

Experiencia asociativa para la producción comercial bioenergética: sorgo azucarado y caña de azúcar como cultivos complementarios en Tucumán, Argentina

Javier Tonatto*, Patricia Garolera De Nucci**, Sergio Casen*, Guillermo De Boeck**, Carlos Gusils***, Marcelo Ruiz***, Eduardo R. Romero*

RESUMEN

Con el fin de contribuir a la diversificación de la matriz energética argentina y realizar aportes concretos a la sustentabilidad se llevó adelante un proyecto asociativo público-privado en la provincia de Tucumán (Argentina), cuyo objetivo principal fue lograr pruebas de producción a escala comercial de bioetanol y bioelectricidad a partir de sorgo azucarado como cultivo energético complementario de la caña de azúcar. Los resultados obtenidos, tanto en la fase agrícola como industrial, demostraron la aptitud de este cultivo para la producción de energía renovable (etanol y energía eléctrica), así como su carácter complementario con la tradicional industria azucarera.

Palabras clave: cultivo energético, etanol, cultivo complementario

ABSTRACT

Associative experience for bioenergy commercial production: sweet sorghum and sugar cane as complementary crops in Tucumán, Argentina

In order to contribute to the diversification of the energy matrix from Argentina and to make sound contributions to sustainability, a public-private partnership carried out a project which main objective was to achieve commercial scale production of bioethanol and bioelectricity from sweet sorghum as a complementary energy crop of sugarcane in Tucumán (Argentina). The obtained results, both in the agricultural and industrial phases, demonstrated the suitability of this crop for the production of renewable energy (ethanol and electric energy) as well as its complementary nature with the traditional sugar industry.

Key words: energy crop, ethanol, complementary crop

Recibido: 18/08/17 - Aceptado: 12/03/19

* Sección Caña de Azúcar

** Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales

*** Sección Química de Productos Agroindustriales

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) jtonatto@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

La matriz de consumo energético mundial, según informes publicados en 2015 (BP Statistical Review of World Energy, 2015), está compuesta en un 85,5% por combustibles fósiles, un 10,1% por fuentes de energía renovable y un 4,4% por energía nuclear. En el caso de Argentina, la matriz energética responde a este patrón (Ministerio de Energía y Minería, 2016; Romero, 2010).

Además, se proyecta para el 2040 un incremento del 30% en la demanda de energía global, utilizando diversas fuentes de energía para satisfacer este requerimiento (IEA, 2016). Una de las estrategias globales más utilizadas para suplir esta demanda es la implementación de mezclas de naftas con bioetanol en distintas proporciones. Bajo este contexto, Argentina inició en 2010 la mezcla de naftas con un 5% de bioetanol anhidro, llegando a niveles del 12% en la actualidad. El bioetanol anhidro es producido en porcentajes similares por la industria azucarera y la industria del bioetanol de maíz (FAS-GAIN, 2017).

El cultivo de caña de azúcar es mundialmente reconocido como una de las materias primas más avanzadas para la bioenergía, y se cultiva en regiones tropicales y subtropicales. El contenido energético es elevado respecto a otros cultivos, con un tercio de la energía total en forma de sacarosa en tallos, otro tercio en el bagazo y el último tercio en el residuo vegetal que queda en el campo después de la cosecha mecanizada.

Los análisis del ciclo de vida indican que esta sería altamente competitiva con otros cultivos como materia prima para una industria basada en su biomasa (James, 2004).

La caña de azúcar es un cultivo de gran relevancia en Argentina, y tiene particular importancia en el noroeste del país. En 2016 esta actividad registró una superficie cultivada de 390.000 ha, una producción de 17.872.000 t de caña y 1.950.000 t de azúcar, que se logran a través de 22 ingenios en producción (Centro Azucarero Argentino, 2017).

