

NOTA CIENTÍFICA

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE ENSAYOS DE EXPOSICIÓN NATURAL Y ENVEJECIMIENTO ACELERADO DE FILMS DE POLIETILENOS PARA INVERNADEROS¹

Comparative study between natural exposition trial and accelerated ageing of polyethylene films for greenhouses

Susana Orden,¹ Martha Goldberg,² Rómulo Quartino,² Libertad Mascarini,²
Ana Landini,² Horacio Malleville² y Lucila Bottini²

ABSTRACT

The use of plastic cover for greenhouses allow crops cultivation under glass in unfavorable seasons for field cultivation, with greater control of production, resulting in greater yield, quality and price of the product. The optical and mechanical properties of polyethylene films, of four commercial origins, were evaluated, exposed outdoors, and to an accelerated aging equipment in laboratory, with the procedures of the American Society for Testing and Material (ASTM). It was measured the transmitted light and widespread light (haze) percentage in the photosynthetically active zone (400 - 700 nm) with a LI-190SA sensor. The mechanical properties, elongation and tension to the maximum load, were measured with the INSTROM machine, model 1125. The samples were exposed outdoors in Buenos Aires, Argentina, during two years, and were withdrawn every six months. It was considered the criterion that a plastic material is aged, and therefore it is not suitable for use, when the held value of a characteristic property is 50% or less than the initial values. It was determined the correlation factor between the natural and the accelerated exposition trial. It was studied the evolution of properties in terms of the accumulated solar radiation. The optical properties were not significantly modified during the exposition, so it was concluded that the evolution of the mechanical properties was more representative in the aging process.

Key words: plastic, optical properties, mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

La transmisión de la radiación solar a través de la cubierta influye tanto en el balance energético

del invernadero como en la actividad fotosintética del cultivo, ya que el material de cobertura provoca una reducción en la intensidad de la radiación y una modificación en la distribución espectral (Goldberg *et al.*, 1996). Esta reducción depende principalmente del material utilizado como cobertura y también de los materiales utilizados en la estructura. El material de recubrimiento tiene que favorecer la entrada de la radiación solar incidente y al mismo tiempo limitar, especialmente en horas nocturnas, la

¹Recepción de originales: 30 de abril de 1999.

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina. E-mail: margold@ciudad.com.ar

³Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigaciones Tecnológicas de la Industria del Plástico, Buenos Aires, Argentina.

pérdida de la energía térmica acumulada. Por ello es importante establecer para cada material la transparencia a la radiación fotosintéticamente activa y al infrarrojo, así como poder inferir su comportamiento a lo largo del tiempo, al ser expuesto a las condiciones ambientales características del lugar y al manejo del cultivo (Alpi y Tognioni, 1991).

La radiación solar es un factor importante en la degradación de los materiales plásticos, fundamentalmente su componente Ultra Violeta (UV), factor preponderante en el proceso de envejecimiento (Nijskenst *et al.*, 1993).

La luz incidente es dispersada (haze) por el material, lo que hace que el flujo luminoso se distribuya con más uniformidad, disminuyendo las sombras en el interior del invernadero (Orden *et al.*, 1997). El agregado de aditivos para mejorar la calidad del plástico puede disminuir la transmisión de la radiación, pero también puede aumentar la difusión de luz en el invernadero (Alpi y Tognioni, 1991).

El film de polietileno se deteriora por tensiones originadas por la acción de los vientos, del granizo, de las variaciones de temperatura, su propio peso y los anclajes de la estructura que lo sostiene. Es necesario, por lo tanto, usar materiales resistentes y que ofrezcan garantías de estabilidad, pero que al mismo tiempo no disminuyan la iluminación (Alpi y Tognioni, 1991).

Se considera que un material plástico está envejecido después de su exposición a la radiación solar, o en equipos de envejecimiento acelerado, y por lo tanto no es apto para su uso, cuando retiene el 50% o menos de las propiedades ópticas o mecánicas evaluadas (Ramirez *et al.*, 1995).

Los requerimientos tecnológicos actuales para llevar adelante inversiones como la construcción y manejo de invernáculos son mayores que en el enfoque tradicional. Con la utilización del invernáculo el tema se complica y el productor pasa

a tener una necesidad de soporte técnico mucho más marcada (Benencia *et al.*, 1997).

