

BIODEG

Memoria de ejecución



**Desarrollo de films biodegradables
para films de acolchado agrícola**



Desarrollo de films biodegradables para films de acolchado agrícola

BIODEG

Este Proyecto/Programa está financiado hasta el 80% con recursos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) asignados al Instituto de Fomento de la Región de Murcia con arreglo a la Subvención Global mediante la Decisión C(2015)3408, de la Comisión, por la que se aprueba el Programa Operativo de intervención comunitaria FEDER 2014_2020 en el marco del objetivo de inversión en crecimiento y empleo, en la Comunidad Autónoma de Murcia, como Región calificada en transición.

Para cualquier información adicional relativa a este Proyecto/Programa puede dirigirse a:
Asociación Empresarial de Investigación Centro Tecnológico del Calzado y del Plástico de la Región de Murcia

Avenida Europa 4-5
30840 Alhama de Murcia
Tel: 968632200
a.arribas@ctcalzado.org



Sumario

1	Introducción	03
2	Objetivos	03
2.1	Objetivo general	03
2.2	Objetivos específicos	04
3.	Cronograma	04
4.	ANTECEDENTES	04
4.1.	Films de acolchado biodegradables	06
5.	Materiales y Métodos	09
5.1.	Materiales	09
5.2.	Métodos	13
5.2.1.	Evaluación de las propiedades mecánicas de los films de acolchado	13
6.	Resultados y discusión	16
6.1.	Funcionalidades mecánicas de los films de acolchados	16
6.1.1.	Propiedades de tracción de los acolchados	16
6.1.2.	Envejecimiento de los films de acolchado de base biológica	18
6.1.3.	Resistencia al desgarro de los films de acolchado biobasados	22
6.1.4.	Resistencia a la penetración de los films de acolchado biobasados	26
6.2.	Funcionalidades físicas de los films de acolchados	29
6.2.1.	Propiedades de transporte de gas: transmisión de vapor de agua en films de acolchado de base biológica	29
6.2.2.	Propiedades de transporte de gas: transmisión de CO2 en films de acolchado de base biológica	30
6.2.3.	Propiedades radiométricas	30
6.3.	biodegradabilidad de los films de acolchados	32
7.	Conclusiones	33
8.	Difusión de resultados	35



1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de films de acolchado de plástico biodegradable para su uso en la agricultura lleva desarrollándose durante décadas. Estos films consisten en mezclas de polímeros con diversos aditivos. Como resultado, sus propiedades físicas y químicas difieren de las de los polímeros puros que se utilizan a menudo para estudios de degradación enzimática y microbiana in vitro, lo que plantea dudas sobre la capacidad de biodegradación de las películas de acolchado, máxime cuando visualmente no desaparecen del terreno en plazos razonables (inferiores a 12 meses).

Actualmente, existen normas para la biodegradación de plásticos en condiciones de compostaje o de laboratorio, sin embargo la biodegradación en el suelo o compost depende de una sinergia compleja de los procesos de degradación biológica y abiótica.

Se va a desarrollar un film a partir de plástico biodegradable (compostable) que sea capaz de biodegradarse en suelo de la Región de Murcia, a partir de aditivos naturales como el almidón y se evaluará su capacidad de biodegradación según la norma UNE EN ISO 17556.

Se analizarán las propiedades fisicoquímicas y estructurales de las coberturas de plástico biodegradables, se examinará su potencial de descomposición en diferentes suelos a la luz de la variación de sitio a sitio debido a las condiciones ambientales y biológicas y se considerará el potencial de efectos a largo plazo en la sostenibilidad y funcionalidad del ecosistema agrícola.

La obtención de un acolchado biodegradable en suelo en plazos temporales inferiores a seis meses supondría la aparición de un producto fundamental en la agricultura circular, sostenible y ecológica, con enormes expectativas en un mercado que en el área mediterránea involucró 46.200TM y 280.000 Ha en el año 2015.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Obtención de un film de acolchado biodegradable en suelo agrícola de la Región de Murcia



2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigación y obtención de nuevas formulaciones de ácido poliláctico con mayor capacidad de degradación, especialmente en suelos de poca humedad y carga microbiana limitada.
- Investigación y obtención de nuevas formulaciones de polibutilen-adipato-co-tereftalato (PBAT) con mayor capacidad de degradación, especialmente en suelos de poca humedad y carga microbiana limitada.

3. CRONOGRAMA

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
WP 1	Definición de propiedades y características del film biodegradable												
WP 2	Selección de polímeros biodegradables, PLAs, BPAs, PHAs, PHBs												
WP 3	Formulación de composiciones												
WP 4	Preparación del film y caracterización												
WP 5	Ensayos de biodegradabilidad												

El proyecto se ha organizado en cinco paquetes de trabajo. El primer WP1 Definición de propiedades y características del film biodegradable, tiene como objetivo establecer las características que debe tener el film biodegradable. El segundo WP2 Selección de polímeros biodegradables PLAs, BPAs, PHAs, PHBs, tiene como objetivo establecer los polímeros óptimos para desarrollar un film biodegradable en condiciones de suelo (poca humedad y carga microbiana limitada). El tercer WP3 Formulación de composiciones, tiene como objetivo obtener formulaciones potencialmente biodegradables en suelos de poca humedad y carga microbiana limitada. El cuarto WP4 Preparación del film y caracterización, tiene como objetivo la obtención de un film biodegradable a escala de laboratorio. Por último el quinto WP5 Ensayos de biodegradabilidad, tiene como objetivo

4. ANTECEDENTES

El uso de plásticos en la agricultura se llama plasticultura y se remonta a la era posterior a la Segunda Guerra Mundial. Actualmente, en la agricultura, los plásticos tienen multitud de usos para diversos productos, tales como recipientes, bandejas, macetas, embalajes, cubiertas de túneles y surcos, tubos de riego por goteo y films de acolchado para cultivos. Las películas de acolchado de plástico se aplican a la superficie del suelo en vegetales (por ejemplo, tomate, pepino, berenjena, sandía) y sistemas de producción de fresas para reducir la competencia de malezas, aumentar los días de cosecha y mejorar el rendimiento de los cultivos y la eficiencia del uso de fertilizantes y agua.



Figura 1: Lomos de terreno acolchados con plástico biodegradable para el cultivo de fresa

Las películas de acolchado plástico se fabrican generalmente con polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), son delgadas (0.015-0.025 mm), ligeras (20 g/m² para 0.025 mm de espesor) y generalmente se usan para Una temporada de cultivo. Por lo general, los lomos de cultivo se acolchan, pero no el área entre ellas, por lo que la mitad del espacio de campo contiene plástico (Figura 1). Por lo tanto, 1 ha de terreno cubierto contiene aproximadamente 5,000 m (100 kg) de film acolchado.

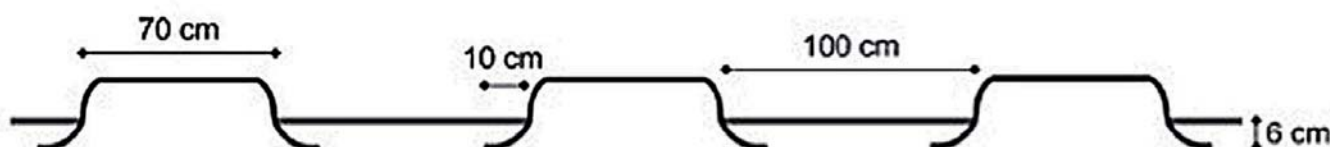


Figura 2: Esquema de las dimensiones de un acolchado típico

La Figura 2 muestra un acolchado biodegradable con las dimensiones típicas, sobre el suelo (0,7 m) y enterradas en ambos lados (aproximadamente 10 cm), de manera que aproximadamente el 50% de la superficie del suelo contiene plástico y aproximadamente el 20% del plástico se entierra bajo el suelo durante la temporada de cultivo. Como ejemplo, en 1999, el film de acolchado plástico se usó en 10 millones de hectáreas en China, y en 2006, en 160,000 hectáreas en los Estados Unidos (1 millón y 16,000 toneladas de film de acolchado plástico, respectivamente). Sin embargo, el uso del acolchado no ha llegado sin problemas. En Europa, los desechos plásticos agrícolas se estimaron en más de 1.3 millones de toneladas en 2011, y solo la mitad se recuperó para reciclaje y usos secundarios¹. Existen pocas instalaciones de reciclaje que acepten

¹ Plastics Europe, European Plastics Converters, European Plastics Recyclers, European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations (2012) Plastics-the facts 2012. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011.



película de acolchado, ya que hasta el 50% del peso puede tener contaminantes como tierra, vegetación, pesticidas o fertilizantes. En los Estados Unidos, los agricultores retiran el acolchado del suelo, lo cual tiene un coste entre 360-580 dólares por hectárea y además es una labor que necesita mucha mano de obra², mientras que otros agricultores de Estados Unidos y del resto del mundo entierran o queman el plástico en el propio lugar de cultivo, lo cual puede liberar contaminantes de dioxano en el aire y plantear otras graves consecuencias para el medio ambiente³. El arado de los films de acolchado de plástico en el suelo ha sido una alternativa atractiva al final de su vida útil, pero no es práctica para los films de acolchado de LDPE y LLDPE de uso común debido a la velocidad de degradación tan lenta de estos polímeros (del orden de un 0.35% en 2.5 años)⁴.

Las innovaciones en formulaciones plásticas para hacer films de acolchado más biodegradables comenzaron hace varias décadas⁵ y siguen siendo un foco importante de investigación y desarrollo en la actualidad. Los avances en la biosíntesis y los métodos de procesamiento, junto con las inversiones en instalaciones comerciales, han reducido los precios de las resinas y aumentado considerablemente el suministro mundial de bioplásticos⁶. Se espera que el mercado general de bioplásticos aumente en aproximadamente un 19% por año⁷ en concordancia con el desarrollo de muchas aplicaciones y productos nuevos⁸.

4.1. FILMS DE ACOLCHADO BIODEGRADABLES

Los films de acolchado biodegradables no son polímeros puros y en un entorno agrícola, estos productos deben degradarse en condiciones ambientales variables a través de los microorganismos nativos, que pueden incluir o no aquellos con la capacidad de descomponer el polímero. Debido a la complejidad de la biodegradación de los films de acolchado en condiciones agrícolas, nuestra visión reúne los diferentes puntos de vista de un microbiólogo, un ingeniero de polímeros, un horticultor y un patólogo de plantas, para abordar las siguientes preguntas: (1) En la degradación de productos compostables de film de acolchado, ¿qué características del film de acolchado y del medio ambiente deben considerarse para que se descompongan en agroecosistemas o compost?, y (2) ¿cómo podrían los films de acolchado agrícola biodegradables afectar la sostenibilidad del agroecosistema?

2 Johnston G (2012) Evaluation of biodegradable plastic mulches for watermelon production in Delaware. University of Delaware Carvel Research Education Center.

3 Levitan L (2005) Reducing dioxin emissions by recycling agricultural plastics: creating a viable alternative to open burning. In: Great Lakes Regional Pollution Prevention Roundtable, New York Academy of Sciences, New York, NY

4 Albertsson A-C, Ranby B (1979) Biodegradation of synthetic polymersIV. The ¹⁴C¹⁴O₂ method applied to a linear polyethylene containing a biodegradable additive. J Appl Polym Sci Appl Polym Symp 35:423

5 Otey FH, Mark AM, Mehlretter CL, Russell CR (1974) Starch-based film for degradable agricultural mulch. Chem Prod Res Dev 13:90-92

6 Kersh K (2012) Bridging the divide between demands and bio-based materials. Lux Research Inc. Report 11743.

7 Laird K (2013) Freedonia Group forecasts explosive surge in worldwide bioplastic demand.

8 Karpu_enkait_ A, Var_inkas V (2014) Bioplastics: development, possibilities and difficulties. Environ Res Engin Manag 68:69-78



Ya sea en el suelo o en el compost, cualquier descomposición plástica que ocurra lo hace a través de una sinergia compleja de procesos abióticos y biológicos, como se muestra en la Figura 3. Para un plástico verdaderamente biodegradable, el resultado final es una reducción en la masa molar (longitud) del polímero, seguido de bioasimilación o conversión biológica de los productos de descomposición del polímero, y en última instancia, conversión biológica en dióxido de carbono o metano y agua⁹.

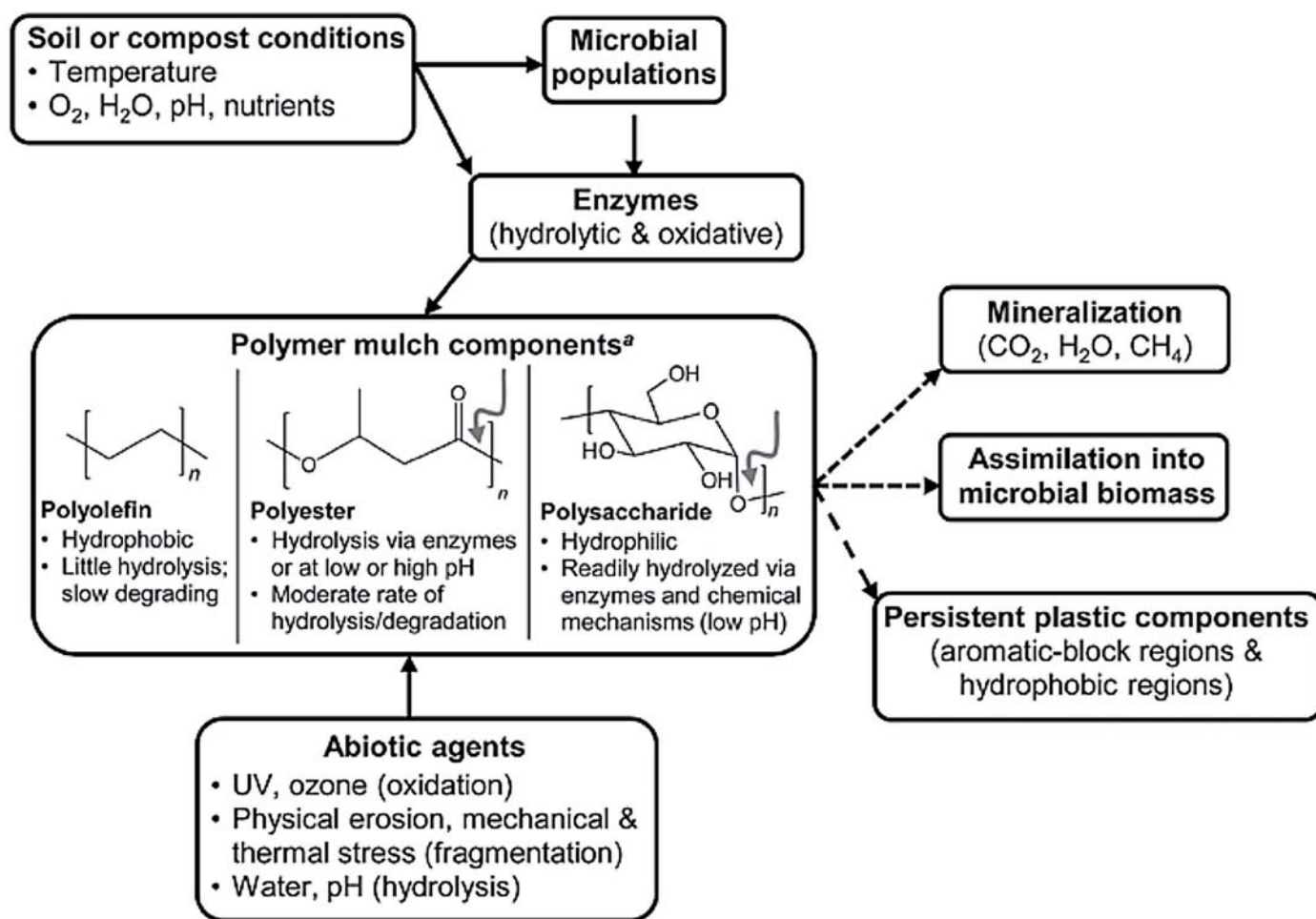


Figura 3: Relaciones entre las condiciones ambientales del suelo o compostaje, los agentes biológicos y abióticos presentes, la estructura del polímero de las coberturas agrícolas y la disposición de los productos de degradación y los componentes del acolchado persistente. Se muestran ejemplos de tres clases de componentes de acolchado plástico. Las flechas curvas indican enlaces químicos susceptibles a la hidrólisis (enzimática o química); La oxidación puede ocurrir en múltiples sitios.