Otro cultivo de reconocido potencial bioenergético es el sorgo azucarado (*Sorghumbicolor* (L.) Moench), que presenta una elevada productividad en ciclos cortos. Puede producirse en una gran variedad de ambientes, tanto en regiones tropicales y subtropicales como templadas, en tierras de mediana y baja aptitud agrícola, siendo apto para regiones con escasa pluviometría (Almodares and Hadi, 2009; Mazziotto, 2005). Se caracteriza por sus tallos con jugos ricos en azúcares, similares a los de la caña de azúcar y factibles de ser fermentados para la producción de bioetanol. Además, suministra bagazo y residuos de cosecha como subproductos fibrosos, útiles para su empleo directo como biocombustible sólido en la generación de electricidad. Otro aspecto favorable a tener en cuenta es su elevado

potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Romero *et al.*, 2012).

En 2006 la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (Tucumán, Argentina) inicia dentro de su Programa Bioenergía la evaluación de materiales genéticos de sorgo azucarado, seleccionando aquellos que evidencien una adecuada adaptación a las condiciones agroecológicas locales y cumplan con los requerimientos de la industria alcoholera, destacándose entre ellos el híbrido Argensil 165 bio (Argenetics Semillas S.A.).

Además se desarrolló un paquete tecnológico para el adecuado manejo agronómico, contemplando las mejores alternativas para el manejo de malezas, sistema y diseño de siembra, cosecha mecanizada y alternativas para el manejo de la maduración (Romero *et al.*, 2012). Complementariamente, se estudió el proceso industrial y los ajustes necesarios para el aprovechamiento fabril de esta materia prima para la obtención de bioetanol.

En base a estos avances, sumado a una serie de factores favorables como son la similitud de sus procesos de producción, la posibilidad de una integración temporal (ampliando el período de producción bioenergética), una integración espacial (utilizando áreas de baja aptitud agrícola), el aprovechamiento de la infraestructura y maquinaria disponible y los aportes a la sustentabilidad, es que se define al sorgo azucarado como un cultivo complementario ideal para el cultivo de la caña de azúcar en la región NOA (Romero, 2010). Si bien no existe una producción significativa de bioetanol a partir de sorgo sacarino a nivel mundial, ya se registraron experiencias iniciales en India, China, Brasil y EE.UU., siendo necesario emprender proyectos de investigación que permitan obtener nuevos desarrollos (Ratnavathi *et al.*, 2010).

El estado nacional, a través de su política referida a la producción sustentable de biocombustibles y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), a través del Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Energía - Fite Energía 2012 - Biocombustibles Fonarsec, subvenciona un número de propuestas altamente innovadoras, competitivas y de alto impacto en el sector productivo de los biocombustibles. Gracias a estos beneficios de promoción tecnológica fue seleccionado en 2012 para su ejecución el proyecto Biosorgo: producción comercial de bioetanol y bioelectricidad a partir de sorgo azucarado, cultivo energético complementario de la caña de azúcar (Nº 408/2012), siendo el único en su tipo para la región NOA del país.

Proyecto Biosorgo

Objetivo General

Integrar a la cadena agroindustrial actual de la caña de azúcar asociada al ingenio Santa Bárbara (productor de azúcar, etanol y electricidad) la producción agrícola y el procesamiento fabril del sorgo azucarado como una nueva

materia prima energética para aportar a la producción comercial de bioetanol de 1ª generación y a la cogeneración eléctrica.

Objetivos Específicos

- Transferir y ajustar a escala comercial, en sus aspectos agrícolas e industriales, la información experimental y semi-comercial proporcionada por la EEAOOC correspondiente a la producción agronómica y el procesamiento fabril de sorgo azucarado para producir bioetanol a partir del jugo de sus tallos y generar energía eléctrica a partir del residuo fibroso de su molienda (bagazo).

- Facilitar la incorporación del cultivo de sorgo sacarífero a la actividad agroindustrial del área de influencia del ingenio Santa Bárbara (Aguilares, Tucumán) sin desplazar los cultivos actuales, ya que será utilizado como cultivo alternativo de rotación del cultivo de soja en el área de granos, bien de reemplazo o incorporación en zonas cercanas al ingenio con limitaciones hídricas y con problemas de salinidad.