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar las propiedades mecánicas y ópticas de los films de polietileno a través del tiempo, expuestos a la intemperie y en ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio; 2) determinar los factores de correlación entre el ensayo de exposición natural y el acelerado para predecir sobre la base de estos resultados, el tiempo de vida útil de un plástico en condiciones climáticas semejantes realizando sólo ensayos de laboratorio; y 3) analizar la evolución de las propiedades mecánicas y ópticas en función de la radiación solar acumulada para independizarla del período de tiempo en el que se realizó el ensayo (1996-1998) y así poder generalizar el resultado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron cuatro films de polietileno transparente, térmico, de baja densidad y espesores comprendidos entre 96-144 micrómetros (μm), proporcionados por cuatro empresas que comercializan esos materiales en la Argentina. Se codificaron las muestras para mantener en reserva sus procedencias. Se trabajó con materiales nuevos, no sometidos a ningún proceso de envejecimiento previo (Cuadro 2).

Para la exposición de las muestras a la intemperie, se siguieron las normas dispuestas por la American Society for Testing and Material (ASTM) D1435. De acuerdo a dichas normas se colocaron los films de polietileno en marcos de madera sobre bastidores de aluminio, con una inclinación de 45° , orientados hacia el Norte. Las muestras se expusieron a la intemperie en Argentina, Buenos Aires, a $34^\circ 33' 49''$ de Latitud Sur y $58^\circ 27'$ de Longitud Oeste, durante dos años, a partir del 22.02.96 y se estableció un cronograma de retiro de las mismas cada seis meses.

Por su parte, el equipo de envejecimiento acelerado Q.U.V. Panel, trabaja de acuerdo con las normas ASTM D4329 y ASTM G53, utilizando tubos fluorescentes UVB 313, con un pico máximo de radiaciones ultravioletas en los 330 nanómetros (nm), a humedad saturada, con ciclos de 4 h de radiación UV a 60 °C y 4 h de condensación de vapor de agua a 40 °C. Las muestras expuestas fueron retiradas cada 100 h de exposición, hasta completar las 1.000 h.

Evaluación de las propiedades ópticas

Para medir la transmitancia de acuerdo con las normas ASTM D1003, la luz proveniente de una lámpara halógena de tungsteno cuyo espectro es similar al del sol, se condujo por un tubo colimador a una esfera integradora, cuyo interior es una superficie difusora perfecta. La radiación fotosintéticamente activa (400-700 nm) se midió con un sensor cuántico LI-190SA ubicado sobre la esfera, en ángulo recto a la dirección de la luz incidente.

La transmitancia luminosa total T se calculó como:

$$T = I_2 / I_1$$

donde I_1 es la radiación registrada en la esfera integradora sin la muestra, e I_2 es la radiación registrada en la esfera integradora con la muestra.

Para evaluar la luz dispersada (haze), fue necesario excluir del haz de luz transmitida, la que pasa en dirección normal a la muestra. Para ello se habilitó una trampa de luz ubicada a 180° de la entrada de la esfera integradora.

La luz dispersada H (haze) se calculó de acuerdo a la norma ASTM D1003, como:

$$H = (I_4 / I_2) - (I_3 / I_1)$$

donde I_4 es la radiación medida en la esfera con la muestra y la trampa habilitada, e I_3 sin la

muestra y con la trampa habilitada. Como las muestras no son homogéneas en toda su superficie, se midieron en diferentes zonas de las mismas, las radiaciones I_1 , I_2 , I_3 e I_4 . A los efectos de tener en cuenta la influencia de la variabilidad en el proceso de muestreo, con el test de "Student" se calculó el mínimo número de muestras para trabajar con un determinado error probable a un nivel de precisión del 10% de la media. Para cada muestra se repitió la medida treinta veces y se calculó el promedio y su desviación standard.

El porcentaje retenido de transmisión luminosa DT se determinó como:

$$\Delta T = (T_t / T_o) 100$$

donde T_t es la transmitancia de las muestras al tiempo t de exposición en condiciones naturales o de laboratorio (%) y T_o la transmitancia inicial de las mismas sin exponer (%).