⁹ Lucas N, Bienaime C, Belloy C, Queneudec M, Silvestre F, Nava Saucedo J-E (2008) Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques. Chemosphere 73:429-442



Se han desarrollado muchas normas y métodos de prueba para la degradación ambiental de polímeros. Los plásticos etiquetados como "compostables" representan una clase importante de plásticos potencialmente biodegradables que se utilizan actualmente en los sistemas agrícolas. Para ser etiquetados como tales, estos materiales deben cumplir con ASTM 6400-12 (2012) e ISO 17088 (2012). La limitación de ASTM 6400-12 (2012) e ISO 17088 (2012) para probar plásticos biodegradables destinados a sistemas agrícolas es que la degradación se evalúa en condiciones óptimas en un entorno de laboratorio controlado que no se parece a las diversas y complejas condiciones ambientales de campo que ocurren en entornos agrícolas. También existen normas para medir la biodegradación de plásticos en suelo ASTM D5988-18 (2018) e ISO 17556:2012, pero tienen los mismos inconvenientes que las anteriores, son suelos sintéticos y en condiciones controladas de laboratorio, sin embargo, cumplen una función muy importante como comportamientos de referencia.

Muchos polímeros etiquetados como "biodegradables" en el pasado eran en realidad parcialmente degradables a través de una combinación de procesos abióticos (por ejemplo, fotooxidación, erosión, fragmentación) y bióticos. Las coberturas biodegradables pueden describirse mejor con los términos utilizados por Kyrikou y Briassoulis¹⁰, es decir, bioerosionables, hidrobiodegradables, fotodegradables o parcialmente biodegradables. Una de las primeras prácticas de fabricación consistió en mezclar poliolefinas (Polipropileno o PE) con almidón para lograr un producto más fácilmente biodegradable, pero el resultado fue principalmente la biofragmentación ya que solo el almidón se biodegradó y los sólidos de poliolefina solamente redujeron de tamaño, no fueron mineralizados. Si bien ASTM e ISO aún estaban formulando procedimientos de prueba estándar para plásticos etiquetados como "biodegradables", se ha demostrado¹¹ que: (1) la evolución del CO₂ en algunos plásticos de prueba reflejó probablemente la descomposición de los aditivos, el almidón y los plastificantes dioctiladipato y aceite de soja epoxidada, en lugar de un acortamiento de los polímeros, y (2) la evolución del CO₂ y los cambios en la resistencia a la tracción no se correlacionaron bien con el acortamiento de los polímeros, medido por cromatografía de permeación de gel (GPC). Los autores declararon que "la disminución en el tamaño de las moléculas de polímero, medida por GPC, es probable que sea crucial para la definición de degradación, mientras que los cambios en los aditivos se definirán como deterioro". Veinte años después, ASTM e ISO aún confían en la evolución del CO₂, una medida indirecta, para demostrar la descomposición del plástico.

A la luz del ejemplo anterior, es importante apreciar que los films de acolchado agrícola son mezclas de polímeros, con plastificantes, compatibilizadores y otros aditivos para mejorar el procesamiento, las propiedades, la compatibilidad química y la uniformidad de las coberturas¹².

10 Kyrikou I, Briassoulis D (2007) Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. J Polym Environ 15:125-150

11 Yabannavar AV, Bartha R (1994) Methods for assessment of biodegradability of plastic films in soil. Appl Environ Microbiol 60:3608-3614

12 Imre B, Puklasnszky B (2013) Compatibilization in bio-based and biodegradable polymer blends. Eur Polym J 49:1215-1233



Esta mezcla se realiza generalmente mediante fusión y extrusión, seguido de moldeo por soplado para formar los films; Todos estos pasos de procesamiento pueden alterar la morfología física y química de la cobertura producida. Como resultado, la tendencia de los componentes a formar regiones amorfas o semicristalinas puede ser bastante diferente a la de los componentes puros individualmente¹³. Por lo tanto, el conocimiento de las propiedades térmicas y químicas de los polímeros puros es inadecuado para evaluar las propiedades biodegradables de las películas de acolchado agrícola, que generalmente son mezclas patentadas de composiciones no publicadas.

Sin embargo, el aumento rápido de la innovación y la inversión en biopolímeros influirá en los productos comerciales disponibles para aplicaciones agrícolas en los próximos años, siendo necesaria una reducción de residuos plásticos en el medio ambiente. Para lograr este objetivo, los científicos expertos en polímeros deben abandonar un enfoque de "café para todos" y, en su lugar, diseñar films de acolchado agrícola formulados individualmente para los diversos entornos en los que se espera que funcionen y optimizados para sus diversos fines o destinos de vida (por ejemplo, compost, entierro del suelo, reciclaje, etc.). El logro de estos objetivos sin comprometer la sostenibilidad y sin efectos negativos en el agroecosistema representa un desafío continuo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. MATERIALES

La fabricación de films biodegradables se ha llevado a cabo en la planta piloto de CETEC (Figura 4).



Figura 4: Planta piloto de CETEC

¹³ Ferrarezi MMF, de Oliveira TM, da Silva LCE, do Carmo Goncalves M (2013) Poly(ethylene glycol) as a compatibilizer for poly(lactic acid)/thermoplastic starch blends. J Polym Environ 21:151-159



Para la formulación de las composiciones se ha empleado la extrusora Leistritz, modelo ZSE 18HP. La extrusora se caracteriza por tener dos husillos corrotantes, los cuales son modulares y totalmente configurables, permitiendo variar a voluntad las zonas donde queremos que haya mezcla, cizallamiento o transporte. Además consta de dos zonas de alimentación, conectadas a sendos alimentadores gravimétricos. Los parámetros controlados durante el proceso de extrusión han sido los siguientes:

- Velocidad del husillo (150-200 rpm)
- Par (50-80 %)
- Alimentación (2-3 kg/h)
- Presión de fundido (5-20 bar)
- Temperatura de las distintas zonas de la extrusora (110-170°C)



Figura 5: Extrusora Leistritz ZSE 18HP

Para la preparación del film hemos utilizado una extrusora Collins E 20:

DIÁMETRO DEL CILINDRO
LONGITUD DEL CILINDRO
CAPACIDAD DEL MOTOR
VELOCIDAD
TORQUE
ALIMENTACIÓN MÁXIMA
PRESIÓN MÁXIMA
TEMPERATURA MÁXIMA

Tabla 1: Características de la extrusora Collin E20

Se ha acoplado a la extrusora Collin E 20 un cabezal para obtener film plano, con una ranura de 120 mm y equipado con labio flexible (para producir láminas o películas); espacio de extrusión ajustable 0.3 - 1.3 mm.

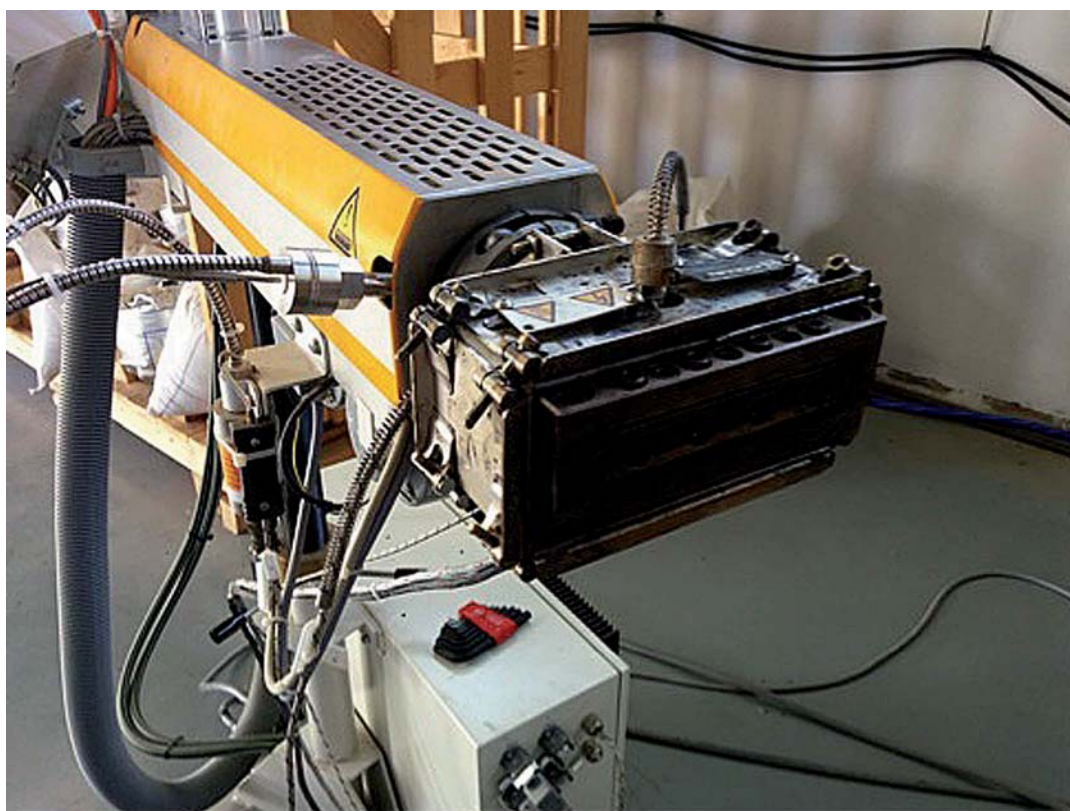


Figura 6: Extrusora Collin E 20 con cabezal acoplado para obtener film plano



Los films obtenidos se ensayaron en el respirómetro ECHO de 12 canales, que dispone sensores para medición de oxígeno y CO₂. El respirómetro puede ensayar muestras en grano, polvo, líquidos o sólidos así como aguas residuales. EL rango de operación es entre 5 y 70°C y entre 100 y 1500 ml/min de flujo másico por canal.



Figura 7: Respirómetro Echo

Los materiales seleccionados para le estudio se muestran en la Tabla 2:

MATERIAL	PRODUCTOR	REFERENCIA	ESPESOR (MM)	DESCRIPCIÓN
MATER-BI	NOVAMONT	MATER-BI	15	GRANZA PARA FILM DE ACOLCHADO TERMOPLÁSTICO BIODEGRADABLE NEGRO QUE SE BASA EN POLIÉSTERES Y ALMIDONES BIODEGRADABLES AROMÁTICOS / ALIFÁTICOS; CONTIENE RECURSOS RENOVABLES NO DERIVADOS DE RECURSOS ALIMENTICIOS
ECOVIO	BASF	ECOVIO M2351	12	GRANZA PARA ACOLCHADO BIODEGRADABLE
NICHIGO G-POLYMER	NIPPON-GOHSEI	BVE8049P	12	

Tabla 2: Materiales empleados



Mater-Bi (grado de acolchado, 15 μm de grosor)¹⁴: Esta película pertenece a la familia Mater-Bi de segunda generación basada en poliésteres y almidones biodegradables aromáticos / alifáticos (contenido mínimo de C14: 40%; derivado no alimentario, 15 μm de grosor) . Mater-Bi es una granza apropiada para acolchado plástico completamente biodegradable y compostable de acuerdo con la norma europea UNE EN 13432¹⁵. Las propiedades de los films de acolchado Mater-Bi son muy similares a las de las películas de PE convencionales. Mater-Bi es un material biodegradable termoplástico para película soplada. Se utiliza principalmente para la producción de films de acolchado que son completamente biodegradables en el suelo (certificadas). Para obtener films de acolchado negro, se agrega masterbatch negro a la resina Mater-Bi para garantizar una transmitancia de luz $\leq 3\%$. Se sugiere un espesor de 15 μm para estos films.

Ecovio (grado de acolchado, 12 μm de grosor): Ecovio es un grado de acolchado seleccionado para el estudio. BASF produce la resina Ecovio, un compuesto del copoliéster biodegradable ecoflex y ácido poliláctico. Cumple con la norma europea EN 13432 y está certificada OK suelo biodegradable AIB Vinçottes. Nichigo G-Polymer, BVE8049P, 13 μm de grosor, es un copolímero de butanodiol y vinil alcohol, además de una excelente transparencia y resistencia a los disolventes, a través de la combinación de "baja cristalinidad" con "gran fuerza de unión mediante enlaces de hidrógeno", que son rasgos que normalmente están en conflicto, este nuevo material realiza funciones que no habían sido posibles con el PVOH convencional. Estos incluyen bajos puntos de fusión, altas características de estiramiento y gran barrera a los gases.

5.2. MÉTODOS

5.2.1. Evaluación de las propiedades mecánicas de los films de acolchado

La norma europea UNE-EN 17033:2018 (Plásticos. Películas de acolchado biodegradables para su uso en la agricultura y la horticultura. Requisitos y métodos de ensayo), es aplicable a películas de acolchado. Esta norma especifica los requisitos básicos para las características ópticas y mecánicas de varios tipos de películas de acolchado de plástico utilizadas en la agricultura y la horticultura en el mercado europeo: películas transparentes (normales) - películas transparentes transparentes y difusoras (térmicas) - películas negras y negras / blancas . El rango de espesor considerado es de 10 μm hasta 250 μm . También, se hace especial hincapié en definir la vida útil en el suelo de las películas de acolchado biodegradables y a los requisitos para materiales, esquemas de prueba y criterios de evaluación para biodegradación y ecotoxicidad.

