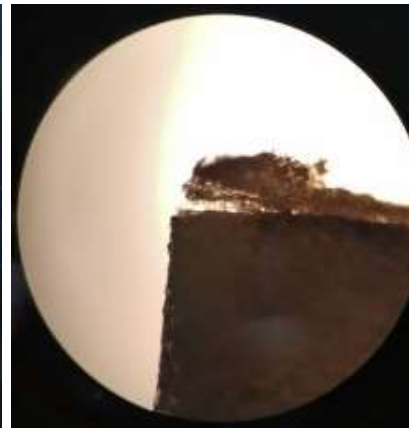
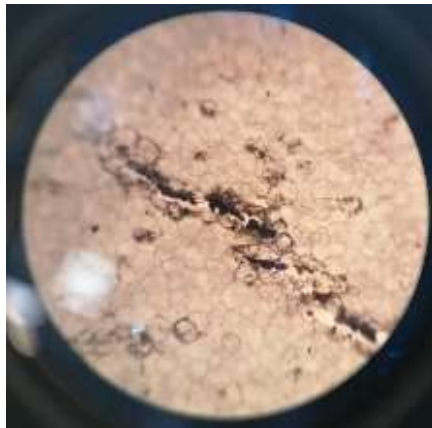
Tabla 7. Observación al microscopio óptico de la cepa 134 con sustrato de naranja.

134 naranja		
Unidad experimental	Degradación poliestireno expandido	Evidencia
Blanco	Bordes con alteraciones	
Réplica 1	Bordes con alteraciones, también se observaron grupos agujeros en el interior de los cuadros. Estos alcanzaban un tamaño de 1 o 2 mm.	



Réplica 2

Bordes con alteraciones, también se observaron grupos agujeros en el interior de los cuadros. Estos alcanzaban un tamaño de 1 o 2 mm. En un cuadro se alcanzó a observar un agujero de 2 mm, como se muestra en la última imagen.



Réplica 3

Bordes con alteraciones, también se observaron grupos agujeros en el interior de los cuadros, de hasta 1 mm. En la última imagen se puede apreciar una alteración similar a un corte, con un tamaño aproximado de 1.5 mm.

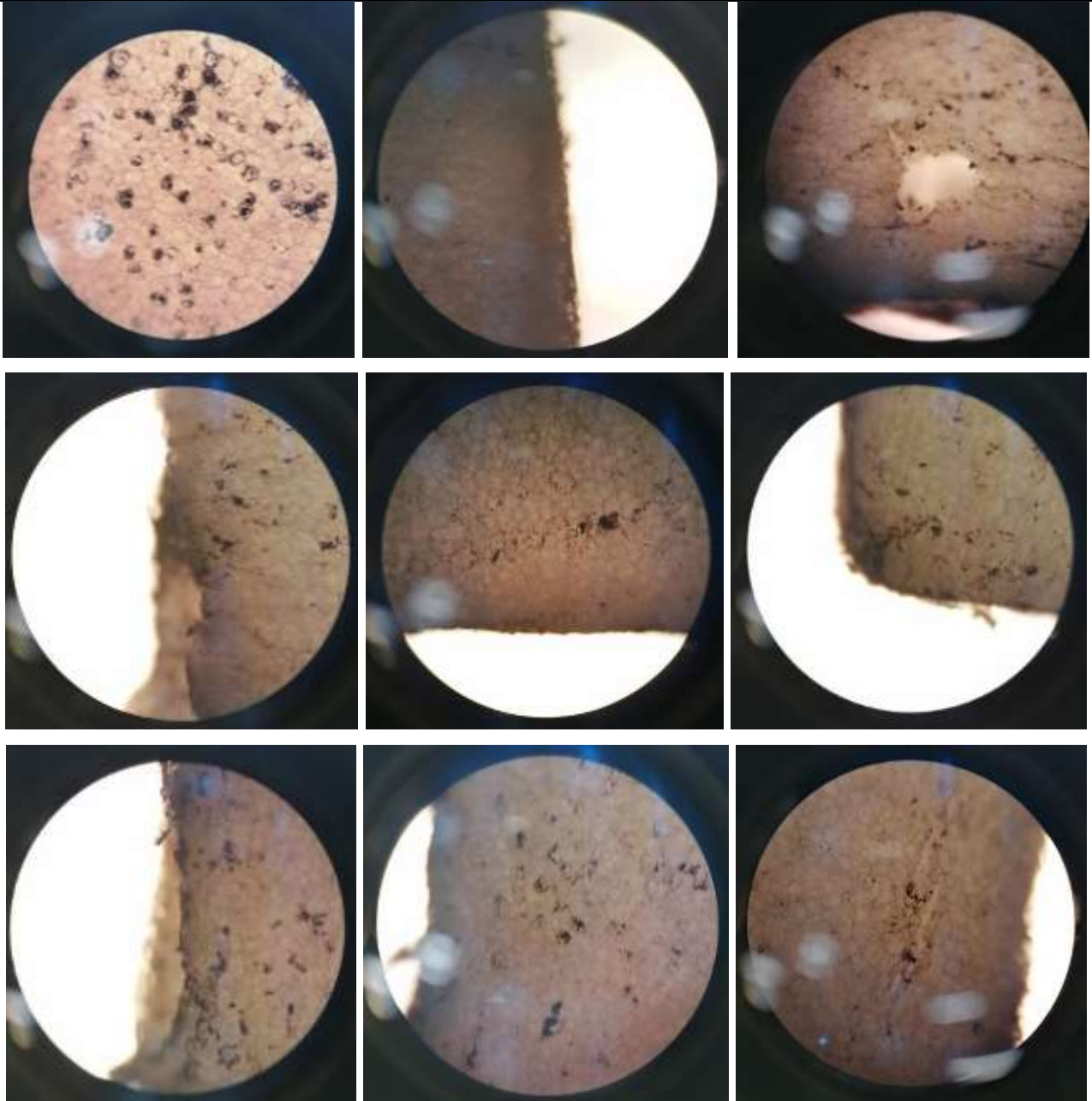
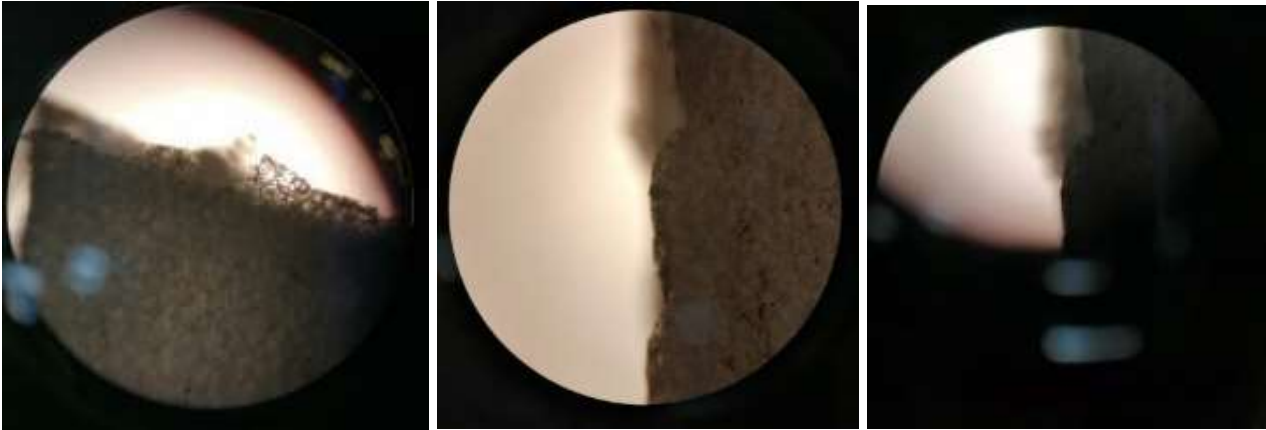
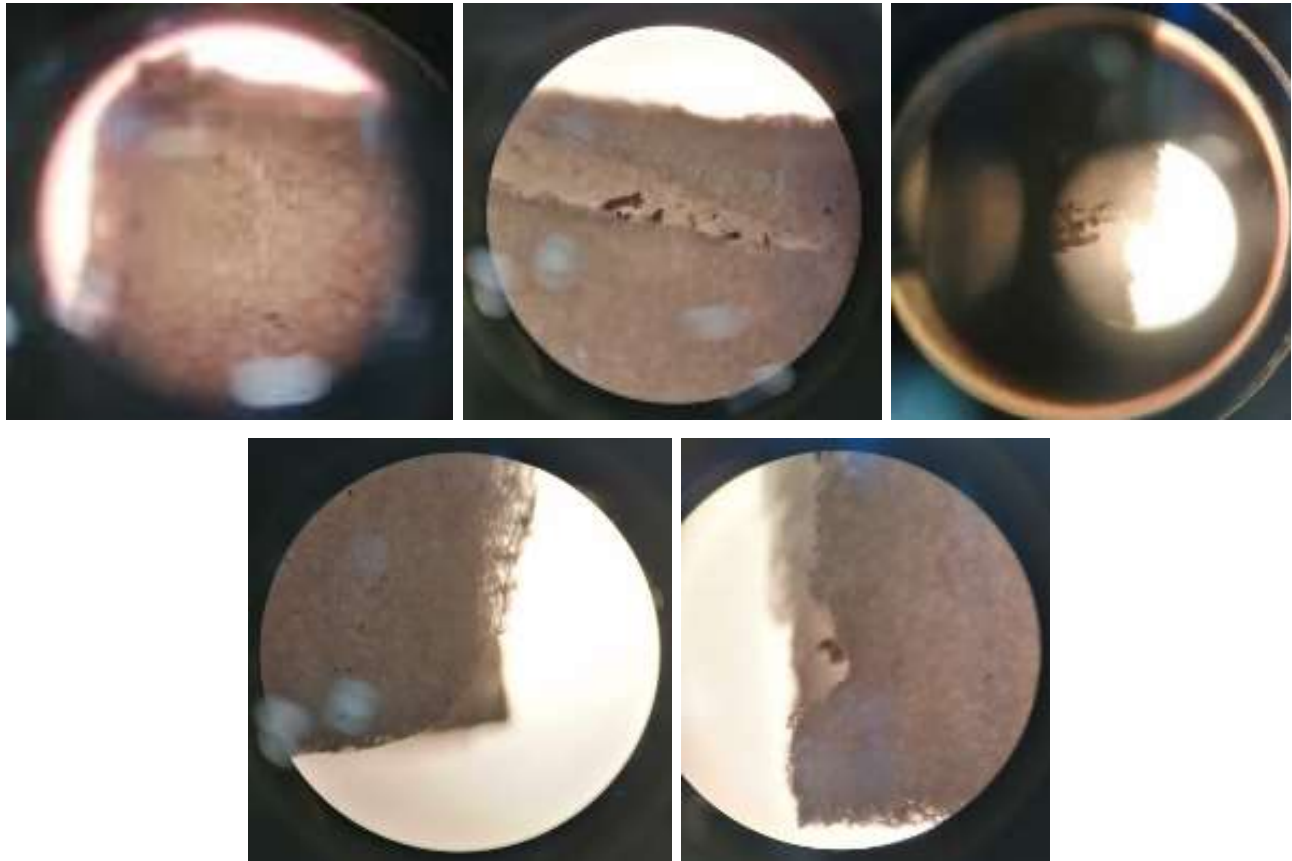