Análogamente se calculó el porcentaje de retención del haz ΔH como:

$$\Delta H = (H_t / H_o) 100$$

Evaluación de las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas, tensión y elongación a la carga máxima, se midieron con la máquina INSTRON modelo 1125, del laboratorio del Centro de Investigaciones Tecnológicas de la Industria del Plástico (CITIP), del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

Se define la tensión elástica t sobre una superficie interior de un cuerpo deformable al cociente entre la fuerza ejercida sobre dicha superficie y el valor de la superficie. La unidad para la tensión en el sistema internacional es el Pascal (Pa). En la deformación elástica, después de cesar la acción de la fuerza exterior el cuerpo toma las dimensiones y forma anteriores, pero cuando los valores de las cargas o fuerzas exteriores sobrepasan el llamado límite de elasticidad

dad, aparece otro tipo de deformación llamada deformación plástica, la cual no desaparece por completo al cesar la acción de las fuerzas. La deformación plástica se produce con más facilidad que la elástica. Aumentando constantemente la carga se llega a la rotura y el valor de la tensión correspondiente se denomina tensión a la carga máxima.

Se define la elongación a la carga máxima ΔL , en un tiempo t de exposición en condiciones naturales o aceleradas, a la diferencia entre la longitud natural de la muestra L_n sin exponer y la longitud de la muestra L_t , sometida a la tensión a la carga máxima:

$$\Delta L = L_t - L_n$$

El porcentaje retenido de tensión a la carga máxima se calculó como:

$$\Delta \tau_{\%} = (\tau_t / \tau_o) 100$$

donde τ_t es la tensión a la carga máxima al tiempo t de exposición en condiciones naturales o de laboratorio y τ_o la tensión a la carga máxima sin exponer.

Análogamente el porcentaje retenido de la elongación a la carga máxima se calculó como:

$$\Delta L_{\%} = \{(L_t - L_n) / (L_o - L_n)\} \cdot 100$$

donde $(L_t - L_n)$ es la elongación a la carga máxima al tiempo t de exposición, en condiciones naturales o de laboratorio y $(L_o - L_n)$ es la elongación a la carga máxima sin exponer. Estas medidas fueron repetidas varias veces y se calcularon en cada caso los valores medios y su desviación standard.

Se graficaron los porcentajes retenidos de transmisión (ΔT), de haz (ΔH), la tensión a la carga máxima ($\Delta \tau$) y elongación a la carga máxima (ΔL) en función del tiempo para los dos tipos de ensayos, naturales y de envejecimiento acelerado. A los efectos de determinar el tiempo t , al

cabo del cual cualquiera de las propiedades mencionadas se redujo a un 50% de su valor inicial, se calculó la curva de tendencia que mejor ajustó a los valores experimentales.

Se calcularon los factores de correlación f como el cociente entre el tiempo necesario para producir un deterioro determinado en el ensayo de exposición natural t^n y el necesario para producir un deterioro en el ensayo de envejecimiento acelerado en laboratorio t^a :

$$f = t^n / t^a$$

Se expresaron los resultados en función de la radiación solar acumulada, utilizando datos suministrados por el Servicio Meteorológico de Buenos Aires.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentajes retenidos de la transmitancia luminosa

En la Figura 1 se muestra la evolución del porcentaje retenido para la transmitancia luminosa en ensayos de envejecimiento natural y acelerado para los films de polietileno estudiados. Se observa que el porcentaje de retención para la transmitancia luminosa no varió significativamente durante el ensayo, para ninguna de las muestras. Para la muestra 4, si bien se observa una reducción del 15%, la línea indica que ese valor tiende a permanecer constante. Por lo tanto, se concluye que la transmitancia luminosa no es una propiedad apta para la evaluación del envejecimiento de los films de polietileno, durante el tiempo en que fueron expuestas a las condiciones naturales y de envejecimiento acelerado, en este ensayo.

Porcentajes retenidos de haz

En los Cuadros 1a y 1b se muestran los porcentajes de luz dispersada para las distintas muestras en envejecimiento acelerado y en exposición a la intemperie respectivamente.

