

**Evaluación del efecto de la incorporación de
dos tipos de plásticos (biodegradable y
convencional) y la actividad de lombrices en
suelos arenosos en trigo (*Triticum aestivum* L.)**

Amalia Mejía Peláez

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**Evaluación del efecto de la incorporación de
dos tipos de plásticos (biodegradable y
convencional) y la actividad de lombrices en
suelos arenosos en trigo (*Triticum aestivum* L.)**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero Agrónomo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Amalia Mejía Peláez

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Evaluación del efecto de la incorporación de dos tipos de plásticos (biodegradable y convencional) y la actividad de lombrices en suelos arenosos en trigo (*Triticum aestivum* L.)

Amalia Mejía Peláez

Resumen. Películas plásticas como polietileno de baja densidad (PEBD) y biodegradables en la agricultura surgen como alternativa para la protección del suelo, cultivo y agua. El conocimiento de estos plásticos en el ecosistema terrestre es escaso. Los objetivos fueron evaluar en el desarrollo de las plantas de trigo: i. El efecto de la incorporación de plástico biodegradable y convencional en suelos arenosos, ii. El efecto del tamaño de los macro y micro plásticos y iii. El efecto de las lombrices (*Lumbricus terrestris*). El estudio se realizó en una cámara climatizada en la Universidad Wageningen, Holanda. Se usaron dos películas plásticas, dos tamaños de partículas (5 – 10 mm y <1 mm), presencia y ausencia de lombrices, en un diseño DCA y cinco repeticiones ($P \leq 0.05$). Se evaluaron en plantas semanalmente altura y número de hojas y al corte diámetro de tallo, biomasa aérea y radicular, hojas vivas y muertas, área foliar y macollamiento, pH y conductividad del suelo y mortalidad y peso de lombrices. La incorporación del plástico biodegradable en una concentración de 1% p/p en suelo retarda el desarrollo del trigo, baja la conductividad eléctrica en el suelo y no afecta el pH, mientras que el PEBD en el suelo no causa efecto en crecimiento pero genera mayor área foliar. Los micro plásticos retrasan el crecimiento del trigo. Las lombrices bajaron el pH del suelo, incrementaron la biomasa, el número de hojas, macollamiento y área foliar pero no tuvieron efecto en la altura y diámetro del tallo; su mortalidad incrementa en presencia de plástico biodegradable.

Palabras clave: Biodegradabilidad, cobertura, humedad del suelo, mulch.

Abstract. Plastic films such as low density polyethylene (LDPE) and biodegradable in agriculture arise as an alternative for soil, crop and water protection. The knowledge of the two plastics in the terrestrial ecosystem is scarce. The objectives were to evaluate in the development of wheat plants: i. The effect of the incorporation of biodegradable and conventional plastic in sandy soils, ii. The effect of the size of macro and micro plastics and iii. The effect of earthworms (*Lumbricus terrestris*). The study was conducted in a climate-chamber at Wageningen University, The Netherlands. Two plastic films, two particle sizes (5 – 10 mm and <1 mm), presence and absence of earthworms, were used in a DCA design and five replicates ($P \leq 0.05$). Leaf height and number of leaves were evaluated weekly. At the end of the experiment, stem diameter, aerial and root biomass, live and dead leaves, leaf area, tillering, soil pH and conductivity and earthworm mortality and weight were evaluated. The incorporation of biodegradable plastic at a concentration of 1% w / w in soil delays the development of wheat, lowers the electrical conductivity in soil and does not affect pH, whereas LDPE in the soil does not cause an effect on its growth, but generates greater leaf area. Micro plastics lower wheat growth. The earthworms lowered the pH in the soil, increased the biomass, number of leaves, tillering and leaf area but did not affect the height and stem diameter of wheat. Its mortality increases in the presence of biodegradable plastic.

Key words: Biodegradability, coverage, mulch, soil moisture.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
4. CONCLUSIONES	32
5. RECOMENDACIONES	33
6. LITERATURA CITADA.....	34
7. ANEXOS	38

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Condiciones de la cámara climatizada para el crecimiento de trigo con adición de plástico biodegradable y convencional con presencia y ausencia de lombrices.	4
2. Distribución de tamaños de microplásticos <1 mm y porcentaje por peso de cada rango de tamaño en dos películas plásticas (biodegradable y polietileno de baja densidad).	5
3. Nutrientes de la solución de fertilizantes líquidos para 100 L de agua utilizados en investigaciones en los invernaderos Unifarm de la Universidad de Wageningen.	7
4. Contenido de macro y micro elementos de la solución nutritiva de fertilizantes líquidos para 100 L de agua utilizados en investigaciones en los invernaderos Unifarm de la Universidad de Wageningen.	7
5. Factores evaluados en la determinación del efecto de dos tamaños y tipos de plástico con presencia y ausencia de lombrices.	8
6. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación de la altura de las plantas de trigo a los 14, 21, 28, 35, 42, 47 y 56 días después de siembra con diferentes películas plásticas, tamaños de partículas y la ausencia o presencia de lombrices.	10
7. Comparación de las interacciones en la evaluación de la altura de las plantas de trigo a los 14, 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	12
8. Comparación individual de los factores en la evaluación de la altura de las plantas de trigo a los 47 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	13
9. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del número de hojas de las plantas de trigo para los 14, 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra con diferentes películas, tamaño de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	14
10. Comparación de las interacciones en la evaluación del número de hojas de las plantas de trigo a los 21, 28, 35 y 56 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	15
11. Comparación individual de los factores en la evaluación del número de hojas de las plantas de trigo a los 14 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	17

12. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación de los parámetros de biomasa en las plantas de trigo con diferentes películas plásticas, tamaños de plástico y la ausencia o presencia de lombrices.	17
13. Comparación de las interacciones en la evaluación de la biomasa radicular de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	18
14. Comparación individual de los factores en la evaluación de la biomasa aérea y total de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaño de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	20
15. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del área foliar y número de hojas vivas y muertas en las plantas de trigo con diferentes películas plásticas, tamaños de plástico y la ausencia o presencia de lombrices.	21
16. Comparación de las interacciones en la evaluación del número de hojas vivas en las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	22
17. Comparación individual de los factores en la evaluación del área foliar y número de hojas muertas en las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	23
18. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del diámetro del tallo y número de macollas efectivas y no efectivas en las plantas de trigo con diferentes películas plásticas, tamaños de plástico y la ausencia o presencia de lombrices.	24
19. Comparación de las interacciones en la evaluación del diámetro del tallo y número de macollas efectivas de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	25
20. Comparación individual de los factores en la evaluación del número de macollas no efectivas de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	26
21. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del pH y conductividad eléctrica final del suelo en las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	27
22. Comparación de las interacciones en la evaluación de la conductividad eléctrica final en el suelo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	28
23. Comparación individual de los factores en la evaluación del pH final del suelo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.	29
24. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación de los parámetros de las lombrices en las plantas de trigo con diferentes películas y tamaños de plásticos.	30
25. Comparación de las interacciones en la evaluación del número final de lombrices vivas y muertas y el peso total de lombrices inicial y final con diferentes películas y tamaños de plásticos.	31

Figuras	Página
1. Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) a los 35 días después de siembra. (A) Tratamiento de la película biodegradable con un tamaño de partícula <1 mm sin lombrices. (B) Tratamiento de polietileno de baja densidad, partículas de 5-10 mm con lombrices	16
2. Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) en el momento del corte. (A) Tratamiento de la película biodegradable con un tamaño <1 mm sin lombrices (B) Tratamiento de polietileno de baja densidad, partículas con tamaño <1 mm sin lombrices.	19

Anexos	Página
1. Análisis de suelo.....	38

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la predicción de la FAO en el 2009, la población mundial incrementará de 6.8 billones en el 2010 a 9.1 billones para el 2050, con un incremento esperado del 70% en demanda de alimentos. Esto presenta un reto para la producción agrícola global y se hace necesario el desarrollo de estrategias que permitan la eficiencia en el rendimiento de los cultivos. Las coberturas del suelo son una alternativa para lograr sistemas de producción eficientes.

Se deriva del alemán el término comúnmente utilizado “mulch” que hace referencia a una capa o película de material(es) que cubren la superficie del suelo (Jiang *et al.* 2016). En los últimos 10 años, el uso de las coberturas del suelo ha aumentado alrededor del mundo. Surgen como una alternativa efectiva para la conservación del suelo y agua. El “mulch” es un método que permite la manipulación del ambiente del cultivo con el fin de aumentar el rendimiento y la calidad (Kader *et al.* 2017). Además trae consigo múltiples beneficios como el incremento en la temperatura del suelo, reducción de la presencia de malezas, limita la evaporación del suelo, mantiene la humedad, reduce el riesgo del ataque de algunos insectos, mayor rendimiento del cultivo y uso eficiente de nutrientes (Kasirajan y Ngouajio 2012).

Los materiales de cobertura se clasifican en tres grupos: Materiales orgánicos (desechos de animales y plantas), materiales inorgánicos (algunos polímeros sintéticos) y materiales especiales (concreto y grava) (Kader *et al.* 2017). Los materiales orgánicos usados apropiadamente cumplen con todas las bondades que brindan los otros tipos de coberturas. Sin embargo, estos materiales no están disponibles en grandes cantidades y su calidad es inconsistente. Por esta razón, desde del año 1948, el Dr. Emery Emmert, de la Universidad de Kentucky, se dedicó a desarrollar películas plásticas para los cultivos que revolucionaron las técnicas de cobertura en la agricultura (Kasirajan y Ngouajio 2012).

El plástico polietileno proviene de la resina de este material en forma de pellets. Estos pellets son calentados y procesados en pliegues, formando películas de plástico. El polietileno de baja densidad (PEBD), se ha convertido en el plástico más usado en el mundo gracias a su fácil procesamiento, resistencia química, alta durabilidad y flexibilidad (Clarke 1987). La mayor desventaja es que este material proveniente del petróleo, causa un problema ambiental considerable como residuo (Halley *et al.* 2001). La remoción de las películas plásticas toma mucho tiempo, aproximadamente 16 h/ha y así exista maquinaria, es indispensable la mano de obra para su total remoción (McCraw y Motes 1991). Normalmente la vida útil del plástico excede la duración del ciclo de vida del cultivo y se deja en el suelo después de la cosecha. Así una parte expuesta a la luz pase por el proceso de foto degradación (Gonzalez *et al.* 2002), el resto del material queda en pedazos,

incorporándose durante la preparación del suelo para el nuevo cultivo. Algunas partículas quedan en la superficie y otras se incorporan, siendo más difícil su proceso de degradación porque están menos expuestas a altas temperaturas y a la luz. Esto se traduce en un problema de contaminación en suelos que no ha sido del todo evaluada (Kasirajan y Ngouajio 2012). El reciclaje del material fue una alternativa, sin embargo aquellas coberturas utilizadas en la agricultura, se contaminan en grandes cantidades con escombros y polvo (Hemphill 1993). En Canadá, las películas plásticas con más del 5% de contaminación en medida de peso, no serán aceptadas para reciclaje (Clarke 1996).