5.2.1.1. Prueba de funcionalidades mecánicas en films de acolchado

Las películas de mulching de base biológica deben cumplir un conjunto de requisitos mínimos de diseño,

¹⁴ <https://www.novamont.com/eng/mater-bi>

¹⁵ EN 13432:2000/AC:2005, Requirements for Packaging Recoverable through Composting and Biodegradation - Test Scheme and Evaluation Criteria for the Final Acceptance of Packaging, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005



que incluyen: resistencia y alargamiento a la rotura adecuados para la instalación de los mismos en el campo, buenas propiedades mecánicas con respecto al envejecimiento para garantizar un rendimiento satisfactorio durante la vida útil de la película y 100% de biodegradación en el suelo después del final de la temporada de cultivo. Las propiedades mecánicas de los films de acolchado (Tabla 2) se evaluaron de acuerdo con los métodos de prueba estándar de la norma UNE-EN 17033:2018.

Propiedades de tracción: las propiedades de tracción de los films de acolchado de base biológica deberían permitir su colocación y perforación con la misma maquinaria utilizada para las películas de plástico tradicionales y proporcionar excelentes rendimientos ya que son muy delgadas, sin experimentar problemas de fallos mecánicos. La evaluación de las propiedades de tracción se realizó con un dinamómetro zwick allround Z010 después del preacondicionamiento de la muestra a $23^{\circ}\text{C} \pm 1$ y 50% HR.

Envejecimiento: Las propiedades mecánicas de los pfilms de acolchado convencionales y de base biológica se reducen como resultado de la fotodegradación inducida por la radiación solar UV, acelerada por las altas temperaturas. Como se requiere que las películas de mulching tengan una durabilidad que coincida con su vida útil, se incluye una prueba de intemperie en la norma UNE-EN 17033:2018. Se logra una mayor durabilidad mediante aditivos de negro de carbón que actúan como estabilizadores. Para estimar el envejecimiento artificial de acolchados agrícolas y la estimación de la durabilidad se han seguido las normas EN ISO 4892 y EN ISO 4892-1 que proporcionan información y orientación general, EN ISO 4892-2 especifica métodos para exponer muestras a la luz de xenón, que simula la luz solar natural, en combinación con altas temperaturas y humedad o humectación para simular los efectos de la intemperie a los que están expuestos los materiales en condiciones reales de luz natural.

Resistencia al rasgado: los films de acolchado biodegradables de base biológica deben ser resistentes al rasgado (resistencia a la propagación de rasgaduras) después de cualquier tipo de fallo localizada. La propagación de rasgados en los films a una velocidad lenta se midió con el dinamómetro Zwick de acuerdo con el método estándar de prueba de resistencia al rasgado UNE-EN ISO 6383-1 a $23^{\circ}\text{C} \pm 1$ y 50% HR. La propagación de rasgados a alta velocidad se midió siguiendo el método de prueba de rotura estándar según UNE-EN ISO 6383-2 mediante un instrumento de prueba de rasgado digital Elmendorf.

Resistencia al impacto: la resistencia al impacto (resistencia a la penetración rápida) se encuentra entre las principales propiedades mecánicas notificadas para los films de acolchado plástico. Los métodos de prueba de impacto cubren la determinación de la energía que hace que la película de plástico falle en condiciones específicas de impacto de un dardo en caída libre. La resistencia al impacto se probó mediante el método A de dardo de caída libre de acuerdo con UNE-EN ISO 7765-1:2005, Películas y láminas de plástico. Determinación de la resistencia al impacto por el método de caída de dardo.



5.2.1.2. Ensayos de funcionalidades físicas en films de acolchado

Las propiedades barrera a los gases de los films de acolchado también son importantes ya que afectan el microambiente del aire y el suelo debajo de la cubierta del acolchado.

En los casos en los que se usan films de acolchado de base biológica transparentes o coloreadas, las propiedades radiométricas también son importantes ya que afectan el control de las malezas, la temperatura del suelo y el microambiente de la planta sobre la película. Los colores más comunes de los films de acolchado son el negro (el tipo dominante de los films de acolchado) y transparentes, mientras que otros colores simples y duales también se usan para cultivos específicos. En la Tabla 3 se muestran las propiedades físicas de los acolchados de base biológica seleccionados evaluadas según los métodos de prueba estándar internacionales.

PROPIEDAD	MÉTODO	CONDICIONES
PROPIEDADES RADIOMÉTRICAS	ASTM D1003	
TRANSMISIÓN AL VAPOR DE AGUA	ASTM E96/E96M-14	38°C, 90% HR
TRANSMISIÓN AL CO ₂	ASTM F2476 – 13	23°C, 0% HR

Tabla 3: Propiedades físicas y métodos empleados

Transmisión al vapor de agua: una de las propiedades físicas más importantes que distinguen los films de acolchado de base biológica del LDPE o LLDPE convencional es su permeabilidad al vapor de agua (WVP), ya que puede afectar la preservación del agua del suelo. Dependiendo del material, la WVP puede ser varios órdenes de magnitud más alto que el de las películas convencionales. La velocidad de transmisión de vapor de agua (WVTR) de las películas se midió de acuerdo con la norma ASTM E96 / E96M en una cámara de condiciones controladas a 38°C y 90% de HR. Las condiciones de la prueba se cumplieron ajustando la HR de la cámara al 90% y utilizando recipientes con HR inicial cero.

Transmisión de CO₂: el transporte de gas CO₂ también se considera importante para los films de acolchado plástico ya que afecta el intercambio de CO₂ entre el suelo y el aire. Las tasas de transmisión de CO₂ se midieron de acuerdo con ASTM F2476 mediante análisis por cromatografía de gases (GC). Las muestras analizadas se expusieron a condiciones controladas de 23°C y 0% de HR en una cámara. Las muestras se



colocaron entre dos compartimentos pequeños, uno lleno de gas CO₂ y el otro lleno de gas N₂. Se usó un cromatógrafo de gases equipado con una columna capilar de sílice fundida CarboxenTM 1006 PLOT (30 mx 0,32 mm) para la medición de CO₂. Se inyectó una cantidad de 100 µl de muestra de gas recolectada en diferentes intervalos de tiempo desde el compartimento de N₂ en modo dividido en el inyector a una temperatura de 120°C usando helio a un caudal de 8 ml/in como gas portador.

Propiedades radiométricas: los films negros bloquean el rango de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de la radiación solar, lo que suprime el crecimiento de malezas, que es la razón principal de su uso dominante en la agricultura, y también calientan el suelo con efectos beneficiosos. Los films de acolchado selectivo de longitud de onda con color único o doble están diseñadas para repeler insectos, manipular la luz, la temperatura y la humedad, y extender la temporada de crecimiento, aumentando el rendimiento del cultivo. En el presente trabajo, solo se evaluaron los films de acolchado negro. Las propiedades radiométricas de las películas se midieron por medio de un espectrofotómetro Perkin-Elmer lamda 650 (radiación visible y UV).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. FUNCIONALIDADES MECÁNICAS DE LOS FILMS DE ACOLCHADOS

6.1.1. Propiedades de tracción de los acolchados

Las propiedades de tracción de las películas de acolchado medidas en condiciones estándar, a baja temperatura (-18° C) y en condiciones de remojo en agua se presentan en la Fig. 2. Los valores de resistencia a la tracción están de acuerdo con los valores de TDS dados por los fabricantes. Además en general, todos ellos cumplen la norma UNE-EN 17033, superando los valores recomendados en dicha norma, en la mayoría de las ocasiones.

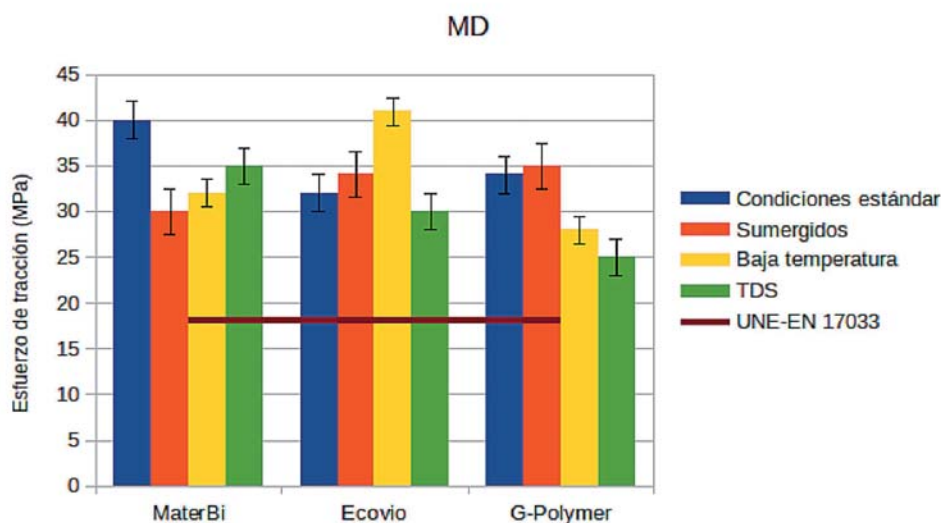


Figura 8: Esfuerzo de tracción en la dirección longitudinal

Respecto al esfuerzo de tracción en la dirección longitudinal, todos los materiales se comportan bien, destacando el MaterBi en condiciones estándar y el Ecovio en condiciones de baja temperatura.

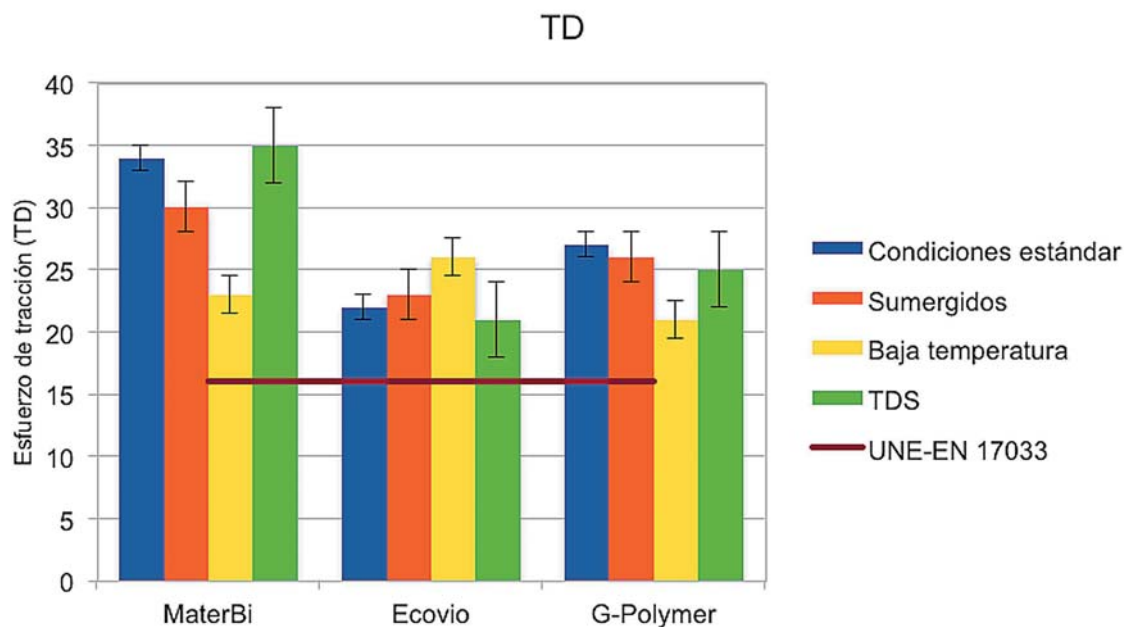


Figura 9: Esfuerzo de rotura en la dirección transversal

En cuanto al esfuerzo de rotura en la dirección transversal, el Materbi presenta los mejores valores siendo el Ecovio el que destaca por abajo pero superando los límites de la UNE-En 17023.

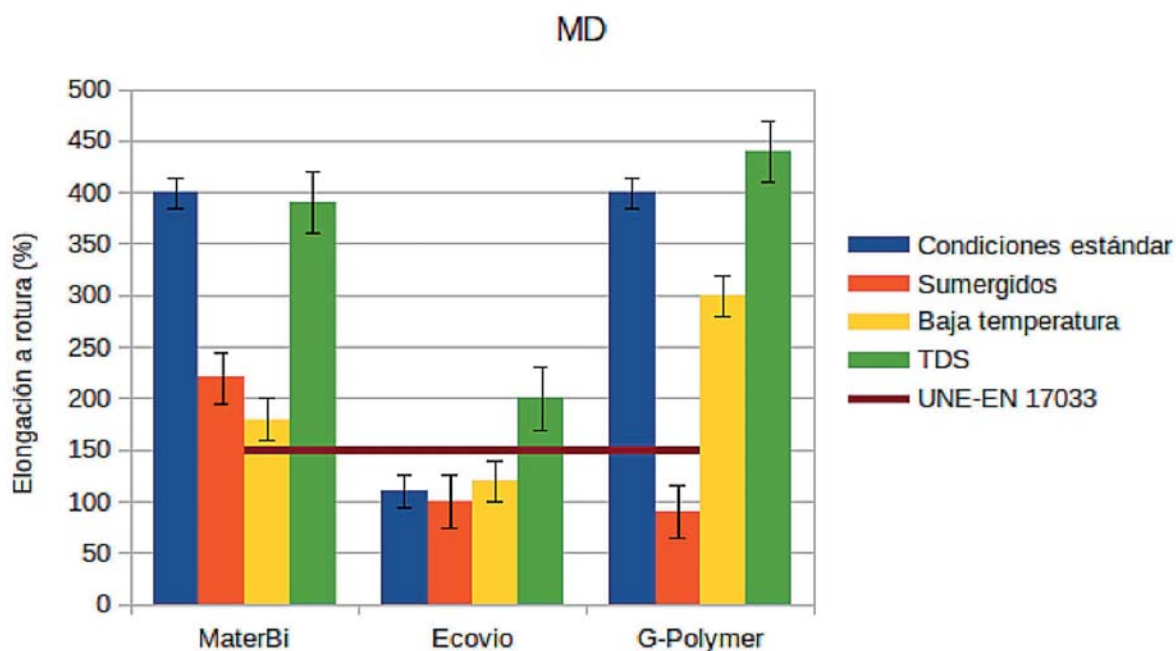


Figura 10: Alargamiento de rotura en la dirección longitudinal



En el alargamiento de rotura longitudinal, El G-Polymer presenta excelentes valores excepto en mojado. El ecovio exhibe valores muy pobres en esta faceta.

