

03-027

INFLUENCE OF THE MOULDING TEMPERATURE IN PEA AND SOY PROTEIN-BASED BIOPLASTICS

Rubio-Valle, José Fernando ⁽¹⁾; *Jimenez-Rosado, Mercedes* ⁽²⁾; *Bouroudian, Estrelle* ⁽²⁾; *Perez-Puyana, Victor* ⁽²⁾; *Romero, Alberto* ⁽²⁾

⁽¹⁾ Univerisdad de Sevilla, ⁽²⁾ Universidad de Sevilla

The elaboration of bioplastics from renewable polymers, such as proteins, is a field with high potential for industrial applications such as packaging, agriculture, etc. This study evaluates two different raw materials to elaborate these bioplastics by injection molding: soy protein isolate (SPI) and pea protein isolate (PPI). Both proteins are by-products, which would lower the price of processed bioplastics. However, it is necessary to control their properties in the production, so that they can replace conventional plastics. In this way, the main objective of this work was to compare the properties of SPI and PPI bioplastics processed at different mold temperatures (70 and 130 °C). Thus, mechanical properties, transparency and water uptake capacity were evaluated. The results show the potential of these raw materials to obtain bioplastics that can replace conventional plastics, although it is necessary to choose the correct processing conditions to obtain the desired final properties.

Keywords: bioplastics; soy protein; pea protein; mold temperature; mechanical properties

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE MOLDEO EN BIOPLÁSTICOS A BASE DE PROTEÍNA DE SOJA Y GUISANTE

La elaboración de bioplásticos a partir de polímeros renovables, como las proteínas, es un campo de enorme potencial para aplicaciones industriales como el envasado, la agricultura, etc. Este estudio evalúa dos materias primas diferentes para elaborar estos bioplásticos mediante moldeo por inyección: aislado de proteína de soja (SPI) y aislado de proteína de guisante (PPI). Ambas proteínas son subproductos, lo que abarata el precio de los bioplásticos procesados. Sin embargo, es necesario controlar sus propiedades durante el procesado para que puedan reemplazar los plásticos convencionales. De esta forma, el objetivo principal de este trabajo es comparar las propiedades de los bioplásticos SPI y PPI procesados a diferentes temperaturas de molde (70 y 130 °C). Por lo tanto, se evaluaron las propiedades mecánicas, la transparencia y la capacidad de absorción de agua. Los resultados muestran el potencial de estas materias primas para obtener bioplásticos que pueden reemplazar al plástico convencional, aunque es necesario elegir las condiciones de procesamiento correctas para obtener las propiedades finales deseadas.

Palabras clave: bioplásticos; proteína de soja; proteína de guisante; temperatura del molde; propiedades mecánicas

Correspondencia: José Fernando Rubio Valle jrvalle@us.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El plástico se ha convertido en uno de los materiales preferidos y más utilizado en la industria durante el siglo pasado, los productos derivados del petróleo, tienen la capacidad de adoptar multitud de formas y de propiedades, lo que hace que su rango de aplicación sea muy elevado, todo esto a costes relativamente económicos, estos precedentes provocan una producción masiva de los mismos (Thompson et al., 2009). Estudios recientes han documentado, que al menos desde la década de 1950, se han producido más de 9,1 mil millones de toneladas de plástico, de los cuales al menos 7 mil millones ya no se usan, es decir, se han convertido en residuos lo que está generando un problema creciente que amenaza no solo a los suelos, sino también a los mares y océanos (MacArthur et al., 2016). De ellos, la mayoría no se ha reciclado llegando a tardar de degradarse hasta 1000 años, tiempo en el que puede causar daños múltiples en los ecosistemas (Imhof et al., 2013).

Una de las alternativas más prometedoras para este gran problema es el desarrollo de bioplásticos que sean biodegradables, que provengan de fuentes naturales y renovables. De esta forma, se evitaría la contaminación por acumulación de plásticos, además se contaría con recursos suficientes para generarlos (Krishna y Reddy, 2018). Ejemplos claros de estos bioplásticos son PLA, PGA o el copolímero PLGA. Sin embargo, el problema de reemplazar los plásticos convencionales con los mencionados anteriormente es que las grandes empresas son reacias a hacerlo, debido al incremento en el precio que implica en el producto final (Romero Mujalli, 2019).