Tabla 8. Observación al microscopio óptico de la cepa 134 con sustrato vegetal

134 vegetal		
Unidad experimental	Degradación poliestireno expandido	Evidencia
Réplica 1	Bordes con alteraciones.	
Réplica 2	Bordes con alteraciones.	

Réplica 3

Bordes con alteraciones, también se observaron grupos agujeros en el interior de los cuadros. Estos alcanzaban un tamaño de 1 o 2 mm.

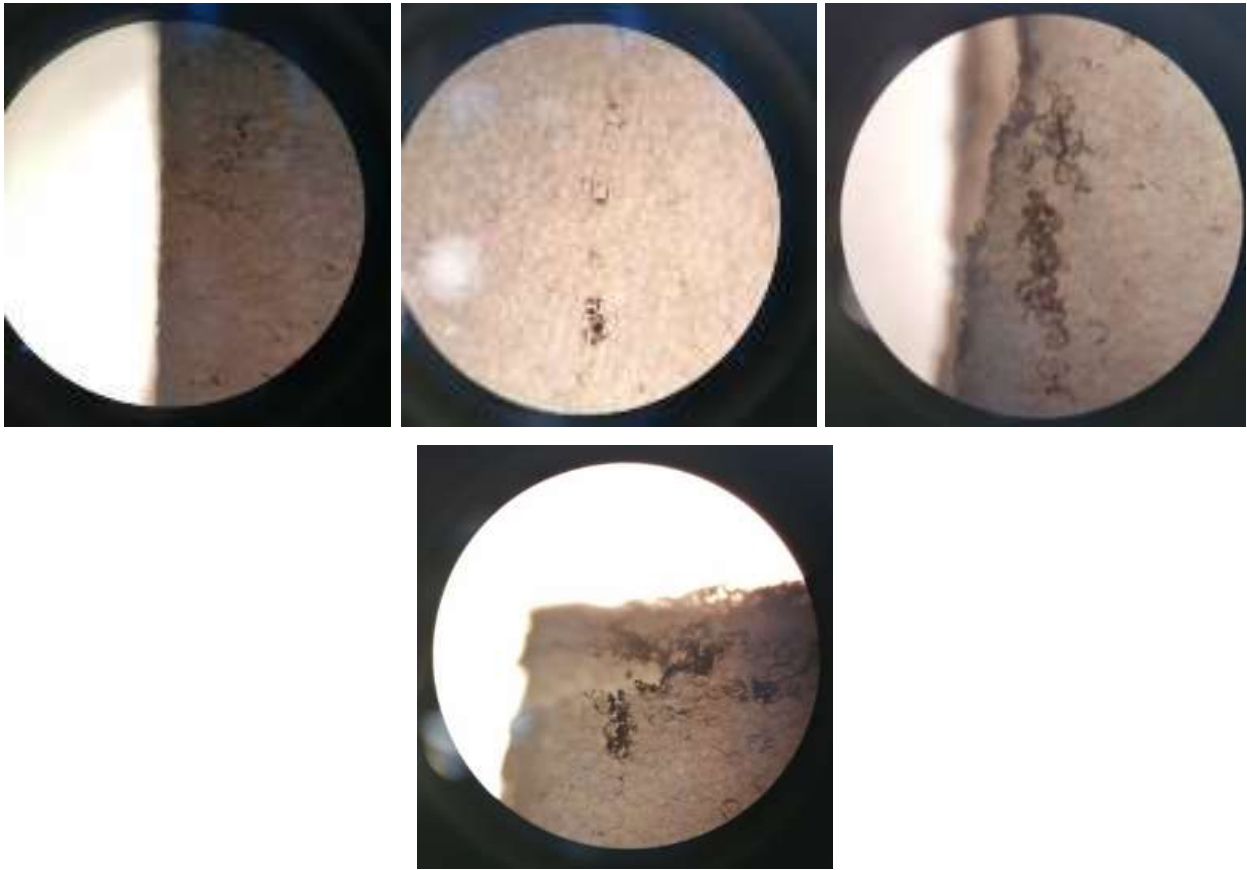
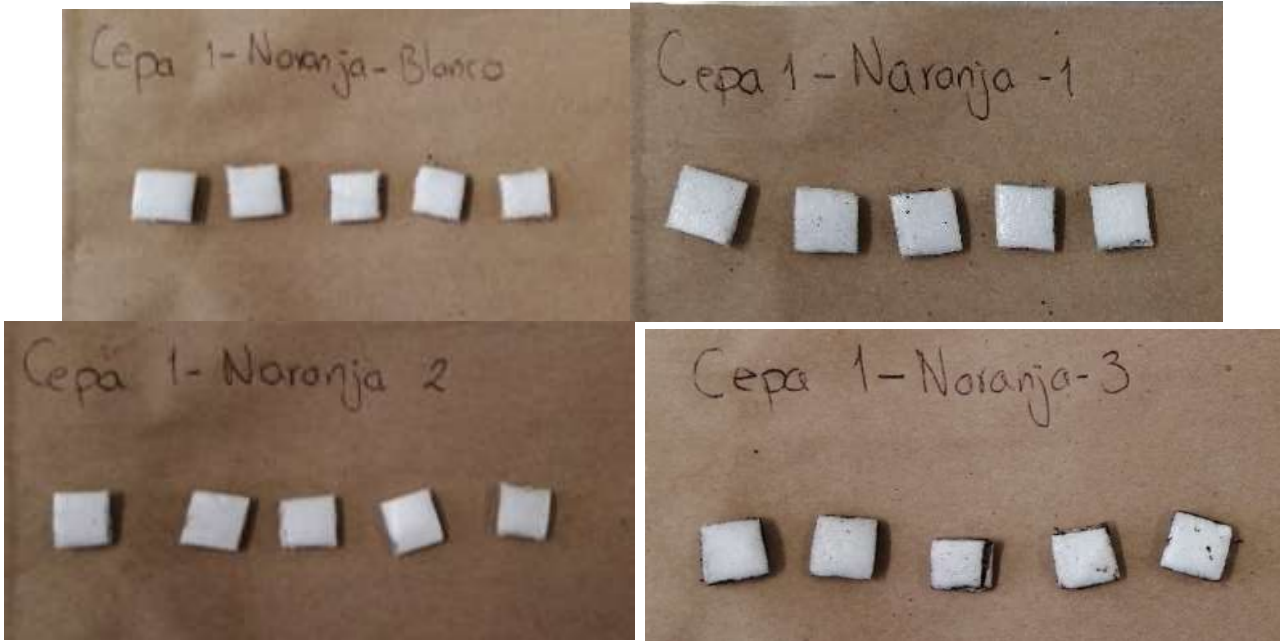
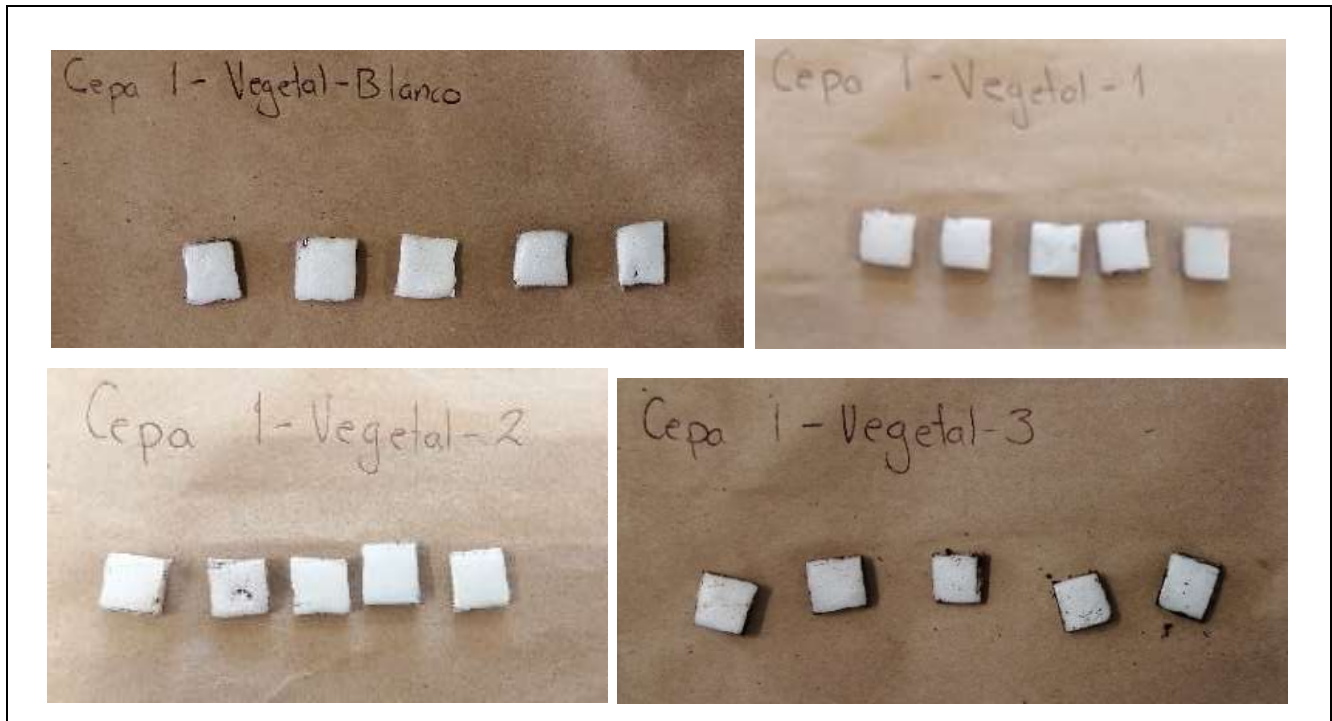


