



Figura 1. Campos de la Misión Biológica de Galicia (MBG) con maíz en fase de encañado



Investigando nuevos aprovechamientos del cultivo de maíz: caso de estudio de los híbridos Sugar Corn

Abordamos la línea de investigación que se está llevando a cabo para utilizar de modo responsable el residuo de esta variedad de maíz como biocombustible tras la limitación legal de carburantes provenientes de cereales hasta que se solucionen los frentes abiertos que aún suscita su proceso de producción.

D.J. Figueroa-Garrido¹, A. López-Malvar¹, Z. Reséndiz², A. Carballeda², A. Butrón², R.A. Malvar², Lana M. Reid³, Gil Garrote⁴, P. G. del Río⁴, Rogelio Santiago¹

¹Agrobiología Ambiental, Calidad de Suelos y Plantas (UVIGO), Unidad Asociada a la Misión Biológica de Galicia (CSIC), Universidad de Vigo

²Misión Biológica de Galicia (CSIC), Pontevedra, España

³Centro de Investigación y Desarrollo de Ottawa (AAFC), Canadá

⁴Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias de Ourense, Universidad de Vigo

La posible escasez de combustibles fósiles en un futuro próximo, junto con la sospecha más que razonable de que su uso contribuye al cambio climático, han impulsado una línea de investigación con gran respaldo social orientada a la búsqueda de fuentes de energía renovables alternativas. Si bien, este esfuerzo de investigación solo ha llegado a que se produzca una cantidad de energías renovables capaces de sustituir el 10 % de la energía total consumida. Los biocombustibles, biodiesel obtenido a partir de semillas oleaginosas y bioetanol genera-

do a partir de la digestión y fermentación de cultivos y residuos, son las fuentes de energía alternativas que en la actualidad tienen una mayor implantación. El etanol (EtOH) lignocelulósico derivado de pastos perennes de rápido crecimiento se ha convertido en la principal alternativa por ser el mayor repositorio de energía renovable.

Brasil y Estados Unidos han sido pioneros en la producción y en la utilización de etanol, proveniente de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y del almidón del maíz (*Zea mays*), respectivamente. En

► EL ETANOL (ETOH) LIGNOCELULÓSICO DERIVADO DE PASTOS PERENNES DE RÁPIDO CRECIMIENTO ES LA PRINCIPAL ALTERNATIVA POR SER EL MAYOR REPOSITORIO DE ENERGÍA RENOVABLE

Europa, el etanol se destina principalmente al sector del transporte y su implantación como combustible alternativo experimentó un rápido crecimiento en los años 2006-2009, que se ha visto claramente interrumpido en la actualidad. El principal motivo es la directiva 2015/1513 del 9 de septiembre de 2015, que limita el uso de biocombustibles provenientes de cereales hasta que se solucionen los frentes abiertos que aún tiene su producción, el equilibrio de mercado de los cereales, el uso y valor del suelo y la falta de desarrollo de la tecnología y de la optimización del proceso. Para solucionar todos estos problemas, García & You (2018) realizaron un estudio global con el objetivo de identificar las materias primas y las estrategias para obtener una producción de bioetanol económicamente responsable y con el menor impacto medioambiental posible. En ese estudio se plantearon, en contraposición al uso de caña de azúcar, que cuenta con restricciones climáticas en cuanto a su cultivo, el uso del rastrojo (biomasa lignocelulósica) de maíz, tanto por sus rendimientos de biomasa como por su adaptación y amplia distribución geográfica.

En los tejidos de las plantas podemos encontrar azúcares en distintas formas: solubles, polisacáridos de reserva (almidón) y polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa). Los principales componentes que conforman la llamada biomasa lignocelulósica son la celulosa (44 %), la hemicelulosa (30 %) y la lignina (26 %), todos ellos fuertemente asociados entre sí (Barros-Ríos *et al.*, 2015; DOE: US, 2006).

En el residuo lignocelulósico la matriz de unión tan estrecha que forman la hemicelulosa, la lignina y la celulosa impide la acción de las enzimas hidrolíticas que intervienen en el proceso de la producción de etanol, reduciendo la degradabilidad de los carbohidratos.