Otra opción que está ganando interés últimamente es el uso de residuos o subproductos de la industria agroalimentaria, muchos de ellos ricos en polisacáridos y proteínas. De hecho, la extracción de las proteínas de estas materias primas tiene un uso potencial en la aplicación para producir bioplásticos (European bioplastics, 2016). Estos residuos o subproductos, por definición tienen poco valor añadido, por lo que su uso para producir bioplásticos genera un gran beneficio social, ambiental y económico (Gupta y Nayak, 2015; Peelman, 2013). En esta área, se han llevado a cabo estudios con diferentes residuos y subproductos ricos en proteínas, como el aislado de proteína de soja, subproducto proveniente de la producción de aceite de soja o el aislado de proteína de guisante, residuo proveniente del control de calidad del guisante comercializado en los alimentos (Carvajal-Piñero, 2019; Thakur, 2017). Aunque ambos son una opción potencial para reemplazar los plásticos convencionales, es importante optimizar sus propiedades ya que estas van a depender de la aplicación que tengan. Para ello, se pueden realizar modificaciones tanto en la extracción de la proteína, así como en la incorporación de diferentes aditivos para lograr una mayor reticulación, hasta el cambio de algunos de los parámetros en la fabricación de estos (Gamero et al., 2019; Álvarez-Castillo et al., 2018; Saenghirunwattana et al., 2014). Una de las técnicas más utilizadas es la inyección (técnica comúnmente utilizada para obtener bioplásticos), ya que con un simple cambio en los parámetros de inyección podemos obtener diferentes propiedades mecánicas y morfológicas sin la necesidad de agregar aditivos adicionales, ni etapas extras en el proceso; evitando así por tanto un mayor coste y, por consiguiente, un aumento del precio final del producto (Perez-Puyana et al., 2016).

Este trabajo es parte de la línea de investigación “desarrollo de materiales superabsorbentes y biodegradables”, perteneciente al grupo de investigación “Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes” (TEP-229). En este contexto, se desarrollaron matrices biodegradables a base de aislados de proteínas de guisante y de soja, las cuales fueron procesado por moldeo de inyección utilizando distintas temperaturas del molde.

1.1 Bioplásticos

Los bioplásticos son plásticos cuya virtud es el ser biodegradables y el ser obtenidos a partir de materias primas renovables (Remar, 2011). De esta forma, el término bioplástico hace referencia a una doble sostenibilidad, por un lado, se consideran bioplásticos a aquellos provenientes de fuentes renovables, y, por otro lado, atienden a aquellos que tienen una degradabilidad natural eliminando así las acumulaciones de basura. Aparecen, por tanto, dos grandes categorías de bioplásticos con distintas propiedades y rangos de aplicación (Emadian et al., 2017). Hay bioplásticos que combinan ambas características, procediendo así de fuentes renovables y teniendo alta biodegradabilidad.

La biodegradabilidad de un polímero depende de la estructura de dicho polímero y es independiente de la naturaleza del mismo. La consideración de un polímero como biodegradable lo regulan las normas EN 13432, 33 ASTM D640034 e ISO 17088. Así se pueden obtener polímeros procedentes de recursos fósiles que se considerarán biodegradables, según lo estipulado en estas normas, y polímeros procedentes de biomasa que no lo sean. Por otro lado, sólo se consideran bioplásticos a aquellos que provienen de biomasa o materias primas renovables. Este tipo de material tiene diversas ventajas como el ahorro energético y la reducción de la huella de carbono. Además, no contiene aditivos perjudiciales para la salud (como el bisfenol A), reduce los residuos no biodegradables y proviene de materias primas renovables (Wijayanti et al., 2016). De esta forma, los bioplásticos constituyen un sector de interés creciente en los últimos años en sectores industriales como envases, automoción, alimentación, sector eléctrico-electrónico, construcción, agricultura, medicina y textil. Este interés proviene de la necesidad de reducir los desechos plásticos que contaminan el medio ambiente y están causando problemas de salud al ecosistema (Neila, 2016).

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es estudiar las diferencias encontradas entre los bioplásticos a base de proteína de soja y guisante procesados a diferentes temperaturas del molde de inyección. Para ello, se evaluaron las propiedades mecánicas, la transparencia, la capacidad de absorción de agua y la pérdida de material soluble de los diferentes bioplásticos elaborados.