A comienzos del año 1970, investigadores comienzan a desarrollar películas plásticas con la capacidad de auto degradarse por condiciones químicas adecuadas (De Carsalade 1986). Los bioplásticos engloban a los plásticos biodegradables, producidos a partir de materiales fósiles y a los plásticos de base biológica que son sintetizados a partir de biomasa o recursos renovables (Tokiwa *et al.* 2009). El uso de este tipo de plásticos, se convertiría en una alternativa para reemplazar los productos construidos a base de petróleo que son difícilmente degradados. Al final de su vida útil, los plásticos biodegradables pueden ser integrados directamente en el suelo donde la micro flora los transformará en dióxido de carbono o metano, agua y biomasa (Kasirajan y Ngouajio 2012).

La biodegradabilidad de los plásticos debe ser evaluada desde dos puntos de vista. El primer aspecto se trata de las características de las enzimas producidas por los microorganismos. Esto tiene que ver con el tipo de microorganismo, su distribución y las condiciones en las que crece. En este caso el pH, la temperatura, la humedad, el oxígeno y nutrientes en el suelos son de extrema importancia. Así mismo difieren los tipos de enzimas, si son intracelulares o extracelulares. El segundo aspecto a considerar son las propiedades químicas y físicas del polímero como su área superficial y su condición hidrofílica e hidrofóbica (Tokiwa *et al.* 2009).

Los micro plásticos, partículas menores a 1 mm o macro plásticos, partículas mayores a 1 mm, (Cole *et al.* 2011), pueden ser fácilmente ingeridos por organismos del suelo. *Lumbricus terrestris* L. es una lombriz anécica nativa de Europa. Esta especie puede construir túneles de 1 m de profundidad y de 3 a 10 mm de diámetro. Tiene la capacidad de ingerir partículas de plástico y moldearlas para depositarlas en las paredes de sus túneles. (Huerta *et al.* 2016) Su dinámica en el suelo es activa, promoviendo aireación, materia orgánica y estimulando el crecimiento de las plantas (Huerta *et al.* 2010).

El conocimiento sobre la sostenibilidad de ambos tipos de plástico es muy escasa en términos ambientales y agronómicos. Los efectos adversos surgen de los aditivos de plásticos o residuos que se fragmentan a micro plásticos, sin embargo mantienen su composición química intacta (Briassoulis *et al.* 2015). Así mismo, existe poca información y conocimiento sobre el efecto de estos residuos presentes en el suelo y en las plantas.

Para esta investigación se utilizaron plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.). Aparte que es uno de los cereales más producidos a nivel mundial para la alimentación humana (FAO 2017), es una planta fácilmente medible para la investigación. El trigo pertenece a la familia poaceae. Es una gramínea hexaploide anual que tiene tallo simple, erecto y hueco. Mide hasta 1.2 m de altura (FAO 2007). Es una planta que posee dos tipos de raíces, seminales

y nodales o adventicias. La parte aérea se compone por unidades repetidas compuestas de un nodo, una hoja, un internodo elongado y un brote en la axila de la hoja. Las ramificaciones provienen de las axilas de las hojas que tienen una forma linear, plana y recta (Kirby y Appleyard 1985). Es una planta que se cultiva alrededor del mundo en diversas condiciones climáticas y representa uno de los cultivos que alimenta el mundo (FAO 2007).

Los objetivos de este proyecto fueron:

- Evaluar el efecto de la incorporación de plásticos biodegradable y convencional (polietileno de baja densidad) en suelos arenosos en el crecimiento de plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.)
- Evaluar el efecto del tamaño de las partículas del plástico, micro plásticos (< 1 mm) y macro plásticos (5 – 10 mm).
- Evaluar el efecto de las lombrices (*L. terrestris*) en el desarrollo del trigo en suelo con plástico incorporado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación.

El proyecto se llevó a cabo en la cámara climatizada número 7 en el edificio 109 Klima de la Universidad de Wageningen. Ubicada en la provincia de Güeldres en los Países Bajos. Las condiciones para la cámara se determinaron de acuerdo a los requerimientos de las plantas de trigo establecidas para el experimento (Cuadro 1). La humedad del suelo se mantuvo entre 12 y 18% durante el experimento. La investigación se hizo durante los meses de abril a junio del año 2017. Tuvo una duración de 64 días.

Cuadro 1. Condiciones de la cámara climatizada para el crecimiento de trigo con adición de plástico biodegradable y convencional con presencia y ausencia de lombrices.

Condición	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Intensidad Lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Luz	14	22	70	300
Oscuridad	10	17	70	–

Tipos de películas plásticas y tamaño de partículas.

Se usaron dos tipos de películas, polietileno de baja densidad (PEBD) y biodegradable. El plástico PEBD era de color blanco y negro en doble faz con un grosor de 80 μm y plástico biodegradable (BIONOV A) de color negro, con un grosor de 15 μm . Los tamaños de las partículas se clasificaron como macropelásticos con tamaños de 5 – 10 mm y micropelásticos con tamaños <1 mm (Cole *et al.* 2011).

La composición del plástico biodegradable es:

Ácido tereftálico: Es un ácido dicarboxílico aromático de fórmula $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})_2$. Se usa principalmente como precursor del poliéster polietileno (NIH 2004).

Tereftalato de polibutileno: Es un polímero termoplástico con la fórmula $(\text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{O}_4)_n$. (Habasit 2017).

Pululano P2000: Es un polisacárido formado por unidades de maltotriosa. Su fórmula es $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Se produce a partir de almidón de maíz por el hongo *Aureobasidium pullulans* (NIH 2015).

Corte del plástico.

Para obtener los macroplásticos se seccionó una porción del rollo del material plástico en rectángulos de 1.5 m de largo y 0.9 m de ancho. Se marcaron líneas de 5 mm de ancho con un lápiz. Se cortaron las franjas con bisturí y de manera manual, con unas tijeras se cortaron las partículas midiendo entre 5 mm y 10 mm de ancho. Este procedimiento se llevó a cabo para los dos tipos de películas. Se analizó la distribución de tamaños calculando el área (mm²) de 100 partículas para los dos tipos de películas, asegurándose que se encontraban en el rango de tamaño adecuado para los macroplásticos, entre 5 mm y 10 mm, y que ambas tuvieran una distribución uniforme.

Para obtener los microplásticos se seccionó una porción del rollo del material en rectángulos de 1 m de largo y 0.5 m de ancho. El material se congeló con nitrógeno a una temperatura de -180 °C por 1 min. Se molieron a mano con guantes. Las partículas obtenidas se pasaron por cuatro tamices para tener una distribución uniforme de los tamaños de partículas. Los tamices fueron de 1000 µ a 500 µ, 500 µ a 250 µ, 250 µ a 100 µ y de 100 µ a 50 µ. Se utilizó la misma proporción por tamaño de partículas en los dos plásticos, siendo la mayor proporción el tamaño entre 500 y 250 µ (62%) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Distribución de tamaños de micro plásticos <1 mm y porcentaje por peso de cada rango de tamaño en dos películas plásticas (biodegradable y polietileno de baja densidad).

Tamaño del tamiz (µm)	Proporción de plástico por tamaño (%)
1000 – 500	12
500 – 250	62
250 – 50	25

Preparación del suelo y contenedores.

Se usó suelo arenoso con 83% de arena, 11% de limo y <1% de arcilla colectado de un lote de investigación sembrado con papa perteneciente a la Universidad de Wageningen. El suelo se cribó por un tamiz de 2000 micrones para eliminar cualquier partícula diferente al suelo. El suelo se dispuso en contenedores de plástico polietileno de alta densidad (PEAD) de 2 L, con dimensiones de 18 cm de alto, 13 cm de diámetro del radio superior y 10 cm de diámetro del radio inferior. En la parte interior del contenedor se ubicó una lámina de geotextil compuesta de polyester de la misma dimensión del radio de la parte inferior del contenedor con el fin de evitar la salida de las lombrices y permitir el flujo de agua del contenedor.

Con una balanza de marca All Scales Europe[®], modelo DK-6200-C-M, se pesaron todos los contenedores vacíos, con la lámina del geotextil en el interior. En un balde se pesaron 1500 g de suelo seco al aire y tamizado. Se mezclaron con 15 g de plástico (1% de concentración) y se agregó 150 ml de agua para darle consistencia a la mezcla. Se volvió a mezclar a mano hasta homogenizar el contenido el cual se introdujo en el contenedor. Este procedimiento se repitió para los 50 contenedores.

Siembra de semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.).

Se pesaron en promedio 500 semillas individualmente utilizando una balanza analítica digital marca Mettler Toledo®, modelo AE200. Se seleccionaron aquellas con un peso en un rango entre 0.04 y 0.05 g. Previo al llenado de los contenedores, se hizo una prueba de germinación en cinco contenedores con cinco semillas cada uno en la cámara climatizada. Se evaluó la germinación a los siete y diez días. Una vez determinada la viabilidad de la semilla, dos días después del llenado de los contenedores se sembraron cinco semillas por contenedor. La profundidad de siembra se determinó tomando como referencia dos veces el largo de cada semilla medida con regla y empujando con el dedo en el suelo. Las semillas se cubrieron con una capa de suelo de aproximadamente 1 cm de grosor y se agregaron 50 ml de agua de la llave por contenedor. Después de 10 días germinadas las plantas, se eliminaron las dos plantas más pequeñas para dejar tres por contenedor.

Lombrices. *Lumbricus terrestris* (Subclase: Oligochaeta, Familia: Lumbricidae).

Se adquirieron 300 lombrices de un productor, las cuales se almacenaron refrigeradas a 10 °C para evitar su mortalidad. Cinco días después de la germinación de las plantas, se pesaron dos lombrices adultas con la gramera de marca All Scales Europe® modelo DK-6200-C-M, para agregarlas a cada contenedor de los tratamientos con lombriz.