Gracias a la temporalidad del ciclo del cultivo de sorgo azucarado, este nuevo material permite ampliar el período de la zafra actual sucroalcoholera, incorporando al inicio la molienda de este (generalmente fines de abril a mediados de mayo), para continuar posteriormente con la zafra tradicional de caña de azúcar que se desarrolla generalmente entre los meses de mayo a noviembre.

Este proyecto, además, puso énfasis en adaptar y ajustar tanto el uso de los equipos disponibles de cosecha mecanizada y transporte de caña de azúcar, como la infraestructura de fábrica existente para procesar el sorgo dulce.

Además se realizaron evaluaciones técnico-económicas y ambientales de la fase agrícola y del proceso industrial del sorgo dulce destinado a la producción de bioetanol y bioelectricidad, monitoreando el manejo sustentable de los potenciales efluentes de la actividad industrial.

Este proyecto, dirigido por el Dr. Eduardo R. Romero (coordinador del Sub-Programa Agronomía de la EEAOOC), se desarrolló en un período de cuatro años (2013/14 a 2016/17) y abarcó las siguientes etapas: i) el ajuste tecnológico, con la preselección de los materiales y la optimización del proceso fabril; ii) la prueba comercial agrícola-industrial, que implica el monitoreo y ajuste de la cosecha, molienda y transporte; iii) la producción comercial a mediana escala, vinculada principalmente con el proceso de fermentación y destilación, y iv) la producción comercial a gran escala, abarcando los mismos procesos mencionados anteriormente.

Para llevar adelante las distintas actividades previstas por el proyecto, se constituyó un consorcio buscando seguir el modelo asociativo público-privado. Este

fue integrado por dos empresas de Tucumán, una dedicada a la comercialización de maquinaria agrícola (Zafra SA), otra especializada en la elaboración de azúcar y destilación de alcohol (Azucarera Juan M. Terán SA) y la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes como institución tecnológica provincial. Cada integrante del consorcio cumplió funciones específicas, coordinadas y complementarias que permitieron lograr los objetivos propuestos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con las etapas previstas se realizaron siembras de sorgo azucarado en 11 localidades diferentes de la provincia de Tucumán (República Argentina) durante el período comprendido entre los años 2013 a 2017 (Figura 1).

La mayoría de estas localidades están caracterizadas por presentar suelos de limitada aptitud agrícola (suelos salinos y sódicos). La siembra se realizó mayormente durante los meses de enero (con extremos en diciembre y febrero), empleando el sistema de siembra directa con un diseño de dos líneas espaciadas a 0,52 m y 1,56 m entre el centro de estas líneas, logrando así una distribución muy similar al utilizado en caña de azúcar. Se realizó un manejo agronómico comercial que permitió controlar la competencia de malezas, basado en un barbecho químico previo a la siembra y aplicaciones de herbicidas en pos emergencia. El control de plagas se efectuó con un número variable de aplicaciones de insecticidas. A fines de maximizar el balance energético del cultivo, este se realizó sin el agregado de fertilizantes ni riego suplementario.

Se efectuaron visitas de campo periódicas, donde se registraron aspectos relacionados a la fenología del cultivo y se estimó el rendimiento cultural en el momento óptimo de cosecha. Para el cálculo del rendimiento cultural se consideró el peso de los tallos molibles de sorgo, después de eliminar hojas, vainas y la porción apical del tallo, además de la población de tallos.

Posteriormente, se realizó la cosecha mecanizada del cultivo empleando el mismo sistema utilizado en el cultivo de caña de azúcar (cosechadoras integrales y carros de transporte auto-volcables).

Finalmente, se efectuaron experiencias de molienda y procesamiento industrial, conjuntamente con ensayos de laboratorio, a fines de evaluar el proceso fermentativo y producción de etanol a partir del jugo extraído del sorgo azucarado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los datos más relevantes respecto de la producción cultural en los tres primeros ciclos del proyecto.

