



Figura 1. Campos da Misión Biolóxica de Galicia (MBG) con millo en fase de encanado



Investigando novos aproveitamentos do cultivo de millo: caso de estudo dos híbridos Sugar Corn

Abordamos a liña de investigación que se está a levar a cabo para utilizar de xeito responsable o residuo desta variedade de millo como biocombustible tras a limitación legal de carburantes provenientes de cereais ata que se solucionen as fronteiras abertas que aínda suscita o seu proceso de produción.

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

¹Agrobioloxía Ambiental, Calidade de Solos e Plantas (UVIGO), Unidade Asociada á Misión Biolóxica de Galicia (CSIC), Universidade de Vigo, España

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

³Centro de Investigación e Desenvolvemento de Ottawa, AAFC (O Canadá)

⁴Departamento de Enxeñaría Química, Facultade de Ciencias de Ourense, Universidade de Vigo, España

A posible escaseza de combustibles fósiles nun futuro próximo, xunto coa sospeita máis que razoable de que o seu uso contribúe ao cambio climático, impulsaron unha liña de investigación con grande apoio social orientada á procura de fontes de enerxía renovables alternativas. Con todo, este esforzo de investigación só chegou a que se produza unha cantidade de enerxías renovables capaces de substituír o 10 % da enerxía total consumida. Os biocombustibles, biodiésel obtido a partir de sementes oleaxinosas e bioetanol xerado a partir da

dixestión e fermentación de cultivos e residuos, son as fontes de enerxía alternativas que na actualidade teñen unha maior implantación. O etanol (EtOH) lignocelulósico derivado de pastos perennes de rápido crecemento converteuse na principal alternativa por ser o maior repositorio de enerxía renovable.

O Brasil e Os Estados Unidos foron pioneiros na produción e na utilización de etanol, proveniente da cana de azucre (*Saccharum officinarum*) e do amidón do millo (*Zea mays*), respectivamente. En Europa, o etanol destínase principalmente ao sector

► O ETANOL (ETOH) LIGNOCELULÓSICO DERIVADO DE PASTOS PERENNES DE RÁPIDO CRECEMENTO CONVERTEUSE NA PRINCIPAL ALTERNATIVA POR SER O MAIOR REPOSITORIO DE ENERXÍA RENOVABLE

do transporte e a súa implantación como combustible alternativo experimentou un rápido crecemento nos anos 2006-2009, que se viu claramente interrompido na actualidade. O principal motivo é a directiva 2015/1513 do 9 de setembro de 2015, que limita o uso de biocombustibles provenientes de cereais ata que se solucionen as fronteiras abertas que aínda teñen a súa produción, o equilibrio de mercado dos cereais, o uso e valor do solo e a falta de desenvolvemento da tecnoloxía e optimización do proceso.

Para solucionar todos estes problemas, García & You (2018) realizaron un estudo global co obxectivo de identificar as materias primas e as estratexias para obter unha produción de bioetanol economicamente responsable e co menor impacto ambiental posible. Nese estudo expuxéronse, en contraposición ao uso de cana de azucre, que conta con restricións climáticas en canto ao seu cultivo, o uso do restollo (biomasa lignocelulósica) de millo, tanto polos seus rendementos de biomasa como pola súa adaptación e ampla distribución xeográfica.

Nos tecidos das plantas podemos atopar azúcreos en distintas formas: solubles, polisacáridos de reserva (amido) e polisacáridos estruturais (celulosa e hemicelulosa). Os principais compoñentes que conforman a chamada biomasa lignocelulósica son a celulosa (44 %), hemicelulosa (30 %) e a lignina (26 %), todos eles fortemente asociados entre si (Barros-Ríos *et al.*, 2015; DOE: US, 2006).

O residuo lignocelulósico, a matriz de unión tan estreita que forman a hemicelulosa, a lignina e a celulosa, impide a acción das encimas hidrolíticas que interveñen no proceso da produción de etanol, reducindo a degradabilidade dos carbohidratos.

