

Comparación de dos métodos de análisis espacial en etapas de selección sin réplicas de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en Tucumán, R. Argentina*

Ernesto R. Chavanne**, Jorge V. Díaz**, María B. García** y María I. Cuenya**

RESUMEN

El propósito de este estudio fue comparar dos métodos de análisis espacial aplicados en la segunda etapa de selección del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar (PMGCA) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Tucumán, Argentina. Se analizaron dos ensayos experimentales sin repeticiones en edad soca 1, uno de los cuales contenía 200 clones con 20 pares de testigos (Santa Ana, Río Chico); y el otro, 25 clones con 4 pares de testigos (Las Talitas, Tafí Viejo). Para la comparación de los métodos de ajuste espacial se calcularon las eficiencias relativas del Índice Normalizado y del análisis espacial autorregresivo de primer orden, sobre cinco variables evaluadas: número de tallos por parcela, peso individual del tallo, rendimiento fabril % estimado y kilogramos de caña y de azúcar por parcela, respectivamente. La eficiencia relativa del Índice Normalizado fue poco consistente, variando desde 2,9% a 38,2% según la característica analizada en la localidad de Santa Ana; y desde 0% a 79,8% en Las Talitas. La eficiencia relativa del Análisis Espacial fue mayor que la del Índice Normalizado, oscilando desde 14,4% a 262,5% en Santa Ana; y desde 16,5% a 106,9% en Las Talitas. Los coeficientes de correlación entre los valores ajustados y sin ajustar fueron consistentemente superiores para el caso del análisis espacial autorregresivo de primer orden, indicando que este método puede ser utilizado para incrementar la eficiencia en la segunda etapa de selección del PMGCA de la EEAOC.

Palabras clave: eficiencia relativa, ensayos experimentales sin réplicas, análisis espacial.

ABSTRACT

Comparison of two spatial analysis methods used at early stages of sugarcane (*Saccharum spp.*) selection program in Tucumán, Argentina

This work compares the efficiency of two spatial analysis methods when used at the second stage of selection in the sugarcane breeding programme of Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (Tucumán, Argentina). Two trials that had been planted in May 2010 at first ratoon age were evaluated: one of them consisted of 200 clones Serie 2008 and 20 pairs of controls, planted in Santa Ana (Río Chico), and the other included 25 clones Serie 2008 and four pairs of controls, planted in Las Talitas (Tafí Viejo). Spatial data fitting methods were compared by calculating the relative efficiency of the normalization index and the first-order spatial autoregressive model in relation to the assessment of the following five variables: stalk number, individual stalk weight, estimated factory yield (%), and kilograms of cane and sugar per plot. The relative efficiency of the Normalized Index proved to be inconsistent and depended on the assessed parameter: it ranged from 2.9% to 38.2% in Santa Ana, and from 0.0% to 79.8% in Las Talitas. Spatial Analysis showed a higher relative efficiency, with values between 14.4% and 262.5% in Santa Ana, and between 16.5% and 106.9% in Las Talitas. Correlation coefficients between fitted and unfitted values were consistently higher in Spatial Analysis, thus demonstrating that this method can be used to improve procedures at early stages of sugarcane genotype selection.

Key words: relative efficiency, early stages of selection, spatial analysis.

Recibido: 4-10-17 - Aceptado: 14-06-19

*Trabajo presentado en la XXa Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Tucumán, Argentina. 6 - 8 de abril de 2016.

**Sección Caña de Azúcar, EEAOC. echavanne@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

En las etapas tempranas de selección de los Programas de Mejoramiento Genético de caña de azúcar (*Saccharum* spp.), es frecuente la implantación de ensayos con un gran número de clones multiplicados en parcelas pequeñas sin repetición debido a la escasa disponibilidad de material de propagación y a que ocupan, en general, una importante superficie de experimentación (Jackson and Mc Rae, 2001). Como consecuencia de esto y debido a la existencia de gradientes de fertilidad de los suelos y a los efectos de competencia entre parcelas vecinas, frecuentemente se afecta la eficiencia de la selección, disminuyendo en consecuencia la precisión para detectar genotipos superiores (Becher, 1995).

Con el propósito de disminuir los efectos de competencia entre genotipos y la variabilidad atribuida a la heterogeneidad del suelo, se pueden utilizar diseños experimentales que permiten disminuir o corregir estos efectos negativos. Algunos de ellos son diseños aumentados o enriquecidos, bloques incompletos, diseños alfa látice en filas y columnas y modelos mixtos (Federer, 1961; Grondona *et al.*, 1996).

Para ensayos con numerosos genotipos de caña de azúcar sin repeticiones, el diseño aumentado o enriquecido fue primeramente recomendado por Federer (1961) y es utilizado por algunos programas de mejoramiento de Brasil para el control de la variabilidad espacial en etapas tempranas de selección clonal (Duarte and Vencovsky, 2005). Una alternativa de estos diseños aumentados es repetir varias veces las variedades utilizadas como testigos, siendo necesario que estos reaccionen del mismo modo que los materiales evaluados al suelo, al clima y a distintas prácticas agronómicas del experimento. De este modo, es preferible emplear al menos dos testigos para evitar que posibles interacciones de alguno de ellos con el ambiente invaliden su función como tal. A mayor cantidad y frecuencia de los testigos utilizados, se obtiene un mejor control de la variabilidad local (Chanda, 1994).

El método de corrección espacial denominado Índice Normalizado (IN) se aplica frecuentemente sobre macroparcels de soja (Devani *et al.*, 2001) y esta metodología fue adoptada en caña de azúcar a partir del año 2010, en los ensayos de la segunda etapa de selección del Programa de Mejoramiento Genético (PMGCA) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) (Informe Anual EEAOC, 2011). En estos ensayos, cada genotipo está representado por una parcela de 3 m de longitud, con un distanciamiento entre surcos de 1,6 m. En esta etapa se evalúan aproximadamente 5000 genotipos, de los cuales se selecciona alrededor del 10% superior - unos 500 clones sobresalientes-, los que pasan a la siguiente etapa de selección. De esta manera, el PMGCA decidió incrementar la cantidad de parcelas testigo tratando

de mantener una proporción de 10 clones por cada testigo, utilizando como controles de referencia las variedades TUCCP 77-42 y LCP 85-384, por tener ambas amplia difusión comercial en el área cañera de Tucumán, Argentina (Ostengo *et al.*, 2015).

En Australia, Stringe y Cullis (2002) aplicaron técnicas de análisis espacial (modelos mixtos autorregresivos de tipo AR1) para corregir la variabilidad espacial y los efectos de la competencia entre parcelas vecinas, en ensayos no repetidos en etapas tempranas de selección del programa de mejoramiento de caña de azúcar de ese país.

El objetivo de este trabajo fue comparar la eficiencia relativa de dos procedimientos estadísticos de corrección espacial (Índice Normalizado y análisis espacial autorregresivo de primer orden AR1), sobre ensayos sin réplicas de clones de caña de azúcar, correspondientes a la segunda etapa de selección del PMGCA de la EEAOC en Tucumán, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este estudio se utilizó la información de dos ensayos correspondientes a la segunda etapa de selección del PMGCA. Uno de los ensayos, implantado en la localidad de Santa Ana (departamento Río Chico, Tucumán, Argentina), comprendió 200 clones y 20 pares de testigos intercalados en bloques incompletos (relación 10:1). El otro ensayo, ubicado en Las Talitas (departamento Tafí Viejo, Tucumán, Argentina) comprendió 25 clones y cuatro pares de testigos en bloques incompletos (relación 6:1). En ambos casos la distribución de los genotipos fue aleatoria y los testigos fueron intercalados en forma sistemática.

Las variables analizadas en la edad de soca 1 (año 2012) fueron: número de tallos/parcela (NUTA); peso por tallo (PPT) y rendimiento fabril % (RF%), obtenido a partir de muestras de 10 tallos en el mes de junio; kilogramos de caña por parcela (KCP), calculado como el producto entre NUTA y PPT; y finalmente, kilogramos de azúcar por parcela (KAP), estimado por el producto entre KCP y RF%.

En el análisis estadístico de los datos se utilizó la técnica del Índice Normalizado (IN), que consiste en obtener la semi suma del par de testigos de cada bloque incompleto, dividido en el promedio general de los testigos del ensayo (Devani *et al.*, 2001). Por otro lado, se aplicó la metodología de modelos mixtos (análisis espacial autorregresivo de primer orden), utilizando los programas estadísticos Infostat versión 2012 y R versión 3.1.3 (Di Rienzo *et al.*, 2012), considerando el genotipo como efecto aleatorio, y los testigos y bloques como efectos fijos, según el siguiente el modelo estadístico:

$$y_{ijk} = \mu + g_i + c_j + \beta_k + \varepsilon_{ijk}$$

donde μ es la media general, g_i es el efecto de genotipo (o clon) y el error experimental ϵ_{ijk} considerados como efectos aleatorios, mientras que c_j indica el efecto de los pares de testigos dentro de bloques β_k considerados como efectos fijos.

Para cada variable utilizada se realizó un análisis de la variancia convencional (ANAVA) que se comparó con el Análisis Espacial (AE). Para calcular la eficiencia relativa (ER%) del método espacial sobre la del ANAVA, se utilizaron los errores estándar de las diferencias (ERD) o de las predicciones, basada en la fórmula propuesta por Cullis y Gleeson (1991):

$$ER\% = [100 \times (ERD_{\text{estándar}}) / (ERD_{\text{espacial}})] - 100$$

Para los IN se calcularon las ER% en función de las reducciones de las variancias de los testigos no ajustados en comparación con los valores ajustados por este índice.

Se calcularon también los coeficientes de correlación de Pearson entre los valores ajustados y no ajustados de las cinco características evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados de eficiencia relativa (ER%) de los dos métodos de corrección

espacial utilizados en este estudio: Índice Normalizado (IN) y Análisis Espacial (AE), en los dos ensayos analizados en Etapa II: Santa Ana (Tabla 1) y Las Talitas (Tabla 2).

En la Tabla 1, se observa que aplicando el IN como técnica de ajuste espacial, la eficiencia relativa (ER%) aumentó con respecto a los datos sin ajustar en forma variable de acuerdo con la característica analizada, con valores que oscilaron entre el 2,9% para PPT y el 38,2% para NUTA. Para los caracteres KCP y KAP, la eficiencia relativa resultó negativa, indicando que las estimaciones de los errores estándar fueron mayores en los valores ajustados (Aj) que en los no ajustados (NAj). En la misma Tabla se observa que con la metodología del análisis espacial AR1, los valores de ER% fueron mayores que los de ER%, aplicando el IN para todas las variables analizadas.

En la Tabla 2, se observa que con la aplicación del IN y considerando las variables NUTA, PPT y RF%, la eficiencia relativa osciló entre 0% para PPT y 79,8% para RF%. Otra vez, la ER% resultó en valores negativos para KCP y KAP por idénticas causas que las recién explicadas para el ensayo de Santa Ana con respecto a los datos sin ajustar. Con la utilización del análisis espacial, la ER% obtenida en el ensayo de Las Talitas resultó mayor que la estimada a partir del IN para todas las variables.

Tabla 1. Eficiencia relativa (ER%) de dos métodos de corrección espacial: Índice Normalizado (IN) y Análisis Espacial (AE), aplicados sobre el análisis de la variancia convencional (ANAVA) en parcelas de genotipos no repetidos y testigos de la Etapa II del PMGCA. Localidad de Santa Ana (Río Chico), Tucumán.

Carácter	Índice Normalizado (IN)			ANAVA		Análisis Espacial (AE)		
	σ^2 Test. NAj	σ^2 Test. Aj	ER%	σ^2 E.E.	ERD ^(*)	Σ^2 ESP	ERD ^(*)	ER%
NUTA	119,25	86,27	38,23	221,34	52,61	172,27	25,77	104,15
PPT	0,35	0,34	2,94	0,01	0,02	0,01	0,01	100,00
RF%	2,34	1,88	24,47	0,77	1,45	3,21	0,40	262,50
KCP	505,73	655,30	-22,82	211,18	137,59	205,52	120,27	14,40
KAP	2,51	4,16	-39,66	3,22	1,71	3,22	1,31	30,53

Tabla 2. Eficiencia relativa (ER%) de dos métodos de corrección espacial: Índice Normalizado (IN) y Análisis Espacial (AE), aplicados sobre el análisis de la variancia convencional (ANAVA) en parcelas de genotipos no repetidos y testigos de la Etapa II del PMGCA. Localidad de Las Talitas (Tafi Viejo), Tucumán.

Carácter	Índice Normalizado (IN)			ANAVA		Análisis Espacial (AE)		
	σ^2 Test. NAj	σ^2 Test. Aj	ER%	σ^2 E.E.	ERD ^(*)	Σ^2 ESP	ERD ^(*)	ER%
NUTA	171,24	159,95	7,06	329,83	289,30	212,13	185,700	55,79
PPT	0,07	0,07	0	0,01	0,07	0,01	0,04	75,00
RF%	1,69	0,94	79,79	0,94	0,60	0,01	0,29	106,90
KCP	648,82	677,55	-4,24	227,59	128,78	227,59	106,13	21,34
KAP	4,55	5,13	-11,31	2,91	1,27	2,91	1,09	16,51

(*) Error Estándar promedio de las diferencias entre clones; NAj: Valores no ajustados; Aj: Valores ajustados; σ^2 E.E.: Variancia del Error Estándar; Σ^2 ESP: Estimación de la variancia del error por AE.

La eficiencia relativa puede ser tomada como un indicador indirecto de la existencia de heterogeneidad edáfica en los lotes experimentales y sugiere que en la segunda etapa de selección clonal del PMGCA se hace necesario utilizar técnicas de análisis espacial de manera rutinaria, a fin de incrementar la ganancia genética en las etapas tempranas de selección clonal de la caña de azúcar. Resultados similares fueron obtenidos por Stringer and Cullis (2002) en Australia y por Edmé *et al.* (2007) en Estados Unidos.

En la Tabla 3 se observa que el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) entre las medias ajustadas y sin ajustar por ambos métodos de análisis espacial fueron altamente significativos ($P < 0,001$) en las cinco variables analizadas y en los dos sitios experimentales. En la mayoría de los casos, el método de análisis espacial evidenció mayores valores de correlación respecto a la técnica del IN. Los valores más elevados de correlación oscilaron entre 0,84 y 0,98 para RF% y los valores más bajos entre 0,57 y 0,73 para KAP. Las correlaciones altamente significativas detectadas para todas las características analizadas indicarían que los ajustes espaciales permiten incrementar la respuesta a la selección de los caracteres sujetos a selección al disminuir los efectos negativos de la variabilidad espacial dentro del soporte experimental.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre medias ajustadas y no ajustadas por el Índice Normalizado (IN) y por Análisis Espacial (AE) en ensayos sin réplicas de la Etapa II del PMGCA, ubicados en las localidades de Santa Ana y Las Talitas, Tucumán.

Características	Santa Ana		Las Talitas	
	IN	AE	IN	AE
NUTA	0,73**	0,79**	0,87**	0,94**
PPT	0,86**	0,85**	0,85**	0,96**
RF%	0,92**	0,97**	0,84**	0,98**
KCP	0,65**	0,80**	0,62**	0,86**
KAP	0,67**	0,73**	0,57**	0,67**

** Altamente significativo ($P < 0,001$)

CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados en este estudio fue posible establecer las siguientes conclusiones:

- Se comprobó que la utilización de testigos repetidos y la posterior aplicación de técnicas de análisis espacial puede ser un recurso eficaz para incrementar la eficiencia relativa en ensayos sin réplicas de clones de caña de azúcar en etapas tempranas de selección.
- Se confirmó que la técnica de análisis espacial utilizando modelos AR1 tuvo mayor eficiencia relativa que la técnica del IN en todos los caracteres de interés económico evaluados en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Becher, H. H. 1995. On the importance of soil homogeneity when evaluating field trials. *J. of Agron. & Crop Sci.* 174: 33-40.

Chanda, S. 1994. Efficiency of check-plot designs in unreplicated field trials. *Theor. Appl. Genet.* 88: 618-620.

Cullis, B. R. and A. C. Gleeson. 1991. Spatial analysis of field experiments-an extension to twodimensions. *Biometrics* 47:1449-1460.

Devani, M. R.; F. Ledesma; J. M. Lenis; L. D. Ploper; M. B. García; M. A. Zamorano; D. Gamboa; M. C. Hasán; G. López; C. Lamelas y J. Valderrábano. 2001. Red de evaluación de cultivares de soja para el NOA. Resultados de la campaña 2000/2001. EEAOC, Las Talitas, Argentina. Publ. Espec. (21).

Duarte, J. B. and R. Vencovsky. 2005. Spatial statistical analysis and selection of genotypes in plant breeding. *Pesq. agropec. bras., Brasília* 40 (2):107-114.

Di Rienzo J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Edmé, S. J.; P. Y. P. Tai and J. D. Miller. 2007. Relative efficiency of spatial analyses for non-replicated early-stage sugarcane field experiments. *Journal American Society of Sugar Cane Technologists* 27: 89-104.

Federer, W. T. 1961. Augmented designs with one-way elimination of heterogeneity. *Biometrics* 17 (3): 447-473.

Gronzona, M. O.; J. Crossa; P. N. Fox and W. H. Pfeiffer. 1996. Analysis of variety trials using two-dimensional separable ARIMA processes. *Biometrics* 52: 763-770.

Jackson, P. and T. A. Mc Rae. 2001. Selection of Sugarcane Clones in Small Plots: Effects of Plot Size and Selection Criteria. *Crop Sci.* 41: 315-322.

Ostengo, S.; M. A. Espinosa; J. V. Díaz; E. R. Chavanne; D. D. Costilla y M. I. Cuenya. 2015. Distribución de

variedades comerciales de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, R. Argentina. Relevamiento de la campaña 2013/2014. Avance Agroindustrial 35 (4): 10-14.

Stringer, J. K. and B. R. Cullis. 2002. Application of spatial analysis techniques to adjust for fertility trends

and identify interplot competition in early stage sugarcane selection trials. Aust. J. Agric. Res. 53: 911-918.

Informe Anual EEAOC. 2011. Programa: Caña de Azúcar. Subprograma: Mejoramiento Genético. EEAOC (12): 17-24.

Uso de Teledetección y SIG para la detección de frecuencias de rotación soja/maíz en el departamento Burruyacu, provincia de Tucumán, Argentina

Carmina Fandos*; Javier I. Carreras Baldrés*, Pablo Scandaliaris*, Federico J. Soria*, Daniel E. Gamboa** y Mario R. Devani**

RESUMEN

Burruyacu es el departamento de mayor producción de soja y maíz en la provincia de Tucumán. La rotación de cultivos es una práctica fundamental para el logro de sistemas productivos sustentables en el tiempo. En este sentido, la rotación con gramíneas, principalmente maíz, es muy importante ya que, entre otros beneficios, contribuye a una mejora en las condiciones físicas y químicas del suelo que llevan al mejor aprovechamiento de la humedad y favorece la disminución de enfermedades, plagas y malezas. El objetivo del presente estudio fue identificar y cuantificar las frecuencias de rotación soja/maíz en el departamento Burruyacu, en el período comprendido entre las campañas 2013/2014 a 2016/2017. Se realizó un estudio multitemporal de imágenes categorizadas obtenidas de imágenes satelitales utilizando metodologías de SIG. Se identificaron distintas secuencias de cultivos que correspondieron a tres grupos: lotes con cultivos de soja sin rotación con maíz, lotes con cultivos de maíz sin intercalar con soja, y lotes con rotación soja/maíz. Las secuencias con rotación soja/maíz concentraron el mayor porcentaje de superficie relevada. Le siguen en orden decreciente el grupo conformado por lotes con soja sin rotación con maíz y la agrupación integrada por lotes con maíz sin rotar con soja. En el grupo integrado por las secuencias de cultivos de soja sin rotación con maíz predominaron aquellas que correspondían a soja en una sola campaña. En la agrupación de secuencias con rotación soja/maíz prevaleció el subgrupo de secuencias con una campaña de maíz y tres de soja, seguido por el subgrupo integrado por maíz y soja en dos campañas cada cultivo. En este último subgrupo predominaron las secuencias en las que los cultivos de soja y maíz se intercalaron anualmente.

Palabras clave: percepción remota, agricultura de precisión, prácticas agrícolas.

ABSTRACT

Remote sensing and GIS for detection soybean/corn rotation frequencies

Burruyacu is the department with the highest production of soybeans and corn in Tucumán province. Crop rotation is a fundamental practice to achieve sustainable productive systems through time. In this sense, the rotation with grasses, mainly corn, is fundamental since, among other benefits, it contributes to an improvement in the physical and chemical conditions of the soil that allow a better use of the humidity and favors the decrease of diseases, pests and weeds. This paper aimed to identify and quantify the soybean/corn rotation frequencies in the Burruyacu department, in the period between the growing seasons 2013/2014 to 2016/2017. A multitemporal analysis of categorized images obtained from satellite images was made, applying GIS methodologies. Different sequences of crops were identified that corresponded to three groups: plots with non-rotated soybean crops with corn, plots with non-intercropped corn crops with soybean, and plots with soybean/corn rotation. Sequences with soybean / corn rotation concentrated the highest percentage of surveyed area. The group of plots with soybeans without rotation with corn and the group of plots with unrotated corn with soybeans follow in descending order. In the group of sequences of soybean crops without rotation with corn, those that corresponded to soy in a single growing season predominated. In the grouping of sequences with soybean/corn rotation, the subgroup of sequences with one corn and three soybean growing season prevailed, followed by the subgroup composed of corn and soybean in two growing seasons each crop. In the latter subgroup, the sequences with soybeans and corn interspersed annually predominated.

Key words: remote perception, precision farming, agricultural practices

Fecha de ingreso: 26-02-18 - Fecha de egreso: 8-10-18

*Sección Sensores Remotos y SIG, ** Sección Granos, EEAOC. carminaf@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

La rotación de cultivos es una práctica fundamental para el logro de sistemas productivos sustentables a través del tiempo. La información sobre secuencias y rotaciones de cultivos es un parámetro primordial al momento del análisis de un agroecosistema, puesto que influye directamente en los flujos de materia dentro del mismo (Waldhoff *et al.*, 2017).

En el contexto de agroecosistemas basados en cultivos de soja, la rotación con gramíneas, principalmente maíz, es fundamental ya que, entre otros beneficios, contribuye a una mejora en las condiciones físicas y químicas del suelo que llevan a un mejor aprovechamiento de la humedad y favorece la disminución de enfermedades, plagas y malezas (Devani *et al.*, 2003). Lo anterior redundó en un incremento en el orden del 15% al 20% promedio en el rendimiento del cultivo de soja siguiente (Pérez *et al.*, 2013).