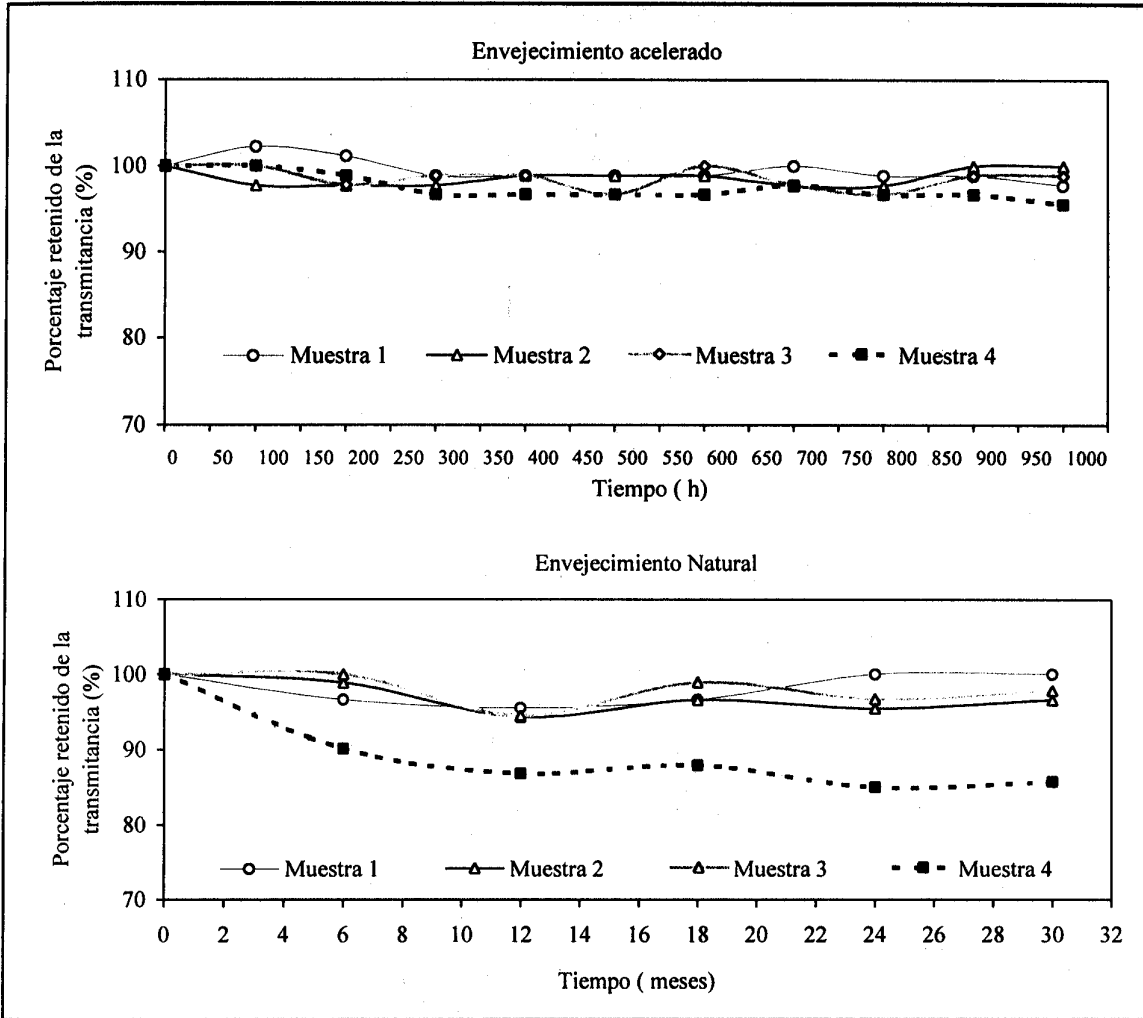


Figura 1. Porcentaje de retención para la transmitancia luminosa.
 Figure 1. Retention percentage of the transmittance luminous.

Cuadro 1a. Valores de luz difusa (haze) en el envejecimiento acelerado

Table 1a. Values of haze in the accelerated ageing

Tiempo (horas)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
0	10 ± 1	12 ± 1	8 ± 1	8 ± 1
100	9 ± 1	10 ± 1	Despreciable	7 ± 1
200	7 ± 1	11 ± 1	Despreciable	8 ± 1
300	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

Cuadro 1b. Valores de luz difusa (haze) en el envejecimiento a la intemperie**Table 1b . Haze values of outdoor ageing**

Tiempo (meses)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
0	10 ± 1	12 ± 1	8 ± 1	8 ± 1
6	10 ± 1	11 ± 1	6 ± 1	9 ± 1
12	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

Se observa que los porcentajes de luz dispersada (haze) de las diferentes muestras se mantuvieron prácticamente constantes en los primeros tiempos de exposición, entre el 6% y el 10%.

A partir de las 300 h de envejecimiento artificial y 6 meses a la intemperie, los valores resultaron despreciables en el orden de magnitud del error experimental. Es importante notar que de acuerdo con las normas ASTM, las muestras no pueden ser consideradas difusoras, ya que exhiben valores de haze inferiores al 30%.