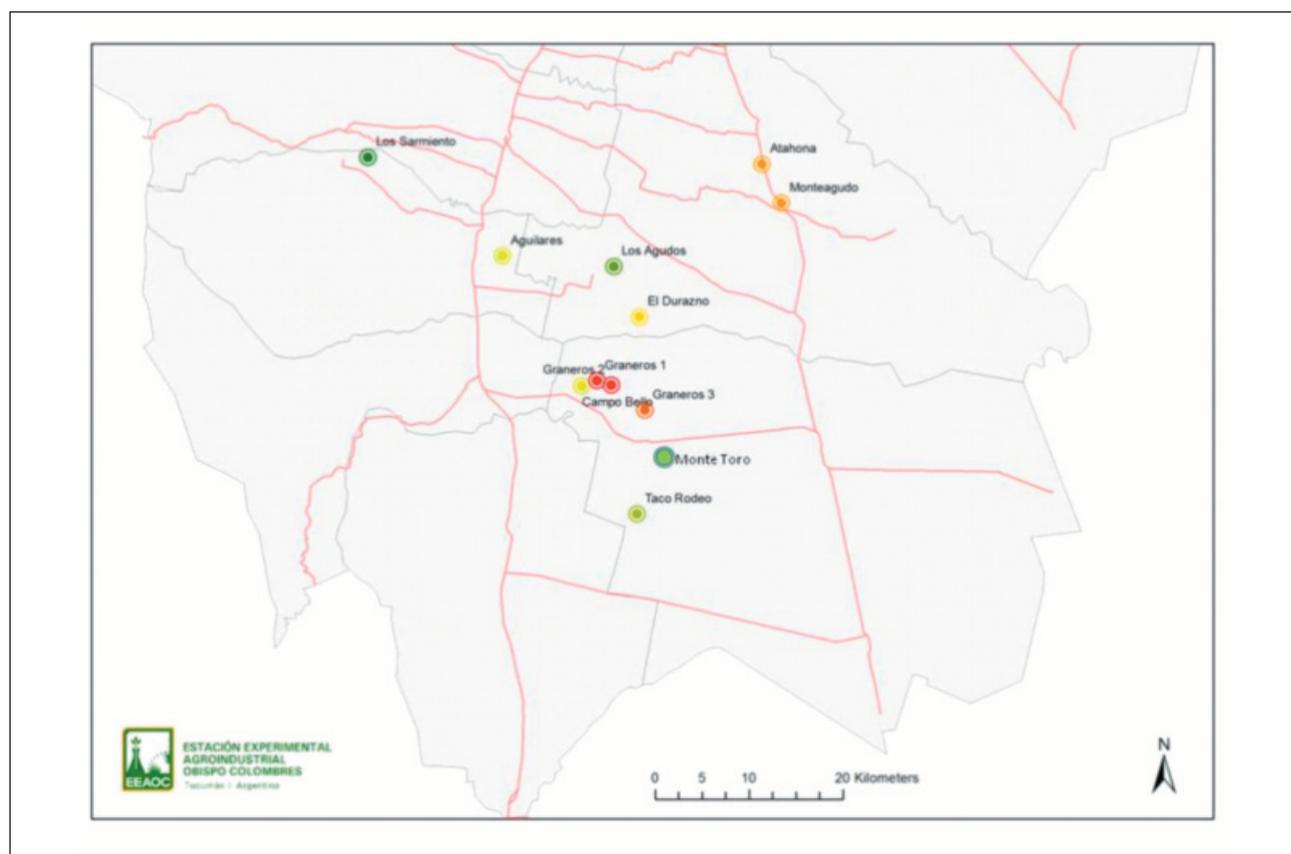


Figura 1: Diferentes localidades cultivadas con sorgo azucarado durante el desarrollo del Proyecto Biosorgo.

Tabla 1: superficie sembrada, superficie cosechable, rendimiento cultural promedio y rendimiento cultural máximo registrado en el periodo 2013-2017.