3. Metodología

3.1 Materiales

En este trabajo se utilizó como materia prima un aislado de proteína de soja (SPI) suministrado por Protein Technologies International (Bélgica) con un porcentaje de materia proteica del 91% en peso. Además, se ha usado un aislado de proteína de guisante (PPI) con un porcentaje de materia proteica del 89% en peso de proteína, suministrado por Roquette (Francia). Como plastificante, se utilizó glicerol (Gly) que es suministrado por Panreac Química S.A. (España).

3.2 Procesado de los bioplásticos

Los bioplásticos basados en proteínas SPI y PPI se llevaron a cabo a través de dos pasos: mezclado y moldeo por inyección (Jiménez-Rosado et al., 2018).

En la etapa de mezclado, la proteína (SPI o PPI) y el plastificante (Gly) se homogeneizaron en una proporción 1:1 usando un mezclador rotativo PolyLab QC (Alemania). Estas materias primas se mezclaron durante 10 minutos a 50 rpm en condiciones adiabáticas (25 ± 1 °C)

para obtener las masas. Además, en esta etapa se registraron los valores de la variación del par de torque (M) y de temperatura ($\Delta T = (T - T_0) / T_0$) durante la elaboración de las distintas masas.

A continuación, las masas producto de la etapa de mezclado se procesaron utilizando un sistema de moldeo por inyección de pistón usando la inyectora MiniJet Injection System II (Alemania) para obtener bioplásticos con una geometría rectangular (60x10x1 mm³). Los parámetros utilizados en esta etapa fueron la temperatura del cilindro (40 °C), la temperatura del molde (70 y 130 °C), la presión de inyección 500 bar durante 10 segundos y la presión posterior a la inyección 200 bar durante 300 segundos. El objetivo del uso de dos temperaturas de molde fue evaluar el cambio en las propiedades de los bioplásticos ya que se considera que es un parámetro fundamental en la fabricación y, por ende, en las propiedades finales del bioplástico.

3.3. Caracterización de bioplásticos.

Los diferentes sistemas fueron caracterizados en la Universidad de Sevilla, durante el año 2019. Para comparar las propiedades mecánicas y funcionales de los bioplásticos SPI y PPI, se realizaron los siguientes ensayos.

3.3.1 Propiedades mecánicas

Primero, las propiedades mecánicas de los diferentes bioplásticos (SPI y PPI) se evaluaron mediante un ensayo de flexión a tres puntos, utilizando un analizador mecánico dinámico RSA3 (EE. UU.) Con una geometría de doble voladizo. En primer lugar, se realizó un barrido de deformación (de 0,002 a 2% de deformación) para establecer el rango de viscoelasticidad lineal a una frecuencia constante de 1 Hz y a temperatura ambiente (22 ± 1 °C). En segundo lugar, se realizó un barrido de frecuencia de 0,02 a 20 Hz dentro del rango viscoelástico lineal a temperatura ambiente. Con estos ensayos, se evaluaron el módulo elástico y la tangente de pérdida (que es la relación entre la componente viscosa y elástica) a una frecuencia constante de 1 Hz (E'_1 y $\tan(\delta)_1$, respectivamente).

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal de la marca comercial MTS Insight Eden Prairie (EE. UU.). Estas mediciones se llevaron a cabo de acuerdo con la norma ISO 527-2 (ISO-527-2, 1997), utilizando una tasa extensional de 25 mm/min a temperatura ambiente (22 ± 1 °C). De este modo, se obtuvieron la resistencia a la tracción máxima (σ_{max}), el módulo de Young (E) y la deformación hasta rotura (ϵ_{max}).

3.2.2 Capacidad de absorción de agua y pérdida de materia soluble

Se midió la capacidad de absorción de agua (CAA) y la pérdida de materia (PMS) soluble de los diferentes bioplásticos (SPI y PPI) para determinar las posibles propiedades funcionales de los mismos como materiales absorbentes. Para realizar estas mediciones, se empleó la misma metodología utilizada por Jiménez-Rosado et al. 2019. De esta forma, los bioplásticos se sumergieron en 300 mL de agua destilada en un recipiente cerrado y la capacidad de absorción de agua se obtuvo mediante la Ecuación 1.

$$CAA (\%) = (w_2 - w_3 (g)) / (w_3 (g)) \cdot 100 \quad (1)$$

Donde w_2 es el peso del bioplástico después de la absorción de agua y w_3 es el peso del bioplástico seco después de la absorción de agua. Este secado se realiza por liofilización, en un liofilizador de la marca comercial Lyoquest (España) durante 2 y 24 horas a la temperatura de -80 °C y a una presión de 0,1 Pa. Luego, la pérdida de materia soluble se calculó utilizando la Ecuación 2.

$$PMS (\%) = (w_1 - w_3 (g)) / (w_1 (g)) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde w_1 es el peso del bioplástico antes de la etapa de absorción de agua.