Se cubrió la superficie del suelo del contenedor con 12 g de hojarasca obtenida de una zona arborizada a los alrededores del edificio con el propósito de alimentar las lombrices. En los tratamientos en los que no se aplicaron lombrices, también se les agregó la misma cantidad de hojarasca con el fin de tener uniformidad de condiciones edafológicas y microclima entre los tratamientos. Se hizo un agujero de tres cm aproximadamente en el suelo con un dedo de la mano, se depositó la lombriz con cuatro gotas de agua y se cubrió con la hojarasca. Cada dos semanas se agregó hojarasca para los contenedores con lombrices. Para los otros contenedores no se agregó semanalmente hojarasca.

Riego y Fertilización.

El suministro de agua a las plantas se hizo con respecto al peso de los contenedores diariamente durante todo el transcurso de la investigación con el fin de mantener una humedad en el suelo de 12 al 18%. Se aplicaron 100 ml de una solución nutritiva estandarizada, brindada por Unifarm en Wageningen para el mantenimiento de la mayoría de los cultivos en el centro de investigación (Cuadro 3 y 4). Se suministró una vez por semana a cada contenedor, comenzando 25 días después su germinación. En total, a cada contenedor se le aplicaron 500 ml a lo largo del experimento.

Cuadro 3. Nutrientes de la solución de fertilizantes líquidos para 100 L de agua utilizados en investigaciones en los invernaderos Unifarm de la Universidad de Wageningen.

Fertilizante	mL
Nitrato de Calcio (Calsal)	85.4
Nitrato Amónico (Amnitra)	15.0
Ácido Nítrico (Salpeterzuur)	43.0
Sulfato de Calcio (Sulfakal)	36.0
Ácido Fosfórico (Fosforzuur)	11.8
Bascal	68.2
Sulfato de Magnesio (Magnesul)	84.6

Conductividad Eléctrica: 2.1 S/cm
pH: 5.5

Cuadro 4. Contenido de macro y micro elementos de la solución nutritiva de fertilizantes líquidos para 100 L de agua utilizados en investigaciones en los invernaderos Unifarm de la Universidad de Wageningen.

Macroelementos	mmol/L	Microelementos	µmol/L
NH ₄ ⁺	1.20	Fe ⁺²	35.0
K ⁺	7.20	Mn ⁺²	8.0
Ca ⁺	4.00	Zn ⁺²	5.0
Mg ²⁺	1.82	B ₄ O ₇ ⁻²	20.0
NO ₃	12.40	Cu ⁺²	0.5
SO ₄ ²⁻	3.32	MoO ₄ ⁻²	0.5
PO ₄ ³⁻	1.00	—	—

Variables Medidas.

El experimento tuvo una duración de 64 días desde siembra hasta corte al término del cual se determinaron las variables. En la planta semanalmente se midió la altura vertical del tallo central (cm) desde la superficie del suelo hasta el final de la hoja más alta. Se comenzaron a tomar las medidas siete días después de la germinación (14 DDS) hasta el corte (56 DDS). Así mismo se midió el número de hojas por planta. Sin embargo para esta variable en los días después de siembra 42 y 47 no se registraron datos.

En el corte se determinaron las variables de biomasa aérea y radical expresadas en gramos (g) utilizando una balanza de marca All Scales Europe[®], modelo DK-6200-C-M, la biomasa total como sumatoria de la biomasa aérea y radical también expresada en gramos (g), el área foliar (cm²) utilizando el equipo Licor LI-3100, el número de hojas vivas, número de hojas muertas, el diámetro del tallo principal (mm) medido con un metro lineal debajo del primer nodo, el número de ramificaciones efectivas siendo estas en las que se evidencia la formación de una estructura reproductiva, en este caso fueron las ramificaciones que

tuvieron más de tres hojas y el número de ramificaciones no efectivas. El experimento no contempló variables de producción.

Las variables medidas en el suelo fueron pH y conductividad eléctrica. Para determinar el pH, se tomaron cinco gramos de suelo en los cuales se agregaron 25 ml de agua destilada (relación 1:5). El pH se midió en el sobrenadante de la mezcla de suelo y agua después de mezclar y reposar dos minutos utilizando un medidor SenTix. Para la conductividad eléctrica se usó la celda de conductividad TetraCon 325. El valor inicial del pH del suelo fue de 6 y para la conductividad eléctrica 167 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tratamientos.

La distribución de los plásticos en los ocho tratamientos se determinó por el tamaño, tipo de plástico y presencia o ausencia de lombrices (Cuadro 5). Hubo cinco repeticiones para cada tratamiento. Resultaron llenos 20 contenedores con plástico PEBD y 20 contenedores con plástico biodegradable. A los dos controles no se les adicionó plástico, solo suelo en 10 contenedores. Los 10 tratamientos en total, se ubicaron aleatoriamente en un mesa dentro de la cámara climatizada con las condiciones establecidas (Cuadro 1).

Cuadro 5. Factores evaluados en la determinación del efecto de dos tamaños y tipos de plástico con presencia y ausencia de lombrices.

Película Plástica	Tamaño de Partícula (mm)	Lombrices
PEBD [£]	5 – 10	Presencia
PEBD	5 – 10	Ausencia
PEBD	<1	Presencia
PEBD	<1	Ausencia
Biodegradable	5 – 10	Presencia
Biodegradable	5 – 10	Ausencia
Biodegradable	<1	Presencia
Biodegradable	<1	Ausencia
Control	–	Presencia
Control	–	Ausencia

[£]PEBD: Polietileno de baja densidad

Diseño experimental.

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial de tratamientos $3 \times 2 \times 2$. Corresponde a dos películas y un control, dos tamaños de partículas y presencia o ausencia de lombrices. Se establecieron diez tratamientos en total con cinco repeticiones. Las unidades experimentales fueron los contenedores. Las unidades observacionales fueron las tres plantas establecidas en cada contenedor.

Las interacciones evaluadas fueron:

1. Película plástica \times lombrices
2. Película plástica \times tamaño de partícula
3. Tamaño de partícula \times lombrices
4. Película plástica \times tamaño de partícula \times lombrices.

Análisis Estadístico. Los datos se analizaron con el programa estadístico SAS versión 9.4 “Statistical Analysis System”. Se hizo un análisis de varianza (ANOVA), una separación de medias Duncan para evaluar el efecto de los factores individualmente y Least-Square Means para evaluar la interacción significativa entre los factores, con una probabilidad del 5% ($\alpha=0.05$) en todos los análisis estadísticos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de variables de crecimiento de plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.)

Altura. Los factores se analizaron en conjunto a los 14, 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra ya que hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en las interacciones película plástica \times tamaño de partícula a los 14, 21, 35 y 42 días después de siembra, en la película plástica \times lombrices a los 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra y en la película plástica \times tamaño de partícula \times lombrices a los 21 días después de siembra (Cuadro 6 y 7). La interacción película plástica \times tamaño de partícula muestra un comportamiento errático en la significancia de los factores que posiblemente se deba a un componente inherente a la película plástica.

A los 47 días después de siembra no se encontraron diferencias en ninguna interacción pero sí en el factor película plástica. Esto indica que el efecto de este factor es independiente, por lo tanto, los factores se discuten individualmente (Cuadro 6 y 8).

Cuadro 6. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación de la altura de las plantas de trigo a los 14, 21, 28, 35, 42, 47 y 56 días después de siembra con diferentes películas plásticas, tamaños de partículas y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Altura (cm)						
	14 DDS	21 DDS	28 DDS	35 DDS	42 DDS	47 DDS	56 DDS
Película plástica	*	***	***	***	***	***	***
Tamaño de partícula	ns	ns	ns	*	*	ns	ns
Lombrices	ns	*	*	*	*	ns	ns
Película \times Tamaño	***	*	ns	*	*	ns	ns
Película \times Lombrices	ns	*	**	*	*	ns	**
Tamaño \times Lombrices	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Película \times Tamaño \times Lombrices	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

^ΩDDS: Días después de siembra

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$)

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo.

Las mayores alturas en general para los diferentes días después de siembra, se presentaron en el plástico PEBD con los dos tamaños (< 1 mm y $5 - 10$ mm) con presencia y ausencia

de lombrices y en los controles (sin plástico). No hubo diferencia entre estas interacciones. A los 14, 21, 28, 35 y 42 días después de siembra la interacción del plástico biodegradable con partículas <1 mm y sin lombrices representó los valores más bajos de altura de las plantas de trigo (Cuadro 7). Se infiere que la competencia por nutrientes causada por los microorganismos en la degradación del plástico biodegradable en el suelo, pudo haber ocasionado un retraso en el crecimiento general de la planta. Debido a la naturaleza higroscópica del componente de almidón del plástico biodegradable, sus propiedades mecánicas y físicas pueden ser afectadas por el agua. La absorción de agua del medio crea un ambiente óptimo para que las enzimas degraden el plástico (Ziyad 2015). Esta condición de la película biodegradable pudo haber generado una baja disponibilidad de agua para la planta, resultando así en una disminución de su crecimiento. Este resultado no concuerda con el estudio elaborado por (Bilck *et al.* 2014) en el que evaluaron la altura de la planta suma (*Pfaffia glomerata* (Spreng) Pedersen), utilizando bolsas de trasplante hechas de plástico biodegradable negro, biodegradable blanco y PEBD. En el día 30 de la investigación, demostraron que no existieron diferencias significativas en la altura de las plantas con bolsas de trasplante biodegradables y aquellas con bolsas de PEBD. Es posible atribuir esta diferencia a la composición de los plásticos biodegradables utilizados que no es conocida para ese estudio.

Sin embargo en el corte a los 56 días después de siembra, se evidencia que la interacción entre el plástico biodegradable con el tamaño <1 mm y con presencia o ausencia de lombrices y el control (sin plástico) con presencia y ausencia de lombrices, no presentaron diferencias. El plástico biodegradable con ambos tamaños (<1 mm y 5 – 10 mm) representó los mayores valores para la altura (Cuadro 7). Se evidencia que las plantas con plástico biodegradable que representaron menor altura en los primeros días después de siembra, logran alcanzar para la fecha de corte la altura de las plantas del control y el plástico PEBD. Esto se puede deber al tiempo de la actividad de los factores en conjunto en el que posiblemente ocurra la degradación del plástico biodegradable creando un efecto en los primeros días después de siembra, lo cual se evidencia en la interacción película plástica × tamaño de partícula × lombrices que fue significativa ($P \leq 0.05$) en el día 21 después de siembra. En los días posteriores no se evidencian diferencias significativas para esta interacción.