Tabla 9. Observación fotográfica de la cepa 119

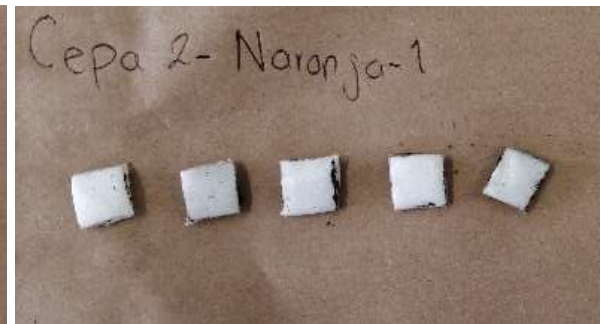
119 naranja	
Degradación de materia orgánica	Degradación poliestireno expandido
<p>La degradación de la materia orgánica conformada por restos de cáscara de naranja en las réplicas y el blanco correspondientes a la cepa 119 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.</p>	<p>No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.</p>
	
119 vegetal	
<p>La degradación de la materia orgánica conformada por restos de vegetales en las réplicas y el blanco correspondientes a la cepa 119 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.</p>	<p>No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.</p>



- **Cepa 134**

Tabla 10. Observación fotográfica de la cepa 134

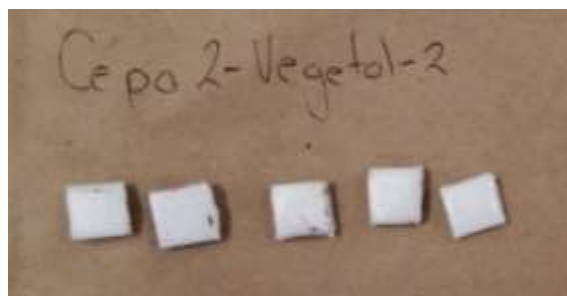
134 naranja	
Degradación de materia orgánica	Degradación poliestireno expandido
<p>La degradación de la materia orgánica conformada por restos de cáscara de naranja en las réplicas y el blanco correspondientes a la cepa 134 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.</p>	<p>Se podían observar pequeñas irregularidades, como puntos o agujeros pequeños.</p>



134 vegetal

La degradación de la materia orgánica conformada por restos de vegetales en las réplicas y el blanco correspondientes a la cepa 134 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.

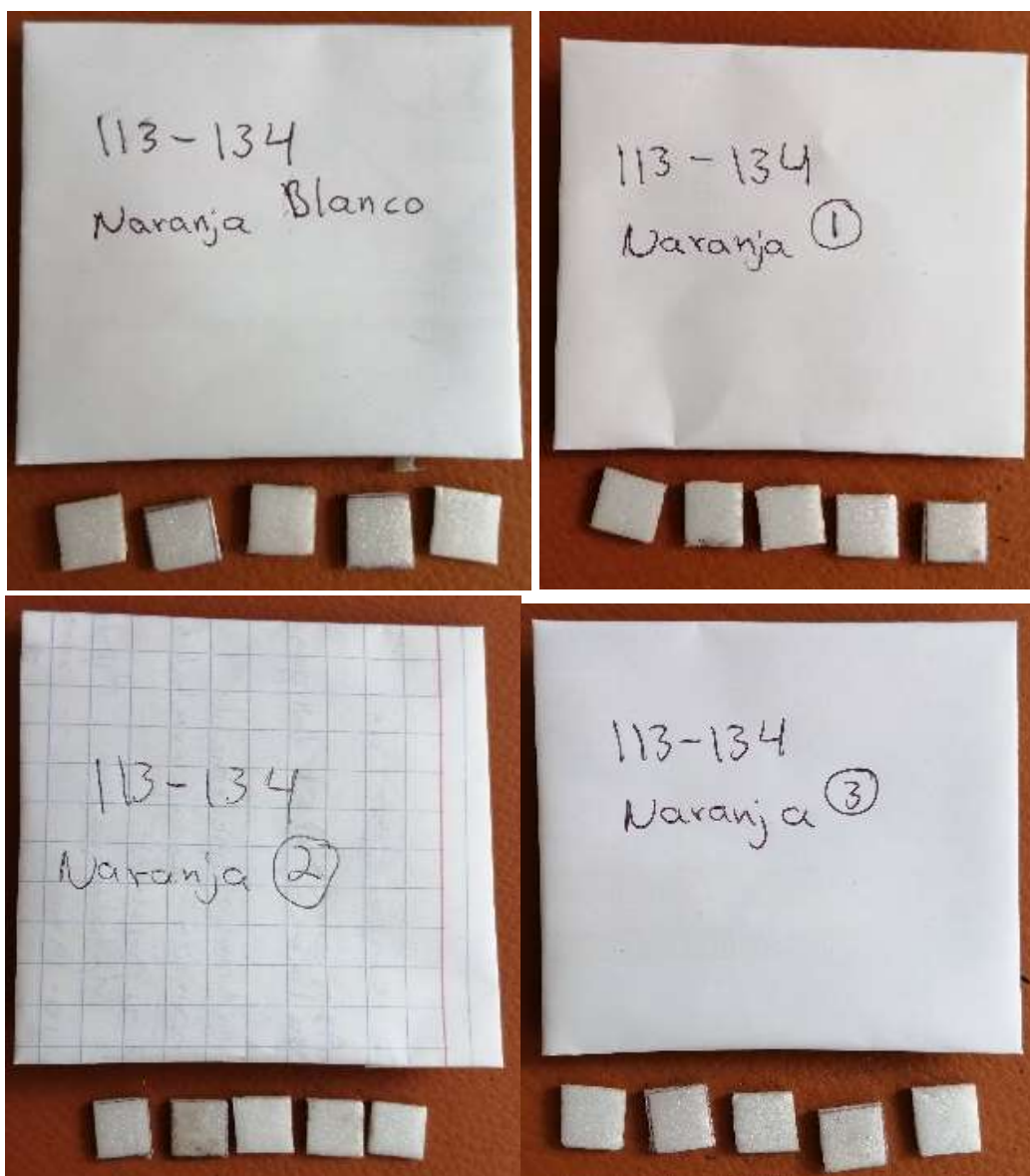
Se podían observar pequeñas irregularidades, como puntos o agujeros pequeños.