A conversión de biomasa lignocelulósica a bioetanol é unha transformación de tres pasos que inclúe, en primeiro lugar, un pretratamento, mediante o cal o que se fai basicamente é separar a planta nos seus compoñentes básicos (celulosa,

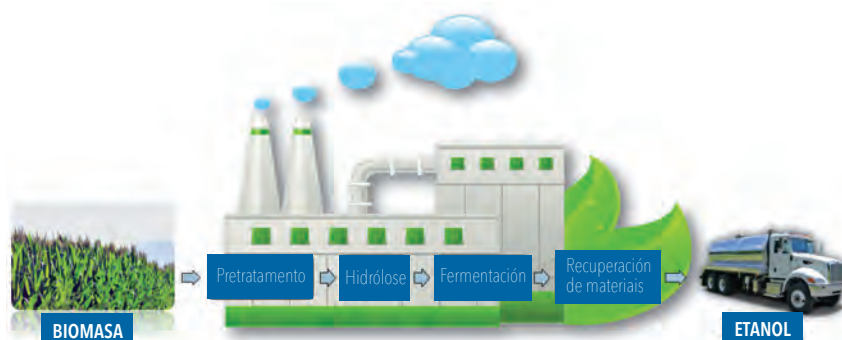


Figura 2. Esquema xeral da produción de etanol nunha biorrefinería

hemicelulosa e lignina) utilizando compostos agresivos (ácidos, bases, compostos orgánicos etc.) ou auga, conseguindo unha eliminación parcial ou unha redución da lignina para que o posterior ataque encimático e a hidrólise da celulosa sexan máis efectivos. O segundo paso consiste nunha degradación hidrolítica dos polisacáridos para liberar os azúcreos simples e permitir a súa fermentación polos microorganismos produtores de etanol.

Para terminar o proceso lévese a cabo unha destilación para corrixir, purificar o etanol e eliminar a auga presente. Todos os residuos non aproveitables xunto coa lignina consumíranse como combustibles para producir enerxía e os que si se poden aproveitar, como a auga e os produtos químicos, serán recuperados para a súa nova incorporación ao proceso, o que fai que aumente o valor de uso desta materia prima (figura 2).

O millo e a cana de azucre, ao ser plantas C4, presentan unha ruta fotosintética especializada que permite un uso máis eficiente da auga, nutrientes e CO₂ para a produción de azúcreos, que son acumulados nas follas e no talo antes de ser transporta-

dos cara ao gran para almacenarse en forma de amido nas células do endospermo. A estrutura do xilema e floema e a fisioloxía da produción de asimilados do cultivo de millo, así como a alta variabilidade xenética deste cereal, permiten inferir que é moi probable obter variedades de millo que presenten unha concentración de azúcreos no talo similar á da cana de azucre (Reid *et al.*, 2015). Por esa razón, Reid e colaboradores iniciaron un programa de mellora no Centro de Investigación e Desenvolvemento de Ottawa (ORCD) pertencente ao Ministerio de Agricultura e Industria Agroalimentaria do Canadá (AAFC) para obter variedades de millo con altos niveis de azúcreos no talo (Sugar Corn) que fornecerán un residuo lignocelulósico, unha vez colido o gran, cun alto potencial enerxético. Os datos obtidos de etanol potencial destes materiais sitúanse nos 3.600 L EtOH/ha, superiores aos 2.600 L EtOH/ha, derivado do gran de millo, ou os 2.800 L EtOH/ha do sorgo doce. Pero estes resultados só consideran a extracción de azúcreos solubles dos mollos do talo, sen ter en conta o aproveitamento dos azúcreos provenientes da biomasa lignocelulósica.