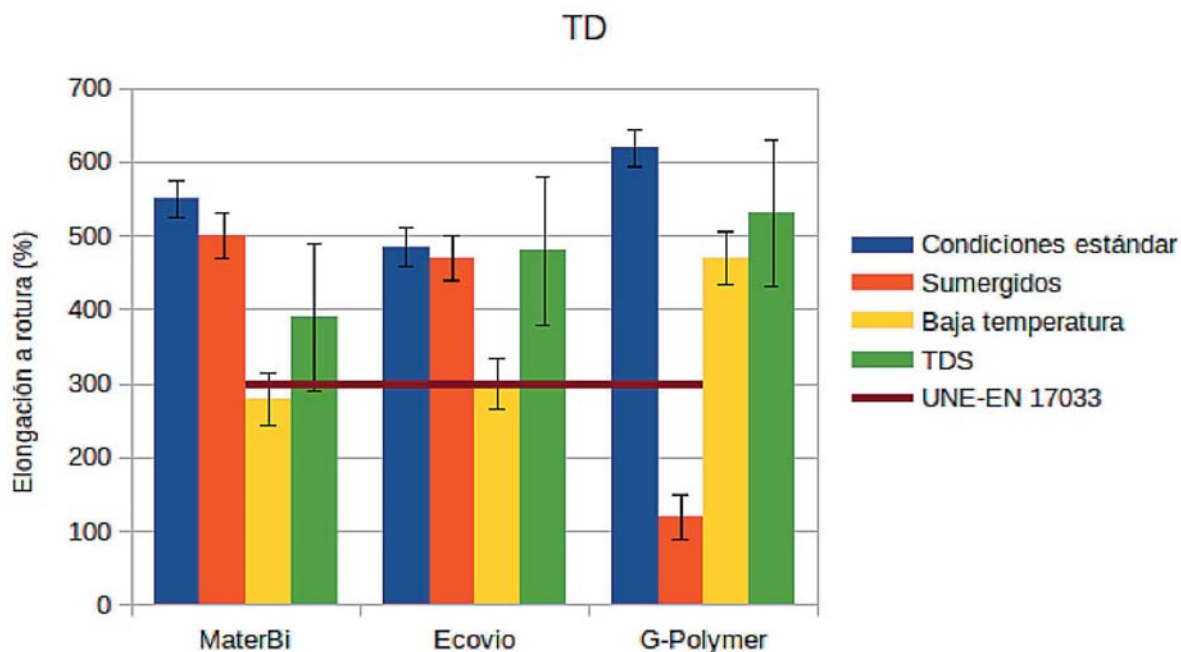


Figura 11: Alargamiento de rotura en la dirección transversal

Respecto a la dirección transversal, vuelve a destacar el G-Polymer excepto con el valor en mojado. Los otros dos films presentan valores similares.

6.1.2. Envejecimiento de los films de acolchado de base biológica

El efecto del envejecimiento se midió exponiendo las muestras a una cámara de envejecimiento acelerado suntest Atlas con ciclos de 8 h de radiación UV-A/4 h de condensación de agua. La duración total de la exposición se estableció en 30 ciclos. Las propiedades de tracción se monitorizaron retirando muestras a intervalos. La frecuencia de las pruebas fue mayor durante los primeros 4 ciclos (una vez por ciclo), luego los siguientes 10 ciclos (una vez en 3 ciclos) y más larga en los últimos 16 ciclos (una vez en 5 ciclos).

La evolución de las propiedades de tracción de los films de acolchado con el tiempo de exposición en el Suntest se presenta en las Figuras 12, 13, 14 y 15. En ellas se muestra que la resistencia a la tracción del film Mater-Bi disminuye rápidamente dentro de los primeros 3 ciclos en ambas direcciones. Luego, se estabilizó a aproximadamente 5 MPa por encima del esfuerzo de fluencia en MD, mientras se acercaba asintóticamente al esfuerzo de fluencia en TD, convergiendo a él después de 15 ciclos.



El film basado en Ecovio también muestra una disminución inicial de la resistencia a la tracción, aunque menor que la de Mater-Bi, durante los primeros dos ciclos. Luego, la resistencia a la tracción sigue el mismo patrón en MD y TD que para Mater-Bi. La resistencia a la tracción de Ecovio alcanza asintóticamente el valor del esfuerzo de fluencia en TD después de 22,5 ciclos. El film de G-polymer muestra solo una disminución menor en la resistencia a la tracción durante toda la exposición de 30 ciclos.

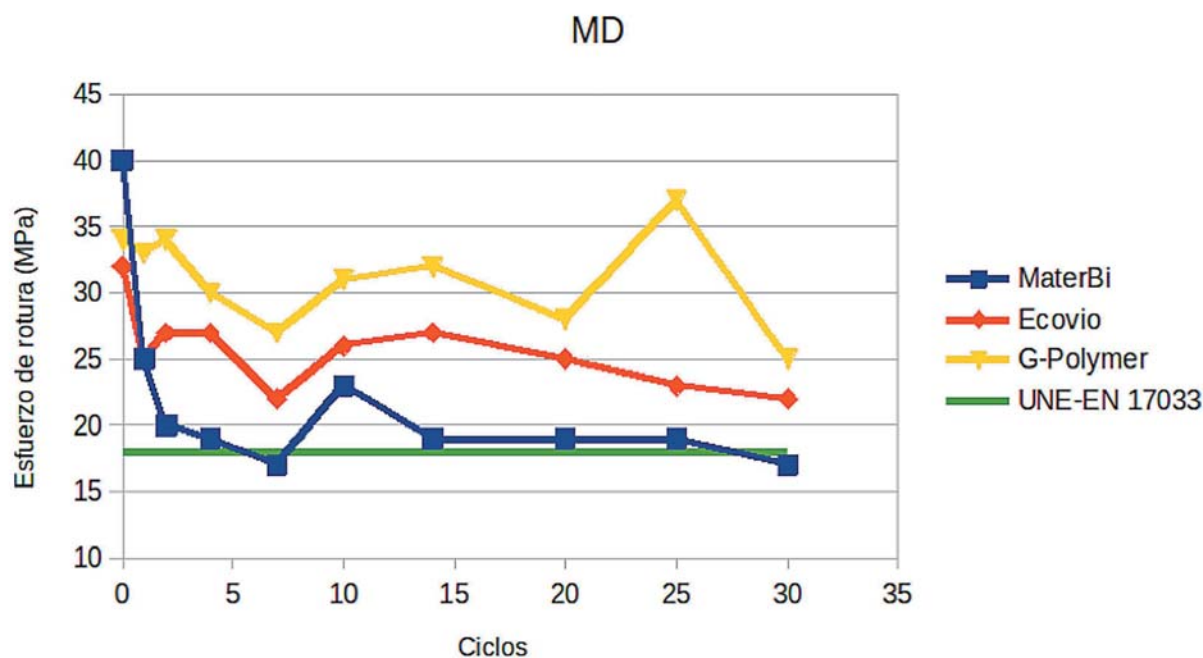


Figura 12: Evolución del esfuerzo de rotura longitudinal con envejecimiento acelerado

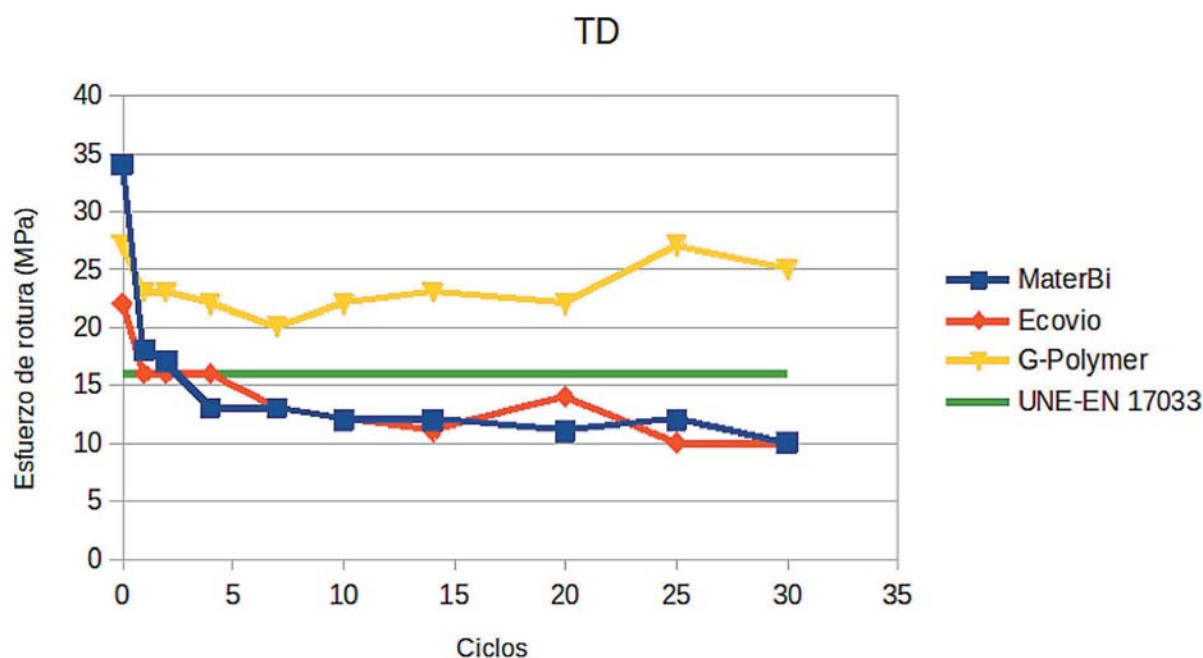


Figura 13: Evolución del esfuerzo de rotura transversal con envejecimiento acelerado



El alargamiento a la rotura de Mater-Bi se reduce drásticamente durante los primeros 2 ciclos (MD: 70%, TD: 35%), alcanzando el criterio de envejecimiento (reducción al 50% del valor inicial) en solo 1,3 y 3,0 ciclos de exposición en MD y TD, respectivamente. El alargamiento a la rotura de Ecovio en MD y TD se redujo al 50%, alcanzando el criterio de envejecimiento en 6,9 y 8,0 ciclos, respectivamente. El valor de alargamiento del film de G-polymer experimentó solo una pequeña reducción (MD: 19%, TD: 7%)

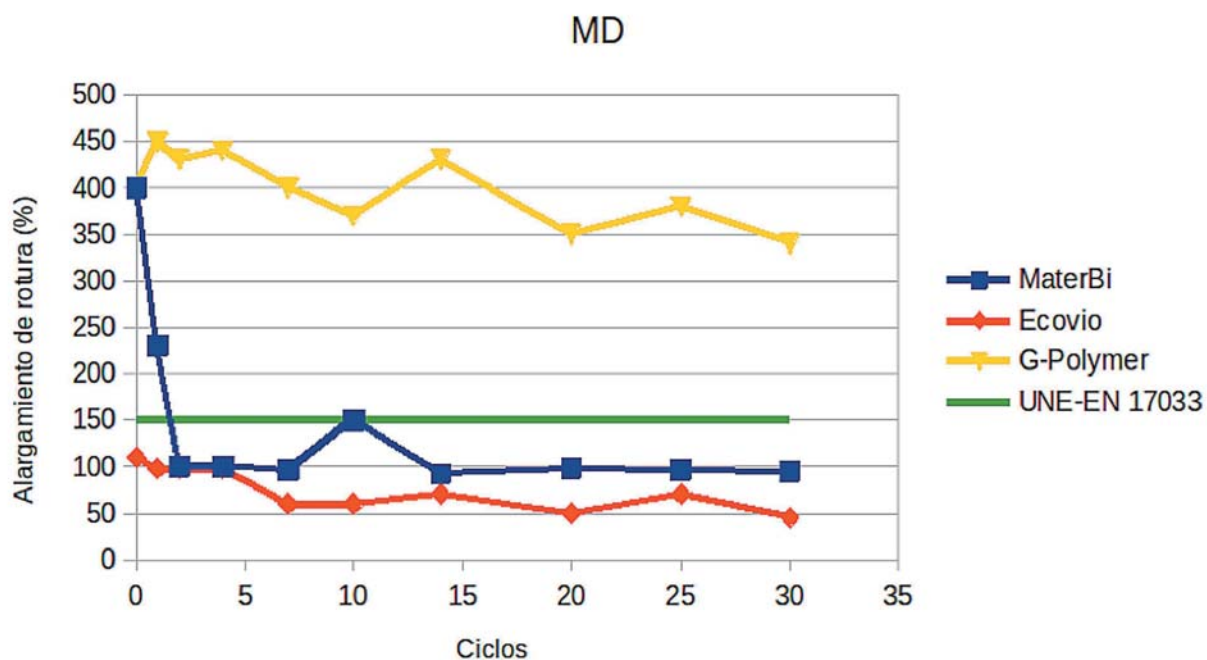


Figura 14: Evolución del alargamiento de rotura longitudinal con envejecimiento acelerado

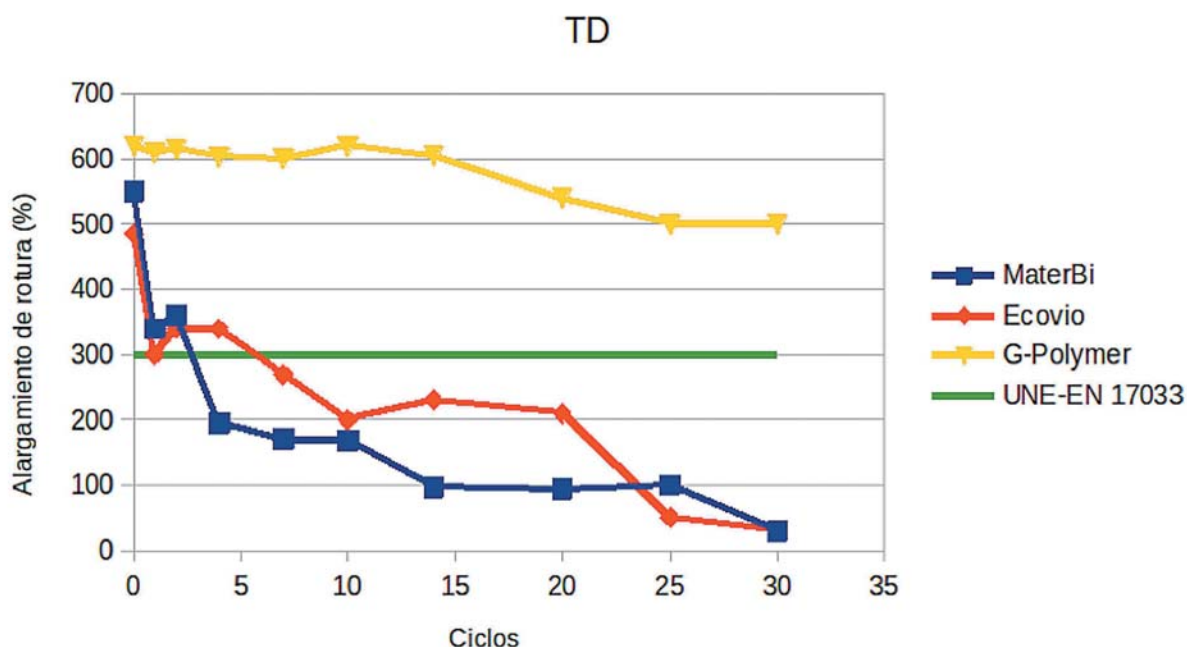


Figura 15: Evolución del alargamiento de rotura transversal con envejecimiento acelerado



Cada muestra se expuso en el Suntest a una irradiancia de 40,9 W/m². Esta potencia UV-A es equivalente a aproximadamente el 3,8% de la irradiación solar total promedio. Por consiguiente, para cada ciclo con 8 h de exposición a UV-A, cada muestra se sometió a una exposición a radiación UV de 1,18 MJ/m² o a una exposición radiante solar total promedio equivalente de 31 MJ/m². El comportamiento del envejecimiento correspondiente a los films de acolchado probados, expresado en términos de la exposición radiante solar promedio equivalente, se presenta en las Figuras 16 y 17 para los dos criterios de envejecimiento.