La conversión de biomasa lignocelulósica a bioetanol es una transformación de tres pasos que incluye, en primer lugar, un pretratamiento con

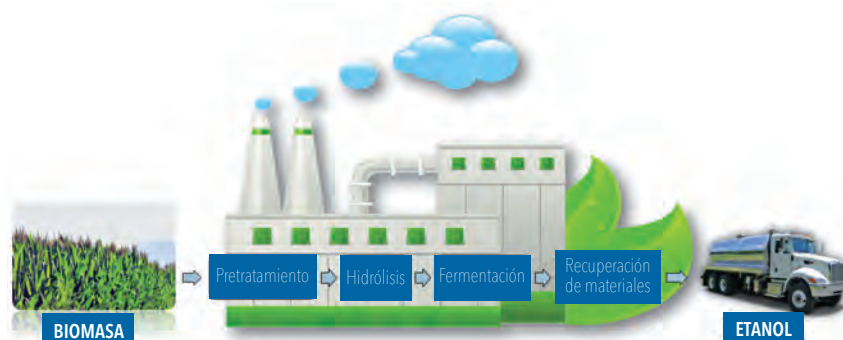


Figura 2. Esquema general de la producción de etanol en una biorrefinería

el cual lo que se hace básicamente es separar la planta en sus componentes básicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) utilizando compuestos agresivos (ácidos, bases, compuestos orgánicos, etc.) o agua, consiguiendo una eliminación parcial o una reducción de la lignina para que el posterior ataque enzimático y la hidrólisis de la celulosa sean más efectivos. El segundo paso consiste en una degradación hidrolítica de los polisacáridos para liberar los azúcares simples y permitir su fermentación por los microorganismos productores de etanol.

Para terminar el proceso se lleva a cabo una destilación con el fin de corregir, purificar el etanol y eliminar el agua presente. Todos los residuos no aprovechables junto con la lignina se consumirán como combustibles para producir energía y los que sí se pueden aprovechar, como el agua y los productos químicos, serán recuperados para su nueva incorporación al proceso, lo que hace que aumente el valor de uso de esta materia prima (figura 2).

El maíz y la caña de azúcar, al ser plantas C4, presentan una ruta fotosintética especializada que permite un uso más eficiente del agua, nutrientes y CO₂ para la producción de azúcares, que son acumulados en las hojas y en

el tallo antes de ser transportados hacia el grano para almacenarse en forma de almidón en las células del endospermo. La estructura del xilema y del floema, y la fisiología de la producción de asimilados del cultivo de maíz, así como la alta variabilidad genética de este cereal, permiten inferir que es muy probable obtener variedades de maíz que presenten una concentración de azúcares en el tallo similar a la de la caña de azúcar (Reid *et al.*, 2015). Por esa razón, Reid y colaboradores iniciaron un programa de mejora en el Centro de Investigación y Desarrollo de Ottawa (ORCD) perteneciente al Ministerio de Agricultura e Industria Agroalimentaria de Canadá (AAFC) para obtener variedades de maíz con altos niveles de azúcares en el tallo (Sugar Corn) que suministrarán un residuo lignocelulósico, una vez recolectado el grano, con un alto potencial energético. Los datos obtenidos de etanol potencial de estos materiales se sitúan en los 3.600 L EtOH/ha, superiores a los 2.600 L EtOH/ha, derivado del grano de maíz o los 2.800 L EtOH/ha del sorgo dulce. Pero estos resultados solo contemplan la extracción de azúcares solubles de los jugos del tallo, sin tener en cuenta el aprovechamiento de los azúcares provenientes de la biomasa lignocelulósica.

► ADEMÁS DE UN RENDIMIENTO DE GRANO DE MÁS DE 10 T/HA, LOS RASTROJOS DEL HÍBRIDO CO348 X C103 PRESENTARON UNA PRODUCCIÓN ETANÓLICA DE 3.300 L EtOH/HA



Figura 3. Campos del Centro de Investigación y Desarrollo de Ottawa (ORCD) con los híbridos Sugar Corn en flor

El Sugar Corn aparece ahora como un maíz idóneo para emplear su residuo en la producción de biocombustibles, pero en Galicia y otras zonas del norte de España ya se estudió hace años como un tipo de maíz forrajero muy prometedor. Debido a que las plantas Sugar Corn permanecen verdes un cierto tiempo después de la maduración del grano, es posible recolectar este y después aprovechar los tallos y las hojas para su utilización como forraje fresco o en ensilado de buena calidad. El valor nutritivo del forraje fresco de algunos de los híbridos probados fue equiparable al de la hierba de un prado permanente de calidad media, y el del ensilado al de un heno de buena calidad (Treviño *et al.*, 1974). Sobre estos mismos materiales y tomando en cuenta el aprovechamiento etanólico, los doctores Gracia Breijo y Primo Yúfera ya avanzaban un rendimiento de 1.800 L EtOH/ha (1986).