Ciclo	Período	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechable (ha)	Rendimiento Cultural Promedio (t/ha)	Rendimiento Cultural Máximo (t/ha)
1	2013/2014	387	198	22,4	44,3
2	2014/2015	263	213	28,1	40,1
3	2015/2016	305	157	19,9	26,4
4	2016/2017	60	60	29,6	41,0

Cabe destacar que se registró una disminución significativa del área sembrada en cada ciclo, debido principalmente a la ocurrencia de condiciones ambientales desfavorables registradas en el inicio del cultivo, afectando la emergencia y establecimiento de este. Se debe considerar que el efecto del stress hídrico fue más severo en suelos salinos y sódicos. En general, se registraron valores de conductividad eléctrica (en extracto de saturación) de 0,2 a 6,1 dS/m, con algunos sectores cuyo pH fue de 7,4 a 8 dS/m en el nivel superficial y de 8,2 a 9,2 dS/m en profundidad, lo que estaría asociado a condiciones de sodicidad.

Los mayores valores de rendimiento cultural estuvieron asociados a sectores con menor nivel de

salinidad. Cabe destacar que niveles de CE cercanos o mayores a 7 dS/m, asociados a condiciones de sodicidad, imposibilitaron el establecimiento del cultivo de sorgo azucarado.

Durante el ciclo 2013-2014 se registraron condiciones de sequía y altas temperaturas en los meses de diciembre y enero, afectando la emergencia y establecimiento del cultivo con pérdidas cercanas al 50% de la superficie sembrada (Tabla 2). El período comprendido entre el mes de octubre y el mes de febrero se caracterizó por la ocurrencia de temperaturas muy elevadas, con máximas diarias que superaron los 40°C. Respecto a los aportes hídricos, se registraron valores por debajo de los promedios de referencia en gran parte del

Tabla 2: precipitaciones acumuladas durante los distintos ciclos de cultivo durante los meses de diciembre a junio de cada año considerado para localidades representativas.

Localidad	Total ciclo (mm)			
	2014	2015	2016	2017
La Cocha	649.6	941,0	742.9	648.3
Ingas	524.2	719.6	827.4	870.5
Graneros	708.2	736.3	754.1	542,0

período analizado, destacándose sólo el mes de febrero por sus aportes mayor a los valores históricos (Figura 2).

El ciclo 2014-2015 se caracterizó por el exceso de precipitaciones durante la época de siembra e inicio del cultivo (diciembre a enero) y en etapas posteriores de desarrollo del mismo (marzo a mayo). Los registros fueron 50% a 100% mayores respecto de los valores de referencia según el mes y las localidades consideradas (Figura 2). Además, la ocurrencia de lluvias inmediatamente después de la siembra, sumado al tipo de suelo de algunas localidades, ocasionó un encostramiento y endurecimiento superficial del suelo con la consecuente falla en la emergencia de plántulas en una superficie considerable. Respecto a las condiciones térmicas durante los meses de

enero, febrero y parte de marzo, se caracterizaron por la ocurrencia de temperaturas elevadas, con máximas diarias que superaron los 40°C y una temperatura media para este período de 26°C.

Durante el siguiente ciclo (2015-2016) también se registraron precipitaciones que superaron en 50% a los valores de referencia en la época de siembra e inicio del cultivo (enero y febrero). Sin embargo, en etapas posteriores de desarrollo del cultivo (marzo y abril) las precipitaciones fueron menores respecto de los valores de referencia en las localidades consideradas, alcanzando valores extremos de un 33% de los valores normales (Figura 2). Como consecuencia de las altas temperaturas registradas durante la fecha de siembra y etapas de