Criterio de envejecimiento en el esfuerzo de rotura

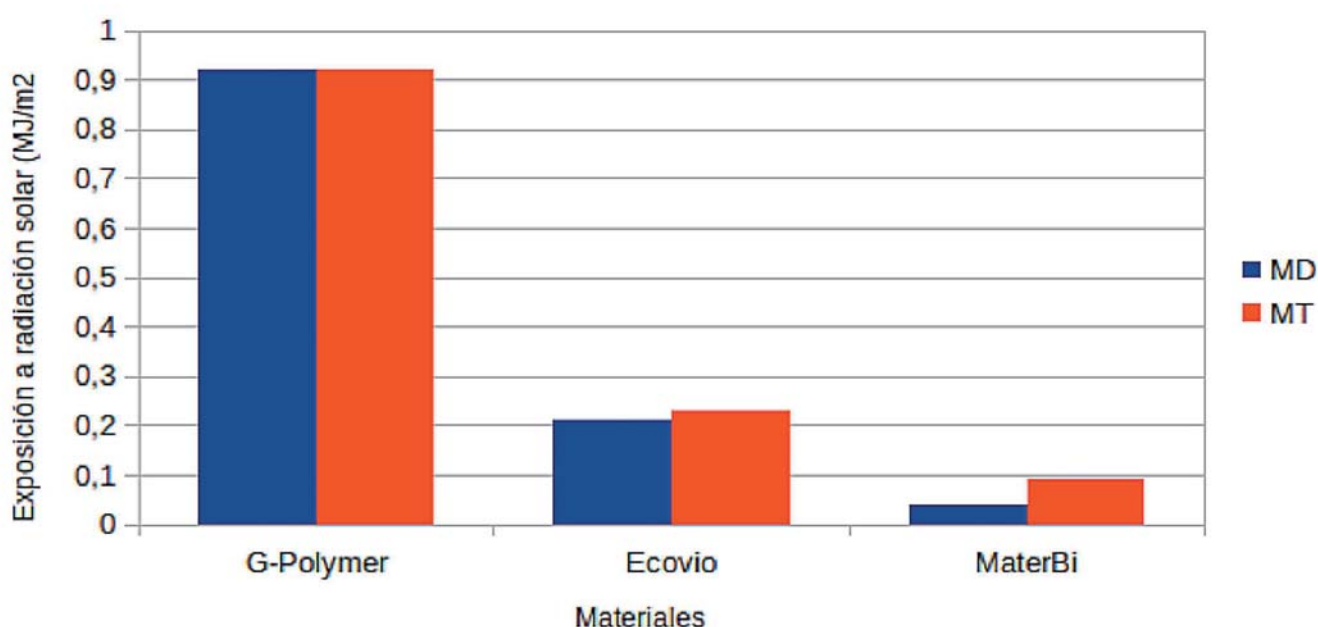


Figura 16: Exposición radiante solar promedio equivalente al envejecimiento bajo el medidor de envejecimiento acelerado, criterio del envejecimiento en el esfuerzo de rotura

La norma UNE-EN 17033 se refiere a la exposición a envejecimiento acelerado de films biológicos y su durabilidad. Para la duración mínima definida por el fabricante, el esfuerzo de rotura MD (solo) debe ser al menos del 50%, determinada de acuerdo con la norma EN ISO 4892-2

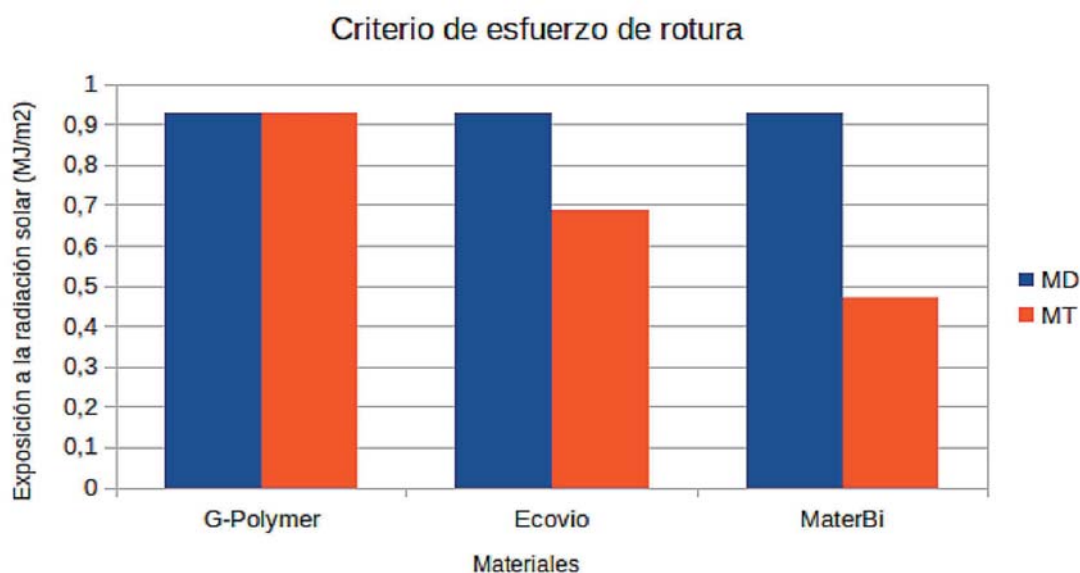


Figura 17: Exposición radiante solar promedio equivalente al envejecimiento bajo el medidor de envejecimiento acelerado, criterio del esfuerzo de rotura.

6.1.3. Resistencia al desgarro de los films de acolchado biobasados

Experimentos a gran escala han demostrado que la fuerza de desgarro inicial y el comportamiento de desplazamiento de los films de acolchado de base biológica como el MaterBi y convencionales basados en LLDPE, siguen el comportamiento de la resistencia a la tracción y el alargamiento correspondientes en las propiedades de rotura¹⁶.

La resistencia al desgarro de los films de acolchado es muy importante. Cualquier desgarro inicial que se origine en los agujeros de trasplante realizados en el film, o de otros fallos localizados debido a operaciones de campo o acciones de impacto y penetración, puede propagarse y hacer que el film no funcione. El método de ensayo de rasgado pendular de alta velocidad Elmendorf y el método de propagación de rasgado del pantalón de baja velocidad se han empleado como métodos alternativos para probar la resistencia a la propagación del rasgado de films de acolchado.

La resistencia al desgarro a alta velocidad se midió de acuerdo con el método estándar Elmendorf ISO 6383-2 (ASTM D1922). La aplicación de altas velocidades de desgarro (7,6-46 m/min) mediante un péndulo minimiza los efectos de alargamiento de los films altamente extensibles, evitando la posible introducción de errores de medición.

La literatura sobre mediciones de resistencia al desgarro de films delgados por el método de Elmendorf informa de grandes discrepancias y desviaciones estándar que se atribuyen a los efectos de alargamiento a la tracción y plasticidad o a la orientación variable¹⁷. Como consecuencia, se ha emitido una advertencia

¹⁶ D. Briassoulis, Mechanical behaviour of biodegradable agricultural films under real field conditions, Polym. Degrad. Stabil. 91 (2006) 1256-1272.

¹⁷ P.A. Dilara, D. Briassoulis, Standard test methods for mechanical properties and degradation of low density polyethylene (LDPE) films used as greenhouse covering materials, Polym. Test. 17 (8) (1998) 549-585.



de que los resultados del método Elmendorf pueden ser "no buenos o engañosos"¹⁸. Además, los valores de resistencia al desgarro de films con diferentes espesores (más del 10%), medidos de acuerdo con estos métodos de prueba, no son comparables.

Se aplica una velocidad de desgarro constante de 250 mm/min con el método de desgarro (se consideraron tanto ISO 6383-1 como ASTM D1938; estos métodos son similares pero no se consideran técnicamente equivalentes; el método ASTM fue utilizado por razones técnicas). La deformación plástica de las patas de las probetas de los films se puede experimentar con films altamente extensibles probadas por el método de desgarro. El método de prueba del desgarro se considera válido para un film particular siempre que la energía de deformación de extensión correspondiente sea insignificante en comparación con la energía de desgarro. Con el objetivo de evitar ambigüedades en la interpretación de los resultados del método de prueba ASTM D1938 con respecto a la extensión potencial de la pata de la probeta, la resistencia a la propagación del desgarro se define como la carga máxima registrada, mientras que la energía crítica de desgarro se define como la energía para que la extensión alcance la carga máxima menos la extensión para iniciar el desgarro.

Los diagramas típicos obtenidos por el método ASTM D1938 para los films de acolchado de base biológica (Mater-Bi) y (G-polymer) se muestran en la Figura 18. La propagación del desgarro en la dirección transversal indica una mayor extensión a los valores de carga máxima para los films de base biológica, especialmente para Mater-Bi (MD / TD: 47.8 / 80.6 mm). Los films G-polymer alcanzaron la carga máxima con un valor de extensión más bajo en TD, similar al de la dirección paralela (55 mm).

Los valores de resistencia a la propagación de la rotura, en mN, de Mater-Bi (15 μ m), Ecovio (12 μ m) y G-Polymer (12 μ m) en las dos direcciones, ensayados de acuerdo a ISO 6383-2 (44) y ASTM D1938, se muestran en las Figuras 19 y 20. Los valores de resistencia al desgarro de los films de base biológica parecen ser mayores en la dirección transversal. El film G-Polymer también tiene la mayor resistencia en TD. Los resultados del método de rotura de probetas tipo pantalón se presentan en comparación con los medidos por el método de prueba Elmendorf y los reportados por TDS (también medidos por ISO 6383-2), solo para fines de comparación cualitativa (ya que estos resultados no son cuantitativamente comparables debido a diferente velocidad de prueba y enfoque de rasgado).

El método con las probetas tipo pantalón muestra que la resistencia a la propagación de la rotura de la película de G-polymer es mayor que la resistencia de los otros dos films de base biológica (15 y 12 μ m). Este hallazgo también es confirmado por los resultados del método de ensayo Elmendorf obtenidos en el laboratorio en la dirección transversal, pero no confirmado en la dirección paralela. Los valores de TDS concuerdan cualitativamente con los resultados del método de las probetas tipo pantalón.

¹⁸ ASTM D1922-15, Standard Test Method for Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by Pendulum Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015 www.astm.org

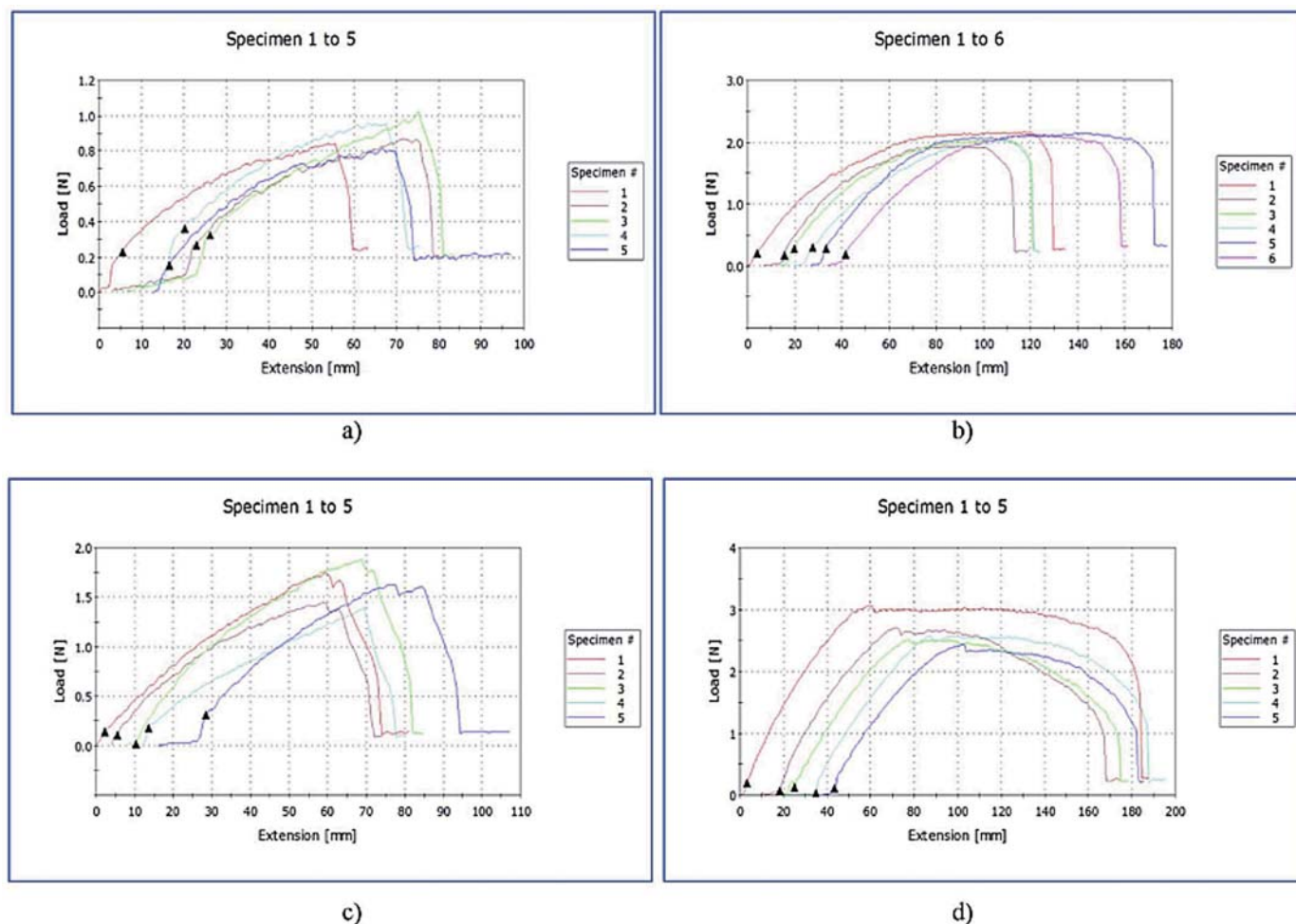


Figura 18: Curvas típicas de resistencia al desgarro frente a la extensión según ASTM D1938 para el film Mater-Bi: MD (a) TD (b) y film G.polymer: MD (c) TD (d).