- **Consortio 113+134**

Tabla 11. Observación fotográfica del consorcio 113+134

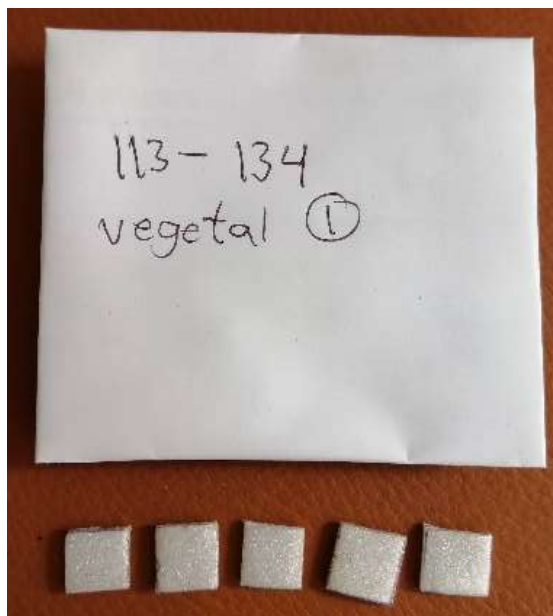
113+ 134 naranja	
Degradación de materia orgánica	Degradación poliestireno expandido
<p>La degradación de la materia orgánica en las réplicas y el blanco correspondientes al consorcio bacteriano con las cepas 113 y 134 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.</p>	<p>No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.</p>



113+ 134 vegetal

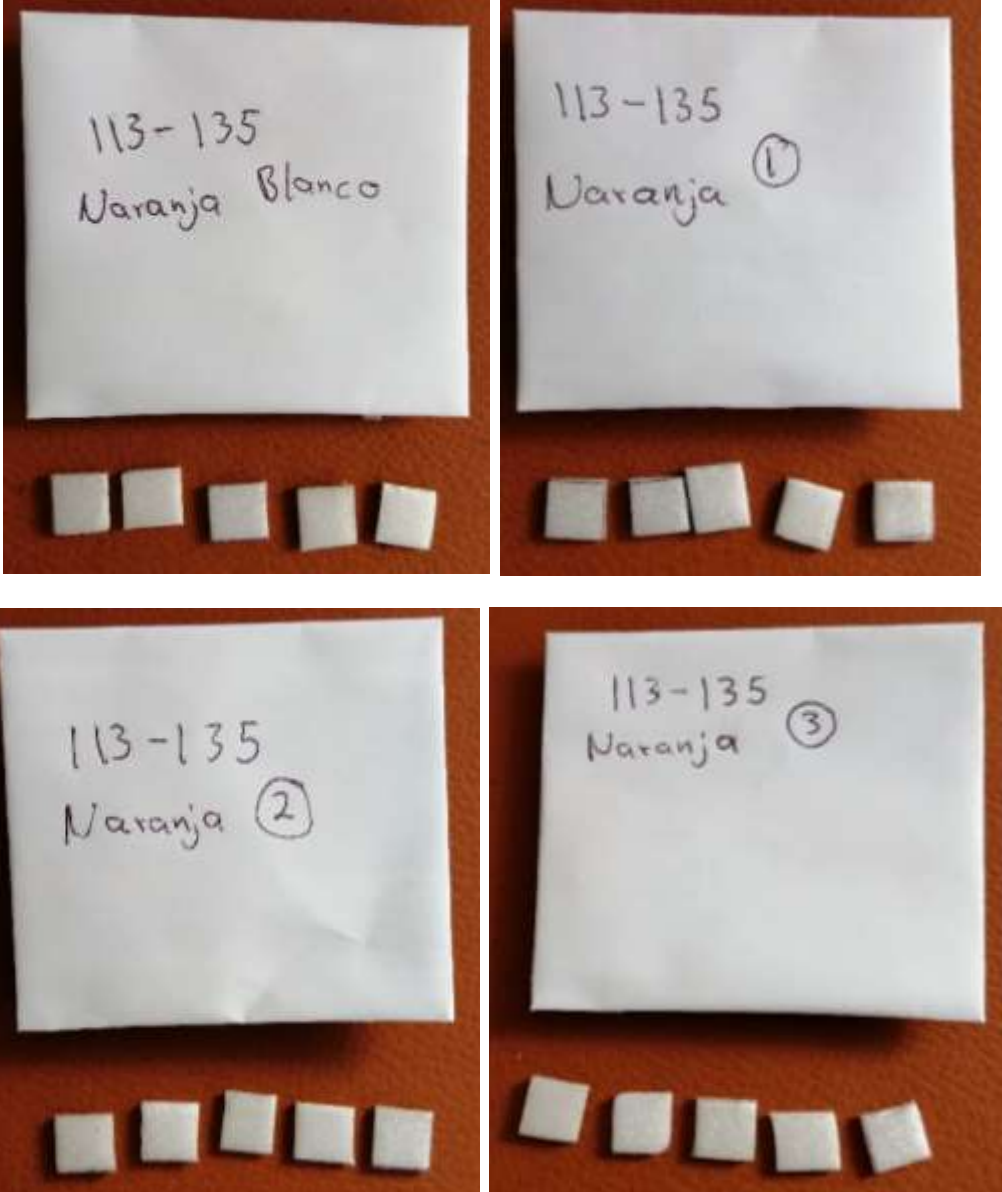
La degradación de la materia orgánica en las réplicas y el blanco correspondientes al consorcio bacteriano con las cepas 113 y 134 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.

No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.



- **Consortio 113+135**

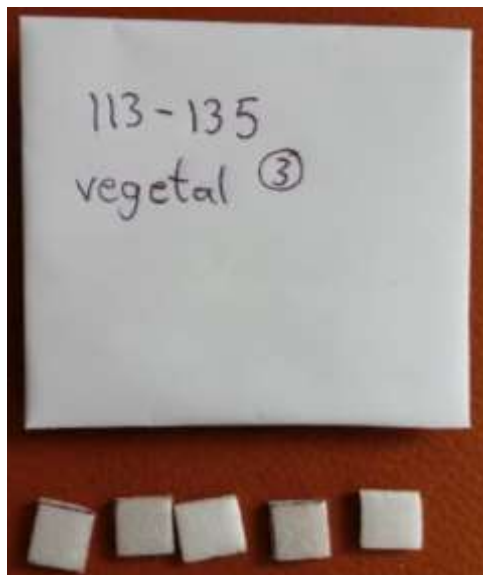
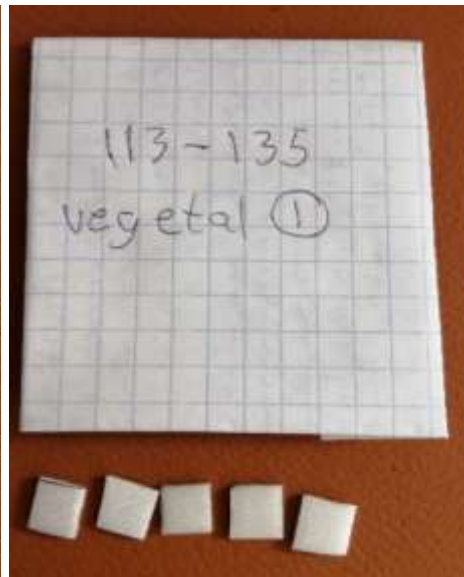
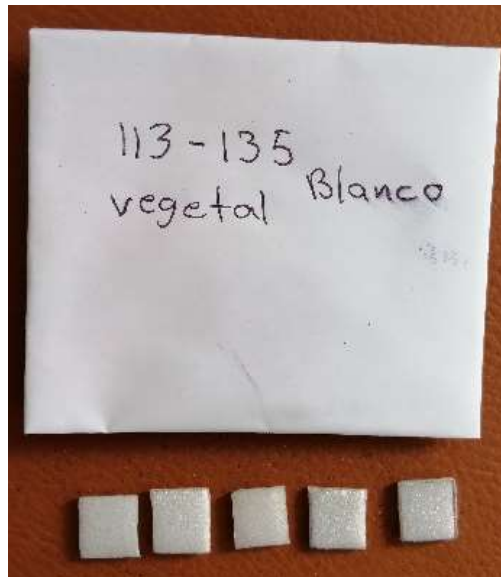
Tabla 12. Observación fotográfica del consorcio 113+135