En la provincia de Tucumán el cultivo de soja es el de mayor importancia dentro de los granos estivales, siguiéndole en jerarquía el cultivo de maíz y en muy pequeña escala otros granos como el poroto, el sorgo, la chíca, etc.

Burruyacu es el departamento de mayor producción de soja y maíz en la provincia de Tucumán (Fandos *et al.*, 2015). Entre las campañas 2013/2014 a 2016/2017 concentró entre el 37% y el 42% de la soja, y entre el 49% y el 62% del maíz cultivado a nivel provincial.

La información sobre secuencias y rotaciones de cultivos está escasamente disponible para escalas regionales ((Waldhoff *et al.*, 2017), si bien en numerosas publicaciones se diferencian coberturas vegetales utilizando información satelital. Entre las técnicas utilizadas para diferenciar coberturas vegetales utilizando imágenes satelitales se destaca el proceso de clasificación digital, que consiste en la agrupación de los valores digitales en clases y en función de la coincidencia de sus valores con hechos de interés en un determinado territorio. En el proceso, la imagen multibanda se convierte en otra imagen, donde los valores digitales no corresponden a la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a cada píxel (Chuvieco, 2000). La posibilidad de confeccionar mapas temáticos a partir de imágenes clasificadas ha dado lugar a múltiples aplicaciones, entre las que la producción de mapas de usos de suelo ocupa un lugar destacado (Prados Velasco, 1995).

El advenimiento de tecnologías relacionadas con el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) presenta un gran potencial para la obtención de información de secuencias y rotaciones de cultivos a escala regional, puesto que los sensores remotos permiten una rápida detección y cuantificación de

los cambios en la cobertura terrestre, y los SIG, posibilitan la vinculación espacial de distintas fuentes de información. En definitiva, el uso conjunto de ambas tecnologías facilita el estudio de la dinámica en el uso de la tierra, lo que resulta particularmente importante para la detección de fenómenos intuitivos y que no resultan fácilmente identificables por otros métodos (Prados Velasco, 1995).

Utilizando técnicas de geoprocusamiento (procesamiento informatizado de datos referenciados geográficamente), la información sobre cada lugar puede ser georreferenciada, lo que permite representar cartográficamente la variación espacial y/o temporal de las variables consideradas, así como la integración espacial de información proveniente de diversas fuentes.

La representación espacial de datos sobre las áreas de producción apunta a generar información que favorezca el gerenciamiento de insumos y busca la forma de solucionar o mitigar conjuntamente cuestiones de tipo ambiental, social y económico. En este sentido, la aplicación de técnicas de geoprocusamiento utilizando SIG se ha transformado en una alternativa esencial para la integración espacial de los datos multidisciplinarios a ser considerados (Landau *et al.*, 2014).

Entre los antecedentes locales de aplicación de teledetección y SIG al análisis de rotaciones de cultivos se destacan los trabajos de Soria y Fandos (2005) y Paoli *et al.* (2001).

El objetivo del presente estudio fue identificar y cuantificar las frecuencias de rotación soja/maíz en el departamento Burruyacu de la provincia de Tucumán en el período comprendido entre las campañas estivales 2013/2014 a 2016/2017.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende la zona granera del departamento Burruyacu, situado en la provincia de Tucumán, R. Argentina (Figura 1).

Se realizó un estudio multitemporal de imágenes categorizadas (Chuvieco, 2000), utilizando metodologías de SIG. Las imágenes categorizadas son coberturas temáticas digitales en formato raster generadas a partir de clasificaciones de imágenes adquiridas por sensores remotos. Las coberturas temáticas utilizadas como base fueron las clasificaciones de soja, maíz y caña de azúcar obtenidas para las campañas 2013/2014 a 2016/2017 (Soria *et al.*, 2014; Soria *et al.*, 2015; Soria *et al.*, 2016; Fandos *et al.*, 2017a; Fandos *et al.*, 2017b). Dichas capas temáticas fueron obtenidas a partir de clasificaciones multispectrales de imágenes satelitales Landsat 8 OLI, SPOT 5 HRVIR, Resourcesat 2 LISS 3 y Sentinel 2A MSI, [Obtenidas de los sitios, <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/>; <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/> y <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, respectivamente].

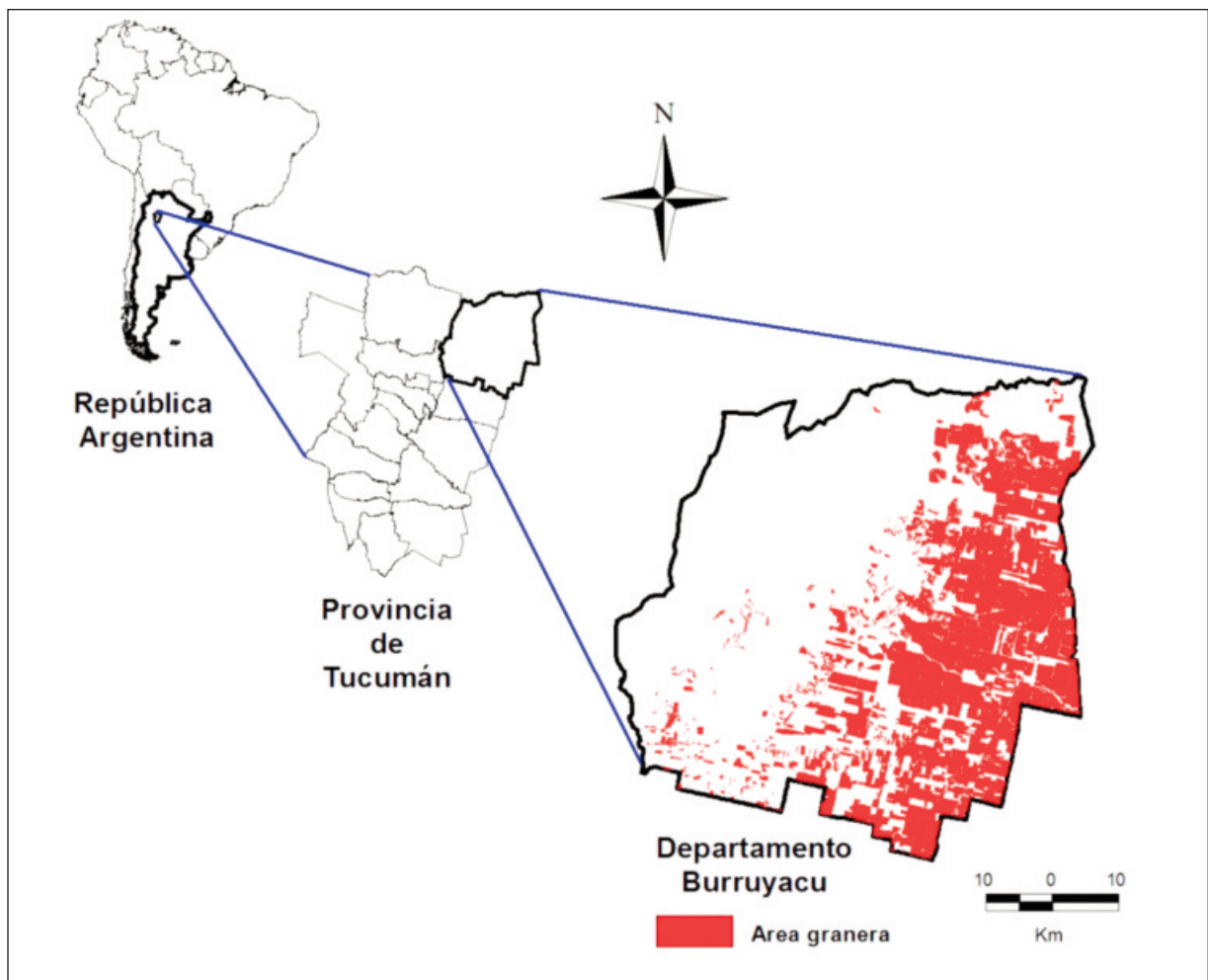


Figura 1. Situación relativa del área de estudio.

Las mismas presentaban correcciones geométricas y sistema de referencia correspondiente a la proyección cartográfica Posgar 94, Datum WGS 84.

Debido a la diferente resolución espacial de los sensores utilizados, las capas temáticas presentaban distinto tamaño de pixel, por lo que en primera instancia se realizó el redimensionamiento de pixel para ajustarlo a 30 m, valor correspondiente al pixel de las imágenes Landsat 8 OLI.

Seguidamente, utilizando técnicas de superposición de SIG se integraron las diferentes coberturas temáticas.

En primer lugar se superpusieron las coberturas de soja y maíz, lo que permitió identificar los lotes con rotación soja/maíz, los lotes con cultivos de soja que no fueron alternados con maíz y viceversa.

Posteriormente se seleccionaron las clases correspondientes a zonas con soja sin rotación con maíz y se integraron con la capa resumen de las clasificaciones de caña de azúcar entre 2014 y 2017, lo que facilitó la identificación de las zonas con rotación soja/caña de azúcar.

En la Figura 2 se expone el diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio.

Los resultados obtenidos fueron validados confrontándolos con la información de campo relevada para las diferentes campañas en análisis. El proceso se realizó corroborando la información de campo de 72 puntos de control repartidos según un muestreo sistemático no alineado (Chuvienco, 2000), por cuadrículas de 4000 ha, lo que permitió el muestreo de toda la superficie en estudio. El proceso de verificación arrojó una fiabilidad del 89%.

La Figura 3 expone la distribución espacial de la grilla de cuadrículas y los puntos de muestreo.

Finalmente se elaboraron los mapas temáticos.

Los softwares utilizados para el trabajo fueron ERDAS Imagine, versión 8.4. y ARC GIS versión 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La integración de las coberturas de soja y maíz en el período analizado permitió identificar diferentes

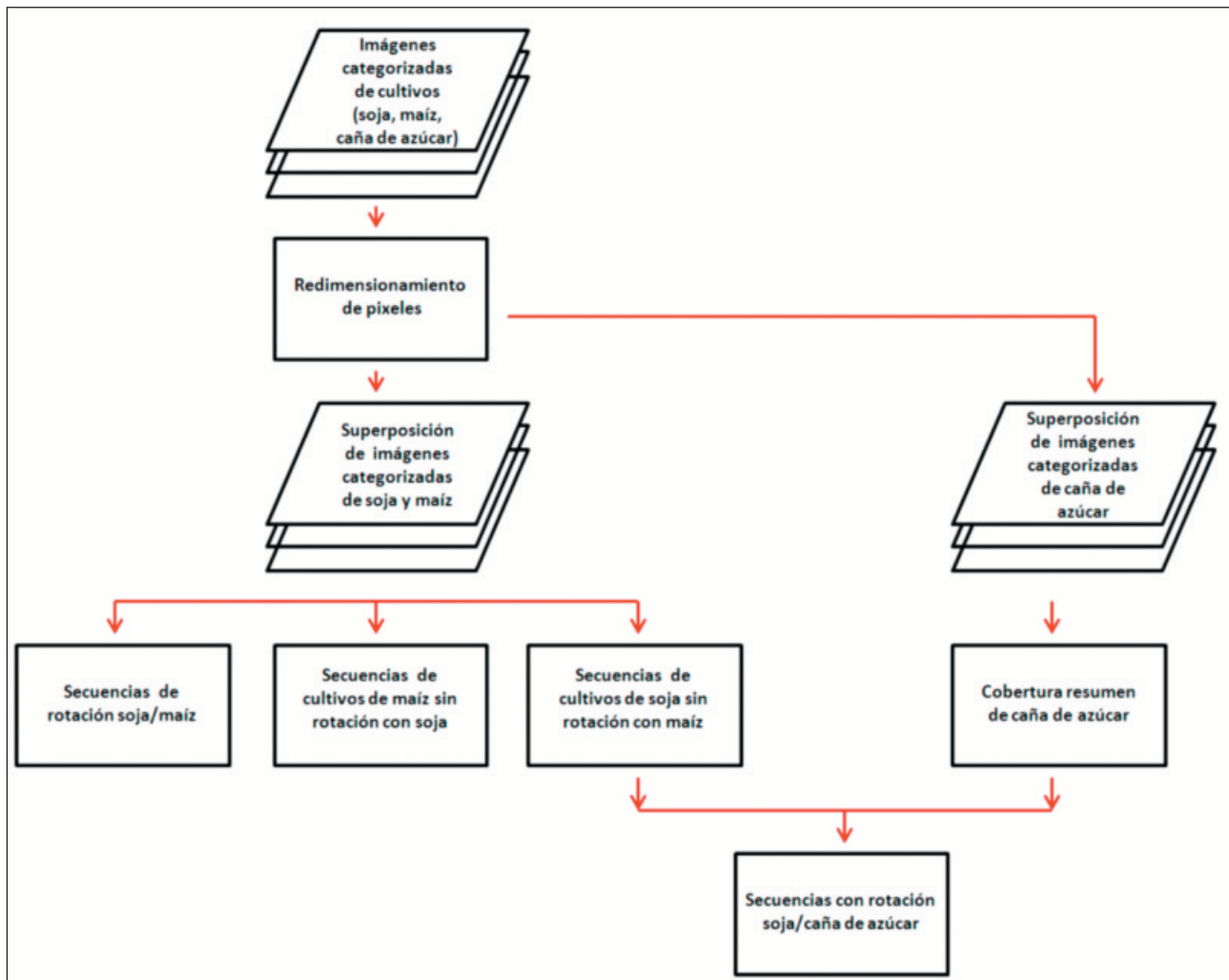


Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología empleada

secuencias o sucesiones, las que se clasificaron en tres grupos (Tabla 1). El grupo 1, integrado por las secuencias 1 a 15 que corresponden a lotes con cultivos de soja sin rotación con maíz; el grupo 2, conformado por las secuencias 16 a 27 que indican los lotes con cultivos de maíz sin intercalar con soja; y el grupo 3, que concentra las secuencias 28 a 41 y corresponden a lotes con rotación soja/maíz. Los espacios en blanco indican lotes con otros cultivos o en barbecho.

El análisis de la Tabla 1 indica un total de 128.130 ha, que corresponde a la sumatoria de las superficies de todas las secuencias identificadas. Las secuencias con mayor superficie fueron la 29, 36, 15 y 30, con valores superiores a las 10.000 ha en cada caso. Todas corresponden a rotaciones soja/maíz con excepción de la secuencia 15 que indica monocultivo de soja. Cabe destacar además que no se detectaron lotes con cultivos de maíz en las cuatro campañas.

Al realizar el análisis por agrupaciones (Figura 4), se observa que el grupo 3 concentró el mayor porcentaje

de superficie relevada, alrededor del 55%. Le siguen en orden decreciente el grupo 1 (38%) y el grupo 2 (7%).

Al analizar el grupo 1 (Figura 5), surge que el subgrupo conformado por áreas con soja en una sola campaña de las cuatro consideradas (secuencias 1 a 4) es el de mayor superficie (41%), seguido por el subgrupo de soja en las cuatro campañas (secuencia 15) con el 23%.

Una práctica agronómica frecuente en la zona cañera del departamento Burruyacu es la rotación de los cañaverales con soja (Fandos *et al.*, 2012). Para indagar si los lotes de soja que no fueron rotados con maíz correspondían a lotes en rotación soja/caña de azúcar, se integraron dichas clases con la cobertura temática de caña de azúcar entre 2014 y 2017, resultando que alrededor de 13.000 ha correspondían al sistema de rotación soja/caña de azúcar. Dicha superficie representa el 35% del total de la superficie con soja sin rotar con maíz en una a tres campañas.

La Figura 6A muestra la disposición espacial de los lotes con soja en una o más campañas, mientras que la

Tabla1: Secuencia de cultivos de soja y maíz entre las campañas 2013/2014 a 2016/2017

Grupo	Secuencias	Campañas				Superficie (ha)	Superficie (%)
		2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017		
1	1	Soja				5.490	4,3
	2		Soja			4.600	3,6
	3			Soja		3.530	2,8
	4				Soja	6.320	4,9
	5	Soja	Soja			2.760	2,2
	6		Soja	Soja		1.770	1,4
	7			Soja	Soja	2.130	1,7
	8	Soja				1.420	1,1
	9	Soja		Soja		1.080	0,8
	10		Soja		Soja	720	0,6
	11	Soja	Soja	Soja		2.330	1,8
	12		Soja	Soja	Soja	1.670	1,3
	13	Soja	Soja		Soja	1.390	1,1
	14	Soja		Soja	Soja	2.210	1,7
	15	Soja	Soja	Soja	Soja	11.070	8,6
2	16	Maíz				1.850	1,4
	17		Maíz			1.210	0,9
	18			Maíz		1.070	0,8
	19				Maíz	940	0,7
	20	Maíz	Maíz			120	0,1
	21		Maíz	Maíz		160	0,1
	22			Maíz	Maíz	90	0,1
	23	Maíz				140	0,1
	24	Maíz		Maíz		900	0,7
	25		Maíz		Maíz	370	0,3
	26	Maíz	Maíz	Maíz		450	0,4
	27	Maíz		Maíz	Maíz	1.860	1,5
3	28	Maíz	Soja	Soja	Soja	9.810	7,7
	29	Soja	Maíz	Soja	Soja	12.190	9,5
	30	Soja	Soja	Maíz	Soja	10.040	7,8
	31	Soja	Soja	Soja	Maíz	4.380	3,4
	32	Maíz	Maíz	Soja	Soja	810	0,6
	33	Soja	Maíz	Maíz	Soja	1.120	0,9
	34	Soja	Soja	Maíz	Maíz	80	0,1
	35	Maíz	Soja	Soja	Maíz	6.640	5,2
	36	Maíz	Soja	Maíz	Soja	11.750	9,2
	37	Soja	Maíz	Soja	Maíz	10.590	8,3
	38	Soja	Maíz	Maíz	Maíz	160	0,1
	39	Maíz	Maíz	Maíz	Soja	420	0,3
	40	Maíz	Soja	Maíz	Maíz	700	0,5
	41	Maíz	Maíz	Soja	Maíz	1.790	1,4
	Total						128.130

granera departamental, que coincide con la zona de aptitud ecológica óptima para el cultivo de la soja en secano (Lamelas *et al.*, 2006). Con respecto a los lotes con soja sin rotación con maíz o caña de azúcar, podrían corresponder a lotes donde se sembraron otros cultivos con mayor rentabilidad puntual en alguna campaña, como poroto, chí, sorgo, etc.

El estudio en detalle del grupo 2 (Figura 7), revela que el subgrupo integrado por lotes con maíz en una sola campaña de las cuatro consideradas (secuencias 16 a 19) es el de mayor repetición concentrando el 55% del total del grupo; seguido por el subgrupo formado por maíz en tres campañas con el 25% (secuencias 26 y 27). En la Figura 8 se muestra la disposición espacial de los lotes con maíz en

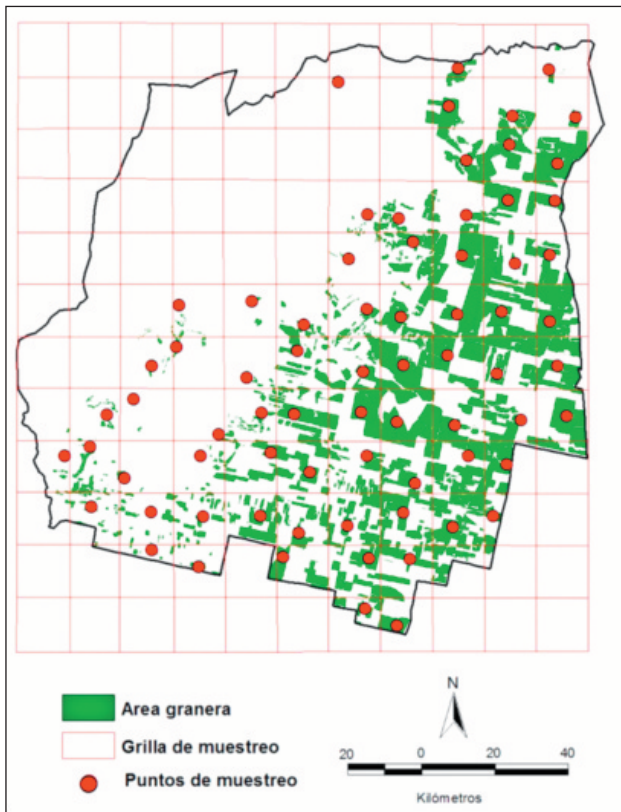


Figura 3: Distribución espacial de la grilla y puntos de muestreo

Figura 6B expone además los lotes en rotación soja/caña de azúcar. Si se analiza la disposición espacial de los lotes sojeros en rotación con caña de azúcar, se aprecia que corresponden mayormente a lotes con soja en una sola campaña; por otra parte también se constata que se disponen en general en la franja occidental del área

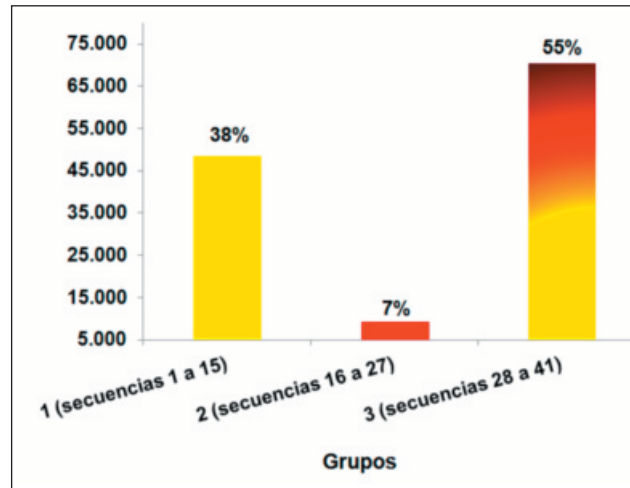


Figura 4. Grupo 1: secuencias 1 a 15, soja sin rotación con maíz. Grupo 2: secuencias 16 a 27, maíz sin rotación con soja. Grupo 3: secuencias 28 a 41, rotación soja/maíz.