► ADEMAIS DUN RENDEMENTO DE GRAN DE MÁIS DE 10 T/HA, OS RASTROLLOS DO HÍBRIDO CO348 X C103 PRESENTARON UNHA PRODUCCIÓN ETANÓLICA DE 3.300 L EtOH/HA



Figura 3. Campos do Centro de Investigación e Desenvolvemento de Ottawa (ORCD) cos híbridos Sugar Corn en flor

O millo Sugar Corn aparece agora coma un millo idóneo para empregar o seu residuo na produción de biocombustibles, pero en Galicia e noutras zonas do norte de España xa se estudou hai anos como un tipo de millo forraxeiro moi prometedor. Debido a que as plantas Sugar Corn permanecen verdes un certo tempo despois da maduración do gran, é posible coller este e despois aproveitar os talos e as follas para a súa utilización como forraxe fresca ou en ensilado de boa calidade.

O valor nutritivo da forraxe fresca dalgúns dos híbridos probados foi equiparable ao da herba dun prado permanente de calidade media, e o do ensilado ao dunha herba seca de boa calidade (Treviño *et al.*, 1974). Sobre estes mesmos materiais e tomando en conta o aproveitamento etanólico, os doutores García Breijo e Primo Yúfera xa avanzaban un rendemento de 1.800 L EtOH/ha (1986).

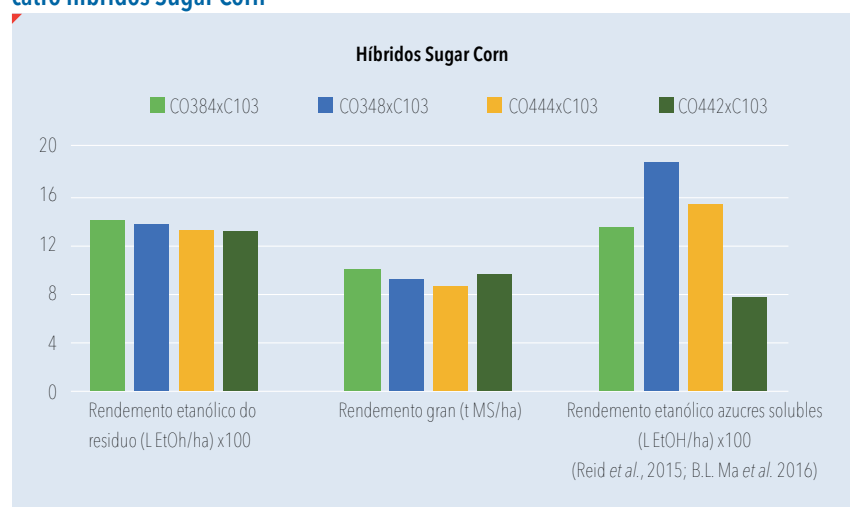
Retomando o interese por este tipo de materiais, no ORCD-AAFC desenvóléronse novos híbridos de millo Sugar Corn con ata un 16 % de azucre soluble no talo e un rendemento de materia seca (MS) de 16 t/ha. Seguindo esta liña de investigación, na Misión Biolóxica de Galicia (CSIC)

tamén veñen realizando diversos estudos que expoñen un dobre aproveitamento do cultivo. Empezouse determinando o potencial de uso de millo de gran doce, comunmente coñecido como *sweet corn*. Neste caso a produción potencial de etanol a partir dos azucres estruturais e solubles extraídos do restrollo de millo doce alcanzou ata 4.400 L EtOH/ha nos híbridos máis produtivos, 33 % dos cales (1.500 L EtOH/ha) se obtiveron por fermentación directa de azucres solubles (Barros-Ríos *et al.*, 2015). O híbrido GSS2259, un dos mellores híbridos para biomasa e concentración de azucre, tamén mostrou unha boa aptitude para produción de gran e número de mazarocas por planta. Do mesmo xeito, e buscando nesta ocasión novos tipos de millo gran para dobre aproveitamento, dentro dun proxecto subvencionado pola Xunta de Galicia (ED431F 2016/014), están a avaliarse distintos híbridos Sugar Corn desenvolvidos polo equipo da doutora Reid. Na avaliación agromónica destes materiais tomáronse datos de rendemento de gran e rendemento da biomasa lignocelulósica, e recolleuse a planta completa sen mazaroca para a análise de compoñentes de parede celular e produción

etanólica. O rendemento etanólico do residuo en L EtOH/ha estimouse multiplicando o potencial etanólico de cada híbrido polo rendemento do residuo lignocelulósico.