En el día 14 después de siembra, el factor película plástica fue significativo ($P \leq 0.05$) y en los 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra, la película fue altamente significativa ($P < 0.0001$). Estos resultados demuestran que la película plástica fue el factor que tuvo más influencia en la altura para las plantas de trigo.

Cuadro 7. Comparación de las interacciones en la evaluación de la altura de las plantas de trigo a los 14, 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores			Altura (cm)					
Lombrices	Película Plástica	Tamaño (mm)	14 DDS ^Ω	21 DDS	28 DDS	35 DDS	42 DDS	56 DDS
Presencia	PEBD [‡]	5 – 10	27.9 bc [¥]	39.5 ab	43.8 a	43.4 a	43.4 a	41.0 bcd
Presencia	BIO [€]	5 – 10	27.8 bc	38.4 bc	40.0 b	40.3 b	39.9 b	39.0 d
Presencia	PEBD	<1	29.8 a	40.3 ab	43.7 a	43.8 a	43.5 a	41.5 bcd
Presencia	BIO	<1	27.0 c	38.0 bc	39.6 b	38.8 bc	39.0 b	43.9 abc
Presencia	Control	–	29.0 ab	39.6 ab	44.1 a	43.7 a	43.4 a	44.5 abc
Ausencia	PEBD	5 – 10	27.0 c	39.2 ab	43.6 a	43.5 a	43.2 a	41.4 bcd
Ausencia	BIO	5 – 10	27.9 abc	36.1 c	37.4 b	36.9 c	38.6 b	46.9 a
Ausencia	PEBD	<1	29.8 a	41.4 a	43.6 a	43.3 a	42.9 a	40.2 cd
Ausencia	BIO	<1	24.8 d	30.9 d	32.2 d	31.7 d	33.2 c	45.7 ab
Ausencia	Control	–	28.3 abc	40.3 ab	43.9 a	44.6 a	43.6 a	44.0 abc
R ²			0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
CV			9.2	9.7	9.6	9.8	8.3	9.2

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

^Ω DDS: Días después de siembra

[‡] PEBD: Polietileno de baja densidad

[€] BIO: Biodegradable

A los 47 días después de siembra, el control (sin plástico) y la película PEBD representaron la mayor altura y no difirieron entre ellos. La menor altura de las plantas se encontró en el plástico biodegradable (Cuadro 8).

En cuanto al tamaño de partícula (<1 mm y 5 – 10 mm), la ausencia de plástico (control) y la presencia o ausencia de lombrices, no presentaron diferencias significativas (Cuadro 8). Tanto en el análisis individual de factores, como en las interacciones, se evidencia nuevamente que la película plástica tuvo un efecto significativo en la altura de las plantas de trigo, siendo el plástico biodegradable el que impacta mayor y negativamente en la variable de crecimiento de las plantas.

Cuadro 8. Comparación individual de los factores en la evaluación de la altura de las plantas de trigo a los 47 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	47 DDS^Ω
Película plástica	
PEBD [£]	42.7 a [¥]
Biodegradable	39.6 b
Control	42.3 a
Tamaño de partícula	
5 – 10 mm	41.4
<1 mm	40.9
Control	42.4
Lombrices	
Presencia	41.3
Ausencia	41.3

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

^Ω DDS: Días después de siembra

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

Número de Hojas. Los factores se analizaron en conjunto a los 21, 28, 35 y 56 días después de siembra ya que hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en las interacciones película plástica \times tamaño de partícula a los 21 días después de siembra, en la película plástica \times lombrices a los 56 días después de siembra, en el tamaño de partícula \times lombrices a los 28, 35 y 56 días después de siembra y en la película plástica \times tamaño de partícula \times lombrices a los 21 días después de siembra (Cuadro 9 y 10).

A los 14 días después de siembra no se encontraron diferencias en ninguna interacción pero sí en la película plástica. Esto indica que el efecto de este factor es independiente y se discute individualmente (Cuadro 10).

Cuadro 9. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del número de hojas de las plantas de trigo para los 14, 21, 28, 35, 42 y 56 días después de siembra con diferentes películas, tamaño de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Número de Hojas				
	14 DDS ^Ω	21 DDS	28 DDS	35 DDS	56 DDS
Película plástica	*	***	***	***	***
Tamaño de partícula	ns	ns	*	ns	*
Lombrices	ns	**	***	***	***
Película×Tamaño	ns	***	ns	ns	ns
Película×Lombrices	ns	ns	ns	ns	*
Tamaño×Lombrices	ns	ns	*	*	***
Película×Tamaño×Lombrices	ns	*	ns	ns	ns

^ΩDDS: Días después de siembra,

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$),

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo

El mayor número de hojas en general para los diferentes días después de siembra, se presentaron en el plástico PEBD con tamaño de 5 – 10 mm con presencia de lombrices (Cuadro 10 y Figura 1). Probablemente el efecto impermeable del plástico PEBD pudo haber impedido localmente el escurrimiento del agua lo cual promueve una mayor retención de humedad particularmente para este suelo arenoso. La respuesta de la planta a esta interacción también se puede explicar por un estrés fisiológico. El concepto de estrés en vegetales se diferencia en eu-estrés y dis-estrés. El primero tiene un carácter positivo, activador, mientras que el segundo es un estrés que causa daño (Lichtenthaler 1998). El eu-estrés es suave y estimula la activación del metabolismo celular e incrementa la actividad fisiológica de la planta. Es un promotor del crecimiento vegetal (Daza *et al.* 2009). El contenido de partículas de plástico PEBD con tamaño de 5 – 10 mm probablemente represente una limitante física para el crecimiento de las raíces que se convierta en un eu-estrés. En respuesta a esto, la planta genera una mayor cantidad de raíces posibilitando una mayor absorción de nutrientes y agua. Debido a los nutrientes asimilados, la planta tiene la capacidad de generar un mayor número de hojas.

Las interacciones del plástico biodegradable con partículas de tamaño < 1 mm con presencia o ausencia de lombrices representaron los valores más bajos para la variable número de hojas en las plantas de trigo (Cuadro 10 y Figura 1). Este resultado concuerda con la variable altura, ya que muy posiblemente el plástico biodegradable genera algún compuesto en su proceso de biodegradación que no permite que la planta se desarrolle adecuadamente. Un mayor número de hojas permite un incremento en la fotosíntesis ya que aumenta el área de captación de luz (Gardner *et al.* 1985). Según esto, en las plantas expuestas al plástico

biodegradable que representan un menor número de hojas, disminuye su actividad fotosintética resultando en un crecimiento menor.

Cuadro 10. Comparación de las interacciones en la evaluación del número de hojas de las plantas de trigo a los 21, 28, 35 y 56 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Lombrices	Factores		N° de Hojas			
	Película Plástica	Tamaño (mm)	21 DDS ^Ω	28 DDS	35 DDS	56 DDS
Presencia	PEBD [£]	5 – 10	5.9 a [¥]	11.1 a	13.8 a	43.6 a
Presencia	BIO [€]	5 – 10	4.8 b	6.9 e	9.8 b	22.7 d
Presencia	PEBD	<1	6.5 a	10.0 bc	12.7 ab	36.1 b
Presencia	BIO	<1	4.0 c	5.2 f	7.7 c	25.7 d
Presencia	Control	–	6.7 a	10.4 ab	12.7 ab	37.6 b
Ausencia	PEBD	5 – 10	5.0 b	8.3 d	10.3 b	31.7 c
Ausencia	BIO	5 – 10	3.9 c	4.5 fg	6.1 d	22.7 d
Ausencia	PEBD	<1	6.2 a	9.1 cd	11.5 b	31.4 c
Ausencia	BIO	<1	3.5 c	4.1 g	5.5 d	26.4 d
Ausencia	Control	–	6.0 a	9.1 cd	11.3 b	34.7 bc
R ²			0.6	0.8	0.7	0.6
CV			19.4	18.4	20.4	16.9

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

^Ω DDS: Días después de siembra

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

[€] BIO: Biodegradable

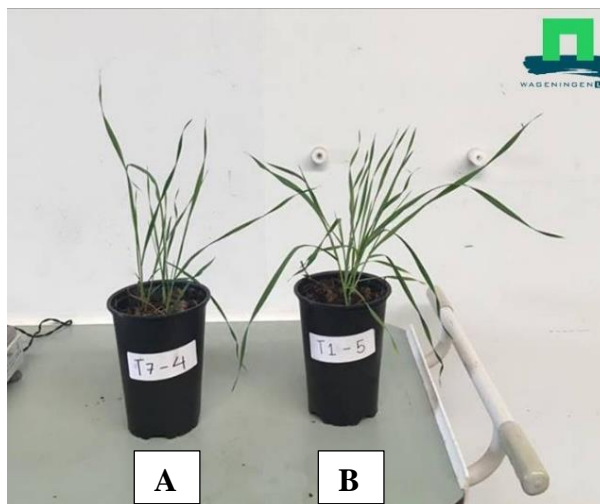


Figura 1. Trigo (*Triticum aestivum* L.) a los 35 días después de siembra. (A) Tratamiento de la película biodegradable con un tamaño de partícula <1 mm sin lombrices. (B) Tratamiento de polietileno de baja densidad, partículas de 5 – 10 mm con lombrices

A los 14 días después de siembra, el control (sin plástico) y la película PEBD representaron el mayor número de hojas y no difieren entre ellos (Cuadro 11). La menor altura resultó en el plástico biodegradable. Estos resultados son similares a los obtenidos en la variable de altura. Los procesos de degradación del plástico biodegradable en el suelo probablemente ocasionen un retraso en el desarrollo de la planta. Así mismo la competencia por nutrientes en el medio entre la planta y los microorganismos responsables de la degradación (Shah *et al.* 2008), posiblemente haya generado una menor disponibilidad de nutrientes, especialmente de nitrógeno para el desarrollo vegetativo de la planta resultando en un menor número de hojas.