El componente principal de la energía de desgarro crítico debido a la propagación del desgarro (N/m) y el componente secundario debido a la posible extensión de la probeta se han calculado de acuerdo con Rivlin y Thomas¹⁹. Se ha encontrado que la contribución calculada de la extensión de la probeta tipo pantalón como (%) de la energía de desgarro crítica total (Figuras 19 y 20) fue bastante baja (inferior al 10%) en todos los casos, excepto para Mater-Bi y Ecovio M12 en la dirección transversal donde la proporción correspondiente alcanzó el 43.2% y el 22.0%, respectivamente. En consecuencia, los resultados del método de probetas tipo pantalón ASTM D1938 se consideraron inválidos solamente para las películas Mater-Bi y Ecovio en la dirección transversal.

19 R.S. Rivlin, A.G. Thomas, Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing, J. Polym. Sci. 10 (1953) 291-318.

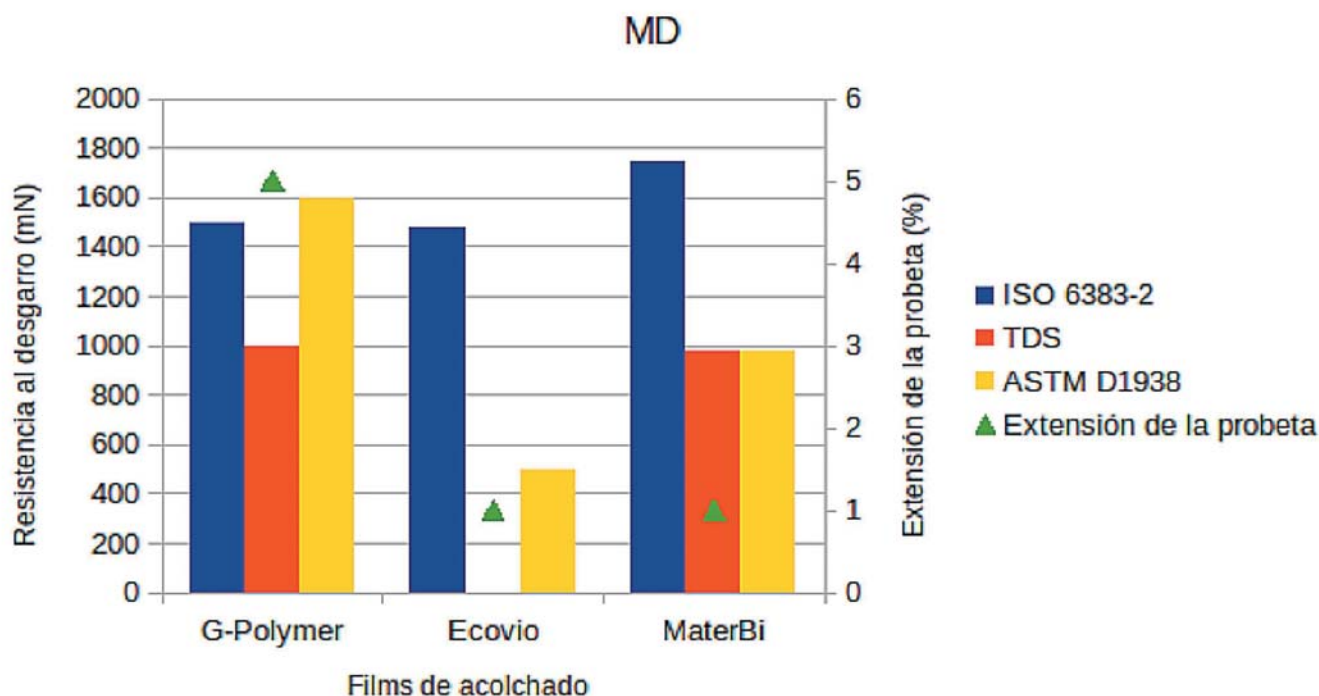


Figura 19: Resistencia al desgarro en la dirección longitudinal según Elmendorf ISO 6383-2, según ASTM D1939 y TDS según Elmendorf

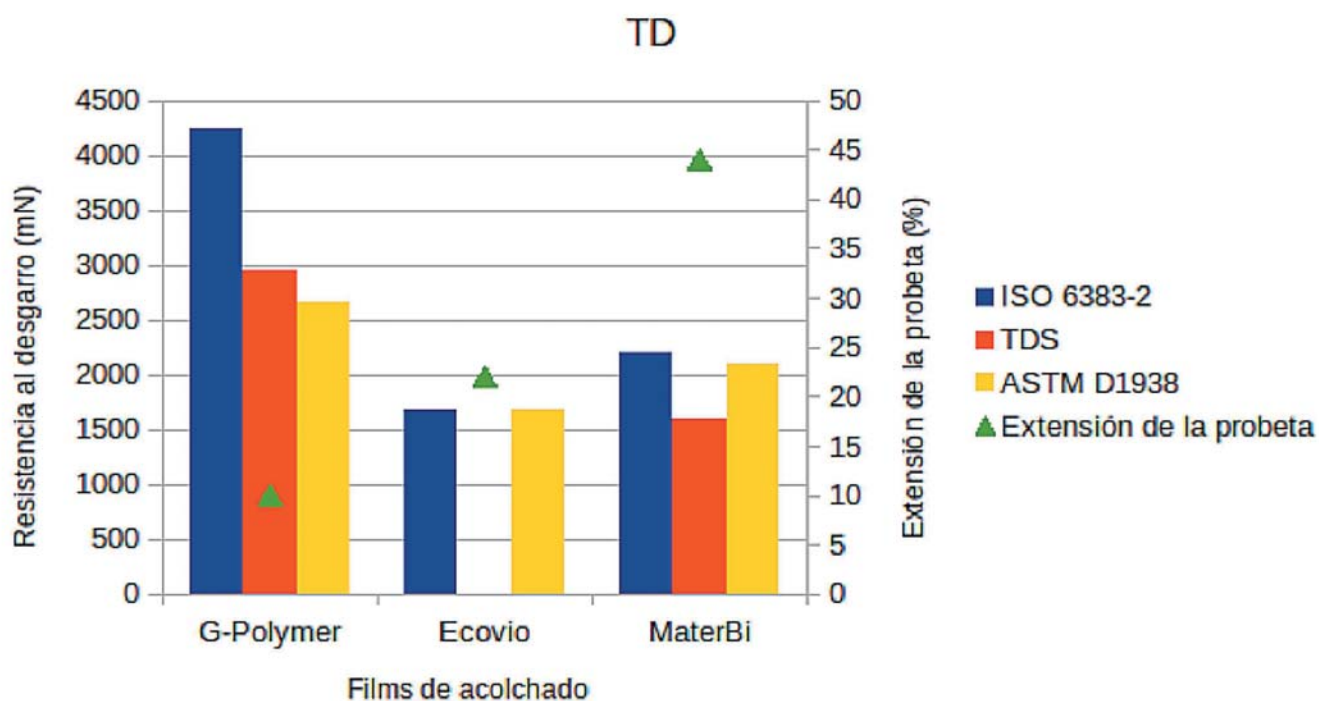


Figura 20: Resistencia al desgarro en la dirección transversal según Elmendorf ISO 6383-2, según ASTM D1939 y TDS según Elmendorf



Se ha descubierto que la resistencia al desgarro de los films de acolchado medidas por el sistema Elmendorf estaba asociada con desviaciones altas y confiabilidad cuestionable. Los resultados del método Elmendorf para estos films se evalúan como "no buenos o engañosos". Si se pueden garantizar mediciones confiables, el método de Elmendorf puede considerarse útil para proporcionar información sobre la fragilidad de los films de acolchado de plástico en condiciones de alta velocidad de propagación del desgarro.

6.1.4. Resistencia a la penetración de los films de acolchado biobasados

La resistencia a la penetración de los films de acolchado se ha medido siguiendo dos métodos de prueba alternativos, ASTM F1306 y UNE-EN 14477, a una velocidad constante de 25 mm/min de acuerdo con ASTM F1306 y dentro del rango de velocidades, 1, 5, 10, 20, 100 mm/min, permitido por EN 14477. Los materiales probados, con alta elongación a valores de rotura, principalmente en la dirección transversal (Figuras 8, 9, 10 y 11), no siguieron el modo típico de fallo descrito por los dos estándares. Las curvas de penetración de extensión de carga obtenidas muestran un comportamiento no lineal con dos picos en los casos de las películas de base biológica Mater-Bi y Ecovio, independientemente del método de prueba (se muestran las curvas típicas de la película de mantillo Mater-Bi en las Figuras 19 y 20). Este comportamiento es similar al observado para los films de envasado de alimentos de base biológica, donde el primer pico está asociado con el rendimiento y el segundo con el fallo de rotura.

El film G-polymer también exhibe un comportamiento no lineal, que sin embargo difiere para los dos métodos de prueba. La curva obtenida por el método ASTM F1306 que utiliza una sonda con forma cónica alcanza una meseta a la carga máxima sin una distinción clara entre los picos de ruptura y fluencia (Fig. 7c). La curva obtenida por el método EN 14477 con una sonda de forma cilíndrica presenta claramente dos picos, el primero correspondiente a la carga máxima (Figura 21d).

Tras el análisis correspondiente de los films para envasado, la resistencia a la penetración de los films que exhiben un modo de fallo con dos picos o un pico (es decir, todas los films de acolchado probados) se define como la capacidad de carga máxima, ya sea que se alcance primer o segundo pico o en un solo pico o meseta. La energía correspondiente a la penetración de los films de acolchado se calcula como la energía a la carga máxima. Por lo tanto, en un caso como el del modo de fallo del G-polymer probado por EN 14477 (Figura 21), el primer pico representa la capacidad máxima.

La resistencia a la penetración de los films de acolchado de base biológica y de referencia probados según ASTM F1306 y EN 14477 y calculada en función de la carga de penetración máxima y la energía correspondiente a la carga máxima se muestran en las Figuras 22 y 23. Los resultados confirman un comportamiento cualitativo similar medido por los dos métodos de prueba estándar. El film de G-polymer (12 _m) logra la mayor resistencia a la penetración y el film de Ecovio (12 _m) la más baja (casi la mitad de la resistencia del film

de G-Polymer). Se midió un valor de resistencia a la penetración intermedia para el film Mater-Bi (15 μ m). La diferencia entre los films G-polymer y Mater-Bi puede atribuirse, al menos parcialmente, al diferente grosor de las dos películas. Las energías medidas a carga máxima siguen un comportamiento similar.

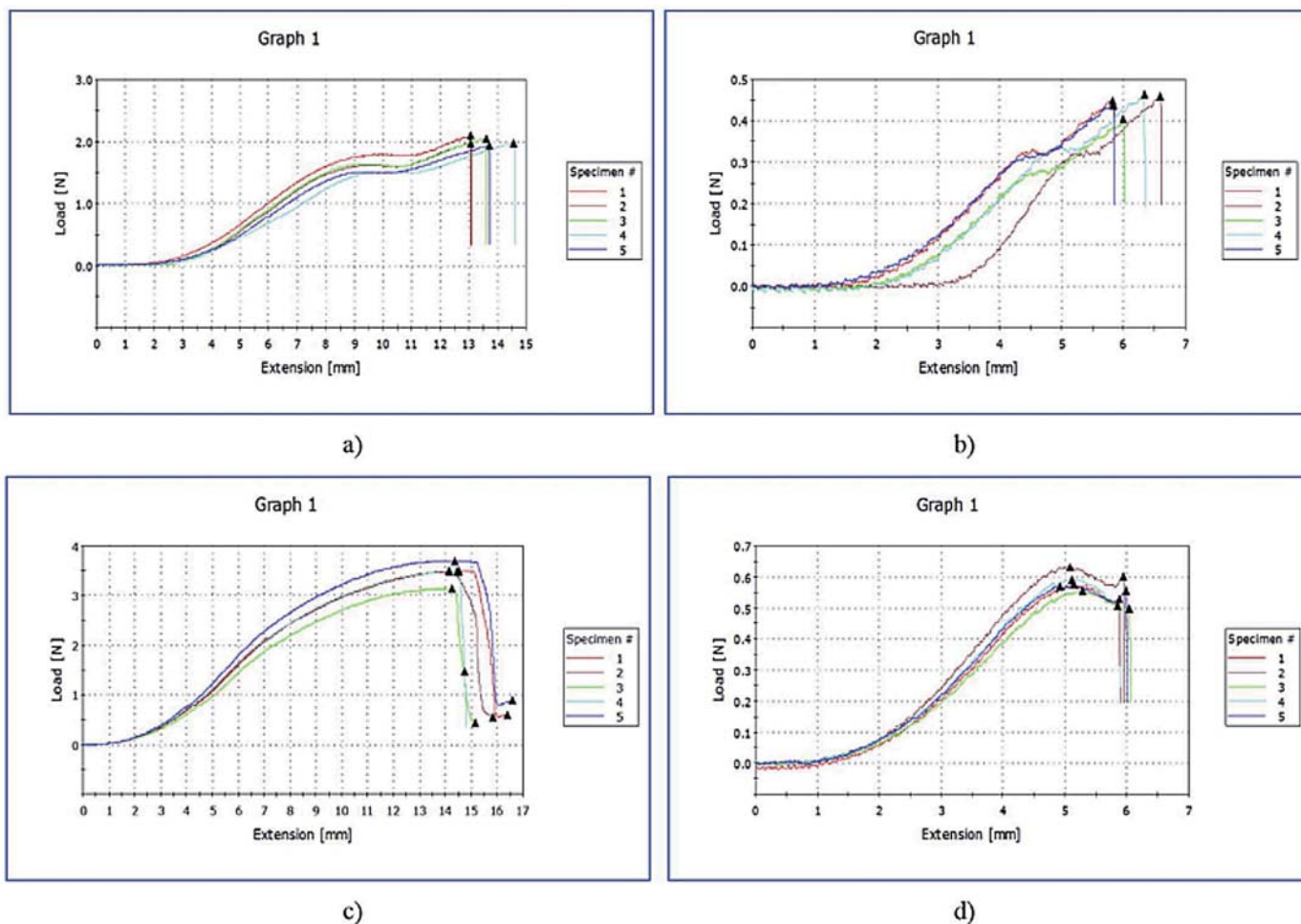


Figura 21: Curvas típicas de resistencia a la penetración frente desplazamiento del film Mater-Bi por ASTM F1306 (a) y EN 14477 (b) y film G-polymer por ASTM F1306 (c) y EN 14477 (d).