Porcentajes retenidos de tensión y elongación a la carga máxima

En las Figuras 2 y 3 se exhibe, la evolución del porcentaje retenido de tensión y elongación a la carga máxima, en ensayos de envejecimiento natural y acelerado.

Se observa que al cabo de 30 meses de exposición natural y de 1.000 h de envejecimiento artificial la muestra 4 no ha modificado significativamente sus propiedades mecánicas, mientras que las muestras 1 y 2 han alcanzado valores de porcentaje de retención por debajo del 50%. El porcentaje retenido de tensión para la muestra 3 alcanzó el 50% en condiciones naturales, pero no al cabo de las 1.000 h de exposición artificial. Nijksenst *et al.*, (1993) en un estudio comparativo de envejecimiento de un film de polietileno en laboratorio y en invernadero, concluyeron que la evolución del alargamiento máximo y del esfuerzo máximo es característica de las condiciones de envejecimiento. Ramírez *et al.* (1995)

usando los valores obtenidos de los test fisicomecánicos (tensión y elongación) observaron también que la disminución de estas propiedades es función del tiempo de exposición natural y del tiempo de exposición en envejecimiento acelerado para diferentes equipos utilizados en el ensayo.

En el Cuadro 2 se indican los valores del tiempo de exposición al cabo de los cuales las muestras han reducido sus propiedades mecánicas al 50% del valor inicial, en condiciones naturales (t^n) y de envejecimiento acelerado (t^a). En la última columna se representa la radiación solar acumulada en los tiempos de envejecimiento natural.

Factores "f" de correlación

En el Cuadro 3 se exhiben los factores de correlación para cada propiedad, obteniéndose valores iguales dentro del margen de error experimental, independiente del film de polietileno utilizado.

El valor 9 del factor de correlación para la tensión indica que para cada muestra y para esta máquina Q.U.V. Panel, el tiempo de exposición a la intemperie para alcanzar el deterioro de esta propiedad resulta ser 9 veces mayor que el tiempo de exposición artificial.

El valor de este factor depende de las condiciones climáticas en las que se realicen los ensayos, sin embargo, la estabilidad de estos factores permitirá usar esta máquina con ensayos de envejecimiento artificial de un film de polietileno

no evaluado, de cualquier procedencia y predecir aproximadamente el tiempo en que sus propiedades se reducirán a un 50%. El factor de correlación para la elongación es, en promedio, similar al factor de correlación de la tensión.

En la última columna figuran los cuocientes entre la radiación solar acumulada en el ensayo natural a la intemperie durante el tiempo t^a y el tiempo t^a de envejecimiento acelerado. Expresar el resultado en función de la radiación acumulada es útil porque lo independiza de las variaciones climáticas estacionales, ya que indica el

máximo de radiación que puede recibir una muestra de film de polietileno de cualquier procedencia, antes de deteriorarse.

CONCLUSIONES

De las cuatro muestras evaluadas, durante treinta meses en el proceso de envejecimiento natural y mil horas de envejecimiento acelerado, ninguna mostró deterioro en sus propiedades ópticas, sólo dos de ellas redujeron sus propiedades mecánicas al 50% de su valor inicial, y una tercera sólo redujo la tensión a la carga máxima.