113+ 135 naranja	
Degradación de materia orgánica	Degradación poliestireno expandido
<p>La degradación de la materia orgánica en las réplicas y el blanco correspondientes al consorcio bacteriano con las cepas 113 y 135 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.</p>	<p>No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.</p>
	

113+135 vegetal

La degradación de la materia orgánica en las réplicas y el blanco correspondientes al consorcio bacteriano con las cepas 113 y 135 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.

No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.



- **Consortio 113+K120**

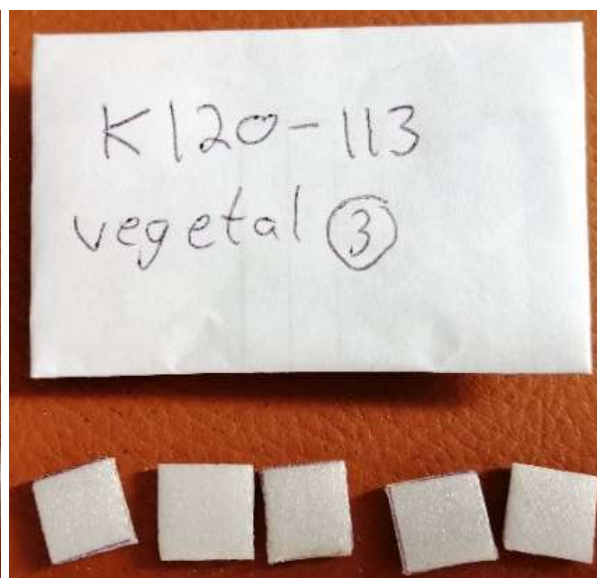
Tabla 13. Observación fotográfica del consorcio 113+K120

113+K120 naranja	
Degradación de materia orgánica	Degradación poliestireno expandido
<p>La degradación de la materia orgánica en las réplicas y el blanco correspondientes al consorcio bacteriano con las cepas 113 y K120 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.</p>	<p>No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.</p>

113+K120 vegetal

La degradación de la materia orgánica en las réplicas y el blanco correspondientes al consorcio bacteriano con las cepas 113 y K120 se realizó exitosamente, logrando una degradación completa y la obtención de un producto final homogéneo.

No se observaron cambios notables o alteraciones en la estructura de los cuadros a simple vista.



Análisis cuantitativo del poliestireno después de los tratamientos

Después de tratar las imágenes con el programa IMAGE TOOL for Windows versión 3 se estructuró una tabla con los datos generados, los cuales se expresan en unidades milimétricas; dichos datos provienen de las mediciones de los lados de cada cuadro de poliestireno antes y después del tratamiento en todas las unidades experimentales.

Después de elaborar las tablas se hicieron los cálculos correspondientes para obtener el porcentaje de degradación de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Degradación} = \frac{\text{Medida inicial} - \text{Medida final}}{\text{Medida inicial}} [\text{mm}] * 100$$

Finalmente se muestran los porcentajes de degradación en las siguientes gráficas.

Gráficos del porcentaje de degradación del consorcio 113-134

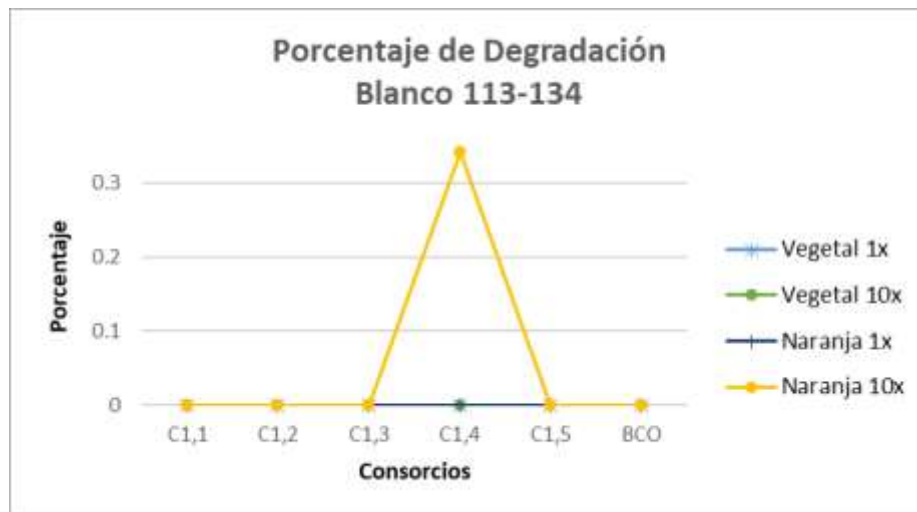


Gráfico 1. Porcentaje de degradación Blanco 113-134

En la gráfica 1 se observa cero porcentajes de degradación del poliestireno expandido en todos los sustratos empleados en las unidades experimentales sin bacterias ni consorcios “blancos”, con un valor fuera de rango (0.35) en una de las 5 piezas colocadas al interior de una de las compostas.

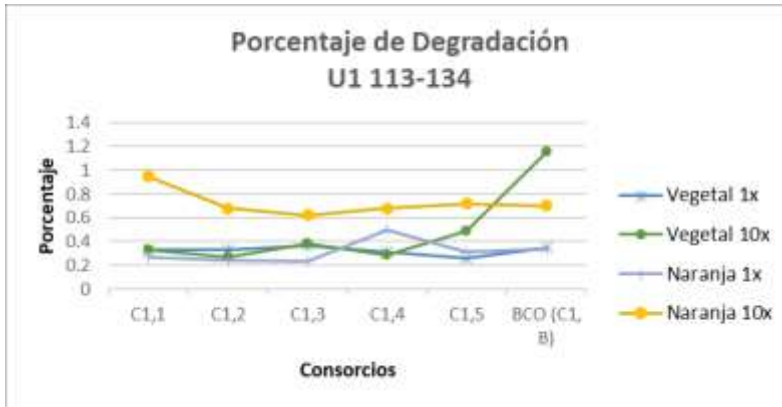


Gráfico 2. Porcentaje de degradación Unidad 1, 113-134

En las tres unidades experimentales (gráficos 2, 3 y 4) se observa un mejor porcentaje de degradación (0.6 -1.2) en el sustrato de naranja, en las mediciones realizadas con las imágenes cuya distancia focal es de 10x.

Es posible que esto se deba, a una mejor precisión de las dimensiones de los poliestirenos expandidos mostrados en las fotografías.

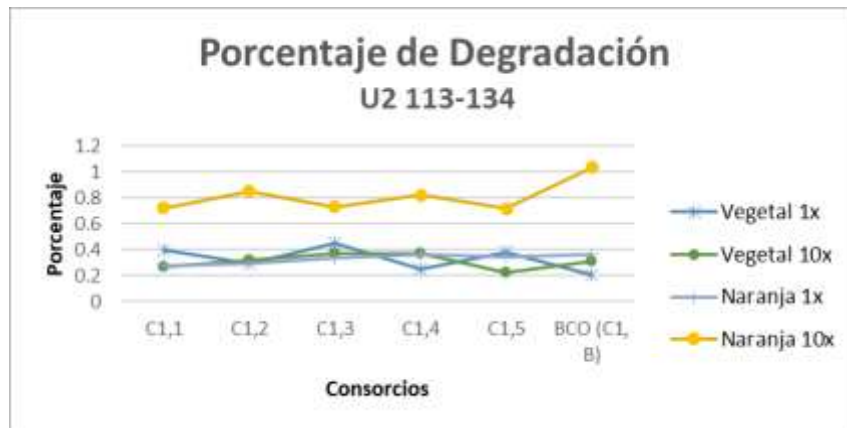


Gráfico 3. Porcentaje de degradación U2 113-134

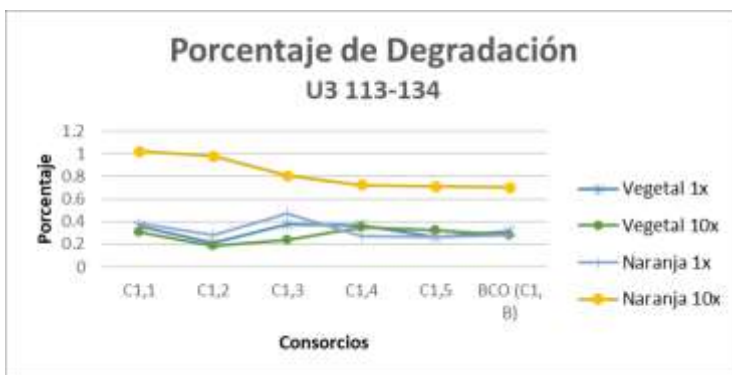


Gráfico 4. Porcentaje de degradación U3 113-134

Los poliestirenos expandidos de los sustratos vegetal 1x y 10x así como naranja 1x (gráficos 2, 3 y 4) presentan un porcentaje de degradación con valores cercanos entre sí (0.2 – 0.5) en las tres unidades experimentales.