En el número de hojas, el control (sin plástico) presentó los mayores valores en conjunto con las partículas de 5 – 10 mm (Cuadro 11). Se infiere que la presencia de partículas de plástico incorporadas en el suelo con tamaño <1 mm afectan negativamente el número de hojas en la planta de trigo, no así los macro plásticos (5 – 10 mm).

A los 14 días después de siembra no se manifestó el efecto de las lombrices (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación individual de los factores en la evaluación del número de hojas de las plantas de trigo a los 14 días después de siembra con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	14 DDS ^Ω
Película plástica	
PEBD [£]	3.0 a [¥]
Biodegradable	2.8 b
Control	3.0 a
Tamaño de partícula	
5 – 10 mm	
<1 mm	2.9 ab
Control	2.9 b
	3.0 a
Lombrices	
Presencia	2.9
Ausencia	2.9

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

^Ω DDS: Días después de siembra

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

Biomasa aérea, radicular y total. Los factores se analizaron en conjunto en la variable biomasa radicular ya que hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la interacción película plástica \times tamaño de partícula (Cuadro 12 y 13). En la biomasa aérea y total no se encontraron diferencias significativas en ninguna interacción pero sí en la película plástica y en las lombrices. Esto indica que el efecto de los factores es independiente y se discuten individualmente (Cuadro 14).

Cuadro 12. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación de los parámetros de biomasa en las plantas de trigo con diferentes películas plásticas, tamaños de plástico y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Biomasa (g·pl⁻¹)		
	Radicular	Aérea	Total
Película plástica	**	***	***
Tamaño de partícula	*	ns	*
Lombrices	***	***	***
Película×Tamaño	*	ns	ns
Película×Lombrices	ns	ns	ns
Tamaño×Lombrices	ns	ns	ns
Película×Tamaño×Lombrices	ns	ns	ns

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$)

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo

Los mayores valores para biomasa radicular en las plantas se dieron en el plástico PEBD con tamaño de partícula 5 – 10 mm con lombrices y en los controles (sin plástico) con presencia y ausencia de lombrices. No hubo diferencia entre estas interacciones. Las interacciones del plástico biodegradable con ambos tamaños de partículas (5 – 10 mm y <1 mm) y sin lombrices, representaron los valores más bajos para la biomasa radicular de las plantas de trigo. La biomasa radicular, la película fue muy significativa ($P < 0.01$ a 0.0001) y las lombrices fueron altamente significativas ($P < 0.0001$). Estos resultados demuestran que individualmente la película plástica y la presencia de lombrices fueron los factores que tuvieron más influencia en el desarrollo radicular de las plantas de trigo (Cuadro 13). Sin embargo la interacción película plástica \times tamaño de partícula es significativa ($P \leq 0.05$) (Cuadro 12 y Figura 2).

Cuadro 13. Comparación de las interacciones en la evaluación de la biomasa radicular de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores			
Lombrices	Película Plástica	Tamaño (mm)	Biomasa Radicular (g·pl⁻¹)
Presencia	PEBD [‡]	5 – 10	6.5 a [¥]
Presencia	BIO [€]	5 – 10	5.4 bc
Presencia	PEBD	<1	5.0 cd
Presencia	BIO	<1	5.3 bcd
Presencia	Control	–	6.3 a
Ausencia	PEBD	5 – 10	5.1 cd
Ausencia	BIO	5 – 10	4.0 ef
Ausencia	PEBD	<1	4.5 de
Ausencia	BIO	<1	3.7 f
Ausencia	Control	–	6.0 ab
R ²			0.7
CV			11.0

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

[‡]PEBD: Polietileno de baja densidad

[€]BIO: Biodegradable

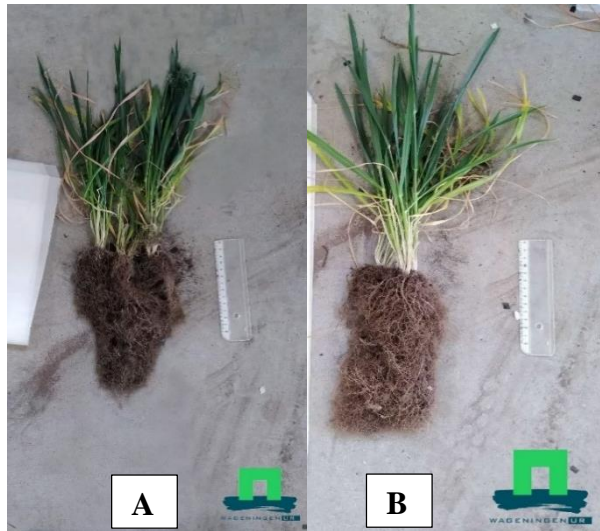


Figura 2. Trigo (*Triticum aestivum* L.) en el momento del corte. (A) Tratamiento de la película biodegradable con un tamaño $<1\text{ mm}$ sin lombrices (B) Tratamiento de polietileno de baja densidad, partículas con tamaño $<1\text{ mm}$ sin lombrices.

Existe diferencia entre los dos tipos de películas plásticas y el control (sin plástico) para la biomasa aérea y total. La mayor biomasa aérea y total se expresa en el control (sin plástico) y la menor se expresa en el plástico biodegradable (Cuadro 14). La degradación hace referencia a la alteración química o física del polímero por el impacto de factores ambientales como la luz, la temperatura, la humedad, las condiciones químicas y actividad biológica (Shah *et al.* 2008). Dentro de los cambios químicos, se encuentra el rompimiento de enlaces, transformación de las moléculas o formación de nuevos grupos funcionales (Pospisil y Nespurek 1997) Según esto, es posible inferir que el proceso de degradación del plástico biodegradable haya producido algún tipo de compuesto que promoviera la disminución en el desarrollo de la biomasa aérea, radicular y total en las plantas.

Durante la biodegradación, los microorganismos son responsables de liberar enzimas intracelulares y extracelulares que degradan los polímeros (Gu *et al.* 2000) Para cumplir con esta función, necesitan condiciones aeróbicas y suficientes nutrientes para obtener agua, dióxido de carbono y biomasa microbiana como productos finales (Shah *et al.* 2008). Es probable que para la ocurrencia del proceso de biodegradación, los microorganismos presentes hayan consumido los nutrientes que originalmente se proporcionaron para el crecimiento de las plantas, resultando así en la disminución de todos los parámetros de biomasa.

En la biomasa aérea ambos tamaños (5 – 10 mm y $<1\text{ mm}$) no presentan diferencias, sin embargo si existe diferencia con el control (sin plástico). Esto quiere decir que la presencia de partículas de plástico en el suelo sin importar el tamaño, causan un efecto en la biomasa aérea de las plantas de trigo. Sin embargo para la biomasa total, sí existen diferencias entre los tamaños de partículas resultando medias más bajas con el tamaño $<1\text{ mm}$ (Cuadro 14). Al momento de evaluar la degradación del plástico, se deben tomar en cuenta los aspectos microbiológicos (enzimas) y las propiedades químicas y físicas del plástico. Es necesario

evaluar las propiedades de agregación del polímero, por ejemplo la superficie específica (Tokawa *et al.* 2009). La superficie específica es una propiedad de los sólidos que representa el área de una superficie por unidad de masa (Mauri 2009). Las partículas más pequeñas generalmente tienen más área superficial permitiendo mayor actividad e influencia en las propiedades químicas y físicas del medio. Esta superficie deja mayor área para reaccionar con la solución, gases del suelo, raíces entre otros componentes (Arévalo G 2017. Profesora asociada Universidad Zamorano. Comunicación personal).

Existe diferencia entre la ausencia y presencia de las lombrices. La presencia de lombrices impacta con una mayor biomasa aérea y total (Cuadro 14). Las poblaciones de las lombrices de tierra dentro de la comunidad del suelo contribuyen a propiciar el desarrollo del ecosistema a través de la relación lombriz-planta-suelo. Contribuyen a mantener las propiedades físicas y químicas del suelo, mejorar la aireación y la retención de agua (Chamorro y Villazón 1995) Se caracterizan por que ingieren la basura presente en el suelo y la depositan en sus túneles en la capa mineral. Cumplen un papel importante en el ciclo de nutrientes haciéndolos disponibles para las plantas (Hale 2005) Se evidencia que la presencia de lombrices impacta positivamente los parámetros de biomasa de las plantas. Estos resultados concuerdan con el estudio realizado por (Huerta *et al.* 2010), en el que registra mayores valores de biomasa aérea y radicular para plantas de maíz (*Zea mays*) con la presencia de lombrices en el suelo.

Cuadro 14. Comparación individual de los factores en la evaluación de la biomasa aérea y total de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaño de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Biomasa Aérea (g·pl⁻¹)	Biomasa Total (g·pl⁻¹)
Película plástica		
PEBD [£]	8.8 b [¥]	14.1 b
Biodegradable	5.6 c	10.2 c
Control	9.9 a	16.0 a
Tamaño de partícula		
5 – 10 mm	7.4 b	12.6 b
<1 mm	6.9 b	11.5 c
Control	9.8 a	16.0 a
Lombrices		
Presencia	8.4 a	14.1 a
Ausencia	7.0 b	11.6 b

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa (P ≤0.05)

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

Área foliar, número de hojas vivas y muertas. Los factores se analizaron en conjunto en la variable número de hojas vivas ya que hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en las interacciones película plástica \times tamaño de partícula, película plástica \times lombrices y tamaño de partícula \times lombrices (Cuadro 15 y 16). En el área foliar y el número de hojas muertas no se encontraron diferencias en ninguna interacción pero sí en la película plástica y en las lombrices. Esto indica que el efecto de los factores es independiente y se discuten individualmente (Cuadro 17).

En el número de hojas vivas, la película y las lombrices fueron altamente significativas ($P < 0.0001$). Esto significa que individualmente la película plástica y la presencia de lombrices fueron los factores que tuvieron más influencia en el número de hojas vivas en las plantas de trigo (Cuadro 15).

Cuadro 15. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del área foliar y número de hojas vivas y muertas en las plantas de trigo con diferentes películas plásticas, tamaños de plástico y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Área Foliar (cm ²)	N° de Hojas	
		Vivas	Muertas
Película plástica	***	***	***
Tamaño de partícula	*	ns	ns
Lombrices	***	***	*
Película \times Tamaño	ns	*	ns
Película \times Lombrices	ns	*	ns
Tamaño \times Lombrices	ns	*	ns
Película \times Tamaño \times Lombrices	ns	ns	ns

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$)

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo

El mayor número de hojas vivas se evidenció en el plástico PEBD con tamaño de partícula 5 – 10 mm con lombrices (Cuadro 16). Este resultado concuerda con el análisis del número de hojas anteriormente discutido. El contenido de partículas de plástico PEBD con tamaño de 5 – 10 mm probablemente represente una limitante física relacionada con el eu-estrés que promueve el crecimiento de las raíces. En respuesta a esto, una mayor cantidad de raíces posibilita una mayor absorción de nutrientes y agua. Por los nutrientes asimilados, la planta tiene la capacidad de generar un mayor número de hojas.