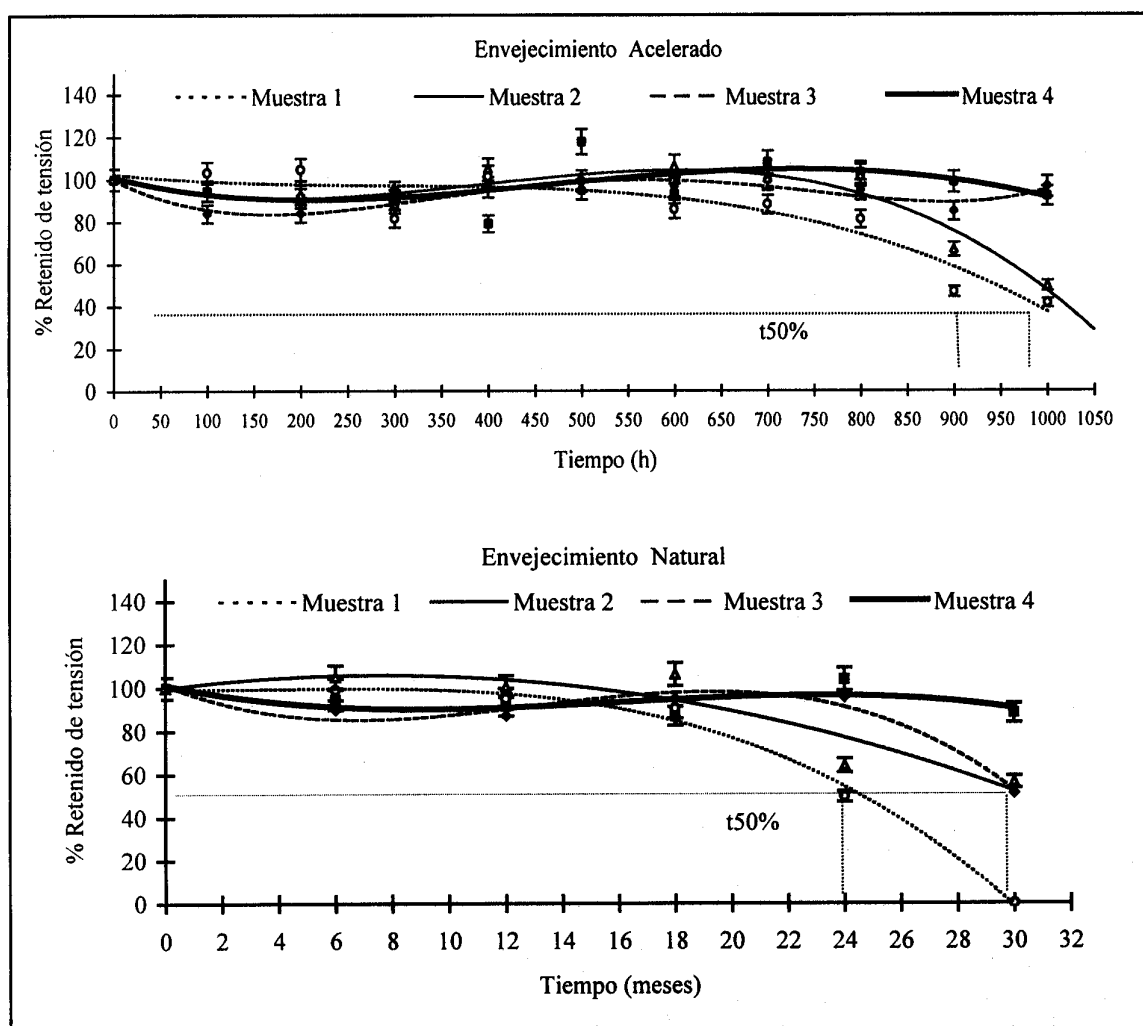


Figura 2. Porcentaje retenido para la tensión.
Figure 2. Retention percentage for the tension.