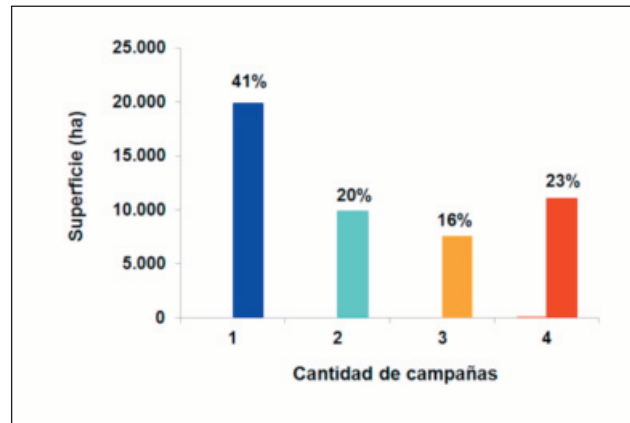


Figura 5: Grupo 1, repeticiones de cultivos de soja sin rotación con maíz.

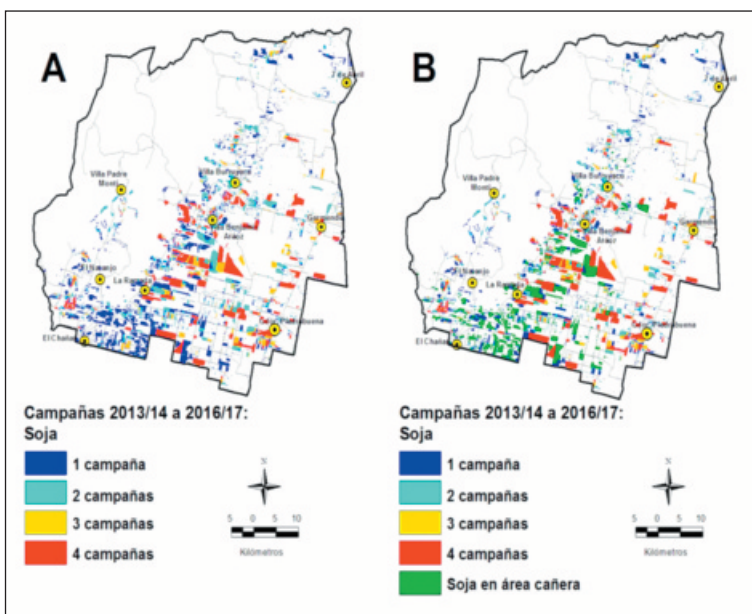


Figura 6. Grupo 1, distribución espacial de las repeticiones de cultivos de soja sin rotación con maíz y soja en área cañera

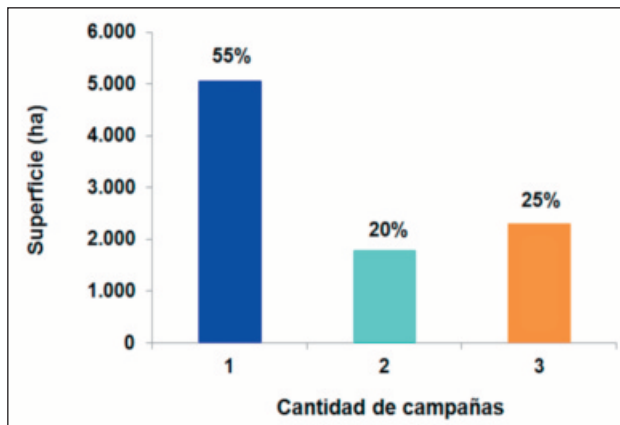


Figura 7: Grupo 2, repeticiones de cultivos de maíz sin rotación con soja.

una o más campañas, sin rotar con soja. Dichos lotes se localizan principalmente en las zonas norte y este del área granera y corresponden mayormente a establecimientos agropecuarios en los que se practica la siembra de maíz en rotación con pasturas.

Como se mencionó previamente, alrededor del 55% de la superficie relevada se concentró en el grupo 3, que corresponde a lotes con rotación soja/maíz. Para el análisis de este grupo se optó por dividir las secuencias según tres tipos de rotación, 1:3, 2:2 y 3:1, según el número de campañas con soja y maíz. El tipo de rotación 1:3

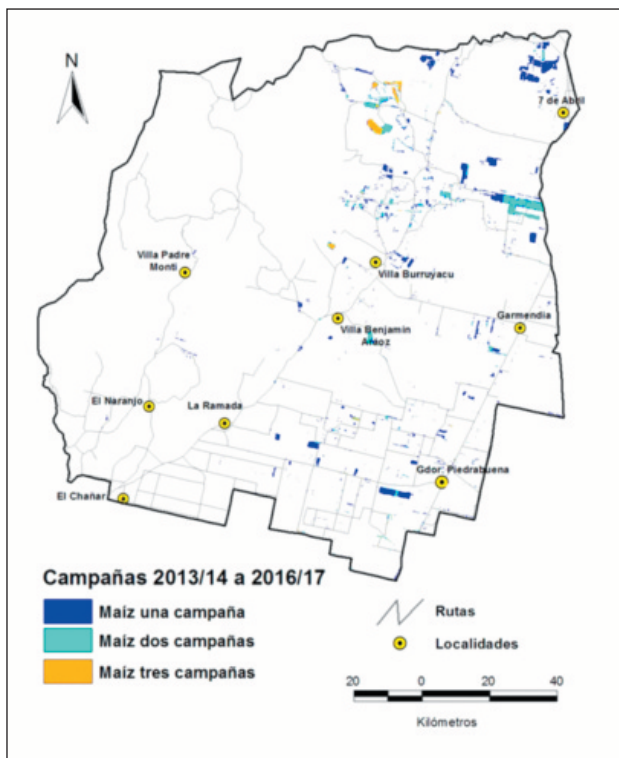


Figura 8. Grupo 2, distribución espacial de las repeticiones de cultivos de maíz sin rotación con soja.

corresponde a las secuencias que presentaron una campaña con maíz y tres de soja; la rotación 2:2 indica dos campañas de maíz y dos de soja; mientras que la rotación 3:1 abarca las secuencias con tres campañas de maíz y una de soja. Si se expresa en términos porcentuales, las rotaciones 1:3, 2:2 y 3:1 corresponden a lotes con cultivos de maíz en el 25%, 50% y 75% del período analizado, respectivamente.

En la Figura 9 se constata que de ese total, el 52% correspondió a secuencias de una campaña con maíz y tres de soja (rotación 1:3); el 44% a sucesiones de dos campañas de maíz y dos de soja (rotación 2:2); y el 4% a secuencias con tres campañas de maíz y una de soja (rotación 3:1).

La Figura 10 muestra la disposición geográfica de los tres tipos de rotaciones mencionados. Se aprecia una mayor concentración en la zona centro-norte del área granera departamental.

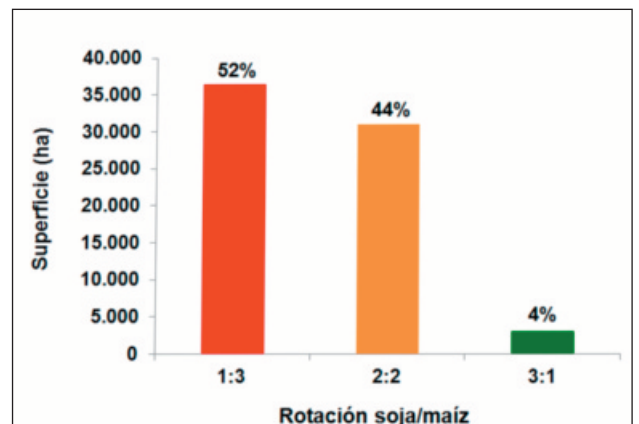


Figura 9. Grupo 3, tipos de rotación soja/maíz.

1:3, maíz una campaña y soja tres campañas. 2:2, dos campañas de maíz y dos de soja.

3:1, tres campañas de maíz y una campaña de soja.

Para un análisis más detallado se elaboraron las Figuras 11 a 13 que muestran la distribución espacial de las secuencias correspondientes a cada tipo de rotación. En la Figura 11 se visualizan las secuencias con rotación 1:3. En este grupo la secuencia con mayor repetición fue la 29 seguida de la 30.

La Figura 12 muestra la disposición geográfica de las secuencias con rotación 2:2. En este tipo de rotación, la secuencia con mayor superficie es la 36, secundada por la 37. En ambas los cultivos de soja y maíz se intercalan anualmente.

En la Figura 13 se expone la distribución espacial de las secuencias con rotación 3:1. La secuencia con mayor frecuencia es la 41 seguida por la 40.

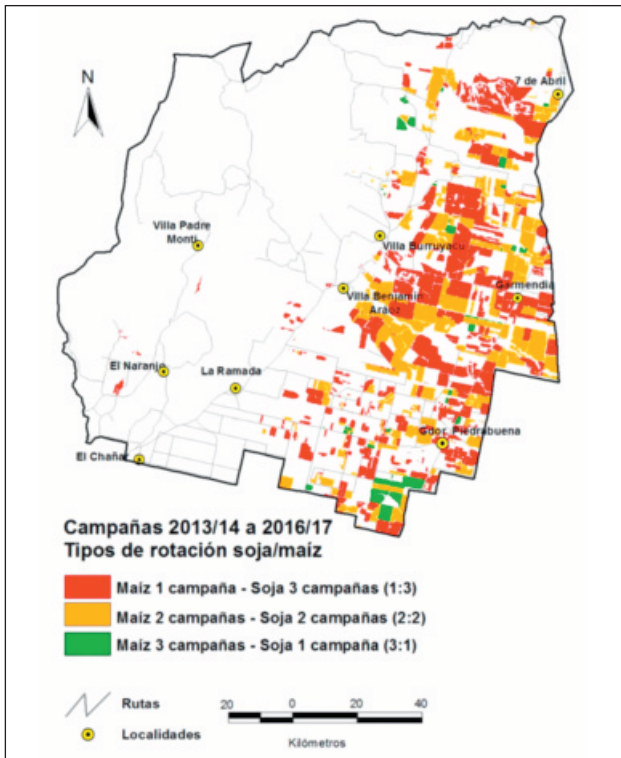


Figura 10. Distribución geográfica de los tipos de rotación soja/maíz.

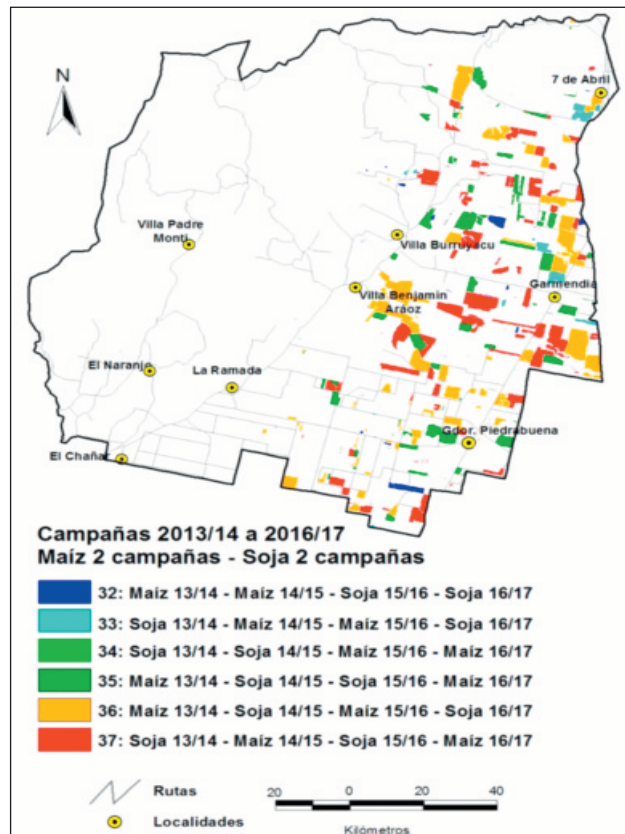


Figura 12. Distribución espacial de la rotación con maíz dos campañas y soja dos campañas (2:2)

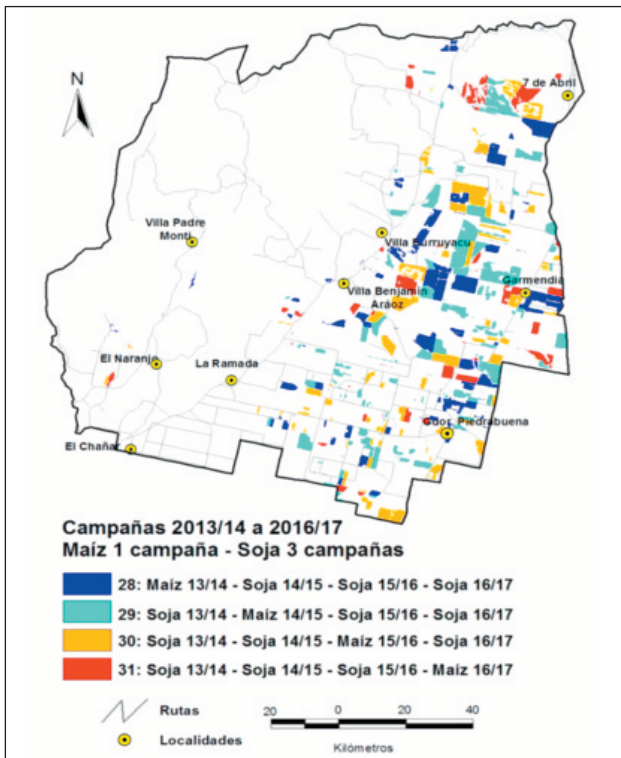


Figura 11. Distribución espacial de la rotación con maíz una campaña y soja tres campañas (1:3)

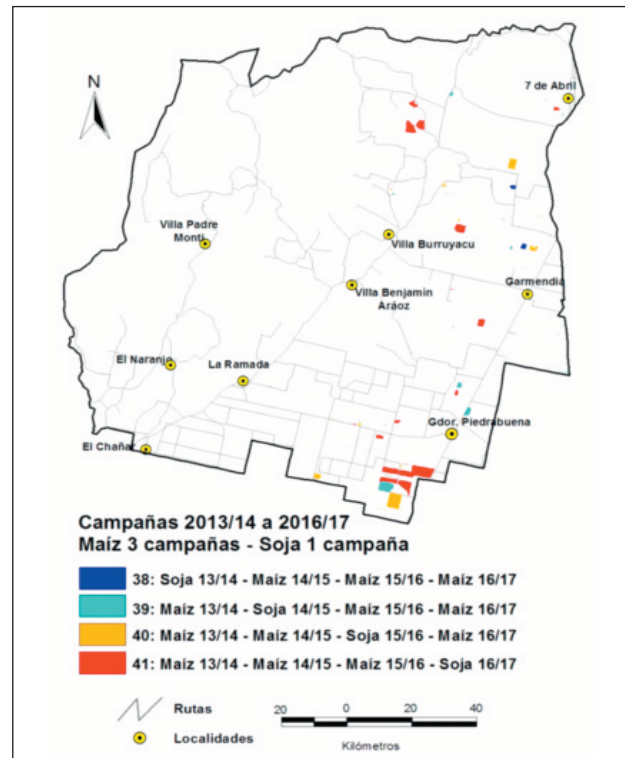


Figura 13. Distribución espacial de la rotación con maíz tres campañas y soja una campaña (3:1)

CONCLUSIONES

La información sobre secuencias de cultivos es un parámetro fundamental al momento del análisis de un agroecosistema. Dicha información está escasamente disponible para escalas regionales.

La metodología empleada contribuye a la generación de información de escala a nivel regional. El análisis multitemporal de las imágenes categorizadas con la información de cultivos, analizadas en un entorno SIG, permitió identificar, cuantificar y representar espacialmente distintas secuencias de cultivos estivales.

Se identificaron tres grupos de secuencias. El grupo 1, integrado por las secuencias de lotes con cultivos de soja sin rotación con maíz; el grupo 2, correspondiente a lotes con cultivos de maíz sin intercalar con soja; y el grupo 3, conformado por lotes con rotación soja/maíz.

El grupo 3 concentró el mayor porcentaje de superficie relevada, predominando el subgrupo conformado por las secuencias de una campaña con maíz y tres de soja (rotación 1:3), seguido por el subgrupo integrado por lotes con maíz y soja en dos campañas cada cultivo (rotación 2:2). En éste último subgrupo prevalecieron las secuencias en las que los cultivos de soja y maíz se intercalaron anualmente.

La disposición espacial de los lotes en rotación soja/maíz reveló una mayor concentración en la zona centro-norte del área granera del departamento Burruyacu.

El análisis SIG generó información estadística y gráfica que sirve de base para diversos estudios. Desde el punto de vista económico, la información relevada permite ponderar los distintos tipos de rotación a nivel departamental, lo que mejoraría la representatividad de las inferencias económicas; en el aspecto agronómico facilita la identificación de lotes con y sin rotación, a los fines de las recomendaciones de manejo agronómico; mientras que en el aspecto ambiental facilita la identificación de las zonas más comprometidas desde el punto de vista de la sustentabilidad de los sistemas productivos.

Investigaciones futuras podrían contemplar la extensión del período de análisis y la inclusión de los cultivos invernales en el estudio, a los fines de identificar las secuencias de cultivos y sus frecuencias, considerando todas las estaciones del año.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Chuvieco, E. 2000. Fundamentos de Teledetección Ambiental. Ediciones RIALP, SA, Madrid, España. 3ª edición revisada.

Devani, M. R.; F. Ledesma; J. Lenis y M. Gandur. 2003. Recomendaciones para el manejo de variedades comerciales de soja en Tucumán y zonas de

influencia. Avance Agroind. 24 (4): 4-7.

Fandos, C.; F. J. Soria; J. I. Carreras Baldrés y P. Scandaliaris. 2012. Estudio de la dinámica de la rotación soja/caña de azúcar en Tucumán mediante teledetección y SIG. Período analizado: años 2001 a 2011. Actas XVII Reunión de la Sociedad Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar (SATCA). Salta, Argentina: 13-17.

Fandos, C.; F. J. Soria; J. I. Carreras Baldrés y P. Scandaliaris. 2015. Capítulo 8.2: Evolución del área sojera en la provincia de Tucumán. Análisis, por departamento, del período 2012/2013 – 2014/2015. En: Devani, R.; F. Ledesma y J. R. Sánchez (eds.) El cultivo de la soja en el Noroeste Argentino: campaña 2014/2015. Publ. Espec. EEAOC (51): 158-162.

Fandos, C.; J. I. Carreras Baldrés; P. Scandaliaris; F. J. Soria; M. R. Devani y D. E. Gamboa. 2017a. Campaña de soja y maíz 2016/2017 en Tucumán: superficie cultivada y comparación con campañas precedentes. Reporte Agroindustrial. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. EEAOC. Boletín electrónico 136 [En línea]. Abril 2017. Disponible en www.eeaoc.org.ar (consultado 02 noviembre 2017).

Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. Soria. 2017b. Área cosechable y producción de caña de azúcar para la zafra 2017 en Tucumán. Reporte Agroindustrial. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. EEAOC. Boletín electrónico 138 [En línea]. Abril 2017. Disponible en www.eeaoc.org.ar (consultado 02 noviembre 2017).

Lamelas, C. M.; J. D. Forciniti y C. Funes. 2006. Capítulo I: Enfoque agroecológico del cultivo de la soja en el Noroeste Argentino. En: Devani, R.; F. Ledesma; J. M. Lenis y L. D. Ploper (eds.), Producción de soja en el Noroeste Argentino. EEAOC. 25-48.

Landau, E. C.; Pereira Guimaraes, D.; Hirsch, A. 2014. Capítulo 1.2.: Uso de Sistemas de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola. En Chartuni Mantovani, E. y Magdalena, C. (eds.). Manual de Agricultura de Precisión IICA PROCISUR (pp. 22-29). Montevideo. Uruguay.

Paoli, H. P.; J. N. Volante; D. R. Fernandez y Y. E. Noé. 2001. Análisis de la rotación de cultivos en la región NOA por Sistemas de Información Geográfica, campaña agrícola 2000-2001. En: INTA (ed.). Monitoreo de cultivos del NOA a partir de sensores remotos 1 (3). [En línea]. Disponible en www.inta.gob.ar (consultado 31 octubre 2017).

Pérez, D. R.; M. R. Devani; M. V. Paredes; G. Rodriguez

- y **D. E. Gamboa. 2013.** Capítulo 19: Costos y rindes de indiferencia de soja, maíz, trigo, garbanzo y caña de azúcar, y márgenes brutos de la soja en diferentes rotaciones y sucesiones en Tucumán, en el período 2007/2008 – 2012/2013. En Devani, M. R.; F. Ledesma y J. R. Sánchez (eds.). El cultivo de la soja en el Noroeste Argentino. Campaña 2012-2013. Publ. Espec. EEAOC (47): 215-226.
- Prados Velasco, M. J. 1995.** Teledetección y agricultura. Editorial Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. España.
- Soria, F. y C. Fandos. 2005.** Dinámica espacial del cultivo de maíz en la llanura oriental tucumana. Campañas 2000/01 a 2003/04. Tucumán. Argentina. Anais XII SBSR (Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto), Goiania, Brasil.
- Soria, F. J.; C. Fandos; P. Scandaliaris y J. I. Carreras Baldrés. 2014.** Relevamiento satelital de los principales cultivos de la provincia de Tucumán, campaña 2013/2014. Disponible en www.eeaoc.org.ar (consultado 02 noviembre 2017).
- Soria, F. J.; C. Fandos; P. Scandaliaris y J. I. Carreras Baldrés. 2015.** Relevamiento satelital de los principales cultivos de la provincia de Tucumán, campaña 2014/2015. Disponible en www.eeaoc.org.ar (consultado 02 noviembre 2017).
- Soria, F. J.; C. Fandos; P. Scandaliaris y J. I. Carreras Baldrés. 2016.** Relevamiento satelital de los principales cultivos de la provincia de Tucumán, campaña 2015/2016. Disponible en www.eeaoc.org.ar (consultado 02 noviembre 2017).
- Waldhoff, G.; U. Lussem and G. Bareth. 2017.** Multi-Data Approach for remote sensing-based regional crop rotation mapping: A case study for the Rur catchment, Germany. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 61: 55-69. Disponible en Journal homepage: www.elsevier.com/locate/jag (consultado 02 febrero 2018).

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 (N° 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 Colombres 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.