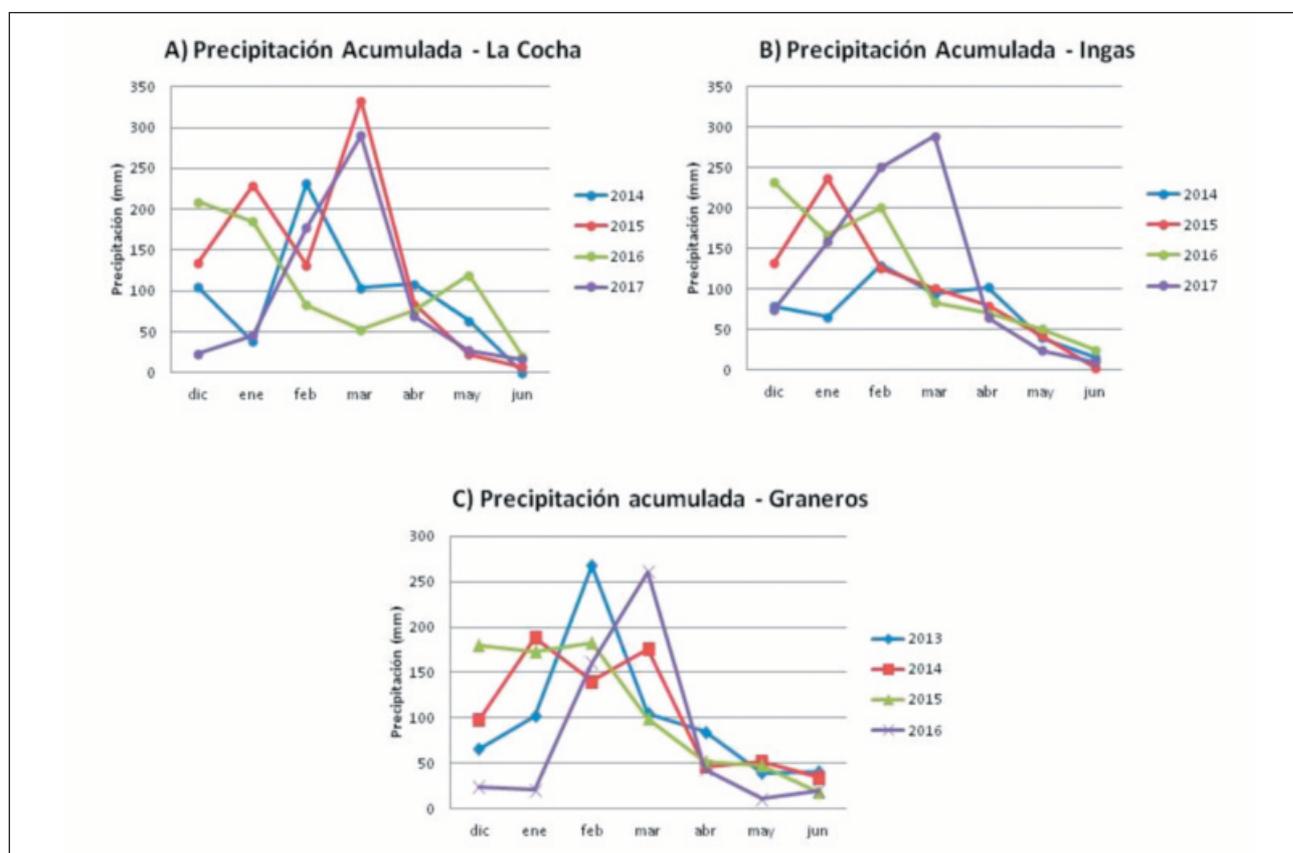


Figura 2: precipitaciones acumuladas durante los distintos ciclos de cultivo durante los meses de diciembre a junio para localidades representativas (2-A: La Cocha, 2-B: Ingas y 2-C: Graneros).



Figura 3: desarrollo de anillo necrótico y daños de sistema radicular.

desarrollo incipiente del cultivo (31,5 a 37,8°C), se observaron plantas dañadas a nivel de sistema radicular con una significativa disminución en la superficie sembrada (Figura 3). El período comprendido entre los meses de enero, febrero y parte de marzo registró una temperatura intermedia.