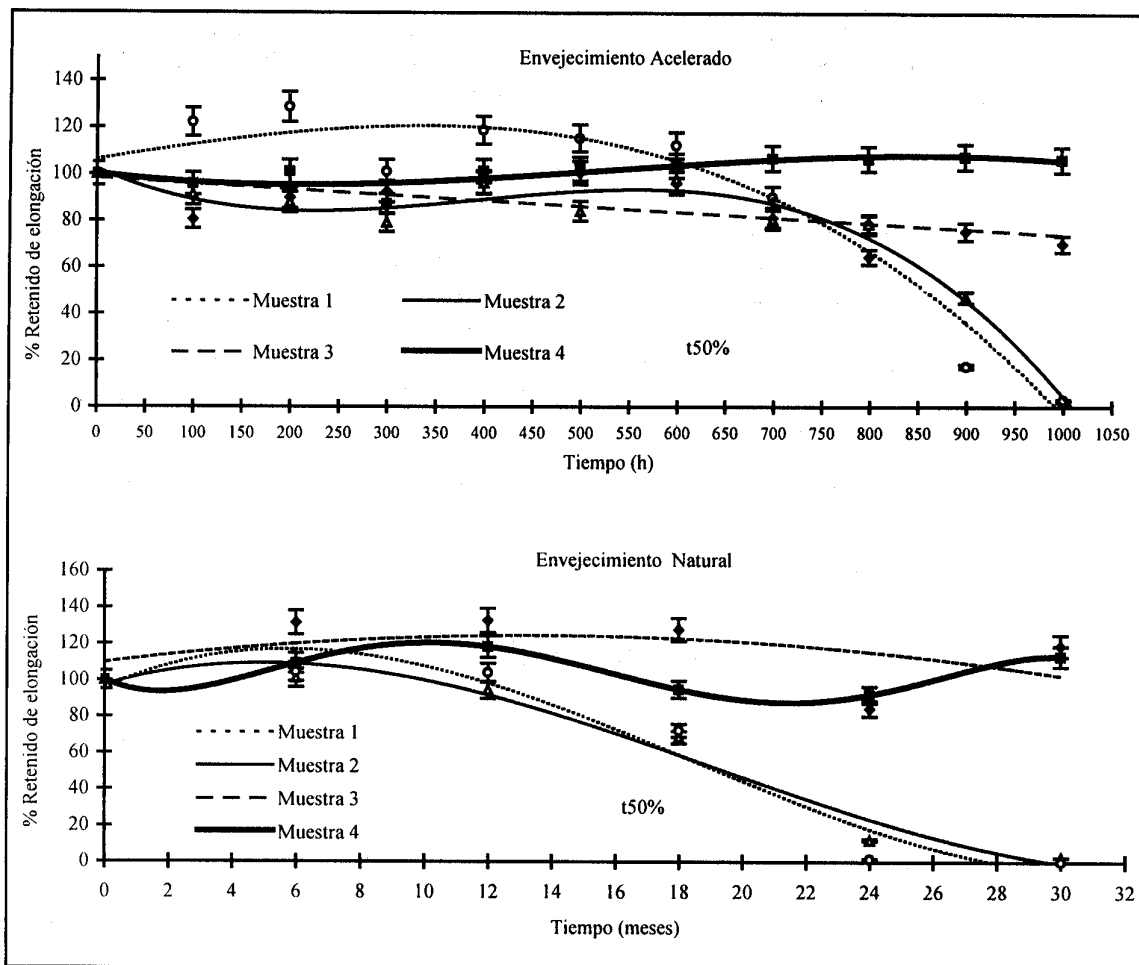


Figura 3. Porcentaje retenido para la elongación.
Figure 3. Retention percentage for the elongation.

Cuadro 2. Tiempo requerido para que las muestras reduzcan sus propiedades al 50%

Table 2. Time spent for the samples to reduce their properties by 50%

Muestra	Espesor (μm)	Propiedad	t ^a (horas)	t ⁿ (meses)	Radiación solar acumulada (kcal cm^{-2})
1	131 \pm 3	<i>Elongación</i>	860	19,5	181,1
2	141 \pm 9		900	19,5	181,1
3	96 \pm 6		-	-	-
4	144 \pm 13		-	-	-
1	131 \pm 3	<i>Tensión</i>	940	24,5	230,5
2	141 \pm 9		1.000	30	324,0
3	96 \pm 6		-	30	324,0
4	144 \pm 13		-	-	-

t^a es el tiempo necesario para producir un deterioro en el ensayo de envejecimiento acelerado y tⁿ en condiciones naturales.

Cuadro 3. Factores de correlación para las propiedades mecánicas**Table 3. Correlation factors for the mechanical properties**

Propiedad	Muestras	Factor f de correlación	Radiación acumulada por hora de envejecimiento artificial (kcal cm ⁻² h ⁻¹)
Elongación	1	8,3	0,211
	2	8,0	0,201
Tensión	1	9	0,237
	2	11	0,324

Se debe hacer notar el excelente comportamiento de la muestra 3, la última en reducir la tensión a la carga máxima, a pesar de ser la de menor espesor, sólo superada por la muestra 4, que no se deterioró en el período en que duró el ensayo. Con estas muestras se obtuvo un factor de correlación que permitirá estimar la duración de un film de polietileno en condiciones naturales a partir de ensayos de envejecimiento acelerado para ser usados en la región del gran Buenos Aires. Se concluye que en el proceso de envejecimiento la evolución de las propiedades mecánicas es más representativa que la de las propiedades ópticas, ya que estas últimas no se modificaron durante la exposición. Es difícil llegar a una

correlación entre envejecimiento artificial y natural, ya que todos los factores climáticos que afectan el envejecimiento de los films no pueden ser reproducidos fácilmente en condiciones de laboratorio.

Para que el productor agropecuario pueda hacer un análisis ajustado de una parte importante de los elementos necesarios para la inversión, se concluye que una evaluación objetiva relativa a la modificación de las propiedades de los films de polietilenos para coberturas de invernaderos le permitirá estimar los cambios a lo largo del tiempo en su durabilidad y transparencia.