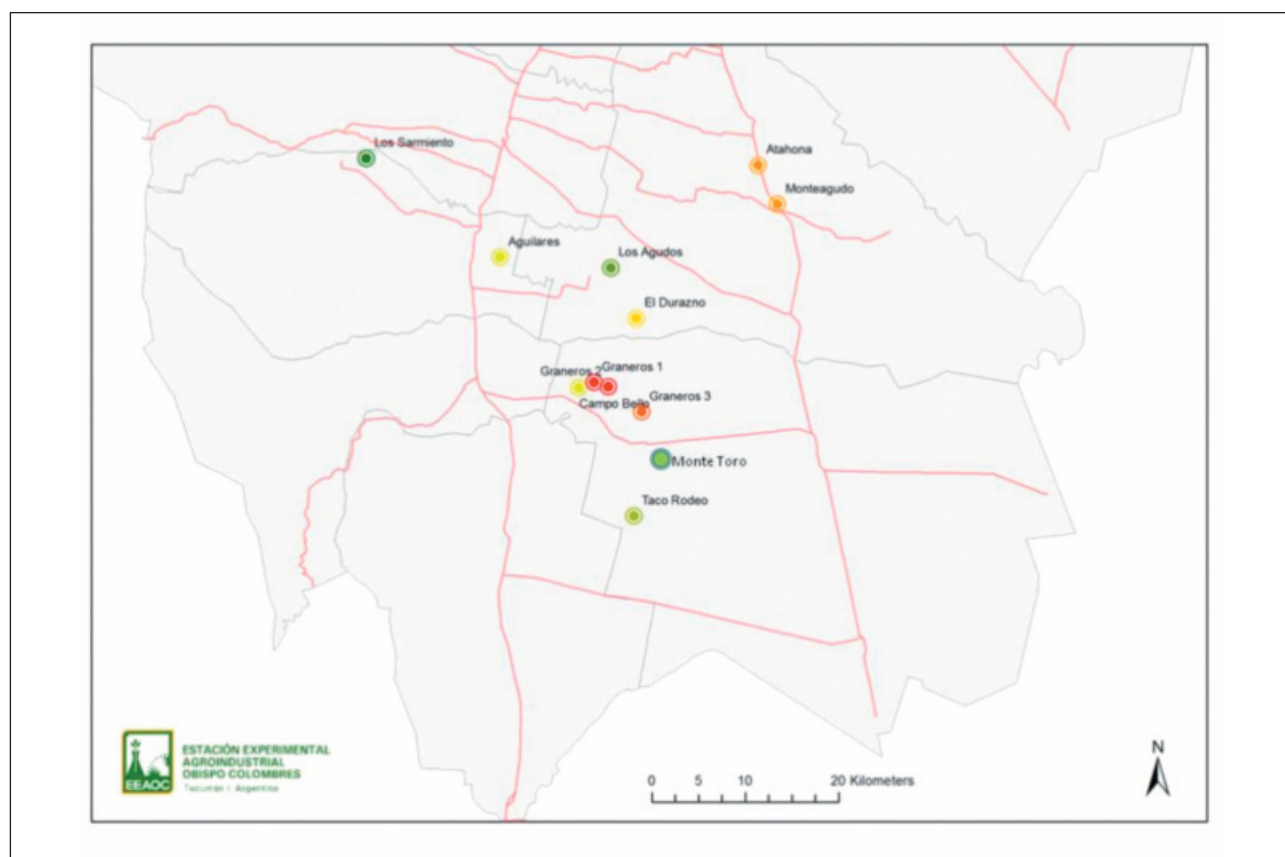


Figura 1: Diferentes localidades cultivadas con sorgo azucarado durante el desarrollo del Proyecto Biosorgo.

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

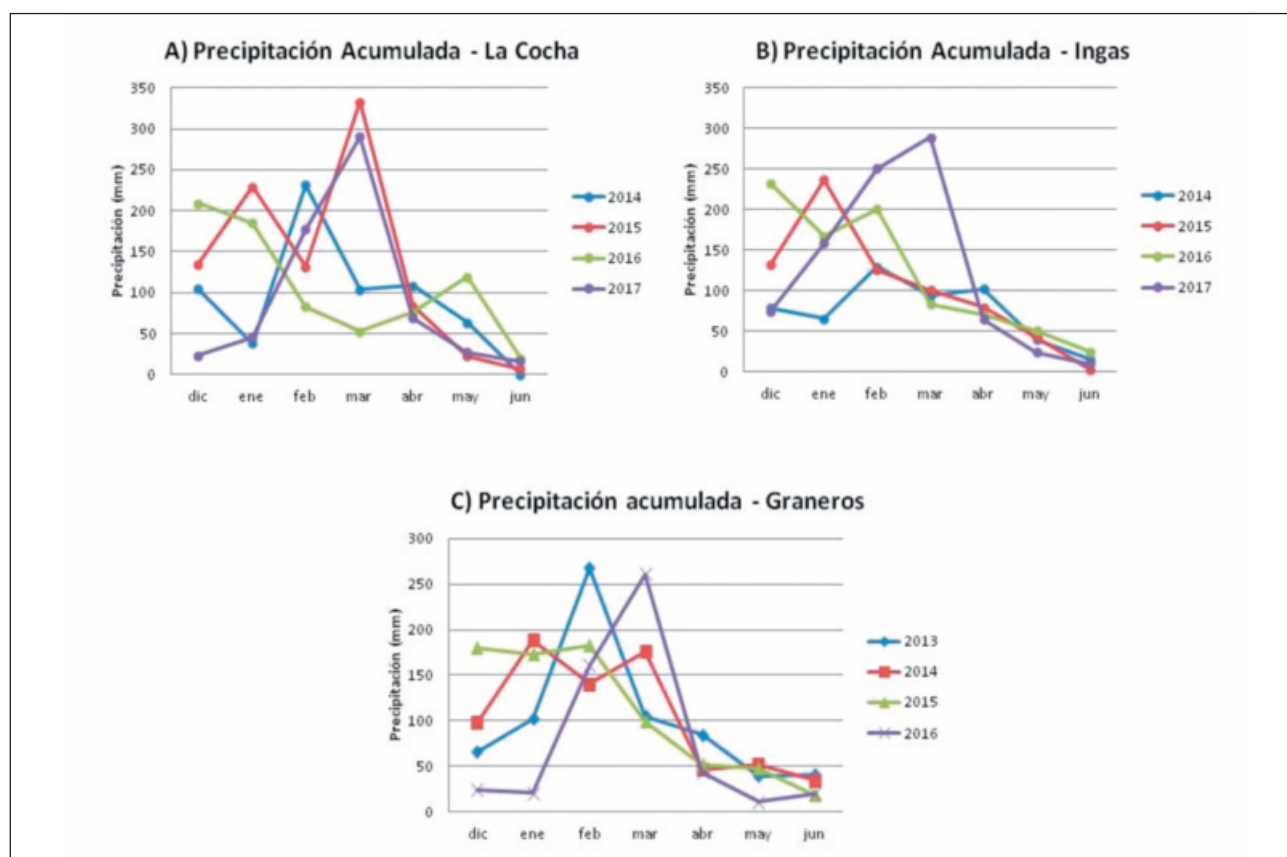


Figura 2: precipitaciones acumuladas durante los distintos ciclos de cultivo durante los meses de diciembre a junio para localidades representativas (2-A: La Cocha, 2-B: Ingas y 2-C: Graneros).



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).

Validación y aplicación del método colorimétrico de fosfatos en jugo de caña de azúcar y sorgo sacarino

Natalia Sorol*, Silvia Zossi*, Marcelo Ruiz* y Michael Saska*

RESUMEN

En caña de azúcar y sorgo azucarado el fosfato existe en formas inorgánica (soluble e insoluble) y orgánica. Los fosfatos inorgánicos solubles son un factor importante en la clarificación de los jugos de caña y sorgo sacarino, ya que participan de reacciones químicas con los iones calcio agregados formando fosfatos insolubles que son muy efectivos en remover del jugo de caña, coloides, colorantes y otras especies. En la literatura se recomiendan concentraciones de 300 mg P_2O_5/L en el jugo para obtener una buena clarificación. Los resultados de varios años de pruebas en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) indican una alta variabilidad de sus niveles, que van desde 100 a 700 mg P_2O_5/L . La alta variabilidad de la concentración de este compuesto hace que sea importante el análisis frecuente de fosfatos solubles para un control adecuado del proceso de clarificación. Se revisó el método colorimétrico empleado en la determinación, dado por ICUMSA y se realizó una simplificación en el procedimiento de filtración que hace más eficiente el uso de recursos y tiempo. Se redujo, además, el tiempo de análisis en un 60% y se validó la metodología con estas modificaciones, determinándose los límites de detección y cuantificación iguales a 4 mg P_2O_5/L y 10 mg P_2O_5/L , respectivamente. La recuperación promedio fue de 99% en un rango de trabajo comprendido entre 10 – 1000 mg P_2O_5/L . Se encontraron niveles de fosfatos insolubles inferiores al límite de detección en un conjunto de muestras de jugos mixtos y clarificados de buena calidad de caña de azúcar y sorgo azucarado. La incertidumbre expandida del método fue de 7,9%.

Palabras clave: jugo de caña, fosfatos, validación, clarificación.

ABSTRACT

Validation and application of the colorimetric method of phosphates in sugarcane and sweet sorghum juice

Phosphate in sugar cane and sweet sorghum comes in inorganic (soluble and insoluble) and organic forms. Soluble inorganic phosphates are an important factor in clarification of sugar cane and sweet sorghum juices as they enter chemical reactions with added calcium ions, forming insoluble phosphates that are very effective in removing from the juice cane colloids, colorants and other species. The frequently recommended levels for good clarification are about 300 mg P_2O_5/L in the incoming juice. The results from several years of testing at EEAOC indicate high variability, with levels ranging mostly from 100 to 700 mg P_2O_5/L . The high variability makes the frequent analysis for soluble phosphates important for monitoring and control of the clarification process in the sugar factories. The frequently used colorimetric method was reviewed and validated. A simplification of the filtration procedure that makes the analysis more time-efficient was introduced and validated. The analysis time was reduced by 60%. The limit of detection and quantification of the method were found to be 4 and 10 mg P_2O_5/L , respectively. The average P_2O_5 recovery was found to be about 99% within the working range 10 – 1000 mg P_2O_5/L . The levels of insoluble phosphates were found below the detection limit in a set of samples of mixed juice and good quality clarified juice from sugar cane and sweet sorghum. The method's expanded uncertainty was 7,9%.

Key words: Sugarcane juice, phosphates, validation, clarification.

Fecha de ingreso: 1/06/2017 - Fecha de egreso: 7/01/2019

*Sección Química de Productos Agroindustriales, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC).
silviazossi@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

El fosfato es uno de los aniones mayoritarios en el jugo de caña, tanto en forma de fosfatos inorgánicos como orgánicos. Los fosfatos inorgánicos solubles tienen gran importancia en el proceso de clarificación de jugo de caña. Según la literatura (Chen and Chou, 1993; Doherty and Rackermann, 2008; 2009; Rein, 2017), la concentración mínima de fosfatos solubles en el jugo de caña debe ser de 250 mg/L para que la clarificación sea satisfactoria.

El propósito de la clarificación es separar las impurezas presentes en el jugo, el cual contiene una considerable cantidad de materia fina y coloidal en suspensión que debe eliminarse para conseguir azúcares de alta pureza al final del proceso. En la clarificación también se extraen algunos constituyentes solubles. En este proceso, el calcio añadido reacciona con el fosfato formando fosfatos insolubles y produciendo -con ayuda de floculantes- flóculos de gran tamaño que absorben las partículas de impurezas y luego decantan por diferencia de densidad. Los beneficios de mantener un nivel óptimo de fosfatos en el jugo son:

- Mayor eliminación de coloides y colorantes
- Mayor velocidad de formación de flóculos y mayor velocidad de sedimentación
- Mejor clarificación en general, obteniéndose un jugo con menos turbidez y menor color

Para lograr un mayor control del proceso de clarificación, es importante disponer de una metodología confiable y rápida con la cual determinar la concentración de fosfatos antes y después de este proceso. Si el jugo es deficiente en este anión, se puede agregar ácido fosfórico o fosfatos solubles hasta por lo menos el nivel mínimo recomendable; si los fosfatos son altos en el jugo clarificado (mayor a 50 mg/L), es recomendable aumentar la cantidad de cal agregada, incrementando el pH final de encalado. En el caso contrario (fosfatos < 10 mg/L) es recomendable que se reduzca la cantidad de cal o encalar hasta un pH final menor.

En la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) se emplea el método colorimétrico de ICUMSA (2015) para determinar fosfatos totales y solubles, en el cual se debe ajustar el pH a 4,0 mediante el agregado de solución de ácido sulfúrico para cuantificar los primeros, y se analizan los segundos al pH natural (aproximadamente pH 5,5 para jugos mixtos y pH 7 para jugos clarificados). Luego, una alícuota del jugo se filtra con una bomba de vacío usando como ayuda de filtración tierra de diatomeas (Supercel) lavada previamente con ácido clorhídrico. Se agregan a la porción de jugo filtrado soluciones de molibdato ácido y de amidol para el desarrollo de color. La cantidad de fosfato presente en la muestra se determina leyendo la absorbancia de la

solución a 660 nm, con una celda de 1 cm de paso óptico, utilizando una curva de calibración apropiada. Aparentemente, este procedimiento fue adoptado del manual de BSES (1991) de Australia por ICUMSA sin revisión.

Hasta el año 2015, en la EEAOC solamente se determinaron fosfatos con la acidificación de la muestra. Este procedimiento demanda tiempo en la preparación del ayuda filtrante, acidificación de cada muestra a pH 4,0 y filtración por vacío. Por esto, el objetivo de este trabajo fue estudiar si eran posibles algunas simplificaciones, específicamente la influencia del pH y de la filtración, sin afectar la validez de los resultados en el monitoreo del proceso de clarificación de jugo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con caña limpia y despuntada, preparada de acuerdo a lo establecido en Zossi *et al.* (2010). El jugo primario fue obtenido mediante una desfibradora a martillo que entrega un material de "open cell" del 95% y posterior prensado en prensa hidráulica. El bagazo se mezcló con 30% de agua referido al peso de caña; se prensó nuevamente y se mezclaron ambos jugos para obtener un jugo mixto, los cuales se clarificaron con 500 mg/L de SO₂ y lechada de cal hasta pH 7,2. También se emplearon jugos de sorgo procedentes de tallos enteros y troceados sin y con trash (8% de desechos, hojas y despuntes), procesados el mismo día de cosechados. Se puede encontrar más detalle del proceso de laboratorio de preparación y clarificación de jugo en publicaciones anteriores de este grupo (Zossi *et al.*, 2010; 2012).

Efecto del pH

Para estudiar el efecto del pH se determinó la concentración de fosfatos en 36 muestras de jugos de sorgo mixtos y clarificados y en 24 muestras de jugos de caña mixtos y clarificados. A todas las muestras se les adicionó ácido sulfúrico 9,6% (V/V) para lograr un pH 4,0 y se analizaron también estas mismas muestras al pH natural del jugo.

Efecto del filtrado con ayuda filtrante

Para determinar si la filtración con Supercel ácidamente lavada produce alguna modificación en la determinación de fosfatos y también comprobar si hay diferencias entre la filtración con bomba de vacío y la filtración por gravedad, se analizaron siete muestras de jugo de caña de azúcar filtrando con bomba utilizando tierra filtrante y también por gravedad sin el uso de tierra filtrante. En ambos casos la filtración se realizó a través de papel de filtro cualitativo de uso general de filtración rápida, equivalente a Whatman 93.

Validación del método analítico

Para validar la metodología modificada se siguieron las directrices del Organismo Argentino de Acreditación (OAA 2012, 2013 a, 2013 b). Los parámetros de validación que se analizaron fueron:

1) Linealidad: se realizó una curva de calibración siguiendo el procedimiento ICUMSA (2015) con soluciones estándares de fosfato de diácido potasio (KH_2PO_4).

2) Límite de detección (LD): se determinó empleando seis muestras de jugo de caña clarificado (blancos de matriz). Se determinó el valor del LD teniendo en cuenta su definición (OAA 2012, 2013) como:

$$\text{LD} = 2 \times t_{1-\alpha, \nu} \times S_0 \quad \text{Ec. 1}$$

siendo S_0 la desviación estándar de la concentración predicha de cada blanco de matriz y $t_{1-\alpha, \nu}$ es el factor de Student para una probabilidad α y ν grados de libertad.

3) Límite de cuantificación (LC): se determinó el límite de cuantificación tomando 10 veces el desvío estándar de los datos obtenidos en el cálculo del límite de detección.

$$\text{LC} = 10 \times S_0 \quad \text{Ec. 2}$$

4) Precisión intermedia (fortificación con distintos niveles de patrón): para la determinación de precisión se usó como blanco de matriz una muestra de jugo de caña clarificado, fortificado con tres niveles en un rango comprendido entre el límite de cuantificación y la mayor concentración validada bajo distintas condiciones. A partir de los datos de concentración en las muestras fortificadas, se calculó la recuperación R (%) de la siguiente forma:

$$R = 100 \times \frac{(C_F - C_M)}{C_P} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- C_F es la concentración del analito en mg P_2O_5 /L en la muestra fortificada.
- C_M es la concentración del analito en mg P_2O_5 /L en la muestra de blanco matriz.
- C_P es la cantidad (en mg) de P_2O_5 añadida a un litro de jugo

5) Veracidad (repetición de fortificación con un nivel del patrón): se fortificaron seis muestras de un

blanco matriz, con una cantidad de patrón del analito que corresponde a una concentración cercana al LC. Con los datos obtenidos se calculó el sesgo, el sesgo promedio y S_{sesgo} , su desvío estándar, que luego se utilizaron en el cálculo de la incertidumbre debida al sesgo.

$$\text{sesgo} = |R - 100| \quad \text{Ec. 4}$$

6) Intervalo de trabajo: el intervalo de trabajo se estableció entre el límite de cuantificación y el valor más alto de concentración validado.

7) Estimación de la Incertidumbre de los resultados: para estimarla se utilizó la contribución del sesgo y la precisión. Para calcular la incertidumbre a partir de las recuperaciones R se tomó el nivel de fortificación cercano al LC.

Incertidumbre debida al sesgo (u_{sesgo}): para estimarla se tuvieron en cuenta dos componentes: a) El sesgo (como diferencia porcentual con el valor nominal), y b) la incertidumbre del valor nominal/certificado, (u_{Cref}) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$u_{\text{sesgo}} = \sqrt{\text{sesgo}^2 + \left(\frac{S_{\text{sesgo}}}{\sqrt{n}}\right)^2 + u_{\text{Cref}}^2} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde u_{Cref} es la incertidumbre del material de referencia. Este valor se tomó como cero, ya que se utilizó un reactivo fosfato diácido de potasio (KH_2PO_4) pro análisis que no disponía de certificado que indique valor de incertidumbre.

Incertidumbre de la precisión intermedia (u_{prec}): esta incertidumbre se estimó con el resultado del coeficiente de variación (CV) de la muestra obtenido del análisis de fortificaciones.

$$u_{\text{prec}} = \text{CV}_{\text{muestra}} \quad \text{Ec. 6}$$

Incertidumbre del método ($u_{\text{método}}$): para el cálculo de la incertidumbre del método se combinaron las incertidumbres aportadas por el sesgo y la precisión del método aplicando la siguiente ecuación:

$$u_{\text{metodo}} = \sqrt{u_{\text{sesgo}}^2 + u_{\text{prec}}^2} \quad \text{Ec. 7}$$

La incertidumbre expandida U_{exp} del método se calculó como:

$$U_{\text{exp}} = k \times u_{\text{metodo}} \quad \text{Ec. 8}$$

Se consideró un valor de factor de cobertura k de 2 para un nivel de confianza de 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del pH

Los resultados obtenidos para analizar la influencia del pH en la determinación de fosfatos se muestran en las Tablas 1 - 4.

Estos valores se analizaron estadísticamente con el Data Análisis Tool de EXCEL mediante la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales, obteniéndose t calculado $<$ t crítico, indicando que no existen diferencias significativas en las concentraciones de fosfatos en jugo de sorgo determinadas a pH natural y a pH 4, con y sin trash. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la prueba t. Como el t calculado $<$ t crítico, tampoco existen diferencias significativas en las concentraciones de fosfatos solubles y totales en jugo de caña mixto y clarificado.

Para determinar si los resultados anteriores se deben ya sea a ausencia de cantidades medibles de fosfatos de calcio insolubles, o bien a que el ácido sulfúrico a pH 4 no fue suficiente para solubilizar cualquier especie de fosfato insoluble que pueda estar presente, se hicieron ensayos de fosfatos totales y fosfatos solubles en una muestra de jugo clarificado mezclado con el lodo de clarificación (esto asegura que la muestra contiene un nivel alto de fosfatos insolubles precipitados por la adición de lechada de cal estándar)

Se comprobó que la concentración de fosfatos totales fue mucho más alta (~1000 mg/L) que la de fosfatos solubles (25 mg/L).

A partir de este ensayo se pudo verificar que la

adición de ácido sulfúrico hasta llegar a pH 4 fue suficiente para solubilizar los fosfatos de calcio insolubles, ya que se obtuvo una concentración mucho más alta de fosfatos totales.

También estos resultados indican que los jugos mixtos y clarificados que se analizaron anteriormente (Tablas 1 y 3) contienen niveles de fosfatos insolubles por debajo del límite de detección, ya que no existió diferencia significativa entre fosfatos solubles y totales de estas muestras.

Tabla 2. Resultados obtenidos en la prueba t para FT y FS en muestras de jugo de sorgo mixto y clarificado, con y sin trash. Variable 1 = FT, Variable 2 = FS.

	Variable 1	Variable 2
Promedio	273	274
Varianza	21317	21498
Observaciones	36	36
Varianza agrupada	21407	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	70	
Estadístico t	-0,03	
P(T<=t) dos colas	0,97	
Valor crítico de t (dos colas)	1,99	

Tabla 1. Concentraciones de fosfatos totales (FT) a pH 4 y fosfatos solubles (FS) a pH natural, en diferentes muestras de jugo de sorgo mixto (JM) y clarificado (JC) en mg P₂O₅/L.

	JM sin trash		JM con trash		JC sin trash		JC con trash	
	FT	FS	FT	FS	FT	FS	FT	FS
	242	290	334	415	137	96	189	134
	499	399	531	537	246	142	216	167
	309	436	543	547	108	150	251	110
	260	228	345	399	123	148	170	142
	502	403	653	446	232	164	161	155
	306	191	340	406	116	104	140	81
	279	332	362	496	149	172	154	180
	360	422	444	446	138	197	145	183
	177	408	432	435	149	149	84	159
Promedio	326	345	443	459	155	147	168	146
S	111	90	112	55	50	32	48	33
CV (%)	34	26	25	12	32	22	29	23

Tabla 3. Concentraciones de fosfatos totales (FT) a pH 4 y fosfatos solubles (FS) a pH natural, en muestras de jugo de caña mixto (JM) y clarificado (JC) en mg P₂O₅/L.