3.3.3 Mediciones de transparencia

Las mediciones de transparencia se realizaron en un espectrofotómetro Genesys-20 (EE.UU.). En este dispositivo, se mide la transmitancia (%) de los diferentes bioplásticos, los cuales tiene una dimensión de 1 mm de espesor, a una longitud de onda seleccionada de 600 nm. Esta longitud de onda se seleccionó debido a que el color característico de los bioplásticos es anaranjado. Además, se usa el aire como blanco (100% de transparencia). Para comparar la transparencia de diferentes bioplásticos, se calculó un índice de transparencia (IT) utilizando como referencia la siguiente en la Ecuación 3.

$$IT = (\% \text{ de transmitancia}) / (\% \text{ de transmitancia de bioplástico de referencia}) \cdot 100 \quad (3)$$

3.4 Análisis estadístico.

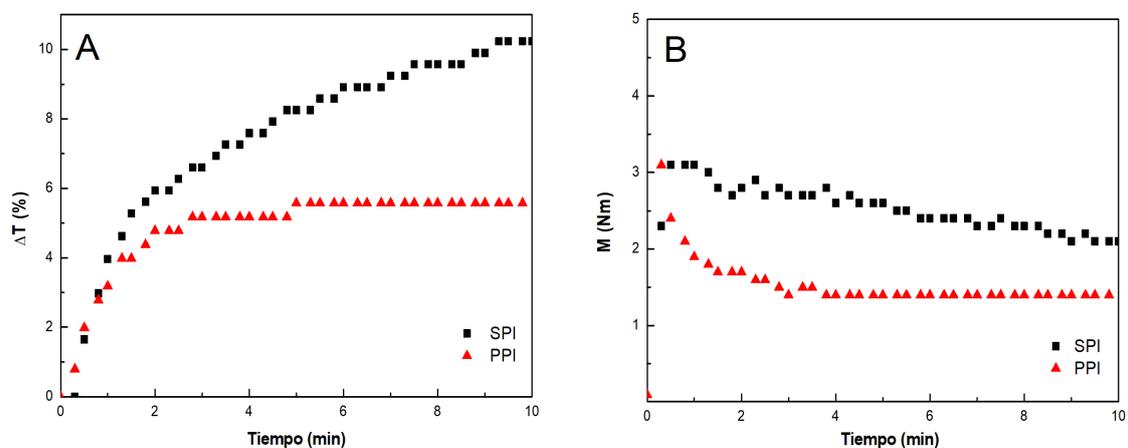
Para realizar las mediciones se empleó cinco réplicas de cada sistema. Se realizó un análisis estadístico, además de calcular la media y la desviación estándar, para este propósito se aplicó un análisis de varianza unidireccional, así como una prueba de comparación de medias (prueba t de Student), utilizando el paquete estadístico SPSS 18. Estos análisis se han representado en los diferentes ensayos con letras que indican las diferencias significativas en los parámetros.

4. Resultados

4.1 Etapa de mezclado

La Figura 1 muestra la variación en el par de torsión (M) y la temperatura (ΔT) durante la etapa de mezclado de las diferentes mezclas de SPI / PPI y usando una relación de Gly 1:1. En la Figura 1.A correspondiente a la variación del par de torsión, se observa que ambas mezclas tienen un máximo al inicio, posiblemente debido a la falta de homogeneización de las materias primas. A medida que transcurre el tiempo de mezclado, la variación en el par de torsión de los sistemas desciende gradualmente hasta alcanzar un valor donde permanece prácticamente constante. En esta última parte, donde no existe variación en el par (valor constante), se puede asegurar que las mezclas se encuentran completamente homogenizadas. Para concluir si comparamos la variación en el par de ambos sistemas, se observa que la mezcla SPI tuvo valores en el par más altos durante la mezcla, este hecho hace denotar y demuestra que esta mezcla es más compacta que la elaborada con PPI.