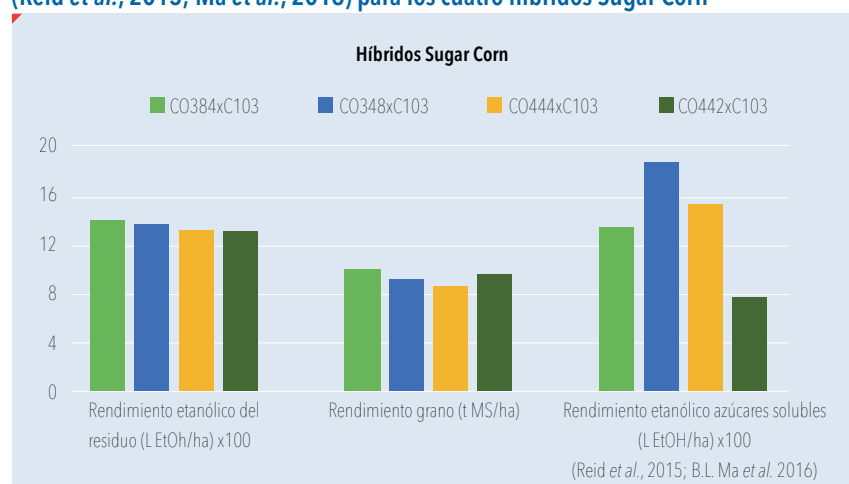
Retomando el interés por este tipo de materiales, en el ORCD-AAFC se han desarrollado nuevos híbridos de maíz Sugar Corn con hasta un 16 % de azúcar soluble en el tallo y un rendimiento de materia seca (MS) de 16 t/ha. Siguiendo esta línea de investigación,

en la Misión Biológica de Galicia (CSIC) también se vienen realizando diversos estudios que plantean un doble aprovechamiento del cultivo. Se empezó determinando el potencial de uso de maíz de grano dulce, comúnmente conocido como *sweet corn*. En este caso la producción potencial de etanol a partir de los azúcares estructurales y solubles extraídos del rastrojo de maíz dulce alcanzó hasta 4.400 L EtOH/ha en los híbridos más productivos, 33 % de los cuales (1.500 L EtOH/ha) se obtuvieron por fermentación directa de azúcares solubles (Barros-Ríos *et al.*, 2015). El híbrido GSS2259, uno de los mejores híbridos para biomasa y concentración de azúcar, también mostró una buena aptitud para producción de grano y número de mazorcas por planta. Del mismo modo, y buscando en esta ocasión nuevos tipos de maíz grano para doble aprovechamiento, dentro de un proyecto subvencionado por la Xunta de Galicia (ED431F 2016/014), se están evaluando distintos híbridos Sugar Corn desarrollados por el equipo de la Dra. Reid. En la evaluación agronómica de estos materiales se tomaron datos de rendimiento de grano y rendimiento de la biomasa lignocelulósica, y se recolectó la planta completa sin mazorca

para el análisis de componentes de pared celular y producción etanólica. El rendimiento etanólico del residuo en L EtOH/ha se estimó multiplicando el potencial etanólico de cada híbrido por el rendimiento del residuo lignocelulósico. Los resultados recogidos en la tabla 1 muestran rendimientos etanólicos del residuo y rendimientos de grano muy similares para todos los híbridos, aunque esto puede deberse a que los híbridos con un mayor potencial etanólico *per se* presentaron menores rendimientos lignocelulósicos produciéndose un efecto de compensación, ya que sí se observaron diferencias significativas entre los híbridos para potencial etanólico y rendimiento lignocelulósico.

Así, cabría destacar el comportamiento del híbrido CO442 x C103, porque presenta un excelente rendimiento de grano y, gracias a su elevado potencial etanólico, una buena producción de etanol a partir del residuo lignocelulósico, pese a su bajo rendimiento lignocelulósico. Esto hace que sea económicamente más rentable que los otros híbridos, porque la cantidad de materia que tendremos que transportar hasta la planta de biocombustible será mucho menor ahorrando en costes de transporte. ►

Figura 4. Rendimiento etanólico del residuo (L EtOH/ha) x100, rendimiento grano (t MS/ha) y rendimiento etanólico de azúcares solubles (L EtOH/ha) x100 (Reid *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2016) para los cuatro híbridos Sugar Corn