	JM		JC	
	FT	FS	FT	FS
	830	925	167	181
	602	450	98	89
	468	592	128	96
	351	649	126	129
	678	926	167	108
	610	862	76	91
	205	315	22	41
	194	419	66	34
	337	612	78	79
	628	789	118	131
	757	772	126	108
	471	532	116	106
Promedio	511	654	107	99
S	208	203	42	39
CV (%)	41	31	39	40

Tabla 4. Resultados obtenidos en la prueba t para FT y FS en diferentes muestras de jugo de caña mixto (JM) y clarificado (JC). Variable 1 = FT, Variable 2 = FS.

	Variable 1	Variable 2
Promedio	309	376
Varianza	64019	100655
Observaciones	24	24
Varianza agrupada	82337	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	46	
Estadístico t	-0,81	
P(T<=t) dos colas	0,42	
Valor crítico de t (dos colas)	2,01	

Efecto del filtrado con ayuda filtrante

Para analizar el efecto del filtrado con tierra filtrante utilizando bomba de vacío versus filtrado sin tierra filtrante y por gravedad, se determinó el contenido de fosfatos solubles en siete muestras distintas de jugos de caña mixtos y clarificados, por ambos métodos (Tabla 5).

Analizando estos resultados, se observó que no

Tabla 5: Efecto del filtrado con vacío y tierra filtrante versus por gravedad y sin tierra filtrante. Concentración de fosfatos solubles en mg P₂O₅/L.

Muestra	c/tierra c/bomba de vacío	s/tierra por gravedad
1	874	861
2	688	687
3	736	735
4	175	159
5	91	86
6	103	92
7	157	158
Promedio	403	397
S	345	346
CV (%)	85	87

existen diferencias estadísticas entre ambos métodos (Tabla 6). La filtración sin tierra por gravedad es suficientemente rápida, y tiene la ventaja adicional de que varias muestras pueden ser procesadas en el mismo tiempo.

Tabla 6. Prueba t para los resultados de fosfatos solubles (FS) obtenidos filtrando de dos maneras distintas. Variable 1 = FS con tierra y bomba de vacío. Variable 2 = FS sin tierra y por gravedad.

	Variable 1	Variable 2
Promedio	403	397
Varianza	118966	119525
Observaciones	7	7
Varianza agrupada	119246	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	12	
Estadístico t	0,04	
P(T<=t) dos colas	0,97	
Valor crítico de t (dos colas)	2,18	

Validación de la metodología modificada

1) Linealidad

Aunque las modificaciones no afectan la calibración, para llevar a cabo la validación completa se trazó la curva de calibración (Figura 1) de fosfatos solubles.

Se consideraron 13 niveles de concentración por duplicado en un rango de 0 a 17 mg P₂O₅/L y se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,9997. Para estar en el

rango de estas absorbancias, la dilución de los jugos debe ser usualmente entre 1 – 5 mL (o gramos) por 100 mL; por lo tanto el rango de la curva de calibración corresponde aproximadamente a 300 mg P₂O₅/L – 1500 mg P₂O₅/L de jugo.

2) Límites de detección (LD) y cuantificación (LC)

Para determinar los LD y LC, se realizaron seis repeticiones de fosfatos solubles en una muestra de jugo de caña clarificado (Tabla 7), tal como se explicó anteriormente.

LD calculado según la ecuación (1) para $\alpha=0,05$ y $v=5$ es 4,1 mg P₂O₅/L. LC se calculó mediante la ecuación (2) y resultó 10,1 mg P₂O₅/L.

3) Precisión intermedia (fortificación con distintos niveles de patrón)

Para estudiarla se procedió a la fortificación de una muestra de jugo clarificado de caña con tres niveles, por duplicado. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Se calculó la recuperación de acuerdo a la ecuación (3) y se obtuvo un promedio de 99% y un coeficiente de variación de 1%.

4) Veracidad

Para estudiar la veracidad se fortificaron seis muestras de un jugo clarificado con una cantidad de solución estándar que corresponda a una concentración cercana al LC. Los resultados se muestran en la Tabla 9

Se calculó el sesgo de acuerdo a la ecuación (4) y

Tabla 7. LD y LC en la determinación de fosfatos solubles

Repeticición	FS (mg P ₂ O ₅ /L)
1	79,1
2	81,2
3	80,0
4	78,9
5	78,7
6	80,6
Promedio	79,8
S	1,0
CV (%)	1,3

se obtuvo un promedio de 3,6% y un desvío estándar de 2,7%. Estos valores se utilizaron en el cálculo de incertidumbre debida al sesgo.

6) Intervalo de trabajo

El intervalo de trabajo se estableció entre el límite de cuantificación y el valor más alto de concentración validada en Tabla 8. Entonces, el intervalo de trabajo quedó establecido en 10 mg P₂O₅/L – 944 mg P₂O₅/L.

7) Estimación de la incertidumbre de los resultados

Empleando las diferentes ecuaciones detalladas en Materiales y Métodos se calcularon los aportes de cada

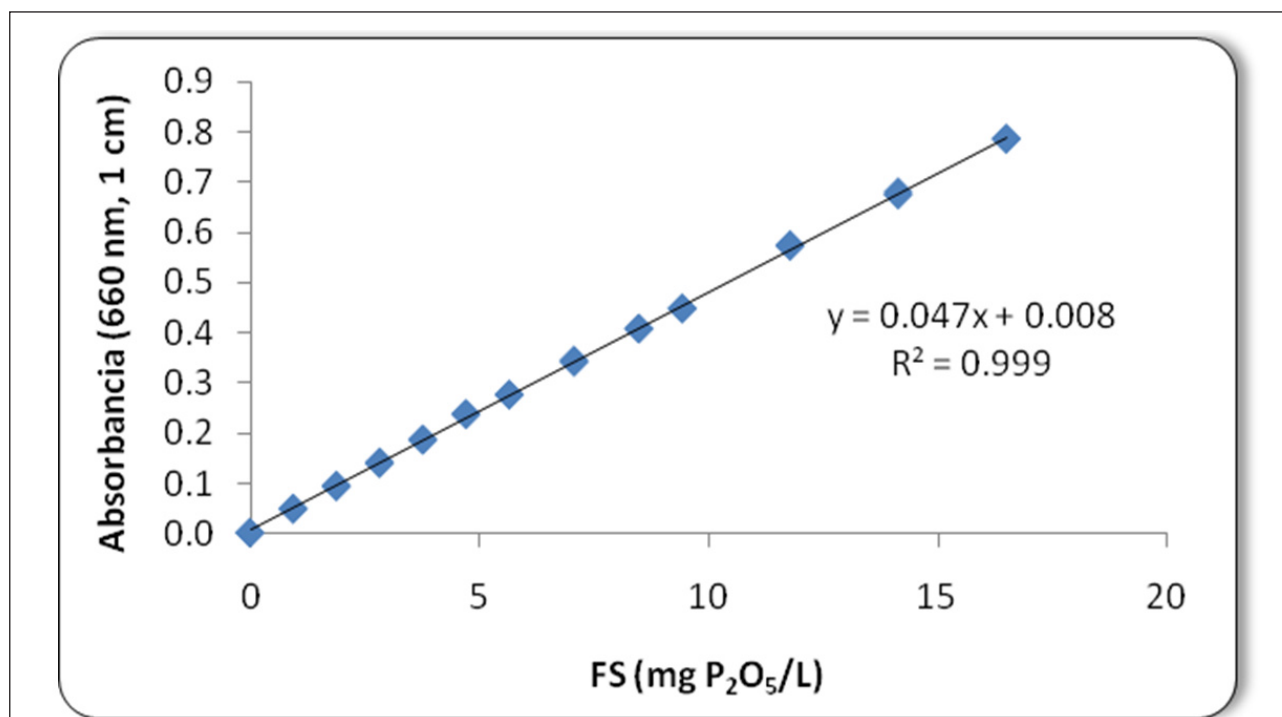


Figura 1. Linealidad: curva de calibración de FS.

Tabla 8: Recuperación (por duplicado) en jugo de caña clarificado de 33 mg P₂O₅/L con 3 niveles de fortificación.

FS (mg P ₂ O ₅ /L)			
Nivel de fortificación	Agregado	Detectado	R (%)
1	302,7	330,2	97,7
		337,8	100,2
2	605,3	637,4	99,6
		636,6	99,5
3	908,0	920,2	97,6
		931,6	98,8
Promedio			98,9
S			1,1
CV (%)			1,1

incertidumbre en la del método y la incertidumbre expandida. Estos resultados se muestran en la Tabla 10.

Como puede apreciarse en la tabla anterior, las modificaciones realizadas en la determinación de fosfatos en jugos de caña y sorgo presentaron un valor de incertidumbre expandida de 7,9%. Esto indica que pueden emplearse las modificaciones introducidas en la metodología oficial ICUMSA sin variaciones en sus resultados.

Aplicación industrial del método

En la Figura 2 se muestran los datos acumulados

Tabla 9: Recuperación y sesgo en 6 fortificaciones de jugo de caña clarificado de 53 mg P₂O₅/L. Nivel de fortificación: 14 mg P₂O₅/L.

	FS (mg P ₂ O ₅ /L)	R (%)	Sesgo
	68,1	98,1	1,9
	68,2	97,9	2,1
	67,2	93,0	7,0
	67,6	101,0	1,0
	67,1	92,9	7,1
	68,5	102,4	2,4
Promedio	67,8	97,6	3,6
S	0,6	4,0	2,7
CV (%)	0,8	4,1	-

Tabla 10: Incertidumbres debidas a sesgo, precisión intermedia, del método e incertidumbre expandida.

Incertidumbre (debida a)			De ecuación
Sesgo	u _{sesgo}	3,8%	(5)
Precisión intermedia	u _{prec}	1,1%	(6)
Método	u _{método}	3,9%	(7)
Expandida	U _{exp}	7,9%	(8)

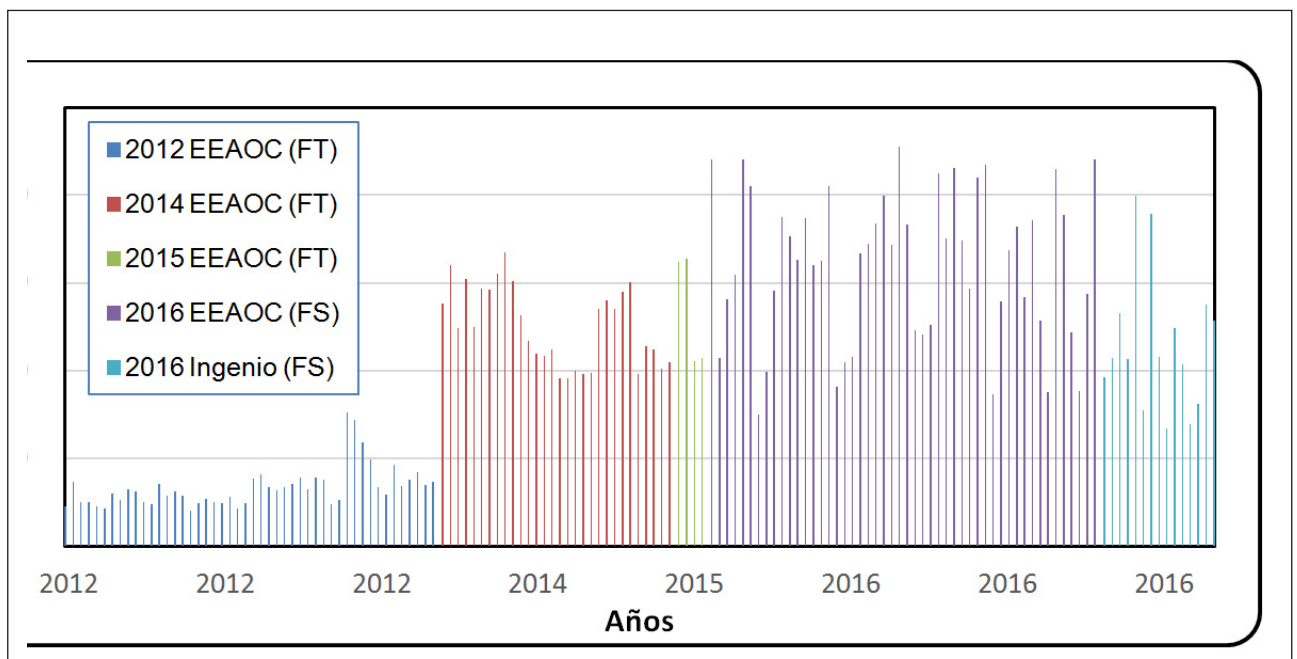


Figura 2. Fosfatos totales (FT) (2012 – 2015) y fosfatos solubles (FS) (2016) en jugos mixtos de la EEAOC y en un ingenio tucumano.

desde el año 2012 de fosfatos en jugo mixto en los ensayos de clarificación en la EEAOC.

La caña empleada en estos ensayos provino de los campos experimentales de la EEAOC. Los valores muestran una variabilidad bastante alta, particularmente los valores en 2012 fueron muy bajos por razones que podrían deberse a la condición de caña, su variedad, su estado de maduración, o también con las condiciones del campo del que fue cosechada, como el uso de fertilizantes o la humedad de suelo. Como se dijo antes, hasta 2015 en la EEAOC solo se analizaron jugos acidificando a pH 4. En 2016, siguiendo la metodología modificada se realizó el análisis sin ajuste de pH. También en 2016 se analizó durante unos días jugo mixto en un ingenio tucumano.

En la Tabla 11 se puede ver que los promedios en 2016 no son significativamente distintos de los obtenidos antes, considerando la gran variabilidad de los niveles de fosfatos encontrada.

La gran variabilidad de fosfatos en jugos de caña fue también observada por otros. Steindl (2016)¹ observó el rango de entre 60 hasta 600 mg P₂O₅/L en lotes de caña entregados en el mismo día en un ingenio azucarero en Queensland, Australia. Esto hace hincapié en la importancia del análisis frecuente de fosfatos en los ingenios azucareros para el control del proceso de clarificación de jugo.

CONCLUSIONES

Se encontró alta variabilidad de los niveles de fosfato soluble en los jugos de caña de azúcar y de sorgo dulce. Esta variabilidad hace que sea muy importante monitorear el contenido de fosfatos solubles en la biomasa entrante a las fábricas de azúcar y controlar el proceso de clarificación de jugo en forma frecuente.

La simplificación del procedimiento de filtración que se introdujo en el método colorimétrico hace más eficiente la metodología. El tiempo empleado en el análisis se redujo en un 60%. La validación del método se realizó en varios conjuntos de jugos mixtos y clarificados de caña de azúcar y sorgo dulce. Se encontró que los límites de detección y cuantificación del

método son 4 mg P₂O₅/L y 10 mg P₂O₅/L, respectivamente. El rango de trabajo validado del método estuvo comprendido entre 10 mg P₂O₅/L y 1000 mg P₂O₅/L, con una recuperación de P₂O₅ del 99% y una incertidumbre expandida de 7,9%. Los niveles de fosfatos insolubles se encontraron por debajo del límite de detección en el conjunto de muestras analizadas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Lic. Marcos Sastre de EEAOC por su ayuda con los temas de estadística; al Dr. William Doherty, de Queensland University of Technology (QUT), Brisbane, Australia; y al Sr. Roderick Steindl de Sugar Consulting International, Mackay, Australia, por sus comentarios valiosos sobre el rol de fosfatos en el proceso de clarificación de jugo de caña.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- BSES (Bureau of Sugar Experimental Stations).1991.** Method 8: Total and soluble phosphate: Determination in cane juice. Brisbane, Australia.
- Chen, J. C. P. and C. C. Chou. 1993.** Cane Sugar Handbook, 12 ed., Wiley & Sons, pp. 121.
- Doherty, W. O. S. and D. W. Rackemann. 2008.** Stability of sugarcane juice – a preliminary assessment of the colorimetric method used for phosphate analysis. Sugar Industry / Zuckerindustrie 133 (1): 24–30.
- Doherty, W. O. S. and D. W. Rackemann. 2009.** Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugarcane clarification. The International Sugar Journal, 111(1327): 448-455.
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). 2015.** Method book. Method GS 7-15: The Determination of Total and Soluble Phosphate in Cane Juice by a Colorimetric Method (Accepted) (1994). Bartens, Berlin, Germany.
- Organismo Argentino de Acreditación (OAA). 2012.** Criterios específicos para evaluar la incertidumbre en medición en laboratorios químicos. Versión 3. 13 de
-
- ¹Steindl, R. 2016. Comunicación personal vía email. Abril 2016.

Tabla 11: Promedio de las concentraciones de fosfatos totales y solubles en jugo mixto, en los ensayos de clarificación en la EEAOC, y en los jugos mixtos en un ingenio azucarero.

Año	2012	2014	2015	2016	2016
Localidad	EEAOC	EEAOC	EEAOC	EEAOC	ingenio
FT (mg P ₂ O ₅ /L)	135	503	539	-	-
FS (mg P ₂ O ₅ /L)	-	-	-	643	462
Número de observaciones	47	29	4	49	14

agosto, 2012.

Organismo Argentino de Acreditación (OAA). 2013 a.

Guía para validación de métodos de ensayo. Versión 1, 26 de junio, 2013.

Organismo Argentino de Acreditación (OAA). 2013 b.

Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones/ensayos. Versión 1, 26 de junio, 2013.

Rein, P. 2017. Cane Sugar Engineering. 2nd edition. Verlag Dr. A. Bartens, Berlin.

Zossi, S.; G. J. Cárdenas; N. Sorol y M. Sastre. 2010.

Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (Argentina). Parte 1: Caña limpia y despuntada. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 87 (1): 15-27.

Zossi, S; G. J. Cárdenas; N. Sorol y M. Sastre. 2012.

Análisis del proceso de sulfitación en la remoción de compuestos no azúcares en jugos de variedades de caña de Tucumán (R. Argentina). Rev. Ind. Agric. de Tucumán 89 (2).

Producción simultánea de azúcar y alcohol: optimización energética incluyendo concentración de vinaza

Oscar A. Diez*, Marcos N. Russo*, Romina A. Salazar* y R. Marcelo Ruiz*

RESUMEN

A partir del análisis comparativo de diferentes escenarios en la producción simultánea de azúcar y alcohol, donde la totalidad de la vinaza producida es concentrada a 35°Brix, la optimización energética pudo ser factible al resolverse la composición del mosto fermentado mediante una mezcla de jugo tratado, melado y miel final, logrando en esta última la máxima concentración de sólidos no azúcares y una baja pureza. El aporte de azúcares faltantes se realizó con las otras corrientes mencionadas, de manera tal de minimizar la dilución para lograr un mosto capaz de producir el producto previsto con la máxima concentración de alcohol posible.

Palabras clave: azúcar y alcohol de caña, optimización energética.

ABSTRACT

Simultaneous production of sugar and alcohol: energy optimization including vinasse concentration

From the comparative analysis of different scenarios in the simultaneous production of sugar and alcohol, where all the vinasse produced is concentrated at 35°Brix, energy optimization is feasible, if the composition of the fermented must is solved by a mixture of treated juice, syrup and final molasses, achieving in the latter the maximum concentration of non-sugar solids and low purity. The supply of missing sugars was carried out with the other currents mentioned in order to minimize the dilution to obtain a worth capable of producing the expected product with the maximum concentration of alcohol possible.

Key words: sugar, alcohol, sugarcane, energy optimization.

Fecha de ingreso: 25/11/17 - Fecha de aceptación: 18/01/18

* Área Industrial. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Tucumán. e-mail: oadiez@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del aumento del corte con bioetanol en los combustibles para motores Otto, las destilerías de vinos obtenidos de la fermentación de mostos azucarados procedentes de la industrialización de la caña de azúcar aumentaron notablemente su producción, marcando en el primer cuatrimestre de 2017 un aumento del 72,78% en comparación con el mismo período del 2016, y las ventas de alcohol proveniente de la caña de azúcar para corte de naftas aumentaron un 53,26%. Este hecho, que junto a la previsibilidad de que el alza en la demanda de alcohol anhidro será sostenida en los próximos años (Ministerio de Agroindustria de la Nación, 2017), impulsó la ampliación de la capacidad de las destilerías.

El nuevo escenario puso los ingenios en el apremio de modificar sus objetivos productivos y transformar la naturaleza esencialmente azucarera de estos hacia una industria generadora de alimentos y energía, lo que llevó a un nuevo esquema de fabricación y consumo de energía.

Tal es así que en el año 2011 Diez *et al.* publicaron un trabajo que contempla el escenario de producción simultánea de azúcar y alcohol, analizando diferentes alternativas en busca de un óptimo energético y teniendo en cuenta la calidad de la materia prima, la relación azúcar/alcohol producida y las fuentes azucaradas para la preparación del mosto. El aumento de la producción de alcohol y de la capacidad instalada conlleva una mayor demanda de vapor, haciendo necesario mejorar la eficiencia a los fines de evitar inversiones en calderas nuevas y/o aumentar el consumo de gas natural.

Como consecuencia de la elevada generación de vinaza por litro de alcohol (los valores medios se encuentran entre 10 y 15, según informan Cortez *et al.* en el año 1995), el tratamiento de la misma consiste aún en la disposición agrícola, con su respectivo costo de logística y combustible fósil, siendo esto último un aspecto delicado si se considera que el objetivo es generar energía renovable para disminuir el consumo de energía fósil.

Para minimizar el impacto negativo del aumento de la producción de etanol, dos industrias azucareras de la

provincia de Tucumán cuentan ya con un concentrador de vinaza, elevando la concentración de esta hasta los 35°Brix. Ante la posibilidad de implementar la concentración de vinaza como pre-tratamiento, es evidente que la modificación en la proporción de azúcar y alcohol a producir a partir de una misma materia prima bajo un mismo proceso productivo impactará en las características de la vinaza y su carga contaminante, dado que al aumentar la pureza del mosto a fermentar, la vinaza generada tendrá menor concentración, requiriendo más energía si se optara por su concentración.

Teniendo en cuenta este escenario, por lo menos en el corto plazo se espera que la vinaza sea concentrada para su compostaje o disposición en campo, llegando así a un aumento en el consumo de vapor, lo que vuelve a modificar las condiciones de operación de los complejos sucro – alcoholeros.