Las interacciones del plástico biodegradable con partículas de 5 – 10 mm y < 1 mm y sin lombrices, representaron los valores más bajos para el número de hojas vivas en las plantas de trigo (Cuadro 16).

Cuadro 16. Comparación de las interacciones en la evaluación del número de hojas vivas en las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores			
Lombrices	Película Plástica	Tamaño (mm)	N° de Hojas Vivas
Presencia	PEBD [‡]	5 – 10	18.2 a [‡]
Presencia	BIO [€]	5 – 10	13.4 bcd
Presencia	PEBD	<1	15.0 bc
Presencia	BIO	<1	11.3 ef
Presencia	Control	–	15.1 b
Ausencia	PEBD	5 – 10	13.0 cde
Ausencia	BIO	5 – 10	10.0 f
Ausencia	PEBD	<1	12.5 de
Ausencia	BIO	<1	12.2 de
Ausencia	Control	–	14.1 bcd
R ²			0.4
CV			19.0

[‡]Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

[‡]PEBD: Polietileno de baja densidad

[€]BIO: Biodegradable

El control (sin plástico) y el plástico PEBD no difieren para el área foliar y el número de hojas muertas. La mayor área foliar se obtuvo en el plástico PEBD y en el control (sin plástico) y la menor en el biodegradable. El mayor número de hojas muertas se evidenció en el plástico PEBD y en el control (sin plástico). El menor número de hojas muertas correspondió al plástico biodegradable (Cuadro 17). Como se mencionó anteriormente para los parámetros de biomasa, los procesos de degradación del plástico biodegradable con la posible generación de moléculas o grupos funcionales químicos promueven una menor área foliar. Posiblemente estos compuestos interfieren en la absorción de nutrientes por parte de la planta. Las hojas son los órganos responsables de la fotosíntesis e interceptación de luz. A medida que el área foliar se desarrolla, la radiación interceptada incrementa (Gardner *et al.* 1985). Esto quiere decir que la disminución en el área foliar reduce los procesos de fotosíntesis para la generación de energía.

Con el plástico biodegradable, se evidenció anteriormente un menor número de hojas. El menor número de hojas muertas con esta película se atribuye al mecanismo de supervivencia de las plantas por mantener las pocas hojas que tienen para generar energía.

Así mismo, el posible retraso del crecimiento generado por la degradación del plástico biodegradable explica una menor cantidad de hojas en la planta.

El tamaño de partícula <1 mm representa los valores más bajos tanto para el área foliar como para el número de hojas muertas. Hubo menos área foliar y menos cantidad de hojas muertas (Cuadro 17). Como se mencionó anteriormente para los parámetros de biomasa, la superficie específica es una propiedad física de las partículas más pequeñas del polímero, que promueven mayor área expuesta para la ocurrencia de reacciones en el medio. Con los micro plásticos se evidenció en las plantas una menor biomasa radicular. Es posible mencionar que los bajos valores para el área foliar sean consecuencia de una pobre absorción de nutrientes por parte de la raíz.

Existe diferencia entre la ausencia y presencia de las lombrices. La presencia de lombrices representa una mayor área foliar y mayor número de hojas muertas (Cuadro 17). De acuerdo con los resultados mencionados para los parámetros de biomasa, las lombrices contribuyen activamente a la dinámica de todos los procesos del suelo (Huerta *et al.* 2010) Así mismo, promueven aireación y retención de agua. Por esta razón se infiere que la presencia de estos organismos en el suelo promueve el desarrollo de una mayor área foliar.

Probablemente, la actividad en los procesos del suelo dada la presencia de lombrices, incrementa la disponibilidad de nutrientes asimilables por la planta. De esta manera se aumenta el metabolismo de la planta, haciendo que la misma produzca hojas nuevas y mude hojas viejas.

Cuadro 17. Comparación individual de los factores en la evaluación del área foliar y número de hojas muertas en las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Área Foliar (cm²)	N° de Hojas Muertas
Película plástica		
PEBD [£]	195 a [¥]	6.4 a
Biodegradable	128 b	2.9 b
Control	187 a	6.9 a
Tamaño de partícula		
5 – 10 mm	173 a	4.9 b
<1 mm	149 b	4.4 b
Control	187 a	6.9 a
Lombrices		
Presencia	180 a	5.6 a
Ausencia	153 b	4.6 b

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa (P ≤0.05)

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

Diámetro del tallo, número de macollas efectivas y número de macollas no efectivas.

Los factores se analizaron en conjunto en las variables diámetro del tallo y número de macollas efectivas ya que hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la interacción película plástica \times lombrices (Cuadro 18 y 19). En el número de macollas no efectivas no se encontraron diferencias en ninguna interacción pero sí en la película plástica y en las lombrices. Esto indica que el efecto de los factores es independiente y se discuten individualmente (Cuadro 20).

Cuadro 18. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del diámetro del tallo y número de macollas efectivas y no efectivas en las plantas de trigo con diferentes películas plásticas, tamaños de plástico y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	Diámetro del Tallo (mm)	Macollas (N°)	
		Efectivas	No Efectivas
Película plástica	***	*	*
Tamaño de partícula	*	ns	ns
Lombrices	*	*	*
Película \times Tamaño	ns	ns	ns
Película \times Lombrices	*	*	ns
Tamaño \times Lombrices	ns	ns	ns
Película \times Tamaño \times Lombrices	ns	ns	ns

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$)

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo

El mayor diámetro de tallo se presentó en el plástico PEBD con ambos tamaños (<1 mm y $5 - 10$ mm) y en los controles (sin plástico) todos con presencia y ausencia de lombrices. El mayor número de macollas efectivas se presentó en el plástico PEBD con ambos tamaños (<1 mm y $5 - 10$ mm) con presencia de lombrices y en los controles (sin plástico) con presencia de lombrices. No hubo diferencia entre estas interacciones (Cuadro 19). Las interacciones con plástico biodegradable con ambos tamaños (<1 mm y $5 - 10$ mm) y con presencia y ausencia de lombrices, representaron el menor diámetro del tallo y menor número de macollas efectivas.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos para la altura, número de hojas y biomasa. El proceso de la degradación del plástico biodegradable impacta a la planta. Probablemente interfiere en la adquisición de nutrientes a través de las raíces para su crecimiento. Por esta razón las plantas resultan con menor diámetro de tallo y menos macollas efectivas.

Cuadro 19. Comparación de las interacciones en la evaluación del diámetro del tallo y número de macollas efectivas de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores				
Lombrices	Película Plástica	Tamaño (mm)	Diámetro del Tallo (mm)	Macollas Efectivas (N°)
Presencia	PEBD [£]	5 – 10	3.6 a [¥]	3.3 a
Presencia	BIO [€]	5 – 10	3.6 a	2.3 cd
Presencia	PEBD	<1	3.6 a	2.8 abc
Presencia	BIO	<1	3.3 b	2.1 d
Presencia	Control	–	3.9 a	3.1 ab
Ausencia	PEBD	5 – 10	3.7 a	2.2 cd
Ausencia	BIO	5 – 10	3.1 bc	2.0 d
Ausencia	PEBD	<1	3.7 a	2.3 cd
Ausencia	BIO	<1	2.9 c	2.5 bcd
Ausencia	Control	–	3.8 a	2.0 d
R ²			0.4	0.1
CV			9.0	37.0

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

[£]PEBD: Polietileno de baja densidad

[€]BIO: Biodegradable

El menor número de macollas no efectivas, se presentaron en el plástico biodegradable. El mayor número se evidenció en el plástico PEBD y en el control (sin plástico). No se presentaron diferencias significativas entre ambos tamaños (Cuadro 20). Este resultado concuerda con aquellos obtenidos para el área foliar. Como se mencionó anteriormente, los procesos de degradación del plástico biodegradable impactan la absorción de nutrientes. Con el plástico biodegradable, se evidenció una menor área foliar en las plantas. Cuando esta es reducida, la tasa de fotosíntesis disminuye y una menor cantidad de asimilados fotosintéticos son disponibles para el crecimiento y desarrollo general de la planta de trigo, una de las variables fisiológicas más afectada es el número de macollas y el grosor del tallo (Vos 2008).

Existe diferencia entre la ausencia y presencia de las lombrices. La presencia de lombrices representa un mayor número de macollas no efectivas (Cuadro 20). Este resultado es similar de acuerdo a los obtenidos para los parámetros de biomasa y número de hojas. Las bondades de la actividad de las lombrices en el medio, aportando aireación a la estructura del suelo,

traen consigo un aumento en el metabolismo de la planta que se expresa en el crecimiento de las plantas generando un mayor número de hojas y macollamiento, así sea no efectivo. De la misma manera lo anterior se evidencia en la biomasa aérea.

Cuadro 20. Comparación individual de los factores en la evaluación del número de macollas no efectivas de las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	N° de Macollas No Efectivas
Película	
PEBD [£]	2.4 a [¥]
Biodegradable	1.7 b
Control	2.1 a
Tamaño	
5 – 10 mm	2.6
<1 mm	1.9
Control	2.1
Lombrices	
Presencia	2.4 a
Ausencia	1.7 b

[¥] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

Evaluación de las variables del suelo.

Conductividad eléctrica y pH. Los factores se analizaron en conjunto en la variable conductividad eléctrica ya que hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la interacción película plástica \times tamaño de partícula (Cuadro 21 y 22). En el pH final del suelo no se encontraron diferencias en ninguna interacción pero sí en la película plástica, tamaño de partícula y en las lombrices. Esto indica que el efecto de los factores es independiente y se discuten individualmente (Cuadro 23).