Finalmente, en el ciclo 2016-2017 se registraron precipitaciones significativamente inferiores a las normales en un 33% en la época de siembra e inicio del cultivo (enero). Contrariamente, en etapas posteriores de desarrollo (febrero a abril) las precipitaciones superaron

entre un 50% al 100% los valores normales (Figura 1). Además, los meses de enero, febrero y parte de marzo se caracterizaron por la ocurrencia de temperaturas elevadas, con máximas diarias de hasta 39,7°C y una temperatura media de 26,7°C. Este ciclo se caracterizó por la ocurrencia de prolongados períodos de temperaturas elevadas (mayores a 32°C).

En la Tabla 3 se presentan los valores de calidad fabril de la materia prima expresado por el azúcar fermentescible total (AFT) en porcentaje y por tonelada de sorgo, el contenido de fibra de la materia prima y la

Tabla 3: azúcar fermentescible, contenido de fibra y producción estimada de etanol correspondientes al periodo 2013-2016.

Ciclo	Período	Brix [°Brix]	Fibra % sorgo	Etanol estimado l/t sorgo
1	2013/2014	8,9	11,83	30,1
2	2014/2015	11,2	10,99	38,5
3	2015/2016	15,7	11,06	53,9
4	2016/2017	12,5	11,60	42,5

producción de etanol estimada por tonelada de sorgo procesado.

Se observa que durante el primer y segundo ciclo no se alcanzaron valores óptimos en la acumulación de azúcares en los tallos, lo cual estaría asociado a las condiciones ambientales desfavorables registradas durante la fase de maduración del cultivo (fines de marzo a mediados de mayo), caracterizadas por un exceso de lluvias y elevada humedad relativa (HR) promedio 64% para el primer ciclo y 70% para el segundo ciclo respectivamente). Además, en ambos ciclos se registró una mayor cantidad de días nublados que lo normal.

El mejor valor de azúcar fermentescible total y la producción de etanol estimada en el ciclo 2015-2016 puede ser explicada en base a las condiciones ambientales que favorecieron la acumulación de azúcares durante la fase de maduración. Durante los meses de marzo y abril se registró un nivel de precipitaciones (66% menor y hasta menos de 33% respectivamente) y HR significativamente menor a los valores de referencia para la localidad de Graneros (HR 39%). Coincidentemente, se registró la ocurrencia de menos días nublados.

Respecto al ciclo 2016-2017, se alcanzaron valores de calidad de materia prima intermedios respecto de los anteriores. Las precipitaciones superaron ampliamente los valores de referencia para la localidad de Graneros durante los meses de febrero y marzo, lo que determinó valores elevados de HR (82%). Sin embargo, en los meses posteriores (abril y mayo) se registraron precipitaciones por debajo de los valores de referencia, generando mejores condiciones ambientales para la maduración, y por ende una mejora en la acumulación de azúcares etapas finales

de esta fase.

A fines de aprovechar la materia prima generada en los distintos ciclos de producción se efectuaron cosechas mecanizadas en las cuales se empleó el mismo sistema utilizado en el cultivo de caña de azúcar. Se trabajó con cosechadoras integrales (que cortan, trocean y limpian los tallos del cultivo) y se cargó la materia prima en carros de transporte auto-volcables equipados con ruedas de alta flotación. Cabe destacar que las cosechadoras también fueron equipadas con equipos de semi-orugas a fines de poder transitar en condiciones edáficas desfavorable y evitar una compactación excesiva. Estos implementos formaron parte de equipamiento adquirido específicamente para la ejecución del proyecto (Figura 3). A través de la evaluación del desempeño de las mismas, considerando pérdidas de materia prima, contenido de trash y aspectos operativos, se logró confirmar la aptitud de este sistema de cosecha para el cultivo de sorgo azucarado con fines bioenergéticos.