En este trabajo se propone una metodología de cálculo para el óptimo uso de la energía, buscando definir la razón azúcar/alcohol a fabricar por unidad de materia prima, y cuál sería el origen y proporción de las corrientes azucaradas a fermentar que maximicen la eficiencia de la transformación de los azúcares en etanol con una mínima dilución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de esta metodología de análisis se consideró una fábrica tipo de azúcar blanco directo con destilería anexa alimentada con vapor de escape, capaz de procesar 15.000 toneladas de caña por día (TCD). Los valores considerados para esa fábrica fueron obtenidos a partir de datos históricos relevados de planta.

Para conceptualizar el problema y analizar la sensibilidad de las variables se analizaron diferentes escenarios productivos (Tabla 1) que son descriptos con mayor detalle a continuación:

Escenario A: máxima producción de azúcar con elaboración de alcohol a partir de melaza con pureza de 42,5%.

Escenario B: máxima producción de alcohol sin elaboración de azúcar (destilería autónoma).

Tabla 1. Diferentes escenarios productivos considerados en este estudio.

Escenario	Distribución Jugo [%]		Efectos Evap.	Melado [%] Alcohol	Bx [%] Alimentación	Bx [%] final mosto	ALC % Vol vino	Nro. Templas	Pureza Miel final
	Azúcar	Alcohol							
A	100	0	5	0	92	31	8,1	3	42,5
B	0	100	1	0	20	20	8,0		
C	70	30	5	0	23	23	7,9	3	42,5
D	85	15	5	0	35	23	7,9	2	60,0
E	40	60	5	50	20	20	7,9	3	42,5

Escenario C: producción intermedia de etanol empleando una mezcla de jugo tratado y miel agotada o melaza con pureza de 42,5% (empleo de sistema de tres templas).

Escenario D: idéntica producción intermedia de etanol que en el escenario C, empleando una mezcla de jugo tratado y miel no agotada con pureza de 60% (empleo de sistema de dos templas).

Escenario E: producción de etanol a partir de una mezcla compuesta por melaza con pureza de 42,5%, jugo tratado y melado de 65°Brix.

Para la resolución de los balances de masa fue necesario fijar algunos parámetros vinculados a la materia prima a procesar, como también las capacidades y eficiencias de los procesos, pudiéndose ver estos en la Tabla 2.

Se emplearon tres simuladores para la resolución de los requerimientos energéticos (vapor) de los escenarios planteados, todos ellos desarrollados por la EEAOC. El software SIMCE (EEAOC,2005), para los

cálculos correspondientes a la etapa de calentamiento – evaporación; mientras que el software CALCO (EEAOC, 2003) facilita la resolución de los sistemas de cocimientos. La descripción y uso de los mencionados simuladores se explica en Diez *et al.* (2011).

Finalmente, el software SICOVIN (EEAOC, 2010) determina los consumos de vapor para la concentración de vinaza, simulando un sistema de evaporación de múltiple efecto de hasta cinco etapas. La descripción y uso de este simulador se explica en Diaz *et al.* (2013).

Con los resultados obtenidos en los diferentes simuladores se formularon los respectivos diagramas de distribución de vapor utilizando una planilla Excel, y se resolvieron los balances en cada colector de vapor mediante el uso del comando Solver.

Optimización de la mezcla a fermentar: para la determinación de los flujos que componen el mosto a fermentar se esquematizó el sistema en Excel (Figura 1), optimizando la composición de la mezcla a través de la herramienta Solver, minimizando el volumen final de

Tabla 2. Valores de referencia para resolución de los balances de masa.

MOLIENDA		TRATAMIENTO JUGO		PROCESO	
Caña molida [TCH]	625	SO ₂ [ppm]	600	Bx Melado [%]	65
Fibra [% caña]	13	Cal [Kg/t caña]	2,56	Pza miel final [%]	42,5
Pureza [% caña]	83	Cachaza [% caña]	4,50	Pza Azúcar [%]	99,7
Pol [% caña]	13,5	Pol [% cachaza]	2,50	Efic. Fermentación [%]	80
ARD [% caña]	0,7	Agua filtro [% cachaza]	5,50	Efic. Destilación [%]	99
Fibra [% bagazo]	48	Bagacillo [kg/t]	0,70		
Pol [% bagazo]	2,5				
Imbibición [% fibra]	200				

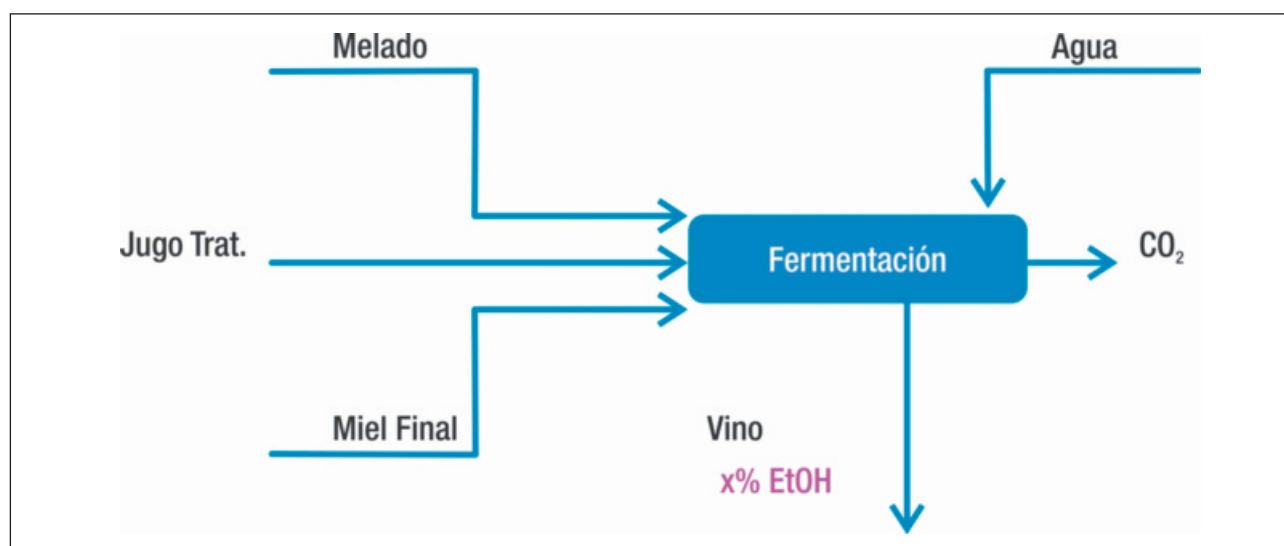


Figura 1. Corrientes intervinientes en el sector de fermentación.

vinaza (celda objetivo), sujeto a restricciones tales como: lograr la producción de etanol propuesta, alcanzar el máximo nivel de alcohol en vino (expresado en por ciento volumen) y, en lo posible, evitar el agregado de agua de dilución al mosto.

La mezcla óptima de las corrientes antes mencionadas debería entonces lograr:

- Máxima concentración de sólidos y baja pureza en la miel final.
- Contenido ajustado de azúcares reductores totales (ART) necesarios para la producción de alcohol buscada.
- Dilución del mosto ajustada al máximo nivel posible de alcohol en vino (expresada en por ciento volumen).
- Ajustar las proporciones de jugo tratado y melado, evitando agregar agua a la mezcla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 esquematiza los resultados de los balances de materia correspondiente al caso A, donde se estudió el sistema maximizando la producción de azúcar. Cada flujo cuenta con los resultados de los balances de sólidos totales, sacarosa, no azúcares y azúcares reductores directos (ARD).

Para analizar el consumo de vapor se planteó, para

cada caso, un esquema de las demandas de cada estación. Aquí se muestra el caso A (Figura 3), donde se expone cada sector junto con el consumo total, el bagazo disponible y excedente.

Dado que el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis comparativo, se consideró que el tiempo aprovechado fue del 100% y se despreciaron las pérdidas indeterminadas, dando como resultado valores de producción ligeramente superiores a los que habitualmente se presentan en fábrica.

Idéntico tratamiento fue realizado sobre el resto de los escenarios productivos y los resultados son expuestos en la Tabla 3, que muestra las principales variables operativas: azúcar (en t/h), etanol anhidro (en m³/h), vinaza(en t/h), consumo de vapor sin concentración de vinaza y con concentración de vinaza hasta 35°Brix (ambos en por ciento caña), bagazo excedente(en t/h) y gas natural adicional(en Nm³/h).

El análisis comparativo entre los escenarios A, máxima producción de azúcar; y B, conversión total azúcares en alcohol, mostró que cuando no se considera la concentración del total de la vinaza generada, la sola producción de alcohol (caso B) insume un 43,30% caña de vapor. Valor sustancialmente menor al 48,60% caña de vapor necesario para fabricar los 68,16 t/h de azúcar blanco directo y 8,36 m³/h de etanol anhidro. Estos resultados son coherentes con numerosos trabajos que

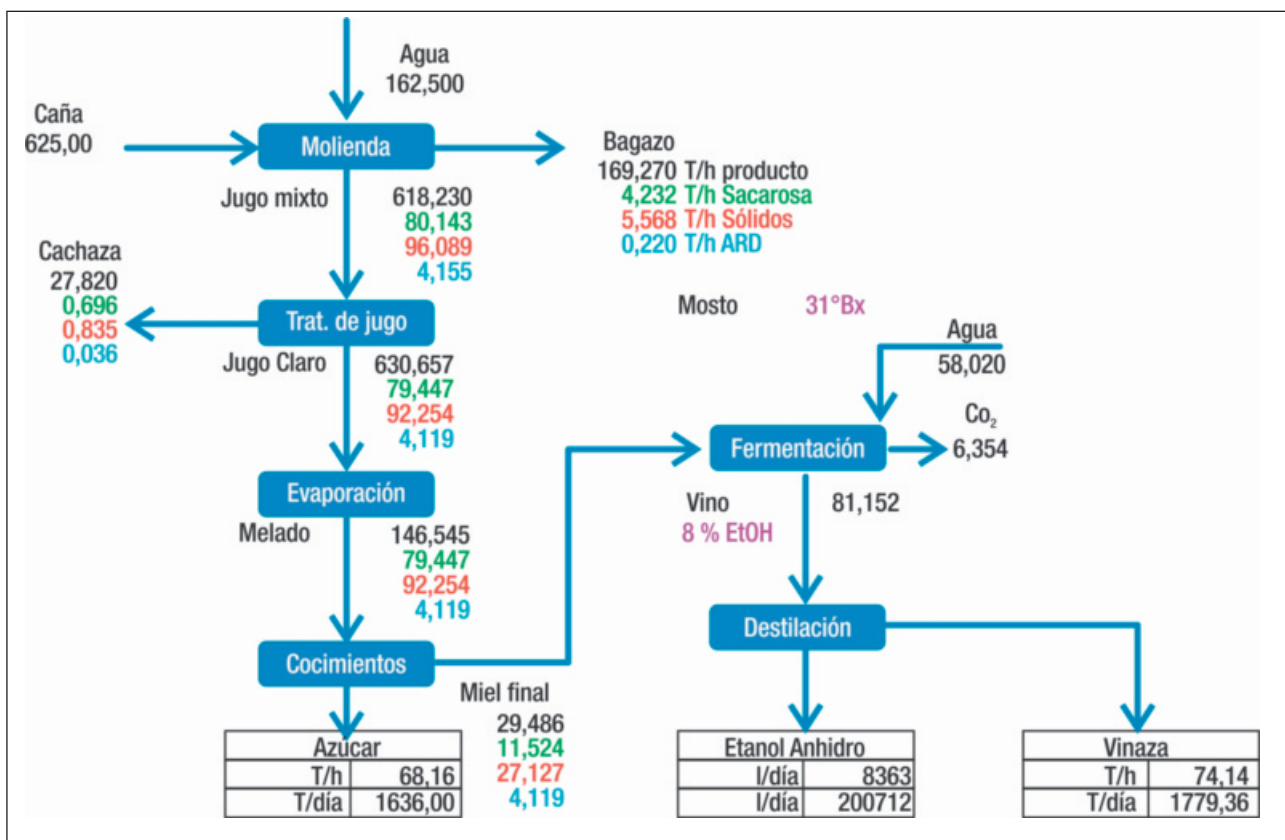


Figura 2. Esquema productivo de máxima producción de azúcar (escenario A) con resultados del balance de masa.

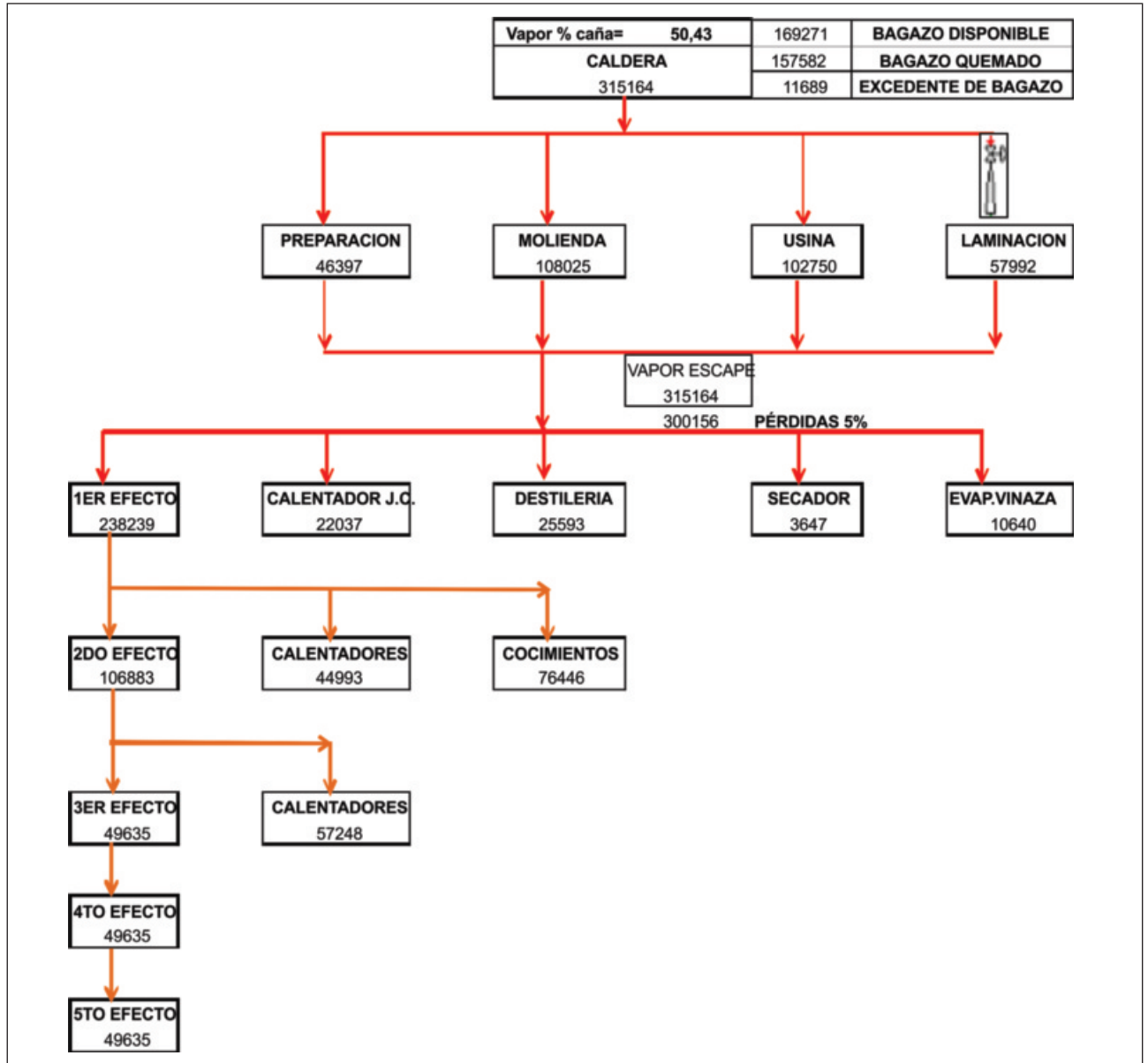


Figura 3. Esquema productivo de máxima producción de azúcar (escenario A) con indicación de los consumos de vapor y bagazo excedente.

Tabla 3. Resultados obtenidos para las opciones analizadas.

Escenario	Azúcar	Etanol anhidro	Vinaza		Consumo vapor [% caña]		Bagazo Excedente	Gas adicional
	[t/h]	[l/h]	[t/h]	Brix [%]	Sin conc. de Vza	Con conc. Vza 35°Bx	[t/h]	[Nm ³ /h]
A	68,16	8,36	74,14	15,35	48,60	50,43	11,69	
B	0,00	45,16	404,12	2,00	43,30	61,82		107,60
C	47,71	19,40	175,81	5,91	43,80	50,70	10,85	
D	47,74	19,39	175,70	5,80	48,60	55,55		19,50
E	13,63	37,50	347,75	2,36	41,60	57,37		45,00

indican la mejora energética al pasar de producir azúcar a una producción mixta de azúcar y alcohol.

Sin embargo, si se considera el consumo de vapor para la concentración de la vinaza, la elevada dilución en la que se incurre al fermentar mostos de jugo claro (como en el caso B) lleva a obtener una vinaza en extremo diluida, la cual puede presentar valores menores de 2°Bx, siendo entonces evidente el impacto de este factor sobre el consumo de vapor. Ahora, el balance global indica que el vapor necesario es de 61,82% caña, cuando anteriormente era de 43,30 % caña.

Por último, se resalta que mientras en la máxima elaboración de azúcar (escenario A) hay un bagazo excedente de 11,69 toneladas por hora, en la producción total de alcohol (escenario B), es necesario recurrir al combustible fósil (107,6 Nm³ de gas por hora).

En los escenarios C y D se plantea una producción intermedia de alcohol, destinado el 35% y 15% del jugo

respectivamente. Para la primera opción, el azúcar fue obtenido mediante un sistema de tres cocimientos, lográndose una melaza de baja pureza (42,5%); mientras que en la segunda opción se trabajó con dos cocimientos, extrayéndose una miel final de 60% de pureza.

Los resultados obtenidos (ver Tabla 3) indican al sistema de tres cocimientos como el de menor requerimiento de vapor. Considerando que la cantidad y concentración de la vinaza a evaporar son similares en ambos casos, la diferencia en el consumo se explica en que al tener como objetivo igual producción de alcohol, a la opción C debe agregarse más azúcar al proceso de fermentación, lo que queda explicitado en los diferentes porcentajes de jugo tratado a destilería (30% para el escenario C y 15% para el escenario D), dando como resultado un mosto de mayor Brix para el caso C que el D y por consiguiente, un Brix mayor en la vinaza.

El escenario E se presenta como testigo, mostrando

DATOS					
MOLIENDA	TCH	TCD			
	625	15000			
TRATAMIENTO JUGO	SO ₂ [ppm]	Cal [kg/t caña]	Bagacillo [kg/t caña]	Agua Filtro [%]	
	600	2,5	0,8	5,5	
PROCESO	ARD	Brix	Pureza		
JUGO A DESTILERIA	0,653	15,11	83,40		
MELADO	4,437	65,00	83,40		
MIEL FINAL	13,960	92,00	42,50		
Conc. Alcohol en vino [%]	Estimar la Producción de Alcohol [m ³ /h]				
8	25				
RESULTADOS					
	Agua	Jugo a Dest	Melado	Miel final	Vinaza
Flujo másico [t/h]	0	242,24	9,28	16,93	291,62
Brix [%]		15,11	65,00	92,00	3,41
Alcohol en Vino [%]	8,00				
JUGO A DESTILERÍA [%]	38		litros de Vinaza/l alcohol		
MELADO A DESTILERÍA [%]	10		11,66		
PRODUCCIÓN CALCULADA					
	AZÚCAR [t /h]	ALCOHOL [m ³ /h]			
	37167	25,00			
	RENDIMIENTO [%]				
	5,95				

Figura 4. Vista de las áreas de ingreso de datos y emisión de resultados respectivamente del sistema de cálculo y optimización de la mezcla a fermentar. Resultados del escenario E optimizado.

la factibilidad de agregar melado al caldo a fermentar cuando crece la producción de alcohol, siendo el consumo lineal en función de la producción y asegurando que el ingreso de melado como materia prima a fermentar no distorsiona la tendencia del consumo, por tratarse de una corriente con una pureza similar a la del jugo claro pero con un menor contenido de agua.

La Figura 4 ilustra a modo de ejemplo las áreas de ingreso de datos y emisión de resultados de la planilla Excel antes descripta. Los valores reflejados en ella corresponden a la optimización de la mezcla propuesta por el escenario E, y una producción de 25 m³/h de alcohol.

CONCLUSIONES

La optimización energética en la producción simultánea de azúcar y alcohol, considerando la concentración de la vinaza generada, es factible si se resuelve la composición del mosto a fermentar. Esto implica trabajar con mieles finales muy bien agotadas (baja pureza) y con alta concentración de sólidos. Además, los azúcares faltantes para producir el alcohol estipulado deben ser aportados por corrientes tales que minimicen la dilución del costo, a fin de lograr la máxima concentración de vino (% volumen).

A través de herramientas disponibles en Excel se generó una estructura de cálculo y optimización que, a través de la comparación de los diferentes resultados, simplifica la toma de decisiones.

El análisis expuesto en este trabajo corresponde

a destilerías que trabajan con vapor de escape, por lo que está pendiente la ampliación del estudio para el caso de destilerías al vacío, donde el uso de vapor vegetal para alimentar la columna modifica el esquema de uso del vapor.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Ministerio de Agroindustria de la Nación. 2017.** Informe sectorial nº 80.
- Cortez, L.; P. Magalhães e J. Happi. 1992.** Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. Rev. Bras. de Energ. 2: 111–146.
- Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2003.** CALCO 1.0. Manual del usuario. Versión 1.0. [CD ROM]. EEAOC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.
- Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2005.** SIMCE 3.0. Manual del usuario. Versión 3.0. [CD ROM]. EEAOC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.
- Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). 2010.** SICOVIN 1.0.
- Diez, O. A.; M. C. Cruz y G. J. Cárdenas. 2011.** Optimización energética para la producción simultánea de azúcar y alcohol, en Tucumán, R. Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88 (2): 27-40.
- Díaz, G. F.; G. De Boeck; M. C. Cruz y D. Paz. 2013.** SICOVIN V.1.0: “software” para el análisis de concentración de vinaza. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 90 (2): 39-47.