Gráficos del porcentaje de degradación del consorcio 113-135

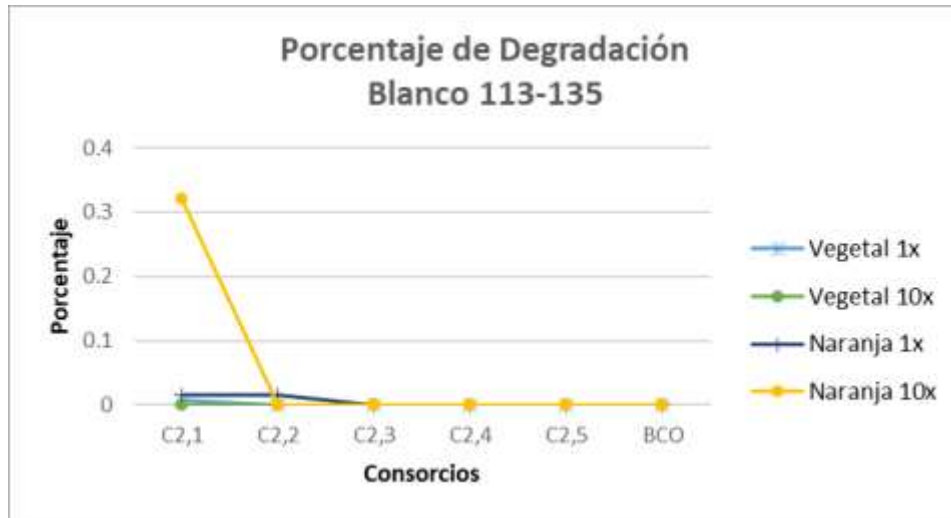


Gráfico 5. Porcentaje de degradación Blanco 113-135

En la gráfica 5 se observan porcentajes de degradación del poliestireno expandido en todos los sustratos con valores cercanos a cero en las unidades experimentales sin bacterias ni consorcios “blancos” con un valor fuera de rango (0.32) en una de las 5 piezas colocadas al interior de una de las compostas.

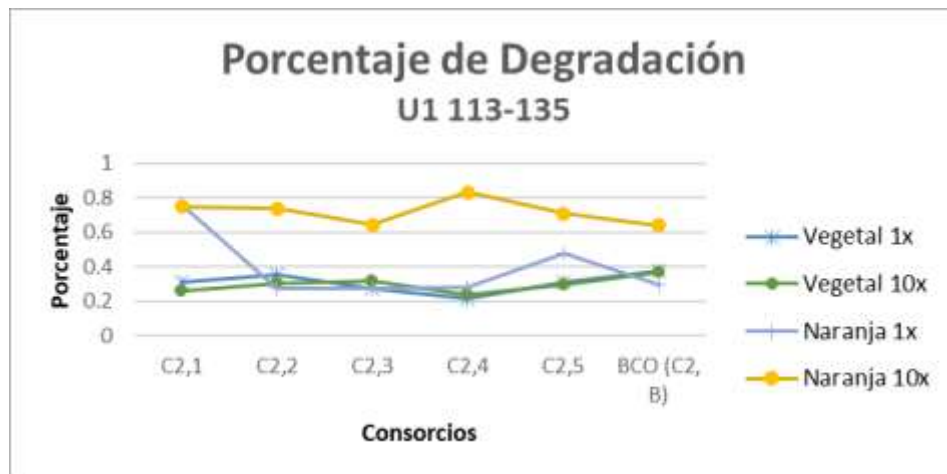


Gráfico 6. Porcentaje de degradación U1 113-135

En las tres unidades experimentales (gráficos 6, 7 y 8) se observa un mejor porcentaje de degradación (0.6 -0.9) en el sustrato de naranja, en las mediciones realizadas con las imágenes cuya distancia focal es de 10x. Es posible que esto se deba, a una mejor precisión de las dimensiones de los poliestirenos expandidos mostrados en las fotografías.

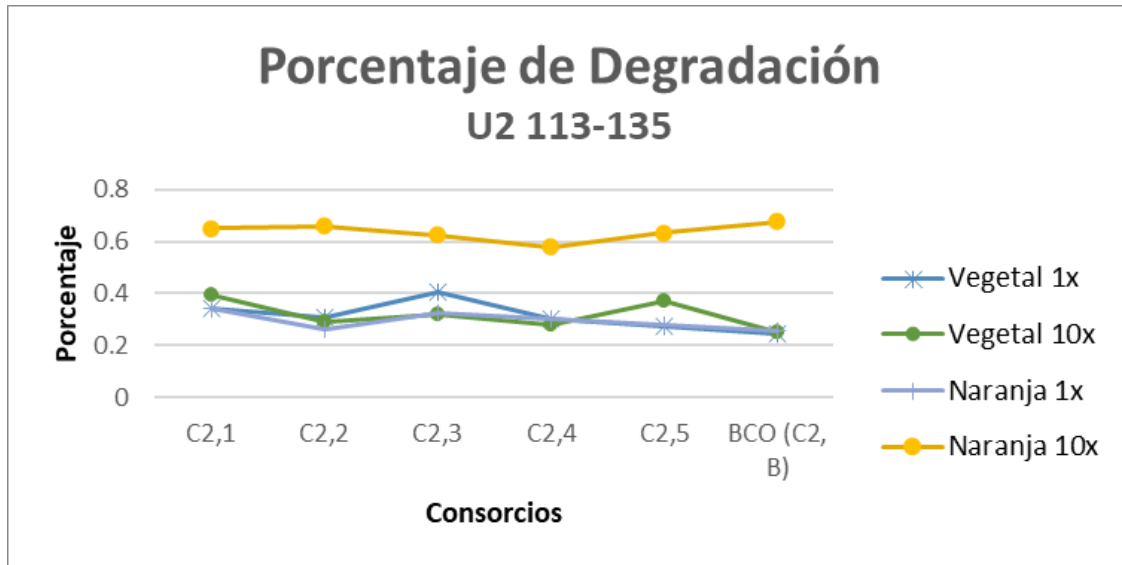


Gráfico 7. Porcentaje de degradación U2 113-135

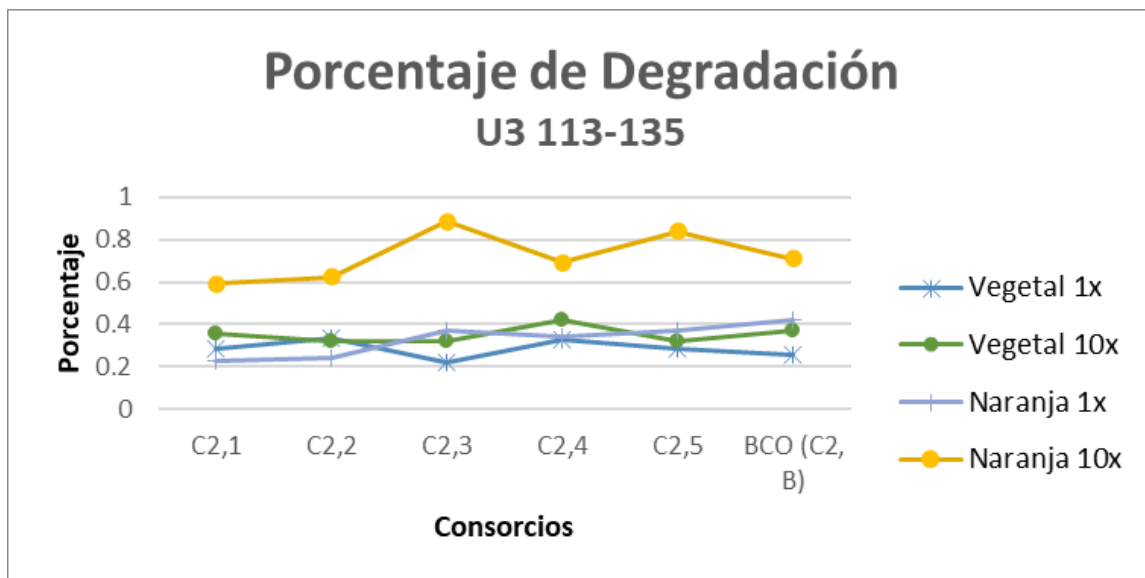


Gráfico 8. Porcentaje de degradación U3 113-135

Los poliestirenos expandidos de los sustratos vegetal 1x y 10x así como naranja 1x (gráficos 6, 7 y 8) presentan un porcentaje de degradación con valores cercanos entre sí (0.2 – 0.45) en las tres unidades experimentales. Con un valor fuera de rango (0.75) en una de las 5 piezas colocadas al interior de una de las compostas de sustrato naranja 1x que muestra el gráfico 6.