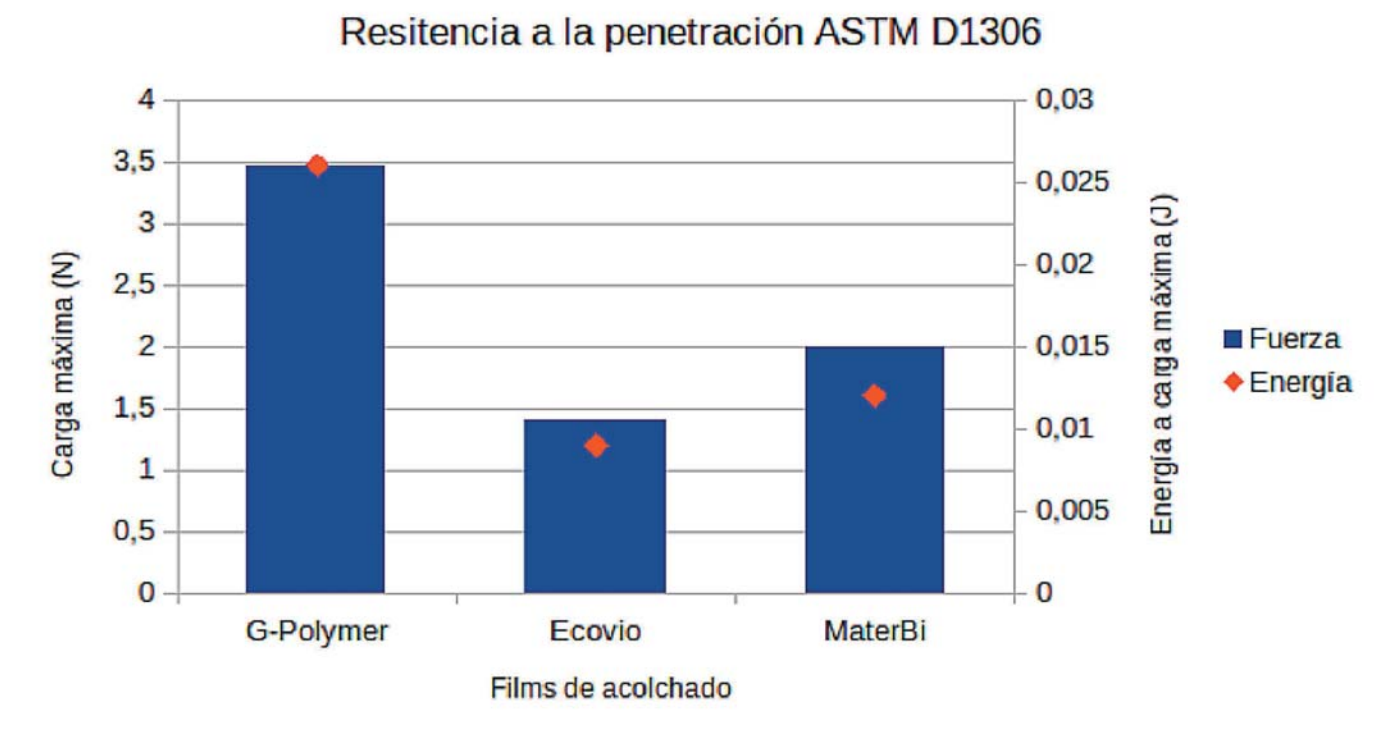


Figura 22: Resistencia a la penetración de acolchado de base biológica según ASTM F1306

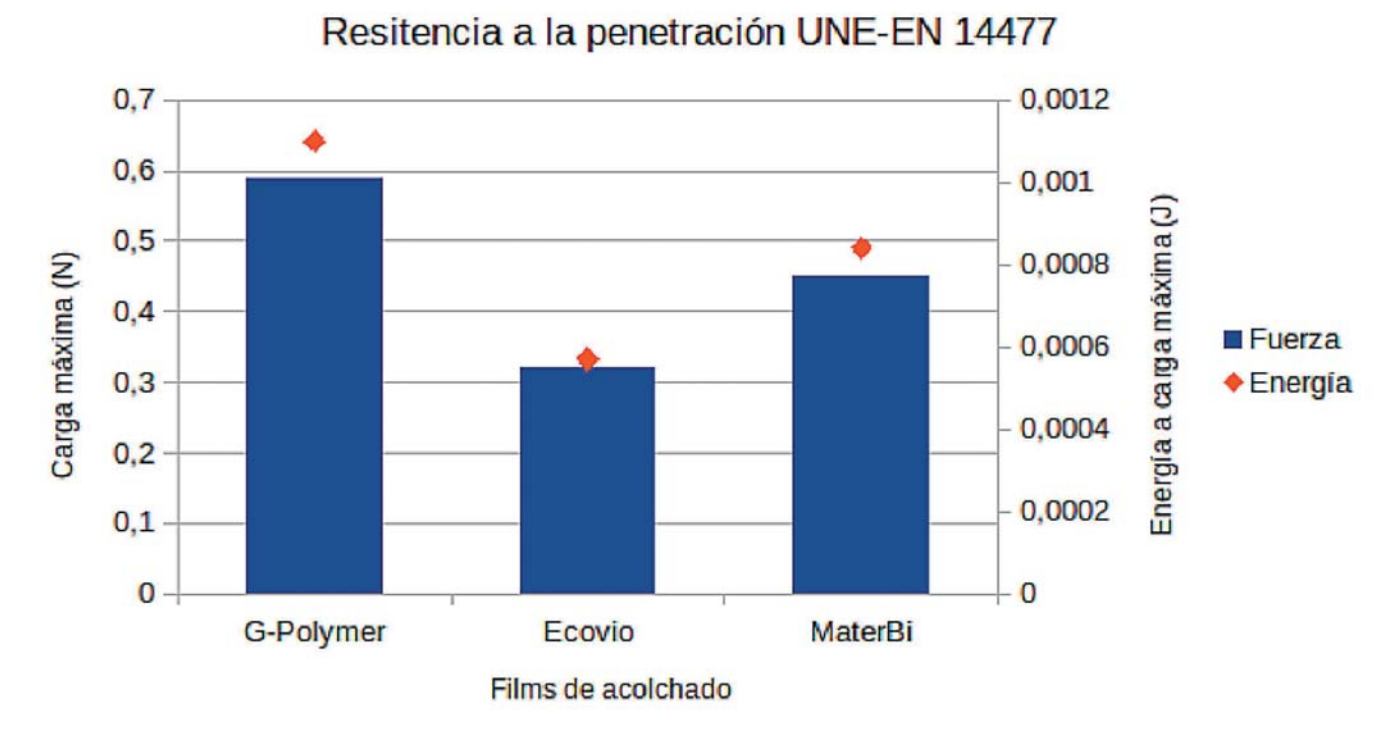


Figura 23: Resistencia a la penetración de acolchado de base biológica según UNE-EN ISO 14477



6.2. FUNCIONALIDADES FÍSICAS DE LOS FILMS DE ACOLCHADOS

6.2.1. Propiedades de transporte de gas: transmisión de vapor de agua en films de acolchado de base biológica

Los valores de transmisión del vapor de agua medidos según ASTM E96/E96M-14 en condiciones de 38°C y 90% HR, se presentan en la Figura 24. Las condiciones del ensayo fueron confirmadas por dispositivos independientes. Los valores de WVTR de los films de base biológica (Mater-Bi: 15 μm ; Ecovio: 12 μm y G-Polymer) no difieren significativamente entre sí. Se observa que el valor de TDS reportado para una película Mater-Bi de 30 μm de espesor, medido también por ASTM E96/E96M-14, es la mitad del valor de laboratorio WVTR correspondiente para el film de acolchado Mater-Bi de 15 μm de espesor.

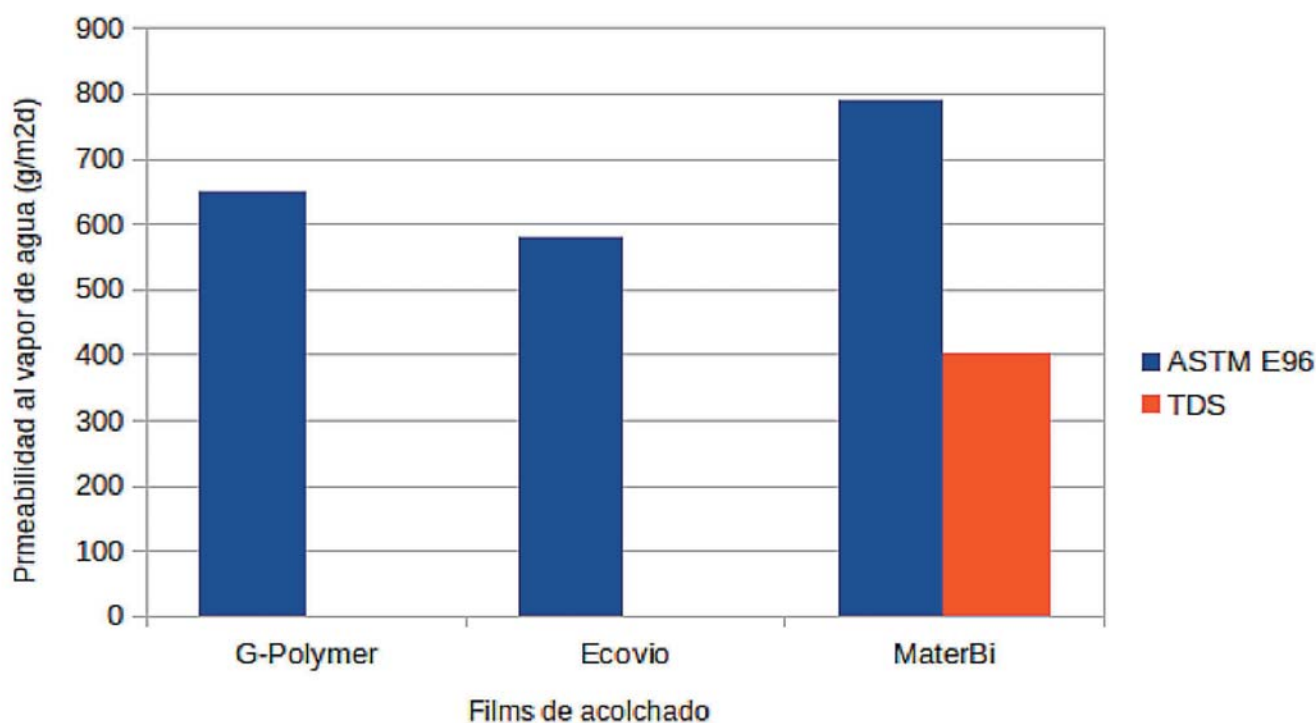


Figura 24: Transmisión de vapor de agua de los films de acolchado de base biológica y de referencia medidas por el método ASTM E96/E96M-14 e informadas por TDS (valor de TDS medido por ASTM E96 para un film Mater-Bi de 30 μm de espesor).

En algunos casos, se utilizan diferentes enfoques para cumplir con las condiciones de ensayo del mismo estándar (por ejemplo, para ASTM E96/E96M-14: la HR de la cámara controlada se establece en 10% mientras los recipientes se llenan de agua; HR = 100%). Sin embargo, los fabricantes de equipos de medición WVTR generalmente especifican un límite inferior en los valores de HR a HR=30%, ya que es técnicamente difícil lograr valores de HR más bajos (rangos de HR disponibles por los fabricantes: 0% HR, 30-90% HR, 100% HR). Se recomienda que los estándares describan un enfoque específico para lograr las condiciones de ensayo específicas.



Además, dado que los valores medidos de WVTR dependen de la temperatura y ΔHR , se recomienda que los valores de WVTR dados por los fabricantes se obtengan mediante los mismos métodos y condiciones de prueba estándar, lo que permite hacer comparaciones entre los valores de WVTR de diferentes productos.

6.2.2. Propiedades de transporte de gas: transmisión de CO₂ en films de acolchado de base biológica

Las velocidades de transmisión, de los films de bajo espesor, al CO₂, medidas siguiendo el método ASTM F2476 en condiciones de 23°C y 0% ΔHR , se muestran en la Figura 25. Los valores de velocidad de transmisión de CO₂ medidos por análisis GC para Ecovio (12 μm) y para G-Polymer (20 μm) son comparables, mientras que se encontró que era mucho más baja para el film Mater- (15 μm). No se encontraron datos para las tasas de transmisión de CO₂ en las TDS para los films, medidas por el método ASTM F2476.