Descripción para el registro de la nueva variedad de garbanzo TUC G-470 desarrollada por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres

Oscar N. Vizgarra*, Clara M. Espeche*, Diego E. Méndez*, Lucas E. Tarulli*,
Marcelo Araya* y L. Daniel Ploper**

RESUMEN

El proyecto Legumbres Secas de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres ha desarrollado una nueva variedad de garbanzo (*Cicer arietinum* L.), tipo Kabuli de calibre grande, denominada TUC G-470. Con el objetivo de inscribir la nueva variedad en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) y el Registro Nacional de Propiedad de Cultivares (RNPC), se realizó la descripción de caracteres morfológicos, fenológicos y comportamiento sanitario. Las evaluaciones se efectuaron sobre plantas provenientes de un ensayo ubicado en la localidad de La Ramada, departamento Burruyacú, provincia de Tucumán. Los caracteres presentados en este trabajo son obligatorios para la inscripción de la nueva variedad y permiten distinguirla entre otras similares.

Palabras clave: *Cicer arietinum*, garbanzo tipo Kabuli, registro, INASE.

ABSTRACT

Description for the registration of the new variety of chickpea TUC G-470 developed by the Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC)

The Dry Legumes project of the Estación Experimental Agroindustrial Obispo has developed a new variety of chickpea (*Cicer arietinum* L.), type Kabuli of large caliber, TUC G-470. In order to register the new variety in the National Register of Cultivars (RNC) and the National Register of Cultivar Property (RNPC), the description of morphological, phenological and sanitary characteristics was carried out. The evaluations were performed on plants from a trial located in La Ramada, department Burruyacú, province of Tucumán. The information presented in this work is obligatory for the registration of the new variety and allows to differentiate it from similar ones.

Key words: *Cicer arietinum*, type Kabuli chickpea, registration, INASE.

Fecha de recepción: 30/10/2018 - Fecha de aceptación: 26/06/2019

* Sección Granos, EEAOC, poroto@eeaoc.org.ar

** Sección Fitopatología, EEAOC.

INTRODUCCIÓN

El proyecto Legumbres Secas de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC) hasta el presente ha inscripto ante el Instituto Nacional de Semillas (INASE) dos variedades de garbanzo (*Cicer arietinum* L.), pertenecientes a tipo Kabuli de calibre chico (7 – 8 mm) (Vizgarra *et al.*, 2017).

Durante el último período, en respuesta a la demanda de una variedad de calibre grande y color claro, el proyecto ha desarrollado TUC G-470, una nueva variedad de garbanzo de calibre grande. Para tal propósito se evaluaron líneas provenientes del International Center for Agricultural Research in the Drey Areas (ICARDA), lo que permitió identificar un genotipo de poroto Dry sobresaliente por arquitectura de planta, rendimiento, calibre y color de grano.

Una vez finalizada la etapa de evaluación, se realizará el registro en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) y el Registro Nacional de Propiedad de Cultivares (RNPC) para proteger el derecho de propiedad de la nueva variedad y a la vez poder comercializarla.

El objetivo del presente trabajo fue dar a conocer algunos de los caracteres de TUC G-470, que se deben describir para la inscripción y registro en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) y en el Registro Nacional de Propiedad de Cultivares (RNPC) del INASE.

MATERIALES Y MÉTODOS

La siguiente descripción corresponde a observaciones efectuadas en plantas del ensayo ubicado en la localidad de La Ramada, departamento Burruyacú, provincia de Tucumán (Latitud: 26°41'S Longitud: 64° 57' N y 557 msnm). Estas se realizaron de acuerdo a lo indicado en el Anexo II de la Declaración Jurada de Solicitud de Inscripción y con el apoyo de las guías para la descripción de caracteres morfológicos elaboradas por el IBPGR, ICRISAT e ICARDA (1993).

Caracteres morfológicos

Para realizar las determinaciones se tomaron de las parcelas de multiplicación 20 plantas al azar y se realizaron las siguientes determinaciones a las diferentes partes de las plantas analizadas:

- **Planta:** porte en estadio vegetativo, porte a madurez de la vaina, altura, altura a cosecha, intensidad de ramificación, número de ramificaciones primarias a cosecha, número de ramificaciones secundarias a cosecha.
- **Tallo y nudos:** altura de inserción de la primera flor, coloración antocianica, entrenudos (zig-zag).
- **Hoja:** longitud de los folíolos, ancho de los

folíolos, tamaño de los folíolos, intensidad del color verde del follaje, presencia de color purpúreo en los bordes de los folíolos, número de folíolos por hoja.

- **Flores:** longitud máxima del estandarte, ancho máximo del estandarte, color del estandarte, color de pedicelos, tipo de flores.

- **Vaina:** altura de inserción de primera vaina, longitud (incluyendo el pico), longitud del pedúnculo, ancho (ancho entre las suturas en la parte media de la vaina), espesor de la vaina, tamaño, intensidad del color verde, longitud de pico o rostro, número predominante de óvulos, número de vainas por pedúnculo, dehiscencia, número de semillas por vaina.

- **Semilla:** peso de 100 semillas (g) humedad 8%, forma, color, surcado, intensidad de color.

Caracteres fenológicos

Se registró el número de días desde la siembra hasta el inicio de floración (cuando el 50% de las plantas han iniciado la floración), época de floración (80% de las plantas con al menos una flor) y época de madurez de la vaina (cuando la semilla está seca). Se tomaron los valores promedio de las lecturas del ensayo.

Comportamiento sanitario

Se determinó la respuesta frente a *Fusarium* spp. a partir de las observaciones efectuadas en las parcelas bajo condiciones naturales de infección.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se describen los resultados obtenidos del material evaluado al analizar los caracteres morfológicos obligatorios necesarios para la inscripción de la nueva variedad en el INASE.

En la Figura 1 se muestra la flor de la variedad TUC G- 470, en la cual se evidencia el color blanco del estandarte; en la Figura 2 se muestra una rama principal con las hojas y vainas. En la Figura 3 se presentan las semillas de TUC G-470, y puede observarse el tamaño del grano de 10 mm.

En la Tabla 2 se realiza una descripción de los caracteres fenológicos de la variedad.

En la Tabla 3 se presenta el comportamiento sanitario de TUC G-470 frente a enfermedades y plagas.

CONCLUSIONES

Los datos presentados permiten obtener una descripción adecuada de TUC G-470, la nueva variedad de Garbanzo tipo Kabuli desarrollada por la EEAOC a partir de selección de materiales introducidos, y posibilitan también distinguirla entre otras variedades similares.

Tabla 1. Descripción de los caracteres morfológicos obligatorios para el registro en el INASE de la variedad de garbanzo tipo Kabuli TUC G-470.

CARACTERES MORFOLOGICOS		
Planta	Porte	erecto (Mexicano)
	Porte a madurez de la vaina	erecto
	Altura (cuando las vainas están totalmente desarrolladas)	73,5 cm
	Altura a cosecha	69,50 cm
	Intensidad de ramificación	medio
	Número de ramificaciones primarias a cosecha	2,5
	Número de ramificaciones secundarias a cosecha	9,2
Tallo	Coloración antociánica	ausente
	Entrenudos	zig-zag leve
Hoja	Longitud de los folíolos	12,6 mm
	Ancho de los folíolos	9,2 mm
	Tamaño de los folíolos	1,3
	Intensidad del color verde del follaje	medio
	Presencia de color purpúreo en los bordes de los folíolos	ausente
Flor	Número de folíolos por hoja	13,1
	Longitud máxima del estandarte	11,9 mm
	Ancho máximo del estandarte	11,9 mm
	Color del estandarte	blanco
	Color de pedicelos	verde
Vaina	Tipo de flores	simple
	Altura de inserción de primera vaina	24 cm
	Longitud (incluyendo el pico)	30,6 mm
	Longitud del pedúnculo	2,43 cm
	Ancho	14,2 mm
	Espesor de la vaina	14,5 mm
	Tamaño	2,15
	Intensidad del color verde	medio (parecido a Norteño)
	Longitud de pico o rostro	2,9 mm
	Número predominante de óvulos	3
	Número de vainas por pedúnculo	1
Dehiscencia	no dehiscente	
Número de semillas por vaina	1,3	
Semilla	Peso de 100 semillas (g) humedad 8%	50
	Forma	redonda a angular
	Color	beige
	Intensidad de color	claro
	Surcado	débil



Figura 1. Flor de la variedad de garbanzo TUC G-470



Figura 3. Semillas de la variedad de garbanzo TUC G-470.



Figura 2. Tallo, hojas y vainas de la variedad de garbanzo TUC G-470.

Tabla 2. Descripción de los caracteres fenológicos para el registro en el INASE de la variedad de garbanzo tipo Kabuli TUC G-470.

CARACTERES FENOLOGICOS	
Número de días desde emergencia a inicio de floración	80
Época de floración (80 % de las plantas con al menos una flor)	90
Época de madurez de la vaina (días desde emergencia a madurez de la vaina)	146

Tabla 3. Descripción del comportamiento sanitario para el registro en el INASE, de la variedad de garbanzo tipo Kabuli TUC G-470.

COMPORTAMIENTO SANITARIO		
Enfermedades	Frente a <i>Fusarium</i> sp.	susceptible
	Frente a <i>Ascohyta</i> sp.	sin información
Plagas	Frente a <i>Heliothis armigea</i>	susceptible
	Frente a <i>Heliothis virescens</i>	sin información
	Frente a <i>Heliothis</i> sp.	sin información

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Proyecto Picto 2016 - ANPCyT por su apoyo en la parte final de la obtención de esta variedad, como así también a los productores que colaboraron en la instalación de los ensayos para esta investigación, en especial al Ing. Alberto Ricardo Ortega.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

IBPGR, ICRISAT and ICARDAD. 1993. Descriptors for

chickpea (*Cicer arietinum* L.) International Board for plant genetic resources, Rome, Italy; International Crops Research Institute for the semi- arid tropics, Patancheru, India and International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Aleppo, Syria. ISBN 92-9043-137-7.

Vizgarra, O. N.; C. M. Espeche; S. Y. Mamani Gonzales y L. D. Ploper. 2017. TUC 403 y TUC 464 dos nuevas variedades de garbanzo tipo Kabuli para el noroeste argentino. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 94 (1): 49-53.

Contenido de azufre total del residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar de Tucumán, Argentina

Gabriela Mistretta*, Cynthia Gutierrez*, Gimena Zamora Rueda*, Florencia Peralta*, Marcos A. Golato*, Dora Paz*, Gerónimo Cárdenas* y Marcelo Ruiz**

RESUMEN

Para predecir el posible comportamiento corrosivo de un combustible sólido en el interior de un generador de vapor es necesario analizar los componentes elementales que se transformarán, durante la combustión, en componentes ácidos, solubles e insolubles, altamente corrosivos. Uno de estos elementos es el azufre (S), que al combinarse con el oxígeno (O₂) y con el hidrógeno (H₂) formarán óxidos de azufre (SO₂ y SO₃) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) respectivamente, y que favorecen los mecanismos de la corrosión. Se caracteriza el residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de la variedad LCP 85-384, de difusión comercial predominante en el área cañera de la provincia de Tucumán, siguiendo la metodología indicada en la norma ASTM D 3177 (ASTM, 2002). Se trabajó con 48 muestras recolectadas de diferentes campos cañeros tucumanos. El contenido de azufre total %S (b.s.) determinado se encuentra en un rango de 0,13% a 0,39%, con un promedio de 0,23% y una desviación estándar (C.V. %) de 27,41%.

Palabras clave: biomasa, biocombustibles, energía, combustión

ABSTRACT

Total sulphur content of the agricultural residue from the sugar cane harvest in Tucumán, Argentina

To predict the possible corrosive behavior of a solid fuel inside a steam generator it is necessary to analyze the elemental components that will be transformed, during combustion, into acid, soluble and insoluble, highly corrosive components. One of these elements is sulfur (S), which when combined with oxygen (O₂) and hydrogen (H₂) will form oxides of sulfur (SO₂ and SO₃) and hydrogen sulfide (H₂S) respectively, facilitating the mechanisms of corrosion. The agricultural residue of sugarcane harvest of the LCP 85-384 variety, of predominant commercial diffusion in the sugarcane area of the province of Tucumán, was characterized, following the methodology indicated in the ASTM D 3177 standard (ASTM, 2002). Samples were collected from different sugar cane fields in Tucumán. The total sulfur content %S (b.s.) was determined in a range of 0.13% to 0.39%, with an average of 0.23% and one standard deviation (C.V.%) of 27.41%.

Key words: biomass, biofuels, energy.

Fecha Ingreso: 4/04/18 – Fecha Egreso: 2/05/18

Área Industrial. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). C.P. 4101- Las Talitas - Tucumán.
www.eeaoc.org.ar - Tel. 0381-4521000 e-mail: mgmistretta@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento del RAC es una de las alternativas con las que cuenta Tucumán para la producción de energía renovable, puesto que estos residuos pueden utilizarse, previo acondicionamiento, en las calderas de vapor de los ingenios azucareros de la provincia (Casen *et al.*, 2012; Feijóo *et al.*, 2015; Golato *et al.*, 2017).

El RAC es un material lignocelulósico formado por compuestos elementales como el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S). (Gehlawat, 1994; Nogués *et al.*, 2010). Además, suele contener cantidades relativamente importantes de Silicio (Si), Potasio (K), Sodio (Na) y Cloro (Cl). (Berlanga Labari *et al.*, 2006; Kirkby y Römheld, 2007; Fungaro y Reis, 2014).

En la biomasa, los metales alcalinos se encuentran asociados, bien químicamente a la parte orgánica o bien como sales simples; esto significa que se pueden liberar fácilmente a la fase gaseosa durante la combustión (Berlanga-Labari *et al.*, 2006).

El material orgánico de la biomasa se quema durante el proceso de la combustión y parte del material inorgánico se transforma y forma la ceniza o residuo sólido que queda post combustión.

Para predecir la posible existencia de fenómenos de corrosión, deposición y/o escorificación en generadores de vapor que utilizan combustibles sólidos, se debe realizar un análisis de los elementos constitutivos de la biomasa y de sus cenizas; esto permite establecer los porcentajes en peso de C, H, N, O, S y Cl (Nogués *et al.*, 2010).

Normalmente los problemas de corrosión y deposición, que suceden en el interior de un generador de vapor, se producen en las zonas más frías de las superficies de transferencia de calor, desde el sobrecalentador hasta el último paquete de tubos de haz convectivo.

A elevadas temperaturas de trabajo de los equipos sobrecalentadores de vapor, el potasio presente en la biomasa genera sulfato, cloruro y/o silicato, que formarán depósitos sobre los tubos. El sulfato de potasio (K_2SO_4) es la única fase sólida que se mantiene estable durante las transformaciones, siempre que exista suficiente cantidad de azufre en el sistema (Berlanga-Labari *et al.*, 2006).

Los compuestos considerados responsables de aumentar el proceso de corrosión en las calderas de biomasa y que forman los depósitos son el cloruro de potasio (KCl) y cloruro de sodio (NaCl), que en contacto con SO_2 y/o SO_3 , presente en los gases, generan ácido clorhídrico HCl, que se condensa sobre la superficie del metal. Este último mecanismo en particular ocurre cuando los combustibles tienen bajo contenido de azufre y significativamente alto contenido de cloro (Melissari, 2012;

Berlanga-Labari *et al.*, 2006).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el contenido de %S total del residuo de cosecha de caña de azúcar (RAC) de la variedad LCP 85-384 en Tucumán, Argentina, mediante análisis en laboratorio, siguiendo una metodología estandarizada de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC).

Para ello, se recolectaron 48 muestras de RAC de caña de azúcar provenientes de diferentes lotes ubicados en distintos puntos del área cañera de Tucumán (ver Tabla 1), plantados con la variedad LCP 85-384, que representa el 83,05% de los cañaverales cultivados en la provincia (Ostengo *et al.*, 2015).

La determinación del porcentaje de azufre (%S) se realizó siguiendo la metodología propuesta en la norma ASTM D 3177-02 (ASTM, 2002), creada originalmente para carbón mineral. Esta indica dos procedimientos alternativos: el método de prueba A (método "Eschka") y el método B, también llamado "método de lavado de la bomba".

Las determinaciones expresadas en este trabajo se realizaron por el método B, donde se determinó el %S mediante la combustión de una muestra de biomasa en bomba calorimétrica. Para ello se utilizó una bomba calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C5000, en operación adiabática, donde se realizó la combustión de una pastilla fabricada a partir de una muestra representativa de RAC de 0,5 a 1,0 g.

Posteriormente se lavó el interior de la bomba y la cápsula porta muestra con una solución de indicador de naranja de metilo al 2% y se recogieron los contenidos del lavado en un vaso de precipitación para su posterior análisis. A este lavado se le midió el pH, se ajustó este a un valor de 7 con hidróxido de amonio (NH_4OH), luego se hirvió y se filtró a través de papel filtro, el cual se lavó posteriormente con agua destilada hervida hasta que alcanzó un volumen de 250 ml. A esta última solución de lavado se la hirvió nuevamente y se le añadieron 10 ml de cloruro de bario ($BaCl_2$) por medio de una pipeta, con agitación constante. Se continuó la ebullición de la solución durante 15 minutos y se dejó reposar 24 horas. Al enfriarse esta solución, el azufre precipitó en forma de sulfato de bario ($BaSO_4$), que luego se filtró en papel bajo en cenizas (menor al 0,01%) y se lavó con agua caliente. Seguidamente se colocó el filtro húmedo que contiene el precipitado de $BaSO_4$ en un crisol de porcelana, previamente calcinado y pesado para eliminar

Tabla 1. Origen de las muestras analizadas.

Muestra	Edad	Región Agroecológica	Variedad
1	Soca 2	Llanura deprimida	384
2	Soca 1	Llanura deprimida	384
3	Soca 2	Llanura deprimida	384
4	Soca 3	Llanura deprimida	384
5	Soca 3	Llanura deprimida	384
6	Soca 4	Chaco Pampeana	384
7	Soca 3	Llanura deprimida	384
8	Soca 3	Chaco Pampeana	384
9	Soca 1	Chaco Pampeana	384
10	Soca 4	Chaco Pampeana	384
11	Soca 1	Chaco Pampeana	384
12	Soca 3	Chaco Pampeana	384
13	Soca 3	Chaco Pampeana	384
14	Soca 1	Chaco Pampeana	384
15	Caña Planta	Pedemonte	384
16	Caña Plata	Pedemonte	384
17	Soca 2	Pedemonte	384
18	Caña Planta	Llanura deprimida	384
19	Soca 2	Chaco Pampeana	384
20	Caña Planta	Chaco Pampeana	384
21	Soca 3	Chaco Pampeana	384
22	Soca 3	Chaco Pampeana	384
23	Soca 3	Chaco Pampeana	384
24	Soca 3	Chaco Pampeana	384
25	Soca 3	Chaco Pampeana	384
26	Soca 3	Chaco Pampeana	384
27	Soca 3	Chaco Pampeana	384
28	Soca 3	Chaco Pampeana	384
29	Soca 3	Chaco Pampeana	384
30	Soca 3	Chaco Pampeana	384
31	Soca 3	Chaco Pampeana	384
32	Soca 3	Chaco Pampeana	384
33	Soca 3	Chaco Pampeana	384
34	Soca 3	Chaco Pampeana	384
35	Soca 3	Chaco Pampeana	384
36	Soca 3	Chaco Pampeana	384
37	Soca 3	Chaco Pampeana	384
38	Soca 3	Chaco Pampeana	384
39	Soca 1	Chaco Pampeana	384
40	Soca 1	Chaco Pampeana	384
41	Soca 1	Chaco Pampeana	384

Tabla 1, Sigue en página siguiente

Continúa de página anterior, Tabla 1. Origen de las muestras analizadas.

42	Soca 1	Chaco Pampeana	384
43	Soca 1	Chaco Pampeana	384
44	Soca 1	Chaco Pampeana	384
45	Soca 1	Chaco Pampeana	384
46	Soca 1	Chaco Pampeana	384
47	Soca 4	Chaco Pampeana	384
48	Soca 4	Chaco Pampeana	384

impurezas, y se calcinó el papel a 800°C hasta peso constante.

La cantidad de azufre se determinó por cálculo, según ASTM D 3177, de acuerdo a la Ecuación 1.

Donde:

$$\% S \left[\frac{g S}{100 g muestra b.s.} \right] = \frac{A * 13,738}{B}$$

A= gramos de BaSO₄ precipitados

B = gramos de muestra utilizados

13,738= Peso equivalente del ion sulfuro [g/eq.]

%S= gramos de azufre por cada 100 gramos de muestra en base seca

Para el análisis estadístico se determinaron el promedio, el máximo, el mínimo y el coeficiente de variación del lote de muestras analizadas.

contenido de %S de las muestras de RAC de caña de azúcar analizadas en este estudio; estos se encuentran expresados en porciento en base seca (b.s.). Además, se señalan los principales indicadores estadísticos de las muestras ensayadas.

El rango de los valores obtenidos se encontró entre 0,13% a 0,39%, con un valor promedio de 0,23% y un CV% de 27,41.

La variabilidad encontrada en %S podría asociarse con los diferentes tipos de suelos de los que provienen las muestras (Zuccardi y Fadda, 1985), con variaciones en la productividad, edad del cañaveral, momento de cosecha y altura del despuntado de cada lote, como también en ciertas situaciones con la calidad del agua de riego y con el empleo de algunos fertilizantes nitrogenados líquidos que tienen azufre en su composición (Kirkby y Römheld, 2007; Singh *et al.*, 2008).