RESUMEN

La utilización de plásticos para invernaderos permite la realización de cultivos bajo cubierta en épocas desfavorables para el cultivo a campo, con un mayor control de la producción, que redundará en mayores rendimientos, calidad y precio del producto. Se evaluaron las propiedades ópticas y mecánicas de films de polietileno, de cuatro procedencias comerciales, expuestas a la intemperie y en equipo de envejecimiento acelerado, en laboratorio, siguiendo las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM). Se midió el porcentaje de luz transmitida y el de luz difusa (haze) en la zona fotosintéticamente activa (400-700 nm) con un sen-

sor LI-190SA. Las propiedades mecánicas, elongación y tensión a la carga máxima, fueron medidas con la máquina INSTRON modelo 1125. Las muestras fueron expuestas a la intemperie en Buenos Aires, Argentina, durante dos años y se estableció un programa de retiro de las mismas cada seis meses. Se consideró el criterio que considera que un material plástico está envejecido y, por lo tanto, no es apto para su uso, cuando el valor retenido de una propiedad característica es un 50% o inferior a los valores iniciales. Se determinó el factor de correlación entre el ensayo de exposición natural y acelerado. Se estudió la evolución de las propiedades en fun-

ción de la radiación solar acumulada. Las propiedades ópticas no se modificaron significativamente durante la exposición, por lo que se concluyó que la evolución de las propiedades me-

cánicas es más representativa en el proceso de envejecimiento.

Palabras claves: plásticos, propiedades ópticas y mecánicas.

LITERATURA CITADA

- ALPI, A. y TOGNIONI, F. 1991. Cultivo en invernadero. Actual orientación científica y técnica. 3^{era} ed. Madrid, España. Ediciones Mundiprensa. 343 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D1003. 1977. Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. Philadelphia, USA. 06(01): 519-526.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D1435. 1979. Standard Recommended Practice for Outdoor Weathering of Plastics. Philadelphia, USA. 08(02): 648-653.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D4329. 1979. Standard Recommended Practice for Operate Light and Water Apparatus Fluorescent UV Condensation Type For Exposure of Plastics. Philadelphia, USA. 08(03): 1-5.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G53. 1996. Standard Recommended Practice for Operate Light and Water Apparatus Fluorescent UV Condensation Type for Exposure of non metallic materials. Philadelphia, USA. 14(04): 455-463.
- BENENCIA, R.; DURAND, P.; SOUZA, C.; FEITO, C.; MARGIOTA, E. Y CATTANEO, C. 1997. Área Hortícola Bonaerense. 1^{era} ed. Buenos Aires, Argentina. La Colmena. p. 81-92.
- GOLDBERG, M.; ORDEN, S.; MASCARINI, L. Y SIERRA, E. 1996. Transmisión Espectral en la Banda del PAR de las Cubiertas Plásticas para Invernaderos. Revista de la Asociación Argentina de Horticultura 15 (38): 51-54.
- HENNINGER, F. Y PEDRAZZSETTI, E. 1992. Evaluación de la estabilidad a la luz de los films para invernadero. Comité International des Plastiques en Agriculture. Francia. Plasticulture N° 86 p. 6-19.
- NIJSKENST, J.; DELTOUR, J.; ALBRECHT, E.; GRATRUD, J. Y FEUILLOEY, P. 1993. Estudio comparativo del envejecimiento de un filme de polietileno en laboratorio y en invernadero. Comité International des Plastiques en Agriculture. Francia. Plasticulture. N° 87 p. 11-20.
- ORDEN, S.; DE OTO, D.; GOLDBERG, M. Y MASCARINI, L. 1997. Transmitancia luminosa, espectral y haze de mallas de sombreado para invernaderos. 7° Reunión Argentina y 1ª Latinoamericana de Agrometeorología. Buenos Aires, Argentina. Abril 28-30. p. 53-54. (Resumen expandido).
- RAMÍREZ, E.; MARTÍNEZ, C.; SÁNCHEZ, L. Y BALDERAS, C. 1995. Previsión de la duración de la vida útil de los filmes para la cubierta de invernaderos con la ayuda de diversos equipos de envejecimiento artificial acelerado. Comité International des Plastiques en Agriculture. París, Francia. Plasticulture. N° 105 p. 5-12.