Figura 1. Evolución del par de torsión (M) y la temperatura (ΔT) durante la etapa de mezclado de las diferentes mezclas de SPI / PPI y usando una relación de Gly 1:1



Por otro lado, en la Figura 1.B se aprecia la variación de la temperatura durante la etapa de mezclado, se observa que ambos sistemas muestran un aumento pronunciado de la temperatura inicial cuyo valor tiende a estabilizarse con el tiempo de mezclado hasta que alcanza un valor constante. Además, los valores registrados para la mezcla SPI son más altos, probablemente debido a que necesita un mayor esfuerzo para mezclar las materias primas como se refleja en los valores de par de torque. Todo esto combinado con la apariencia macroscópica sugiere que la mezcla SPI es más compacta que la de PPI, probablemente presentara una mayor dificultad para fluir en el proceso de inyección desde el cilindro al molde.

4.2 Propiedades mecánicas

Ensayos de flexión

Los ensayos de flexión de los bioplásticos SPI y PPI a diferentes temperaturas del molde se muestran en la Tabla 1. Se puede observar que los bioplásticos de SPI muestran valores más altos de E' que los bioplásticos de PPI a la frecuencia de un 1 hercio, mencionar que existen diferencias significativas entre ellos. Sin embargo, $\tan(\delta)_1$ es mayor en los bioplásticos de PPI, lo que demuestra que estos sistemas presentan un mayor carácter viscoso, esto ya se predijo y se mencionó en los perfiles obtenidos durante la mezcla en la Figura 1.

Tabla 1. Valores del módulo elástico y tangente de pérdidas a 1 Hz (E'_1 y $\tan(\delta)_1$) para los sistemas elaborados de SPI y PPI a las distintas temperaturas del molde de inyección 70 y 130 °C respectivamente

Sistemas		E'_1 (MPa)	$\tan(\delta)_1$
SPI	70 °C	60,1 ^a	0,282 ^A
	130 °C	79,7 ^b	0,299 ^B
PPI	70 °C	17,4 ^c	0,321 ^C
	130 °C	42,9 ^d	0,232 ^D

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes

Por otro lado, si observamos los resultados entre las diferentes temperaturas del molde de inyección usado para los distintos sistemas, parece que un aumento en la temperatura del molde durante la inyección mejora las propiedades de flexión de los bioplásticos, tanto del SPI como del PPI. Esto se atribuye a una mayor reticulación de las proteínas, la cual esta favorecida por el empleo de una temperatura más alta.

Ensayos de tracción

En la Tabla 2 se muestran los valores de los tres parámetros obtenidos de los ensayos de tracción a los bioplásticos elaborados con SPI y PPI: resistencia a la tracción máxima (σ_{max}), módulo de Young (E) y deformación a la rotura (ϵ_{max}). En primer lugar, se puede observar que los bioplásticos SPI muestran mejores propiedades mecánicas (mayor σ_{max} y ϵ_{max}) a la misma temperatura del molde que los bioplásticos PPI, siendo esta diferencia más significativa a cuando utilizamos la temperatura del molde de inyección de 130 °C. Estos resultados podrían deberse a una mejor estructuración de los bioplásticos de SPI al tener un mayor porcentaje de proteínas (91% frente a 89%de proteína en peso de PPI).

Tabla 2. Valores de tangente de resistencia a la tracción máxima (σ_{max}), módulo de Young (E) y deformación a la rotura (ϵ_{max}) para los sistemas elaborados de SPI y PPI a las distintas temperaturas del molde de inyección 70 y 130 °C respectivamente

Sistemas		σ_{max} (MPa)	E (MPa)	ϵ_{max} (%)
SPI	70 °C	0,85 ^a	7,11 ^A	38,6 ^α
	130 °C	2,73 ^b	16,91 ^B	147,1 ^β
PPI	70 °C	0,48 ^c	10,92 ^C	8,3 ^γ
	130 °C	1,53 ^d	10,64 ^D	72,8 ^δ

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes

Entre las diferentes temperaturas del molde, se observa que los bioplásticos SPI procesados a 130 °C tienen las mejores propiedades mecánicas, en términos de mayores valores de σ_{max} , E y ϵ_{max} que los sistemas elaborados con PPI o los sistemas de SPI elaborados una temperatura del molde de 70 °C. Una vez más, esto puede ser debido posiblemente a una mejor reestructuración de las cadenas de polímeros que forman su estructura. Por último, se observa que los módulos elásticos (E) obtenidos en los sistemas elaborados con PPI no se ven afectados por la temperatura del molde de inyección, no encontrándose diferencias significativas entre los sistemas elaborados utilizando una temperatura del molde de 70 °C y los sistemas utilizando una temperatura del molde de inyección de 130 °C.