Se efectuaron experiencias de molienda, determinando los ajustes necesarios para mejorar la eficiencia del proceso fabril y quema de bagazo para la generación de vapor con un poder calorífico y contenido de cenizas muy similar al bagazo de caña de azúcar. Sin embargo, considerando la duración de los períodos de proceso en planta, se piensa que los parámetros fabriles son solamente preliminares y necesitan de un mayor registro. El jugo obtenido fue clarificado, fermentado y destilado adecuadamente como jugo puro de sorgo y como mezclas con melaza de caña de azúcar, obteniendo rendimientos similares a los logrados con productos azucarados derivados de la caña de azúcar.



Figura 3: Cosechadora integral de caña de azúcar realizando labores en el cultivo de sorgo azucarado (Monte Toro, 2016).

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se confirmó la aptitud del sorgo azucarado como cultivo energético para las condiciones agroecológicas de la región NOA, con niveles de rendimiento cultural y alcohólico promisorios. El equipamiento disponible para el cultivo y la cosecha de caña de azúcar es totalmente adaptable, con los ajustes y regulaciones correspondientes, a la producción y cosecha de sorgo azucarado.

La posibilidad de completar el ciclo productivo, tanto en su fase agrícola como industrial, reafirmó la complementariedad de este cultivo con el de caña de azúcar. Al realizar experiencias en escala comercial, se lograron identificar las principales áreas susceptibles de mejoras. Se destacan entre ellas la necesidad de una adecuada coordinación de la etapa agrícola con las actividades de reparación y puesta a punto de los ingenios previo a la zafra de caña de azúcar, a fines de lograr la cosecha de la materia prima y su procesamiento con una calidad óptima. Además, surge la necesidad de desarrollar y establecer un esquema comercial que incentive la incorporación de una materia prima no tradicional en el proceso productivo.

A fines de lograr una mejor adopción de un cultivo no tradicional, surge la necesidad de sostener programas de mejoramiento genético específico que permitan disponer de materiales genéticos con mejoras en su adaptación ambiental, mayor nivel de acumulación de azúcares y con adecuada respuesta a diferentes épocas de siembra. Esto permitiría cubrir la variabilidad generada por las condiciones ambientales durante la época de siembra sin afectar significativamente el rendimiento potencial del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Almodares, A. and M. R. Hadi. 2009.** Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. *Afr. J. Agric. Res.* 4 (9): 772-780.
- BP Statistical Review of World Energy 2015.** [En línea] Disponible en <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (consultado el 10 de marzo de 2017).
- Foreign Agricultural Service – Global Agricultural Information Network. 2017.** Argentina Biofuels Annual. USDA.
- International Energy Agency, World Energy Outlook 2016.** [En línea]. Disponible en http://www.iea.org/bookshop/720-World_Energy_Outlook_2016 (consultado el 5 de marzo de 2017).
- James, G. 2004.** Sugarcane, 2nd Edition. Reino Unido: Blackwell Science.
- Mazziotto, J. 2005.** Agroecología y biocombustibles, herramientas para el desarrollo. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo, Uruguay.
- Ministerio de Energía y Minería - Presidencia de la Nación. 2015.** Balance Energético Nacional de la República Argentina. [En línea]. Disponible en <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366> (consultado el 10 de marzo de 2017).
- Ratnavathi, C. V.; K. Suresh; B. S. Vijay Kumar; M. Pallavi; V. V. Komala and N. Seetharama. 2010.** Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. *Biomass and Bioenergy* 34: 947-952.
- Romero, E. R.; G. J. Cárdenas; M. Ruiz; S. Casen; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; B. S. Zossi; G. De Boeck; C. Gusils; J. Tonatto; M. Medina; R. Caro y J. Scandaliaris. 2012.** Integración del sorgo azucarado a la cadena de aprovechamiento bioenergético de la caña de azúcar en Tucumán, R. Argentina. *Avance Agroind.* 33 (1): 13-17.
- Romero, E. R. 2010.** Biosorgo. Apuntes del camino. *Avance Agroind.* 34 (2): 29-31.
- Centro Azucarero Argentino. Zafra Azucarera 2016. 2017.** [En línea] Disponible en <http://www.centroazucarero.com.ar/zafras/zafra2016.html> (consultado el 3 de marzo de 2017).