Os resultados presentados na táboa 1 mostran rendementos etanólicos do residuo e rendementos de gran moi similares para todos os híbridos, aínda que isto pode deberse a que os híbridos cun maior potencial etanólico per se presentaron menores rendementos lignocelulósicos producíndose un efecto de compensación, xa que si se observaron diferenzas significativas entre os híbridos para potencial etanólico e rendemento lignocelulósico. Así, cabería destacar o comportamento do híbrido CO442 x C103 porque presenta un excelente rendemento de gran e, grazas ao seu elevado potencial etanólico, unha boa produción de etanol a partir do residuo lignocelulósico, a pesar do seu baixo rendemento lignocelulósico. Isto fai que sexa economicamente máis rendible que os outros híbridos porque a cantidade de materia que teremos que transportar ata a planta de biocombustible será moito menor aforrando en custos de transporte. ►►

Figura 4. Rendemento etanólico do residuo (L EtOH/ha) x100, rendemento gran (t MS/ha), rendemento etanólico de azucres solubles (L EtOH /ha) x100 para os catro híbridos Sugar Corn



► NOVAS VÍAS DE EXPERIMENTACIÓN ESTÁN ABERTAS PARA DETERMINAR A POSIBLE SUSCEPTIBILIDADE DESTES MATERIAIS A PRAGAS E ENFERMIDADES

Táboa 1. Resultados obtidos para os híbridos Sugar Corn

Xenotipo	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: rendemento residuo (t MS/ha); RER: rendemento etanólico do residuo (L EtOH/ha); RG: rendemento gran (t MS/ha)

Na figura 4, ademais de mostrar os rendementos de gran e de etanol do residuo lignocelulósico de cada híbrido obtido nas nosas avaliacións, móstranse tamén os resultados para o rendemento etanólico a partir dos azucres solubles do talo obtidos en avaliacións previas no Canadá (Reid *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2016). Aquí obsérvase que os híbridos difiren significativamente na produción de etanol a partir dos azucres solubles do talo e, que, ademais, non existe ningunha relación entre a capacidade de produción de etanol a partir do residuo lignocelulósico ou a partir dos azucres solubles.

En vista desta comparación de resultados, é conveniente completar a caracterización de produción de etanol a partir dos azucres solubles do talo na MBG-CSIC (Pontevedra), xa que o híbrido máis prometedor resaltado (CO442 x C103) mostra resultados previos de contido en azucres máis reducidos que o resto (Reid *et al.*, 2015).

En calquera caso, se tomamos como un valor de base os datos de rendemento etanólico dos azucres solubles obtidos pola Dra. Reid e lle sumamos o etanol proveniente do aproveitamento dos polisacáridos (rendemento do residuo), o híbrido máis prometedor sería o CO348 x C103, cunha produción teórica total ao redor de 3.300 L EtOH/ha. Como se indica previamente, o dato é orientativo á espera de maiores determinacións nas condicións de cultivo galegas.

CONCLUSIÓN

En resumo, combinando o etanol obtido a partir dos azucres solubles da cana e o obtido a partir da biomasa lignocelulósica, conséguese aumentar a taxa de produción de etanol, o que confirma o potencial do cultivo de millo Sugar Corn como alternativa ao uso de combustibles fósiles. En todo caso, novas vías de experimentación están abertas para determinar a posible susceptibilidade destes materiais a pragas e enfermidades derivada do seu contido en azucres solubles. ■

BIBLIOGRAFÍA

- Directiva (UE) 2015/1513 do Parlamento Europeo e do Consello do 9 de setembro de 2015 pola que se modifican a Directiva 98/70/CE, relativa á calidade da gasolina e o gasóleo, e a Directiva 2009/28/CE, relativa ao fomento do uso de enerxía procedente de fontes renovables.
- Barros-Ríos, J.; Román, 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.