4.3 Capacidad de absorción de agua y pérdida de materia soluble

Los resultados de los ensayos de capacidad de absorción de agua (CAA) de los sistemas elaborados y medidos a 2 y 24 h se muestran en la Tabla 3. Se observa que el bioplástico de SPI procesado a 70 °C, es el que muestra mayor capacidad de absorber agua, pudiéndose considerar como un sistema superabsorbente, ya que tiene la capacidad de absorber más de un 1000% de su propio peso (Ramazani-Harandi et al., 2006), siendo este sistema más alto que los otros bioplásticos procesados, tanto a las 2 como a las 24 h. Este efecto puede ocurrir porque la cinética de absorción de agua es más rápida que la pérdida de materia soluble, lo que significa que esta última no se completa hasta las 2 h (Guerrero et al., 2019 y Jimenez-Rosado et al., 2019)

Tabla 3. Valores de capacidad de absorción de agua (CAA) para los sistemas elaborados de SPI y PPI a las distintas temperaturas del molde de inyección 70 y 130 °C respectivamente

Sistemas		CAA 2 h (%)	CAA 24 h (%)
SPI	70 °C	1687 ^a	3080 ^A
	130 °C	454 ^b	586 ^B
PPI	70 °C	656 ^c	937 ^A
	130 °C	321 ^b	338 ^C

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes

Otro efecto interesante es que los bioplásticos procesados a 70 °C (SPI o PPI) tienen valores de capacidad de absorción de agua más altos que los procesados a 130 °C. Estos resultados están en consonancia con los resultados obtenidos en propiedades mecánicas, ya que los bioplásticos con mejores propiedades mecánicas son menos susceptibles al hinchamiento, por lo que su capacidad de absorción de agua es menor. Sin embargo, los bioplásticos de PPI, que eran los que tenían las peores propiedades mecánicas, no tienen una gran capacidad de absorción y, en ningún caso, son superabsorbentes. Esto podría ocurrir por dos efectos: (i) pueden no presentar suficiente resistencia mecánica para resistir

el aumento de volumen, y (ii) tienen una menor cantidad de ácidos glutámico y aspártico en su estructura, que son los aminoácidos más probables para crear enlaces de hidrógeno con agua.

Tabla 4. Valores de pérdida de material soluble (PMS) para los sistemas elaborados de SPI y PPI a las distintas temperaturas del molde de inyección 70 y 130 °C respectivamente

Sistemas		PMS 2 h (%)	PMS 24 h (%)
SPI	70 °C	56,8 ^a	59,8 ^A
	130 °C	54,3 ^b	58,9 ^B
PPI	70 °C	59,1 ^c	78,8 ^C
	130 °C	54,4 ^b	56,2 ^D

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes

Los resultados de los ensayos de pérdida de material soluble (PMS) de los sistemas elaborados y medidos a 2 y 24 h se muestran en la Tabla 5. Se observa, que todos los sistemas tienen como mínimo un 50% de pérdida de materia soluble, que corresponde con la cantidad de Gly que contienen las muestras, ya que ésta se libera en el agua debido a su gran afinidad con ella. El sistema que presenta una mayor cantidad de pérdida de materia soluble es el de PPI con una temperatura del molde de 130 °C, este hecho se debe a que probablemente posea una pobre estructuración, lo que significa que tiene menos capacidad de hincharse durante la absorción de agua, como ya se mencionó anteriormente.

4.4 Ensayos de transparencia

La transparencia de los diferentes bioplásticos (Tabla 5) se evaluó a través del índice de transparencia (IT). Así, se usó como referencia el bioplástico SPI procesado a 70 °C. El resultado más interesante es que cuanto mayor es la temperatura del molde, mayor es la transparencia del bioplástico, tanto en el caso del SPI como del PPI. Estos resultados pueden deberse al hecho de que una estructuración más rápida del bioplástico, debido a una temperatura más alta del molde, hace que confiera una estructura más amorfa que permita que la luz pase a través de su estructura mejor que una ordenada (Liu et al., 2010). Además, los bioplásticos SPI son más transparentes que los PPI, lo que indica que su estructura es más amorfa.