Gráficos del porcentaje de degradación del consorcio 113-K120

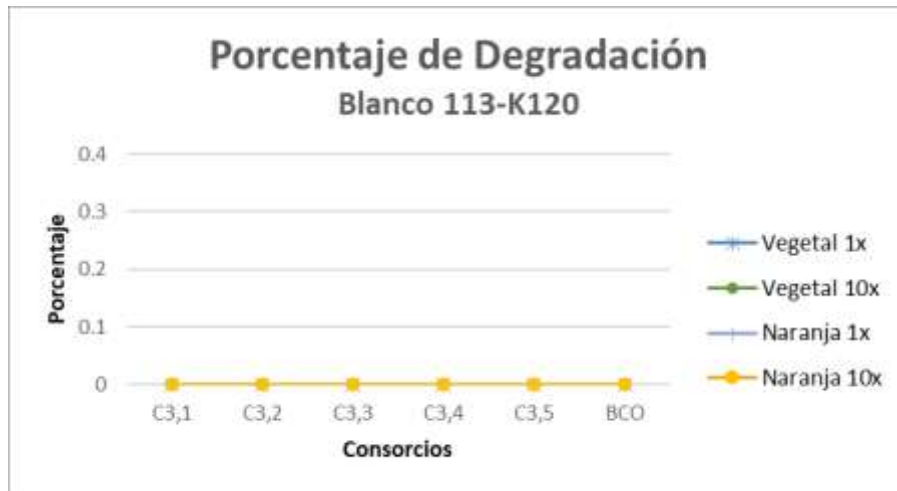


Gráfico 9. Porcentaje de degradación Blanco 113-K120

En la gráfica 9 se observan porcentajes de degradación del poliestireno expandido en todos los sustratos con valores de cero en las unidades experimentales sin bacterias ni consorcios “blancos”.

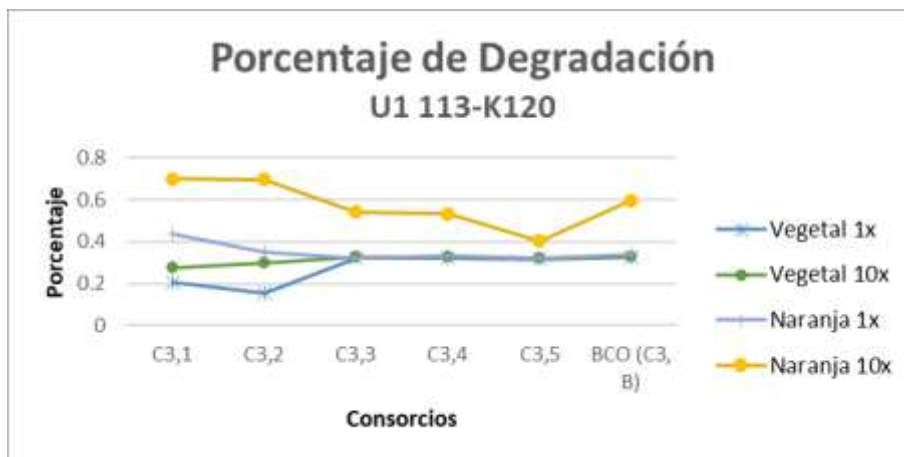


Gráfico 10. Porcentaje de degradación U1 113-K120

En la unidad experimental 1 (gráfica 10) se observa un mejor porcentaje de degradación (0.4 - 0.7) en el sustrato de naranja 10x. En las unidades experimentales 2 y 3 (gráficas 11 y 12) la degradación con sustrato naranja 10x es de (0.3- 0.83). Es posible que esto se deba, a una mejor precisión de las dimensiones de los poliestirenos expandidos mostrados en las fotografías.

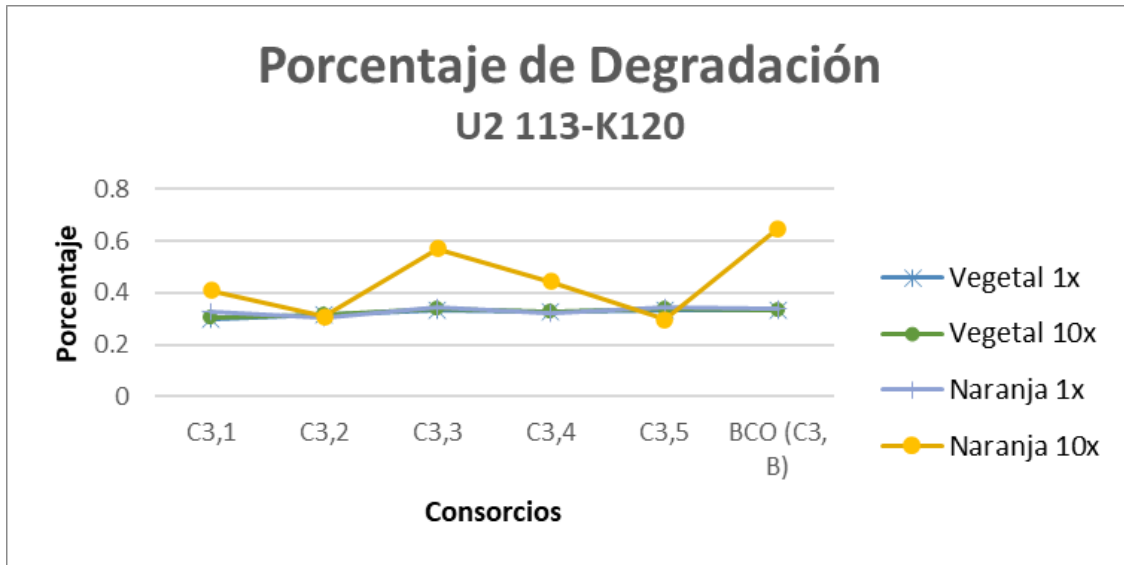


Gráfico 11. Porcentaje de degradación U2 113-K120

Los poliestirenos expandidos de los sustratos vegetal 1x y 10x así como naranja 1x (gráficos 10, 11 y 12) presentan un porcentaje de degradación con valores cercanos entre si (0.15 – 0.43) en las tres unidades experimentales. Con un valor fuera de rango (0.81) en una de las 5 piezas colocadas al interior de una de las compostas de sustrato vegetal 10x que muestra el gráfico 12.

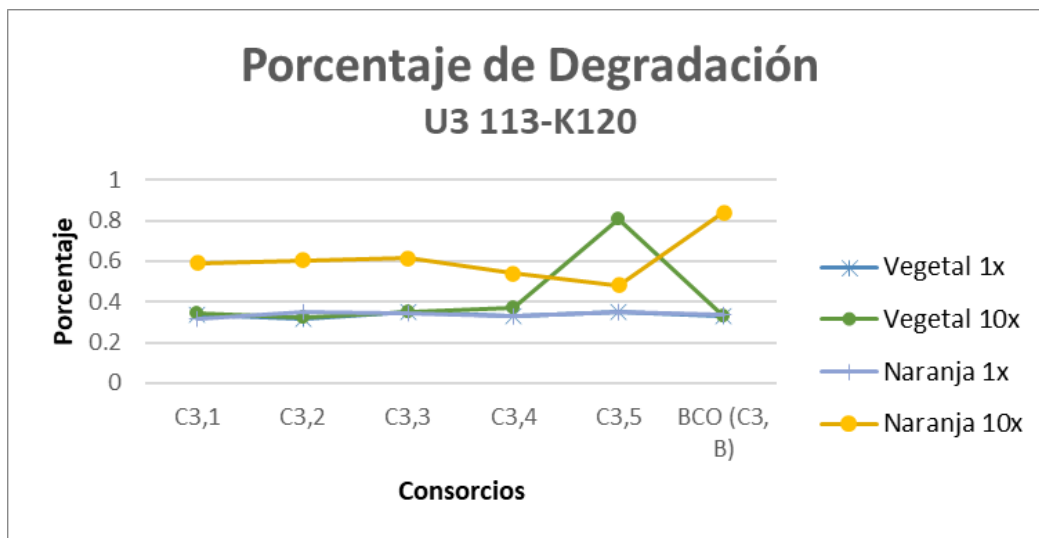


Gráfico 12. Porcentaje de degradación Blanco 113-K120

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para los tres consorcios bacterianos y en las tres unidades experimentales el tratamiento que presentó mejor porcentaje de degradación que va de 0.29 a 1.03, fue empleando sustrato naranja para las imágenes observadas con una distancia focal de 10x.