Cuadro 21. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación del pH y conductividad eléctrica final del suelo en las plantas de trigo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	pH Final	Conductividad Eléctrica (dS/m)
Película plástica	*	*
Tamaño de partícula	*	ns
Lombrices	*	*
Película×Tamaño	ns	*
Película×Lombrices	ns	ns
Tamaño×Lombrices	ns	ns
Película×Tamaño×Lombrices	ns	ns

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$)

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. Un mayor valor para esta variable corresponde a una mayor concentración de sales (Corwin y Lesch 2005). La mayor conductividad eléctrica se evidenció en el plástico PEBD con partículas de tamaño <1 mm y sin lombrices. Los menores valores para la conductividad eléctrica, corresponden al plástico biodegradable con ambos tamaños de partículas (5 – 10 mm y <1 mm) y sin lombrices (Cuadro 22). Como se mencionó anteriormente para el análisis de las variables fisiológicas de las plantas, para que ocurra la degradación del plástico biodegradable, es necesario que existan condiciones aeróbicas y suficientes nutrientes para que los microorganismos puedan cumplir su función. Esto puede explicar los valores bajos para la conductividad, pues la micro biota del suelo entra en competencia por obtención de nutrientes, haciéndolos menos disponibles para las plantas. A partir de esto, es posible inferir que el compuesto liberado durante el proceso de degradación del plástico biodegradable que afecta a las plantas no es una sal o compuesto inorgánico.

La conductividad eléctrica en un suelo se encuentra influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo. Entre ellas la textura, el contenido de materia orgánica, humedad, capacidad de intercambio catiónico y pH. (Corwin y Lesch 2005). Un suelo arenoso, como el sujeto a estudio, posee baja conductividad eléctrica por que el tamaño de las partículas (arena) es mayor (Doerge *et al.* 1999). El plástico naturalmente tiene muy baja conductividad, sin embargo, si se le agrega un aditivo con características conductoras, incrementa la conductividad eléctrica (Márquez s.f.) Así no se tenga conocimiento sobre la composición del plástico PEBD para esta investigación, es posible que contenga este tipo de aditivos.

Cuadro 22. Comparación de las interacciones en la evaluación de la conductividad eléctrica final en el suelo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores			
Lombrices	Película Plástica	Tamaño (mm)	Conductividad Eléctrica (dS/cm)
Presencia	PEBD [‡]	5 – 10	0.34 abc [‡]
Presencia	BIO [€]	5 – 10	0.30 abc
Presencia	PEBD	<1	0.35 abc
Presencia	BIO	<1	0.27 bcd
Presencia	Control	–	0.34 abc
Ausencia	PEBD	5 – 10	0.25 cde
Ausencia	BIO	5 – 10	0.18 de
Ausencia	PEBD	<1	0.39 a
Ausencia	BIO	<1	0.13 e
Ausencia	Control	–	0.34 abc
R ²			0.5
CV			30.0

[‡] Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

[‡]PEBD: Polietileno de baja densidad

[€]BIO: Biodegradable

El mayor pH se presentó en el plástico biodegradable y en el control (sin plástico). El plástico PEBD presentó el pH más bajo, siendo significativamente diferente al control y al plástico biodegradable (Cuadro 23). Es posible atribuirle a la actividad de las lombrices que el pH haya bajado con el plástico PEBD, pues estos organismos tienen la capacidad de digerir plástico PEBD en su intestino y excretarlo en el suelo (Huerta 2016).

Desde el punto de vista de la degradación del plástico biodegradable únicamente en el suelo, los altos valores de pH para el plástico biodegradable estudiado, no concuerdan con los resultados obtenidos por (Romero 1997). En su estudio, evalúa la degradación de un biopolímero de quitina en ambientes de composta, suelo arcillo limoso y agua. En el análisis final del suelo, obtuvo valores de pH bajos. Para este análisis se evidencia que los tres factores, película, tamaño y lombrices presentan diferencias significativas ($P \leq 0.05$), sin embargo la película tiene un mayor impacto que los otros factores (Cuadro 21).

Las partículas de 5 – 10 mm evidenciaron los menores valores para pH y fueron significativamente diferentes a la partícula de tamaño <1 mm. Entre el control (sin plástico)

y el tamaño de partícula de tamaño <1 mm no existieron diferencias (Cuadro 23). Se evidenció que la biomasa radicular es mayor para el control y el plástico PEBD (Cuadro 13). Cuando una planta entra en estrés por las limitaciones de algún material abiótico presente en el medio con partículas grandes, la planta tiende a generar un mayor número de raíces promoviendo la absorción de agua y nutrientes (Montoliu 2010). Lo anterior beneficia el proceso de fotosíntesis. Probablemente por esta acción metabólica, se liberan hidrógenos generando acidificación del medio y generando valores de pH menores a los evidenciados por el plástico biodegradable.

Existe diferencia entre la presencia y ausencia de lombrices ya que la presencia de estos organismos representa un menor pH. (Cuadro 23). Estos organismos, tienen la capacidad de ingerir la materia orgánica del suelo y transformarla para convertirla en humus. Esta forma de materia orgánica se compone de distintos ácidos provenientes de las excretas (Fernández 2003). Es posible que esta condición de las lombrices haya provocado un pH bajo.

Cuadro 23. Comparación individual de los factores en la evaluación del pH final del suelo con diferentes películas, tamaños de plásticos y la ausencia o presencia de lombrices.

Factores	pH Final
Película	
PEBD [£]	6.71 b [¥]
Biodegradable	6.79 a
Control	6.76 ab
Tamaño	
5 – 10 mm	6.72 b
<1 mm	6.79 a
Control	6.76 ab
Lombrices	
Presencia	6.73 a
Ausencia	6.79 b

[¥]Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa (P ≤0.05)

[£]PEBD: Polietileno de baja densidad

Evaluación de las variables de las lombrices.

Para el peso final y el número de lombrices muertas la interacción película plástica \times tamaño de partícula fue significativa, por lo tanto, los factores se discuten en conjunto (Cuadro 24 y 25).

Cuadro 24. Significancia de los factores y las interacciones ($P \leq 0.05$) en la evaluación de los parámetros de las lombrices en las plantas de trigo con diferentes películas y tamaños de plásticos.

Factores	Lombrices			
	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Vivas (N°)	Muertas (N°)
Película plástica	ns	ns	ns	ns
Tamaño de partícula	ns	*	*	*
Película \times Tamaño	ns	*	ns	*

*** Diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$)

** Muy significativas ($P 0.01$ a 0.0001)

* Significativa ($P \leq 0.05$)

ns: No significativo

La integración de la película biodegradable, con tamaño de partícula < 1 mm, representó el menor número de lombrices vivas y mayor número de lombrices muertas. Así mismo para esta interacción, las lombrices presentaron un peso final menor (Cuadro 25). Esto quiere decir que la película biodegradable afecta a las lombrices.

De acuerdo a los resultados obtenidos con respecto a las variables fisiológicas de las plantas, el proceso de degradación del plástico biodegradable pudo haber causado una liberación de grupos funcionales químicos que afectaran a las plantas y las lombrices. Así mismo como se discutió anteriormente para la variable de altura, la posible absorción de agua por parte del bio polímero pudo haber generado deshidratación en las lombrices, provocando un menor peso y por ende su muerte. Las lombrices teniendo la capacidad de ingerir partículas inorgánicas presentes en el suelo y degradarlas en su intestino, posiblemente al ingerir plástico biodegradable pudo haber ocurrido una reacción negativa en la digestión que les causara daño. Las lombrices crean un gran impacto en las transformaciones del nitrógeno a través de las modificaciones ambientales y las interacciones con microorganismos. Estos organismos consumen nitrógeno para su metabolismo mientras contribuyen a la disponibilidad del nitrógeno en el suelo (Domínguez *et al.* 2009) Existe una competencia entre los microorganismos, la planta y lombrices por nutrientes, especialmente el nitrógeno.

El mayor número de lombrices vivas y mayor peso final, se evidenció en la película PEBD con un tamaño de partícula de 5 – 10 mm (Cuadro 25). Según la biología de la especie, el moco intestinal de *L. terrestris*, es abundante en enzimas y en microflora, elementos que probablemente las protege de efecto directo de partículas ingeridas como micro plásticos

(Tiunov y Scheu 1999). Las lombrices producen más moco cuando ingieren un material bajo en materia orgánica fresca (Trigo *et al.* 1999). Así mismo la micro flora intestinal de la lombriz se asociada con la micro flora presente en el suelo creando un efecto positivo para que la lombriz ingiera más nutrientes (Lavelle *et al.* 1995). *L. terrestris* tiene la capacidad de ingerir partículas de micro plásticos de PEBD, digerirlas en su intestino y moldearlas para depositarlas en las paredes de sus túneles. (Huerta *et al.* 2016). Esto concuerda con el resultado obtenido para los parámetros de lombrices, pues el mayor peso y baja mortalidad de los organismos podría atribuirse a la ingestión de plástico PEBD y su capacidad de digerirlo. Así mismo, se evidencia la preferencia de las lombrices por las partículas de 5 – 10 mm (Cuadro 25).

Las lombrices son organismos invertebrados denominados ingenieros del ecosistema. Tienen alto potencial en la dinámica del suelo y en la descomposición de la materia orgánica. Promueven el intercambio de gases y agua (Coleman *et al.* 2004). Estos organismos pueden alterar la estructura física del suelo en la porosidad y en su agregación (Lavelle y Kohlman 1984). En este experimento se evidenció que la presencia de lombrices impacta positivamente el desarrollo de las plantas de trigo, incluso con una concentración de 1% de plástico PEBD incorporado en el suelo.

Cuadro 25. Comparación de las interacciones en la evaluación del número final de lombrices vivas y muertas y el peso total de lombrices inicial y final con diferentes películas y tamaños de plásticos.