Tabla 5. Valores del índice de transmitancia (IT) para los sistemas elaborados de SPI y PPI a las distintas temperaturas del molde de inyección 70 y 130 °C, respectivamente

Sistemas		IT (%)
SPI	70 °C	-
	130 °C	112,2 ^A
PPI	70 °C	0,8 ^B
	130 °C	80,9 ^C

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes

5. Conclusiones

Como conclusión general, los bioplásticos basados en proteínas de soja y guisante pueden fabricarse mediante moldeo por inyección y sus propiedades pueden modularse cambiando la temperatura del molde. Los resultados demuestran que existe un compromiso entre la temperatura del molde de inyección y las propiedades, usar temperaturas más altas del

molde (130 °C) nos conduce a obtener bioplásticos que tienen mejores propiedades mecánicas y mayor transparencia. Por el contrario, se obtiene una menor capacidad de absorción de agua cuando se emplea 70 °C en la temperatura del molde, encontrando un comportamiento opuesto. Por lo tanto, se podría concluir, que utilizando temperaturas de molde más altas obtendremos bioplásticos con un mayor grado de reticulación, es decir, mejor estructurados.

Entre las diferentes proteínas, la proteína de soja parece tener mejores propiedades mecánicas que la proteína de guisante a 130 °C. Además, el bioplástico basado en proteína de soja procesada a 70 °C es el bioplástico que logró la mayor capacidad de absorción de agua, siendo un material superabsorbente.

Finalmente, el uso de uno de estos bioplásticos y sus propiedades dependen de la aplicación requerida. Si se necesita un material superabsorbente, se utilizará el bioplástico SPI procesado a 70 °C. Sin embargo, si es necesaria una alta resistencia mecánica, el bioplástico utilizado podría ser el obtenido con SPI procesado a 130 °C. Los bioplásticos PPI podrían usarse cuando se necesita un material sin alta resistencia mecánica o poca capacidad de absorción de agua, ya que esta materia prima es un residuo, por tanto, es más barata que la del SPI.

5.1 Limitaciones encontradas y posibles líneas futuras

La principal limitación que se encuentra en el presente trabajo viene dada por la incapacidad de obtener con estas materias primas una relación óptima entre la capacidad superabsorbente y las propiedades mecánicas. De esta forma, la mejora de las propiedades mecánicas hace que se descienda, o incluso que se pierda, la capacidad superabsorbente de los bioplásticos, y viceversa.

Una posible línea futura que actualmente se está desarrollando, es utilizar aditivos no tóxicos, y que además sean de bajo coste, para lograr una mayor capacidad de absorción de agua, sin que se produzca un decaimiento en las propiedades mecánicas ni un aumento significativo en el precio final del bioplástico. Actualmente se están realizando estudios con bagazo (residuo).

Agradecimientos

Este proyecto está financiado por un proyecto MICINN (Ref.: RTI2018-097100-B-C21). Los autores también agradecen la beca predoctoral concedida a Mercedes Jiménez-Rosado (FPU2017/01718-MEFP).

Referencias

Álvarez-Castillo, E., Del Toro, A., Aguilar, J. M., Guerrero, A., Bengoechea, C., 2018. Optimization of a thermal process for the production of superabsorbent materials based on a soy protein isolate. *Industrial crops and products*, 125, 573-581.

ASTM D6400–12: Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities, 2012.

Carvajal-Piñero, J. M., Ramos, M., Jiménez-Rosado, M., Perez-Puyana, V., Romero, A., 2019. Development of pea protein bioplastics by a thermomoulding process: Effect of the mixing stage. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 968-978.