Los tratamientos con naranja observados con una distancia focal de 1x muestran un porcentaje de degradación de 0.15 a 0.4, muy similar al comportamiento del sustrato vegetal.

El sustrato vegetal presentó un porcentaje de degradación menor comparada con el sustrato naranja 10x, cuyos valores van de 0.19 a 0.48.

De las observaciones realizadas a los poliestirenos expandidos de las cepas individuales en el microscopio óptico, se muestran alteraciones en los bordes; algunos de ellos con formas dentadas, otros irregulares, e incluso disminución del grosor y perforaciones de hasta 2 mm de diámetro.

Como se puede observar el uso de cepas microbianas en el poliestireno expandido propician una aceleración en su proceso de degradación.

Se considera importante explorar el uso de cepas microbianas modificando las variables empleadas (temperatura, cantidad de inóculo, cepas bacterianas, sustrato, consorcios) en este experimento a fin de aumentar el porcentaje de degradación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research*, 163(2), 173–181. doi:10.1016/j.micres.2006.04.001.
- Arthuz López, L., & Pérez Mora, W. (2019, diciembre). Alternativas de bajo impacto ambiental para el reciclaje del poliestireno expandido a nivel mundial. *Informador técnico*, 83(2), 209-219. <https://doi.org/10.23850/22565035.1638>
- Barrena, R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Tesis de doctorado., Universidad Autónoma Barcelona, Barcelona. Recuperado de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5307/rbg1de1.pdf>
- Barrera Castro, G. P., Olaya Florez, J. J., & Ocampo Carmona, L. M. (2017). *Production and characterization of the mechanical and thermal properties of expanded polystyrene with recycled material. Ingeniería y Universidad*, 21(2). doi:10.11144/javeriana.iyu21-2.pcmt.
- Benjumeda, D. (2017, julio). Bacterias Promotoras Del Crecimiento Vegetal: Mecanismos y Aplicaciones (Revisión Bibliográfica). Tesis de grado. Universidad de Sevilla, Sevilla. Recuperado de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65140/BENJUMEA%20MU%D1OZ,%20DANIEL.pdf;jsessionid=0150B16609A35DB16E65F402DF2920DC?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrejos, C., Chungam L., & Cieza, C. (2016) Biodegradación de poliestireno utilizando microorganismos presentes en el humus de lombriz durante los meses, Octubre – Diciembre 2016. Tesis de licenciatura. Universidad de Lambayeque, Chiclayo, Perú. Recuperado de <https://repositorio.udl.edu.pe/handle/UDL/83>
- Cabrera, L. (2015). Técnicas biológicas para la degradación de contaminantes. Tesis de licenciatura., PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, Quito. Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8745/MONOGRAF%c3%8dA%20LICENCIATURA%20LUIS%20CABRERA%2c%2027%20DE%20MARZO%202015..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Camelo, M., Sulma, P, Bonilla, B. (2011). Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal. *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(2). Recuperado de: https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num2_art:227

- Carrillo, J. M. (2019, mayo). Estrategias y acciones de gestión sustentable para manejo de residuos de poliestireno expandido (EPS), caso: Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Laredo. Recuperado de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/104600>
- Castiglia, V. C., & Kuhar, F. (2015). Deterioration of expanded polystyrene caused by *Aureobasidium pullulans* var. *melanogenum*. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 256–260. doi:10.1016/j.ram.2015.05.001
- Compendio de estadísticas ambientales 2018. (2018). Generación estimada de residuos sólidos urbanos por entidad federativa. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet8357.html
- Compendio de estadísticas ambientales 2018 (2018). Generación estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletf5cc.html
- ECOPLAS. (2011, mayo). POLIESTIRENO CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE (38). Recuperado de <http://ecoplas.org.ar/pdf/38.pdf>
- EPS Industry Alliance Packaging (2013). Expanded Polystyrene Packaging Environmental Profile Analysis. Recuperado de: http://www.epspackaging.org/images/stories/Environmental_Profile_Analysis_small.pdf
- Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2007). Microbiología agrícola. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/237826601_Bacterias_promotoras_de_crecimiento_en_plantas_para_propositos_agricolas_y_ambientales
- Góngora, J. (2014, octubre). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio Exterior*, 64 (5). http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf
- Hernández Rivera, S. A., Martínez Gándara, J., & Pérez Ortigoza, L. B. (2015, septiembre). BACTERIAS HIDROCARBONOCLÁSTICAS BIODEGRADANTES DE POLIESTIRENO EXPANDIDO. *Foresta Veracruzana*, 17(2). Recuperado de <https://www.redalyc.org>
- IMAGE TOOL for Windows, versión 3.0
- Janczak, K., Hryniewicz, K., Znajewska, Z., & Dąbrowska, G. (2018). Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 130, 65–75. doi: 10.1016/j.ibiod.2018.03.017.

- Jiménez Martínez, N. M. (2015, marzo). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (No. 17). Recuperado de: <http://hdl.handle.net>
- Junta de Andalucía. (s. f.). Use el compost: en agricultura, viveros y paisajismo. Recuperado 5 de agosto de 2020, de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Calidad_Ambiental/Gestion_De_Los_Residuos_Solidos/compost/Uso_Compost.pdf
- Lear, G., Kingsbury, J. M., Franchini, V. (2021). Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome*, 16 (2). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- León, R., & Ramírez, M. (2007, marzo). SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL PS ENTRECruzado A PARTIR DE RESIDUOS DE PS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(2). Recuperado de <http://www.ehu.eus>
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación, 22 de mayo de 2015. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23._LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCI_N_Y_GESTI_N_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf
- Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of The Total Environment*, 409(18), 3309–3324. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.04.038.
- Maharana, T., Negi, Y. S., & Mohanty, B. (2007). Review Article: Recycling of Polystyrene. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 46(7), 729–736. doi:10.1080/03602550701273963.
- Martínez, C., & Laines, J. R. (2013). Poliestireno expandido y su problemática ambiental. *KUXULKAB*, XIX. Recuperado de <http://www.revistas.ujat.mx>
- NOVA Chemicals Corporation. (2005). *Poliestireno expandible: almacenamiento y manejo*. Recuperado de https://www.novachem.com/wp-content/uploads/EPS-Regular_Guide_AMER_ES.pdf
- Pantoja, A., Martínez, M., & Román, P. (2013). MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR: Experiencias en América Latina. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Perdomo, G. (2002, abril). Plásticos y medio ambiente. *Revista iberoamericana Polímeros*, 3(2). Recuperado de <http://www.ehu.eus>
- Puente, M. L., García, J. E., Peticari, A., & Rubio, E. (2010). MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL EMPLEADOS COMO INOCULANTES EN TRIGO. *Información técnica de*

Trigo y Otros cultivos de invierno. Campaña 2010, 116, 38-44. Recuperado de

http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/miscelaneas/116/misc116_39.pdf

- Samper, M. D., Ferrandiz, S., & Lopez, J. (2008, julio). REDUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos Ingeniería de Residuos. Recuperado de <http://www.redisa.net>
- Sauri, M., & Castillo, E. (2002, septiembre). Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes. Ingeniería, revista *académica*, 6. Recuperado de <https://www.redalyc.org>
- Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. (2013). Elaboración de composta. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20130717125852/http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Elaboraci%C3%B3n%20de%20Composta.pdf>.
- SEMARNAT. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (Edición 2018). Recuperado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. (Edición 2015). Recuperado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/index.html>
- Trautmann, N., & Olynciw, E. (1996). Compost Microorganisms. Recuperado 4 de agosto de 2020, de <http://compost.css.cornell.edu/microorg.html>
- Valor compartido. (2020, 17 julio). Artículos de Poliestireno expandido [Fotografía]. <https://valor-compartido.com/mitos-y-realidades-del-unicel/>