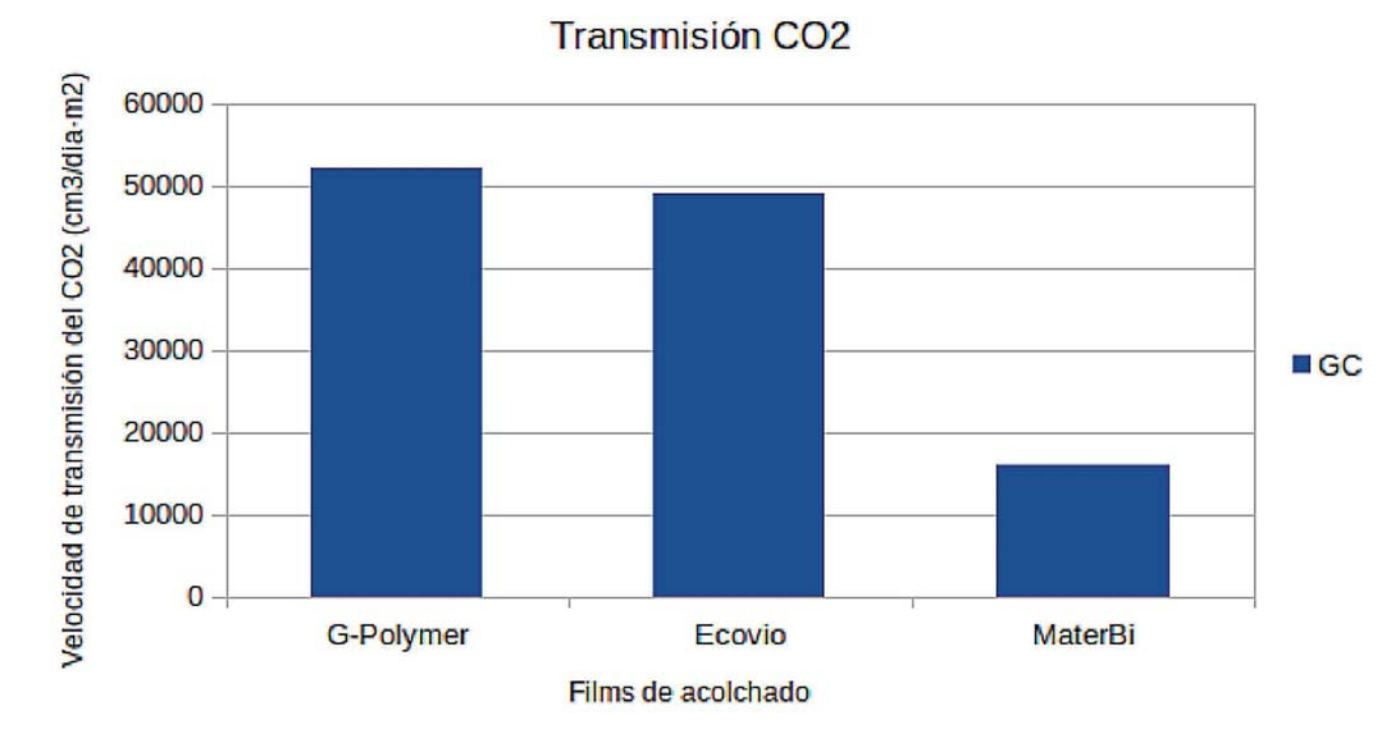


Figura 25: Velocidad de transmisión de CO₂ en films de acolchado de base biológica medidas por el método ASTM F2476

6.2.3. Propiedades radiométricas

Las propiedades radiométricas de los films de acolchado medidas según ASTM D1003 (procedimiento B) se presentan en la Figura 26. La transmitancia PAR medida en los films de base biológica cumple el requisito



establecido por la norma UNE-EN 17033 (transmisión de luz relativa para negro u opaco películas <3%). Cabe señalar que la transmitancia PAR (%) medida por ASTM D1003 es diferente del método de transmisión de luz relativo sugerido por la norma UNE-EN 17033. La transmisión de luz relativa se mide con un luxómetro, un instrumento que simula la sensibilidad del ojo humano. Este método mide la transmitancia (%) sobre una pequeña porción del espectro de radiación visible, 500-600 nm, y no sobre todo el espectro visible (380-780 nm), o el más importante para las plantas del espectro PAR (400-700 nm). Las tasas de transmisión de luz relativas sugeridas por la norma UNE-EN 17033 podrían calcularse basándose en los valores de transmitancia PAR (%), medidos por ASTM D1003, integrando el rango del espectro de 500 a 600 nm. Los resultados de las pruebas específicas no cambian ya que las mediciones indican tasas de transmitancia inferiores al 3% para todas las longitudes de onda de la región PAR.

Sin embargo, la tasa de fotosíntesis promedio en la región del espectro de 500-600 nm es inferior al 40%, mientras que supera el 80% en las regiones del espectro de 400-500 y 600-700 nm. Como el espectro más importante para los organismos fotosintéticos, y por lo tanto, para el desarrollo de malezas, es todo el espectro de radiación PAR (o visible), se recomienda que el método del Anexo A de la norma UNE-EN 17033 sea reemplazado por el ASTM D1003 disposiciones o equivalentes.

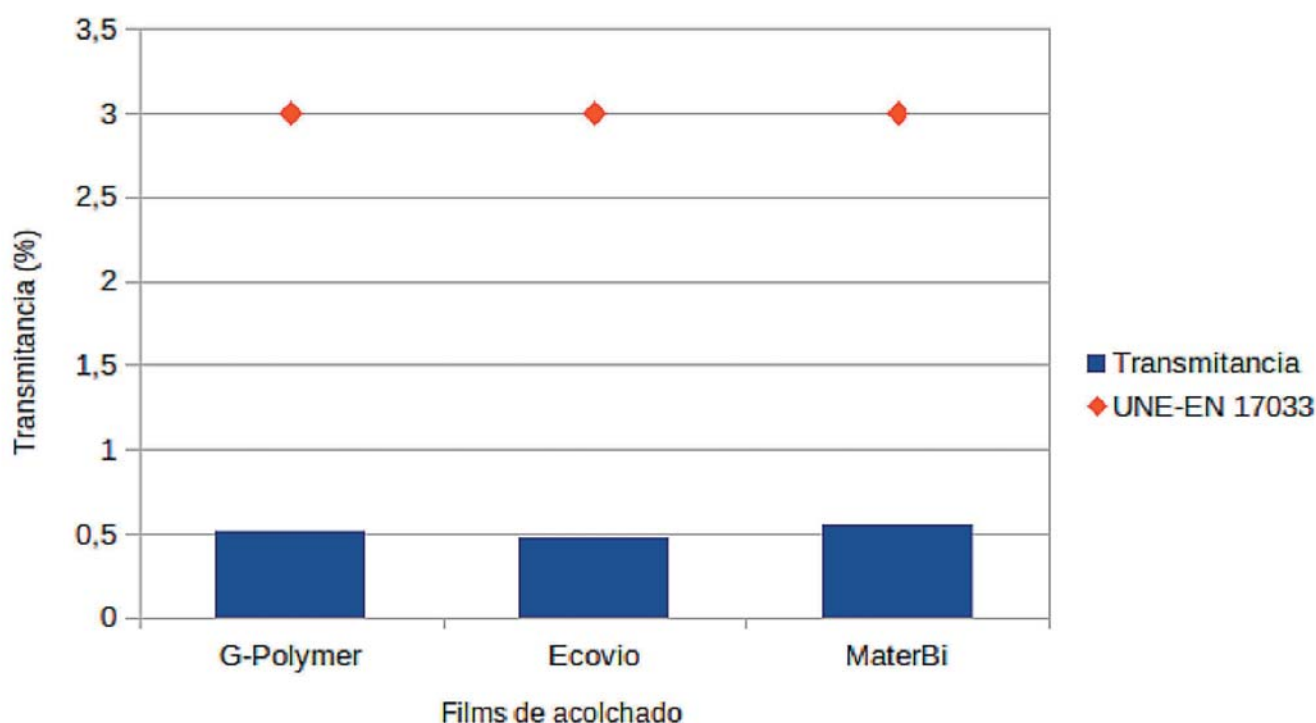


Figura 26: Transmisión de PAR en los films de acolchado de base biológica medidas por el método ASTM D1003 y de referencia según UNE-En 17033.



6.3. BIODEGRADABILIDAD DE LOS FILMS DE ACOLCHADOS

Los films de acolchados desarrollados a partir de materiales biobasados, se han sometido a ensayos para determinar su biodegradabilidad en suelo, tal y como establece la norma UNE-EN 17033. Dicha norma establece los siguientes criterios de evaluación:

- Las muestras sometidas al ensayo no deben someterse a condiciones o procedimientos, como un pretratamiento por calor o una exposición a la radiación, diseñada para acelerar la biodegradación antes del ensayo de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 17556.
- Se considera que el material del film de acolchado ha demostrado una tasa y nivel de biodegradación satisfactorios en el suelo si:
 - Cuando se ensaya de acuerdo con UNE-EN ISO 17556 y alcanza un porcentaje mínimo de biodegradación especificado a continuación, en un período de ensayo no mayor a 24 meses.
 - El 90% del carbono orgánico se debe transformar en CO₂ al final del período de prueba (en relación con el material de referencia, celulosa microcristalina). Tanto el material de referencia como el film objeto del ensayo, se probarán durante el mismo período de tiempo y los resultados se compararán en el mismo punto en el tiempo después de que la actividad de ambos haya alcanzado una meseta.
 - Como alternativa, el 90% (en términos absolutos) del carbono orgánico se debe transformar en dióxido de carbono al final del período de prueba.
- Condiciones de ensayo: temperatura constante dentro de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en el rango entre 20°C y 28°C , preferiblemente 25°C .
- Se utiliza como material de referencia un polímero biodegradable bien definido (polvo de celulosa microcristalina, filtros de celulosa sin cenizas o poli-3-hidroxibutirato). Si es posible, la forma física y el tamaño del material de referencia deben ser comparables a los del material de ensayo.

Los resultados de los tres films ensayados se muestran en la Tabla 4.

	G-POLYMER	ECOVIO	MATERBI
PORCENTAJE DE BIODEGRADACIÓN CON RESPECTO A LA CELULOSA	91,3	90,5	90,9
DÍAS NECESARIOS PARA ALCANZAR EL 90%	436	392	217

Tabla 4: Resultados de biodegradabilidad ensuelo según UNE-EN ISO 17556

En la Figura 27 se muestra el grado de avance de la biodegradabilidad del MaterBi durante el periodo de tiempo de 217 que necesitó para alcanzar el porcentaje de biodegradación del 90%.



Figura 27: Evolución de la biodegradabilidad del MaterBi

7. CONCLUSIONES

Se ha investigado la funcionalidad de los films de acolchado para un conjunto de películas de acolchado biológicas y convencionales representativas. Se ha encontrado que el rendimiento de las películas de base biológica difiere del de los films de acolchado convencionales. Las diferencias identificadas incluyen las propiedades de tracción y el efecto de la humedad y la temperatura sobre las propiedades de tracción, la disminución prematura del alargamiento a la rotura de los films biológicas expuestas a la radiación UVA, el mayor WVTR, la respuesta diferente a la resistencia a la penetración, al desgarrar y al impacto, y otras propiedades físicas. Los films de base biológica y de referencia satisfacen los requisitos de la norma UNE-EN 17033 y EN13655, respectivamente, excepto por el alargamiento a la rotura de Ecovio en MD.

Se evaluaron los métodos de ensayo utilizados para medir las propiedades clave de los films de acolchado biodegradables de base biológica y se han propuesto adaptaciones para métodos de ensayo específicos para ampliar su aplicabilidad a los ensayos de films de acolchado tanto convencionales como de base biológica.

Propiedades de tracción: el alargamiento a la rotura de todos los materiales biológicos y convencionales se reduce en condiciones de bajas temperaturas, mientras que la resistencia a la tracción se reduce para



una de los films en condiciones congeladas y cuando se sumerge en agua. Se recomienda tener en cuenta las condiciones adicionales de bajas temperaturas y agua al probar las propiedades de tracción de los films de acolchado.

Resistencia a la propagación del desgarro: cuando se utiliza el método de propagación del desgarro con probetas tipo pantalón, se recomienda definir la resistencia al desgarro como la carga máxima registrada y la energía de desgarro crítica correspondiente como la energía correspondiente a la extensión a la carga máxima. Se ha encontrado que la contribución de la extensión de la probeta tipo pantalón como (%) de la energía de desgarro crítica total es relativamente baja, lo que hace que el método sea válido en todos los casos, excepto para Mater-Bi y Ecovio en TD, donde se sobreestima la resistencia al desgarro. Los resultados del método Elmendorf se asociaron con grandes desviaciones y confiabilidad cuestionable. La medición de la resistencia a la propagación del desgarro de los films de acolchado de bajo espesor por el método Elmendorf debe considerarse con precaución, siguiendo también la advertencia del método de ensayo estándar. Alternativa al método Elmendorf, se puede considerar el método de desgarro de la probetas tipo pantalón para medir la propagación del desgarro en este tipo de films.

Resistencia a la penetración: los resultados confirman un comportamiento cualitativo similar medido por los métodos de prueba estándar ASTM F1306 y UNE-EN 14477. Se recomienda que la resistencia a la penetración de los films de acolchado se defina como la capacidad de carga máxima, independientemente de la forma de la curva, y la energía de penetración se calcula como la energía a la carga máxima.

Resistencia al impacto: la resistencia al impacto de los films de acolchado parece ser mucho mayor para los films Mater-Bi y Ecovio (15, 12 μm) en comparación con la resistencia de la del film G-Polymer (12 μm), satisfaciendo los requisitos de resistencia al impacto de la norma UNE-EN 17033.

Radiométrica: los valores de transmitancia PAR de los films de acolchado de base biológica satisfacen los requisitos de transmisión de luz establecidos por las normas UNE-EN 17033 y EN13655, respectivamente. Sin embargo, el requisito relativo de transmisión de luz del UNE-EN 17033 se mide con un luxómetro sobre una parte del espectro de radiación visible, 500-600 nm y no sobre todo el espectro visible (380-780 nm), o el espectro PAR (400-700 nm), que es el espectro más importante para el desarrollo de organismos fotosintéticos y malezas. Se recomienda que el Anexo A de la norma UNE-EN 17033 sea reemplazado por las disposiciones ASTM D1003 o equivalentes.

Transmisión de vapor de agua: se ha encontrado que los valores de WVTR de los films de acolchado no difieren significativamente entre sí. Se recomienda que los fabricantes apliquen los mismos métodos de prueba estándar y usen los mismos enfoques para cumplir con las condiciones de prueba establecidas para que los valores medidos de WVTR de los diferentes productos sean comparables.

Biodegradabilidad: Los films de acolchado biodegradables ensayados cumplen con los requisitos establecidos en las normas UNE-EN 17033 y UNE-EN 17556.

8. DIFUSIÓN DE RESULTADOS

Para promocionar y proporcionar información del proyecto, se han publicado en la página web de CETEC enlaces con información tanto de la puesta en marcha y desarrollo del proyecto como de los resultados finales que se obtengan. Desde esta misma páginas web la información será enlazada con las redes sociales de CETEC. (Facebook, LinkedIn, ...).

Una vez obtenidas las primeras muestras semi-industriales estas fueron presentadas a potenciales clientes, informándoles de las ventajas de los nuevos productos, acerca de su sostenibilidad, reciclabilidad, biodegradabilidad y de cualquier otra característica relevante para los fines de cada cliente.

Los resultados finales del proyecto se han presentado en al jornada “Envase plástico y sostenibilidad” organizada por CETEC y celebrada el 11 de marzo de 2020 en Centro Tecnológico de la Conserva en Molina de Segura. A la misma asistieron numerosas empresas de la Región de Murcia interesadas en la problemática de los plásticos biodegradables, tanto en el mundo del envase como otros ámbitos de aplicación como es el de la agricultura sostenible.



Figura 28: Presentación de resultados del proyecto BIODEG

Así mismo, resultados del proyecto serán presentados durante la Semana de la Ciencia en noviembre de 2020.

Por último, con el fin de comparar los resultados obtenidos por CETEC con otras propuestas del mercado, se asistió a la feria K2019, referente mundial en la transformación de materiales poliméricos que se celebra cada tres años y que aglutina todas las novedades mundiales en el sector de los polímeros, entre ellos los polímeros biodegradables. La feria se celebró en Düsseldorf entre los días 16 y 23 de Octubre de 2019.

BIODEG

Memoria de ejecución



**Desarrollo de films biodegradables
para films de acolchado agrícola**