Emadian, S. M., Onay, T. T., Demirel, B., 2017. Biodegradation of bioplastics in natural

- environments. *Waste management*, 59, 526-536
- European Bioplastics., 2016. *What are bioplastics? Material types, terminology, and labels an introduction*. Consultado el 20/05/2020 en: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>.
- Gamero, S., Jiménez-Rosado, M., Romero, A., Bengoechea, C., Guerrero, A., 2019. Reinforcement of soy protein-based bioplastics through addition of lignocellulose and injection molding processing conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 1285-1293.
- Guerrero, A., Jiménez-Rosado, M., Pérez-Puyana, V., Cordobés, F., Romero, A., 2019. Soy protein-based matrices with incorporated salts for use in horticulture. *Proceeding of the Iberian Meeting on Rheology*, pp. 3-6. Davos-Klosters: Springer.
- Gupta, P., Nayak, K. K., 2015. Characteristics of protein-based biopolymer and its application. *Polymer Engineering & Science*, 55, 485-498.
- Imhof, H. K., Ivleva, N. P., Schmid, J., Niessner, R., Laforsch, C., 2013. Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles. *Current Biology*, 23, R867-R868.
- ISO-527-2: Plastics determination of tensile properties. Part 2: test conditions for moulding and extrusion plastics, 2012. British Standards Institution.
- ISO 17088. Specifications for compostable plastics, 2012.
- Jiménez-Rosado, M., Pérez-Puyana, V., Cordobés, F., Romero, A., Guerrero, A., 2018. Development of soy protein-based matrices containing zinc as micronutrient for horticulture. *Industrial Crops and Products*, 121, 345-351.
- Jiménez-Rosado, M., Perez-Puyana, V., Cordobés, F., Romero, A., Guerrero, A., 2019. Development of superabsorbent soy protein-based bioplastic matrices with incorporated zinc for horticulture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99, 4825-4832.
- Krishna, B. V., Reddy, E. R., 2018. Applications of green materials for the preparation of eco-friendly bricks and pavers. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 75-79.
- Liu, B.; Jiang, L.; Zhang, J., 2010. Development of Soy Protein/Poly (Lactic Acid) Bioplastics . Society of Plastic Engineers – Global Plastics Environmental Conference.
- MacArthur, D. E., Waughray, D., Stuchtey, M. R., 2016. *The new plastics economy, rethinking the future of plastics*. Davos-Klosters: World Economic Forum.
- Neila, M., Abengoa., 2016. Las ventajas de los bioplásticos. Consultada el día 21 de mayo de 2020, en: <http://www.laenergiadelcambio.com/las-ventajas-de-los-bioplasticos>
- Peelman, N., Ragaert, P., De Meulenaer, B., Adons, D., Peeters, R., Cardon, L., Devlieghere, F., 2013. Application of bioplastics for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 32, 128-141.
- Perez-Puyana, V., Felix, M., Romero, A., Guerrero, A., 2016. Effect of the injection moulding processing conditions on the development of pea protein-based bioplastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 43306.
- Ramazani-Harandi, M. J., Zohuriaan-Mehr, M. J., Yousefi, A. A., Ershad-Langroudi, A., Kabiri, K., 2006. Rheological determination of the swollen gel strength of superabsorbent polymer hydrogels. *Polymer testing*, 25, 470-474.
- Remar, Red de Energía y Medio Ambiente, 2011. Introducción a los bioplásticos. En *Bioplásticos: Guía práctica – número 2* (pp. 4-6). Madrid: Remar.

Romero Mujalli, D., 2019. Ecological modeling of adaptive evolutionary responses to rapid climate change. Potsdam: Universidad de Potsdam.

Saenghirunwattana, P., Noomhorm, A., Rungsardthong, V., 2014. Mechanical properties of soy protein based “green” composites reinforced with surface modified cornhusk fiber. *Industrial Crops and Products*, 60, 144-150.

Thompson, R. C., Moore, C. J., Vom Saal, F. S., Swan, S. H., 2009. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 2153-2166.

Thakur, V. K., Tharkur, M. K., Kessler, M. R., 2017. *Soy-Based Bioplastics*. Shropshire: Smithers Rapra.

UNE-EN 13432: Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje, 2001.

Wijayanti, K. P., Dermawan, N., Faisah, S. N., Prayogi, V., Judiawan, W., Nugraha, T., Listyorini, N. T., 2016. Bio-degradable Bioplastics sebagai Plastik Ramah Lingkungan. *Surya Octagon Interdisciplinary Journal of Science and Technology*, 1(2), 131-153.

Objetivos de desarrollo sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que se persiguen en este trabajo son los objetivos 12 y 13, cuyos fines son garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, además de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Figura 2. Imágenes de los objetivos de desarrollo sostenible número 12 y 13