► NUEVAS VÍAS DE EXPERIMENTACIÓN ESTÁN ABIERTAS PARA DETERMINAR LA POSIBLE SUSCEPTIBILIDAD DE ESTOS MATERIALES A PLAGAS Y ENFERMEDADES

Tabla 1. Resultados obtenidos para los híbridos Sugar Corn

Genotipo	PE (g EtOH/100 g MS)	RR (t MS/ha)	RER (L EtOH/ha)	RG (t MS/ha)
CO384xC103	15,3 c	7,0 a	1.405,2 a	10,1 a
CO348xC103	15,3 c	6,9 ab	1.363,4 a	9,2 ab
CO444xC103	15,8 b	6,0 bc	1.319,6 a	8,6 b
CO442xC103	17,8 a	5,7 c	1.310,5 a	9,7 ab

PE: potencial etanólico (g EtOH/100 g MS); RS: rendimiento residuo (t MS/ha); RER: rendimiento etanólico del residuo (L EtOH/ha); RG: rendimiento grano (t MS/ha)

En la figura 4, además de mostrar los rendimientos de grano y de etanol del residuo lignocelulósico de cada híbrido obtenidos en nuestras evaluaciones, se muestran también los resultados para el rendimiento etanólico a partir de los azúcares solubles del tallo obtenidos en evaluaciones previas en Canadá (Reid *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2016). Aquí se observa que los híbridos difieren significativamente en la producción de etanol a partir de los azúcares solubles del tallo, y que además no existe ninguna relación entre la capacidad de producción de etanol a partir del residuo lignocelulósico o a partir de los azúcares solubles. En vista de esta comparación de resultados, es conveniente completar la caracterización de producción de etanol a partir de los azúcares solubles del tallo en la MBG-CSIC (Pon-tevedra), ya que el híbrido más prometedor resaltado (CO442 x C103) muestra resultados previos de contenido en azúcares más reducidos que el resto (Reid *et al.*, 2015). En cualquier caso, si tomamos como un valor de base los datos de ren-

dimiento etanólico de los azúcares solubles obtenidos por la Dra. Reid y le sumamos el etanol proveniente del aprovechamiento de los polisacáridos (rendimiento del residuo), entonces, el híbrido más prometedor sería el CO348 x C103, con una producción teórica total en torno a 3.300 L EtOH/ha. Como se indica previamente, el dato es orientativo a la espera de mayores determinaciones en las condiciones de cultivo gallegas.

CONCLUSIÓN

En resumen, combinando el etanol obtenido a partir de los azúcares solubles de la caña con el obtenido a partir de la biomasa lignocelulósica, se consigue aumentar la tasa de producción de etanol, lo que confirma el potencial del cultivo de maíz Sugar Corn como alternativa al uso de combustibles fósiles. En todo caso, nuevas vías de experimentación están abiertas para determinar la posible susceptibilidad de estos materiales a plagas y enfermedades derivada de su contenido en azúcares solubles. ■

BIBLIOGRAFÍA

- Directiva (UE) 2015/1513 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de septiembre de 2015 por la que se modifican la Directiva 98/70/CE, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, y la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.
- Barros-Ríos, J.; Romaní, A.; Garrote, G. & Ordas, B. (2015). Biomass, sugar, and bioethanol potential of sweet corn. *GCB Bioenergy*. 7:153-160.
- Ma, B. L., Zheng, Z. M., & Morrison, M. J. (2016). Does increasing plant population density alter sugar yield in high stalk-sugar maize hybrids? *CSIRO Publishing. Crop and Pasture Science*, 68(1): 1-10.
- DOE (U.S. Department of Energy), 2006, Report of the Review of the "Hanford Solid."
- García, D. & You, F. (2018). Addressing global environmental impacts including land use change in life cycle optimization: Studies on biofuels. *J. Cleaner Production*. 182:313-330.
- García Breijo, F. J.; Primo Yúfera, E. (1986). Alcohol de biomasa. I. Azúcares solubles fermentables en tallos de variedades de maíz y sorgo dulce. *Agroquímica y Tecnología de Alimentos*. 26(4): 571-580.
- Reid, L.M.; Morrison, M.J.; Zhu, X.; Jindal, K.K. & Baulo, L.M. (2015). High stalk sugar corn: A potential biofuel crop for Canada. *Agronomy Journal*. 107: 475-485.
- Treviño, J., Hernández, M. T. & Caballero, R. (1974). Estudio del valor nutritivo de las hojas y tallo del maíz híbrido de tallo azucarado E-10. *Pastos*. 4: 286-292.