Factores		N° de Lombrices		Peso de Lombrices (g)	
Película	Tamaño (mm)	Vivas	Muertas	Inicial	Final
PEBD [£]	5 – 10	1.7 a [¥]	0.2 b	1.6	4.6 a
Biodegradable	5 – 10	1.7 a	0.2 b	1.8	3.9 ab
Control	–	1.6 a	0.3 b	1.5	3.5 ab
PEBD	<1	1.5 ab	0.4 ab	1.8	3.8 ab
Biodegradable	<1	0.8 b	1.1 a	1.8	1.9 b
R ²		0.5	0.4	0.7	0.4
CV		22.0	20.1	14.1	20.2

[¥]Medias con distinta letra en la misma columna indican diferencia significativa (P ≤0.05)

[£] PEBD: Polietileno de baja densidad

4. CONCLUSIONES

- La incorporación del plástico biodegradable en una concentración de 1% p/p en el suelo retarda el desarrollo de las plantas de trigo, baja la conductividad eléctrica en el suelo y no afecta el pH, mientras que el plástico PEBD en el suelo no causa efecto en su crecimiento pero si genera una mayor área foliar.
- El tamaño de partículas menores a 1 mm (micro plásticos) retrasan el crecimiento del plantas de trigo.
- En presencia de lombrices el pH del suelo baja, se incrementa la biomasa, el número de hojas, macollamiento y área foliar pero no hubo efecto en la altura y en el diámetro del tallo; su mortalidad incrementa en presencia de plástico biodegradable.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar la degradación de las dos películas plásticas en diferentes tipos de suelos, con contenidos variables de arcillas y materia orgánica, sin utilizar plantas.
- Desarrollar un protocolo de extracción de las partículas de plástico biodegradable de los agregados del suelo.
- Cuantificar la degradación de las partículas de los plásticos PEBD y biodegradable en un tiempo determinado e identificar los microorganismos que promueven su degradación y los que se ven afectados.
- Evaluar e identificar los niveles de toxicidad de los plásticos biodegradables en diferentes cultivos y en lombrices.
- Cuantificar el contenido de nitrógeno en el suelo, en la planta y en la dosis de fertilización antes y después del estudio.
- Evaluar el efecto de la incorporación de los plásticos biodegradable y PEBD en diferentes cultivos en condiciones de campo, desde la germinación hasta la cosecha.
- Evaluar el efecto de la incorporación de ambos tipos de plásticos en el suelo con diferentes especies de lombrices para estudiar su comportamiento y patrón de ingestión en diversas concentraciones y tamaños de plástico, especialmente con películas plásticas biodegradables.

6. LITERATURA CITADA

- Briassoulis D, Babou E, Hiskakis M, Kyrikou I. 2015. Analysis of long-term degradation behaviour of polyethylene mulching films with pro-oxidants under real cultivation and soil burial conditions. *Environ. Sci. Pollut.* 22: 2584-2598.
- Bilck AP, Bonametti J, Yamashita F, Pinto de Souza R. 2014. Biodegradable bags for the production of plant seedlings. *Polímeros* vol.24: 547-553.
- Chamorro C, Villazón E. 1995. Morfohistología del sistema reproductor de *Andiodrilus bogotaensis* en suelos de alta montaña tropical (Páramo de Chisacá, Colombia). *Acta Biológica Colombiana.* 67-84.
- Clarke AD. 1987. Some plastic industry developments, their impact on plastic film for agricultural application. *Plasticulture* 74: 15-26.
- Clarke SP. 1996. Recycling farm plastic films fact sheet. Ontario: Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs; [consultado 2017 jun 15]. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/95-019.htm>.
- Cole M, Lindeque P, Halsband C, Galloway TS. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bul.* 62: 2588-2597.
- Coleman DM, Crossley D, Hendrix P. 2004. *Fundamentals of soil ecology*, Burlington MA Elsevier Academic Press.
- Corwin DL, Lesch SM. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 11-43.
- Daza N, Rubio P, Martinez C, Durán P, Segura A. 2009. Estrés nutricional de las plantas. *Fisiología Vegetal ambiental.* 154 p.
- De Carsalade B. 1986. Plastics and mulching of crops. *Plasticulture* 72: 31-36
- Doerge T, Kitchen NR, Lund ED. 1999. Soil Electrical Conductivity Mapping. *Site Specific Management Guidelines, SSMG-30.* 4 p.
- Domínguez J, Aira M, Gomez-Brandón M. 2009. El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y ciclo de nutrientes. *Ecosistemas* 18 (2): 20-31.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the UN) 2007. View Crop *Triticum aestivum*. Ecocrop; [consultado 2017 ago 03]. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=2114>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the UN) 2009. La Agricultura mundial en perspectiva del año 2050. [consultado 2017 ago 03]. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_S_P/La_agricultura_mundial.pdf
- Fernández M. 2003. Evaluación agronómica de sustancias húmicas derivadas de humus de lombriz [Tesis]. Pontificia Universidad Católica-Chile. 52 p.
- Gardner FP, Pearce RB, Mitchell RL. 1985. Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. 327 p.
- Gonzalez A, Lopez J, Garcia J, Hernandez MD, Rodriguez R, Fernandez JA, Franco JA. 2002. Comportamiento de acolchados biodegradables en cultivo de melón al aire libre. Seminario de técnicos y especialistas en horticultura. Ministerio de agricultura pesca y alimentación 85-90.
- Gu JD, Ford TE, Mitton DB, Mitchell R. 2000. Microbial degradation and deterioration of polymeric materials. The Uhlig Corrosion Handbook. 439-60.
- Habasit (Industria Habasit) 2017. Tereftalato de polibutileno (PBT). [consultado 2017 jul 02]. <http://www.habasit.com/es/tereftalato-polibutileno.htm>
- Hale M, Frelich LE, Reich PB. 2005. Exotic European earthworm invasion dynamics in northern hardwood forests of Minnesota, USA. Ecological Applications, Ecological Society of America.
- Halley P, Rutgers R, Coombs S, Kettels J, Christie G, Jenkins M, Beh H, Griffin K, Jayasekara R, Lonergan G. 2001. Developing biodegradable mulch films from starch-based polymers. Starch 53: 362-367.
- Hemphill DD. 1993. Agricultural plastics as solid waste: what are the options for disposal? HortTechnology 3: 70-73.
- Huerta E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, Van Der Ploeg M, Besseling E, Koelmans AA, Geissen V. 2016. Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). Environ. Sci. Technol. 50: 2685-2691.

- Huerta E, Valier O, Romero D, Jarquin A. 2010. Efecto de tres especies de lombrices en la fertilidad del suelo y el crecimiento inicial del maíz (*Zea mays*). *Acta Zool. Mex* 2: 219-226.
- Jiang XJ, Liu W, Wang E, Zhou T, Xin P. 2016. Residual plastic mulch fragments effects on soil physical properties and water behavior in the Minqin Oasis, northwestern China. *Soil Tillage Res.* 166: 100-107.
- Kader MA, Senge M, Mojid MA, Ito K. 2017. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil Tillage Res.* 168: 155-166.
- Kasirajan S, Ngouajio M. 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32: 501-529.
- Kirby EJM, Appleyard M, 1985. Development of the wheat plant. F.G.H. Lupton, ed. *Wheat breeding.* 287-311.
- Lavelle P, Kohlman B. 1984. Etude quantitative de la macrofaune du sol dans une forêt tropicale. *Pedobiologia* 24: 834-845.
- Lavelle P, Lattaud C, Trigo D, Barois I. 1995. Mutualism and biodiversity in soils. *Plant and Soil* 170: 23-33.
- Lichtenthaler HK. 1998. The stress concept in plants: An introduction. *Annals of the New York Academy of Sciences* 851: 187-198.
- Mauri L. 2009. Introducción a la superficie específica. *INFAP.* 1-59.
- Márquez JJ. s.f. Introducción a los procesos de transformación de materiales plásticos. Curso de diseño y transformación de plásticos. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. 52 p.
- McCraw D, Motes JE. 1991. Use of plastic mulch and row covers in vegetable production. Cooperative Extension Service. Oklahoma State University. OSU Extension Facts F-6034.
- Montoliu A. 2010. Respuestas fisiológicas de los cítricos sometidos a condiciones de estrés biótico y abiótico. Aspectos comunes y específicos [Tesis]. Universitat Jaume. 213 p.

- NIH (National Center for Biotechnology Information) 2004. Compound Summary for Terephthalic Acid. [consultado 2017 jun 12]. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/terephthalic_acid#section=Top
- NIH (National Center for Biotechnology Information) 2015. Compound Summary for Pullulan. [consultado 2017 jun 12]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/92024139>
- Pospisil J, Nespurek S. 1997. Highlights in chemistry and physics of polymer stabilization. *Macromol Symp.* 115: 143-63.
- Romero DL. 1997. Evaluación del grado de deterioro en plásticos biodegradables sometidos a distintos ecosistemas de estudio [Tesis]. Universidad Autónoma de Nuevo León-México. 121 p.
- Shah AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S. 2008. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances* 26: 246-265.
- Tiunov AV, Scheu S. 1999. Microbial biomass, biovolume and respiration in *Lumbricus terrestris* L. cast material of different age. *Soil Biology and Biochemistry* 32:265-275.
- Tokiwa Y, Calabia BP, Ugwu CU, Aiba S. 2009. Biodegradability of plastics. *Int. J. Mol. Sci.* 10: 3722-3742.
- Trigo D, Barois I, Garvín MH, Huerta E, Irisson S, Lavelle P. 1999. Mutualism between earthworms and soil microflora. *Pedobiología* 43: 866-873.
- Vos J. 2008. Tillering in wheat. WUR (Wageningen University and Research) [consultado 2017 mar 03]. <https://www.wur.nl/en/show/tillering-in-wheat.htm>
- Ziyad T. 2005. Physical and chemical investigations of Starch Based Bio-Plastics [Thesis]. University of Leicester. 168 p.

7. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de suelo

Información General		
Cultivo: Papa		
Muestra: 0 – 25 cm		
Tipo de Suelo: Arenoso		
Área: <1 ha / Método de Muestreo: Patrón W min 40 barrenaciones		
Propiedades Químicas	Resultado	Unidad
N total	1140.00	mg N/kg
S total	300.00	mg S/kg
Pw	35.00	mg P ₂ O ₅ /l
P	48.00	mg P ₂ O ₅ /100 g
K	3.90	mmol ⁺ /kg
Ca	62.00	mmol ⁺ /kg
Mg	6.50	mmol ⁺ /kg
Na	0.70	mmol ⁺ /kg
pH	6.00	
C orgánico	2.00	%
Materia Orgánica	4.00	%
C inorgánico	0.07	%
Carbonato de Calcio	<0.20	%
CIC Arcilla-Hummus	69.00	mmol ⁺ /kg
CIC	100.00	%
Saturación de Ca	84.00	%
Saturación de Mg	9.40	%
Saturación de K	5.70	%
Saturación de Na	1.00	%
Saturación de H	<0.10	%
Saturación de Al	<0.10	%
Propiedades Físicas		
Arcilla	<1	%
Limo	11	%
Arena	83	%
Propiedades Biológicas		
Vida en el Suelo	34	mg N/kg