En la Figura 1 puede observarse un gráfico de dispersión de los valores obtenidos en el estudio e indicados en la Tabla 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 muestra los resultados obtenidos del

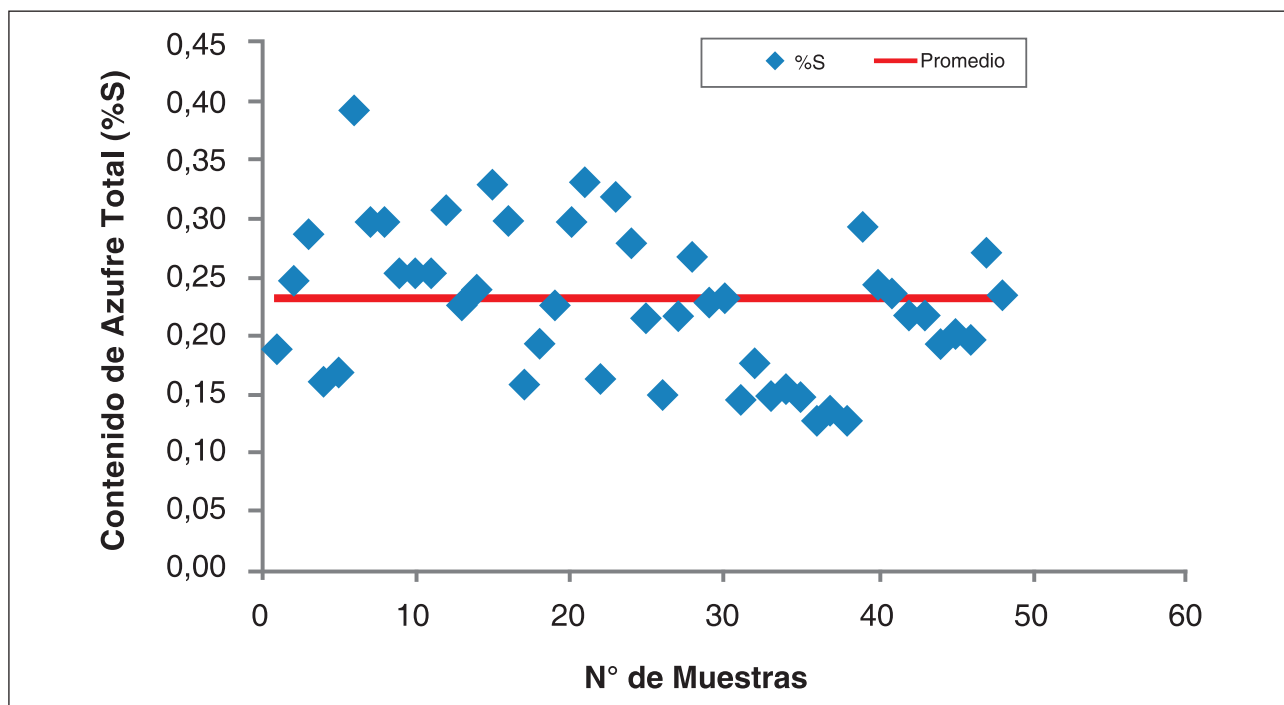


Figura 1. Contenido de %S (b.s.) de las muestras analizadas del RAC de caña de azúcar, var. LCP 85-384, en Tucumán.

Tabla 2. Contenido de azufre total %S (b.s.) para muestras de RAC de la variedad LCP 85-384 en Tucumán.

Medidas	Valores
Nº de muestras (n)	48,00
Contenido Promedio %S (b.s.)	0,23
Contenido Mínimo %S (b.s.)	0,13
Contenido Máximo %S (b.s.)	0,39
Coefficiente de variación (CV%)	27,41

La Tabla 3 muestra una comparación entre el contenido total de azufre en muestras de RAC determinados en este trabajo con los obtenidos en diferentes regiones del mundo.

Los resultados de este estudio fueron comparados con los señalados por Baxter *et al.* (1998) y Jenkins *et al.* (1998), que utilizaron la norma original ASTM E775; por Woytiuk (2006), quien obtuvo sus valores de Hazen Research Inc., Golden CO; por Bizzo *et al.* (2013), quienes realizaron sus determinaciones por medio de espectrómetro óptico de plasma; por Azad *et al.* (2014) y Reyes Montiel *et al.* (2005), quienes no especifican el método utilizado y, por último, por Hassuani *et al.* (2005), que utilizaron la norma ASTM D 4208 que se aplica para carbón mineral.

Los resultados determinados en este trabajo se encuentran en igual orden de magnitud que los informados por Baxter *et al.* (1997); Jenkins *et al.* (1998); Woytiuk (2006); Bizzo *et al.* (2013) y Azad *et al.* (2014). La

Tabla 3. Contenido de %S (b.s.) en RAC en diferentes regiones del mundo productoras de caña de azúcar.

Referencia Bibliográfica	Contenido %S	Lugar
Baxter <i>et al.</i> , 1997	0,16	EEUU
Jenkins <i>et al.</i> , 1998	0,16	EEUU
Woytiuk, 2006	0,22	Maui, Hawái
Bizzo <i>et al.</i> , 2013	0,24	Brasil
Azad <i>et al.</i> , 2014	0,20	Malasia
Reyes Montiel <i>et al.</i> , 2005	0,13	Cuba
Hassuani <i>et al.</i> , 2005	0,11	San Pablo, Brasil
Leal <i>et al.</i> , 2013	0,20	Brasil
RAC de este estudio	0,23	Tucumán, Argentina

metodología utilizada en este trabajo (ASTM D3177-02) resultó adecuada para este tipo de biomasa.

Se puede concluir que las diferencias existentes entre los resultados obtenidos en nuestro laboratorio con los de distintos autores podrían estar asociadas a la metodología de análisis utilizada, a las variedades de RAC estudiadas y al origen de las muestras (suelos, edad, cosecha, tipo de fertilización, etc.).

CONCLUSIONES

Los valores determinados del contenidos de %S en el RAC de caña de azúcar de la variedad LCP85-384, que domina los cañaverales de Tucumán, Argentina, variaron entre 0,13% y 0,39%, con un valor promedio de 0,23% y un CV de 27,41%.

AGRADECIMIENTOS

- Al Ing. Agr. Sergio Casen y al Dr. Eduardo Romero de la sección Caña de Azúcar en la toma de muestra del material ensayado.

- A la Ing. Qca. Mónica Coronel y a la Lic. Gabriela Juárez de la sección Química en la evaluación e interpretación de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ASTM D 3177-02:** Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke. USA.
- Azad A. K.; S. Islam and L. Amin. 2014.** Biomass and Bioenergy. Chapter 16: Straw Availability, Quality, Recovery, and Energy Use of Sugarcane. Editorial Springer: 275-287.
- Baxter L. L.; T. R. Miles; T. R. Miles Jr.; B. M. Jenkins; T. Milne; D. Dayton; R. W. Bryers and L. L. Oden. 1998.** The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. Fuel Processing Technology 54: 47-78
- Berlanga Labari C. y J. Fernández Carrasquilla. 2006.** Revisión sobre la corrosión de tubos sobrecalentadores en plantas de biomasa. Revista de metalurgia 42 (4): 299-317.
- Bizzo W. A.; P.C. Lenço; D. J. Carvalho and J. P. Soto Veiga. 2013.** The generation of residual biomass during the production of bioethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. Renewable and sustainable energy reviews 29: 589-603.
- Casen S. D; L. A. Marto; M. M. Medina; R. E. Romero; A. Torres Bugeau y D. Pérez. 2012.** Evaluación del desempeño de dos enfardados para la recolección del residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar en Tucumán. XVII Reunión Técnica de la Sociedad

- Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar (SATCA) 2012.
- Feijóo, E.; M. A. Golato; F. J. Franck Colombres; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2015.** Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 92 (2): 23-32.
- Fungaro D. A. and T. Vitória da Silva Reis. 2014.** Use of sugarcane straw ash for zeolite synthesis. *International Journal of Energy and Environment*. 5 (5): 559-566.
- Gehlawat, J. K. 1994.** An analysis of a bagasse-fired boiler. Papers for the presentation at "The ISSCT combined factory / energy workshop on efficient production & utilization of steam in sugar factories". The sugar Technologists' association of India, pp.79-87.
- Golato M. A.; E. A. Feijóo; F. J. Franck Colombres; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2017.** Aprovechamiento de los residuos agrícolas de la cosecha de la caña de azúcar (RAC) como combustible alternativo para calderas de vapor bagaceras. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 94 (2): 21-31.
- Hassuani, S. J.; M. R. L. Verde Leal and I. Carvalho Macedo. 2005.** Biomass power generation Sugar cane bagasse and trash. 1º Edición- Piracicaba, Brasil. Editorial PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento), pp. 162.
- Jenkins, B. M.; L. L. Baxter; T. R. Miles Jr. and T. R. Miles. 1998.** Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54: 17-46.
- Kirkby, E. A. y V. Römheld. 2007.** Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Informaciones Agronómicas* 68: 13.
- Leal, M. R. L.; M. V. Galdos; F.V. Scarpore; J. E. A. Seabra; A. Walter and C. O. F. Oliveira. 2013.** Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review, pp. 13.
- Melissari, B. 2012.** Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica 10. ISSN 1510-7475. [En línea] Disponible en: http://www.um.edu.uy/docs/6_comportamiento_de_cenizas_y_suimpacto_en_sistemas_de_%20combustion_de_biomasa.pdf, pp 1688-9584.
- Nogués, F. S; D. García Galindo y A. Rezeau. 2010.** Energías Renovables. Energía de la Biomasa 1. Prensa Universitaria de Zaragoza, pp. 128-139.
- Ostengo, S.; J. V. Diaz; M. A. Espinosa; E. R. Chavanne; D. D. Costilla y M. I. Cuenya. 2015.** Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2013/2014. *Gacetilla Agroind.* 78: 20.
- Reyes Montiel, J. L.; R. Pérez Bermúdez y J. Betancourt Mena. 2005.** Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. [En línea] Disponible en: www.cubasolar.cu/biblioteca/Escolar/Escolar05/HTML/articulo01.htm. (consultado en octubre 2015).
- Singh, V. K.; A. K. Shukla; M. S. Gill; S. K. Sharma and K. N. Tiwari. 2008.** Improving Sugarcane Productivity through Balanced Nutrition with Potassium, Sulphur, and Magnesium. *Better Crops – India*: 12-14.
- Woytiuk, K. 2006.** Master's Thesis- Sugar Cane Trash Processing for Heat and Power Production. Department of applied physics and mechanical engineering. Lulea University of technology, Lulea, Switzerland. Table C2 and C3. PP Cvi- Cvii.
- Zuccardi, R. B. y G. S. Fadda. 1985.** Bosquejo agroecológico de la provincia de Tucumán. *Miscelánea* 86. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán, pp. 85.

Granulation of dispersed anaerobic sludges fed with lemon industry effluent

Walter Daniel Machado*, Marcos N. Russo*, César F. Molina*, Eugenio A. Quaia* y Luis A. Núñez Recio**

ABSTRACT

UASB reactors excel in the treatment of high-load effluents, combining their efficiency with the possibility of using and maintaining the granular state of the consortia of anaerobic microorganisms. However, when it is not possible to start the reactor with already formed anaerobic granules, flocculent or dispersed slurry can be used to promote their clustering in granular form. This work aimed to monitor the biodigestion process and to establish such operating conditions that would cause granulation of dispersed anaerobic slurry in a pilot scale UASB reactor fed with industrial lemon processing effluent. A dispersed sludge obtained from anaerobic lagoons of a textile industry, was inoculated in a 30 liter reactor, with a cross-section 225 cm² and 1.5 meters in height. This system incorporated effluent recirculation that provides the necessary upflow velocity. The substrate, a lemon processing effluent was pretreated by sedimentation. During the period studied, its organic matter concentration ranged from 9.0 to 15.0 g O₂/l of COD. The average COD removal was 75%, at upflow velocities between 0.6 and 0.9 m/h, granules of 2 mm diameter were observed after the third month. The average particle size grew from 0.36 to 0.69 mm.

Key words: UASB, granulation, dispersed sludge, citrus effluent, upward velocity.

RESUMEN

Granulación de lodos anaerobios dispersos alimentados con efluentes de la industria del limón

Los reactores UASB se destacan en el tratamiento de efluentes de alta carga, asociando su eficiencia con la posibilidad de usar y mantener el estado granular de los consorcios de microorganismos anaerobios. Sin embargo, cuando no es posible iniciar el reactor con gránulos anaeróbicos ya formados, se puede proyectar el uso de una suspensión floculenta o dispersa con la idea de promover su agrupamiento en forma de gránulos. Este trabajo tiene como objetivo monitorear el proceso de biodigestión y proponer condiciones de operación suficientes para causar la granulación de la suspensión anaeróbica dispersa en un reactor UASB a escala piloto alimentado con efluente industrial de procesamiento de limón. Se utilizó un lodo disperso obtenido de las lagunas anaerobias de una industria textil, inoculado en un reactor de 30 litros, con una sección cuadrada de 225 cm² y 1,5 metros de altura. Este sistema incorporó la recirculación de efluentes que permite manejar la velocidad del flujo ascendente. Como sustrato, se usó el efluente de procesamiento de limón pretratado mediante sedimentación. Sus concentraciones de materia orgánica oscilaron entre 9.0 y 15.0 g de O₂ / l de DQO, durante el período estudiado.

Trabajando con velocidades de flujo ascendente entre 0.6 y 0.9 m / h, se observaron gránulos de 2 mm de diámetro después del tercer mes. El tamaño medio de partícula creció de 0,36 a 0,69 mm.

Palabras clave: UASB, granulación, lodos dispersos, efluentes cítricos, velocidad ascendente.

Fecha de recepción: 26-02-18 - Fecha de aceptación: 8-10-18

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales – Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.

**Universidad de Burgos, Área de Ingeniería Química.

Email: daniel.machado@eeaoc.org.ar

INTRODUCTION

Lemon (*Citrus lemon*) is grown both for marketing as fresh fruit and industrial processing. Industrial processing produces concentrated juices, essential oil, dehydrated peel and essences. This industrial activity entails the generation of between 2.6 and 5.0 cubic meters of effluent per ton of processed fruit, depending on a variety of operating factors or commercial requirements. In the same way, the concentration of organic matter in the raw effluent is also variable, which, expressed in terms of chemical oxygen demand (COD), is usually between 12 g/l and 16 g/l although on certain occasions it can reach 20 g/l.

Raw effluent presents a variable content of suspended solids, generally composed of pulp and peel remains. This effluent, due to its biodegradable nature and its high organic load, is adequate to be treated by means of anaerobic digestion (Navarro *et al.*, 2013). In addition, anaerobic treatments are advantageous because of their relatively low capital requirements and the possibility of generating biogas that can be used as an energy source.

Some lemon processing plants use anaerobic reactors like CSTR (complete stirring tank reactor) for the treatment of their effluents. For this class of reactors a reduction of suspended solids in the influent is not required. Other industrial plants opt for UASB reactors, which in order to increase its efficiency require a reduction of suspended solids in the influent.

UASB has been used for treating various high-strength wastewaters. Their capital and operating costs make them very competitive against another biotechnological processes (Lim, S. and T. Kim, 2013).

According to Kassam *et al.* (2003) the trend to use anaerobic technology exhibited an exponential growth between 1990 and 1994, then it declined and after that remained constant.

This technology was successfully tested in wastewaters containing easily hydrolysable substrates such as those from rye, barley and wheat breweries (Blonskaja *et al.*, 2003). On the other hand, the observed performance was lower when it was operated with difficult substrates to hydrolyze, like phenols, food and dairy product factory effluents animal slaughter facilities, etc. (Tiwari *et al.*, 2006).

UASB reactors can partially or totally fulfill some of the unitary processes required in conventional aerobic systems, such as primary settlers, sludge digester and secondary settlers (Fernández-Polanco and Seghezzi, 2015).

One of the drawbacks of anaerobic technologies is the long start-up period if they do not start with the sludge already in granular state. Although UASB reactors can

work with some efficiency using flocculated or dispersed inoculums, organic loading can be increased if granular sludge is used from the beginning of the process.

Biogranulation process involves different interactions between cells and involves biological, physical and chemical phenomena. These phenomena were observed in both aerobic and anaerobic processes (Liu and Tay, 2004).

Granular sludge formation can be considered the most important reason for the success achieved by UASB reactors in the treatment of industrial effluents, due to their higher settling velocity of about 60 m/h and their specific methanogenic activity (Hulshoff Pol *et al.*, 2004).

The nature of the effluent to be treated and the reactor's hydrodynamics are among the most influential factors in the development and stability of anaerobic granular sludge. In fact, granules grown in a complex substrate are bigger in size than those grown in a simple substrate. (Lim and Kim 2018), Arcand *et al.*, (1994) suggests that the upflow velocity seems to have the greatest influence on granulation process and on the granule size, by classifying particles according to their settling velocity, thus affecting growth rate and biomass activity.

Alphenaar *et al.*, (1993) argued the importance of maintaining a high upflow velocity of the influent in combination with short hydraulic retention times. The inverse situation, low upflow velocities and high hydraulic retention times may contribute to keeping microorganisms in a dispersed state (Liu and Tay, 2004).

It is important to maintain a balance when selecting initial organic load, which should be as high as possible to ensure rapid granulation but not exceed an upflow velocity that would lead to washing the granules off the reactor. A simple strategy proposed by H. H. Fang and Chui, (1993) is to increase the organic loading rate (OLR) only until 80% COD degradation is achieved.

It is necessary to consider that application of high OLR during the start-up of a UASB reactor implies an increase in the biogas generation rate and an increase in the flow turbulence, which could lead to the reactor washing.

Starting

In order to start a UASB reactor it is convenient to inoculate a granulated sludge from another similar reactor. However, the availability of granulated sludge is usually limited and its acquisition and transportation can be very expensive (Liu and Tay, 2004).

As for the acidity aspects of the medium, pH range of methanogenic bacteria is quite narrow (6.7 to 7.4), while the acidogenic bacteria tolerate values around 5.0. This explains the greater susceptibility to acidification of methane-producing bacteria compared to acid-producing

bacteria. Acids produced by acidogenic bacteria are buffered by the bicarbonate generated by the metabolism of methanogenic bacteria (Liu and Tay, 2004).

The objective of this work was to propose a scheme to start and operate a pilot UASB, initially loaded with flocculent sludge, so as to allow its granulation, using effluent from lemon industrial processing as a substrate.

MATERIALS AND METHODS

2.1. Laboratory analysis

Samples were taken at the points indicated in Figure 1 and referenced in Table 1.

Table 1. Sampling points and parameters analyzed

Parameters	Sampling points (See Figure 1)
COD	1 - 3 - 4
pH	1 - 3 - 4
Alpha ratio	1 - 3 - 4
Solids	1 - 3
Flow	1 - 3 - 4
Granulometry	2

Analytical techniques to determine total, fixed and volatile solids (TS, FS, VS), total suspended solids, fixed and volatile (TSS, FSS and VSS), chemical oxygen demand (COD) and pH were performed according to procedures described in Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005).

To control problems by acidification of the system, the alpha ratio was used, which is obtained by a volumetric analysis that determines total alkalinity of the system by titrating up to pH 5.75 and pH 4.3 using a sulphuric acid solution, recording the volumes V1 and V2, respectively (Rojas, 1987).

Alpha ratio is defined as:

$$\alpha = \frac{V_2 - V_1}{V_2}$$

Analysis of count and distribution of particles or suspended granules in a sludge sample (granulometry) were performed on agar-agar plates. The technique consisted in preparing square agar-agar plates of 20 cm of side, with a suspension of 1 ml of sludge taken from the lower sampling point. After the agar got solid, the image of the plate was digitized by means of a scanner and a count and classification of granules with computer software was made (Image Tool 3.0). This software can be configured to only consider certain particle size ranges. For example, in case of sludge, this range was limited to a diameter between 0.2 mm and 4.0 mm.

2.2. Pilot reactor.

The test was carried out on the premises of a lemon processing industrial plant, with adequate capacity to provide electricity, water and air pressure necessary for the operation of the pilot plant, in addition to the influent to feed the reactor.

Pilot plant (Figure 1), which was provided by a

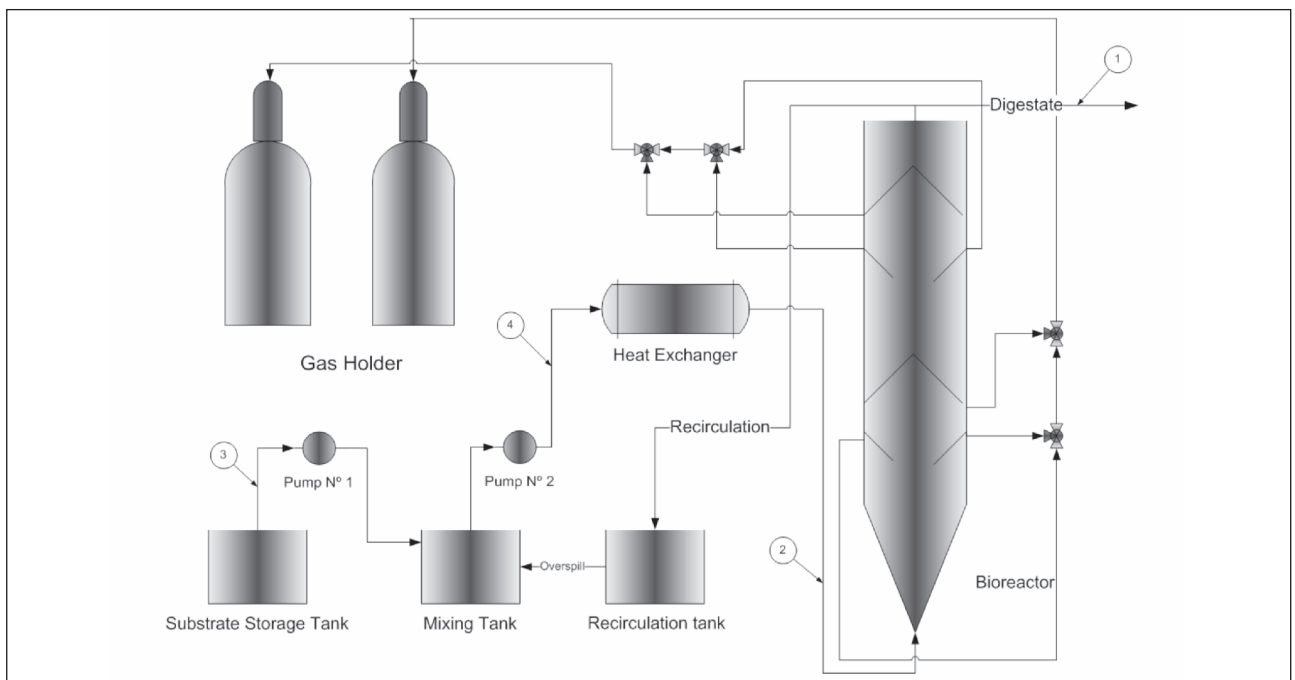


Figure 1. Scheme of pilot plant and its sampling points.

private company, consisted of a module composed of a set of devices designed to operate under different operating conditions.

A 30 liter stainless steel reactor was used. It had a square section of 225 cm² and 1.5 meters in height. Inside of the reactor were six gas-liquid separators, to collect and direct the generated biogas into two stainless steel cylinders (biogas manifolds), arranged vertically, which measured its volume by displacement of the liquid.

Feed and recirculation system consisted of two diaphragm pumps and three stainless steel tanks with the following functions:

- a) Fresh effluent tank, or substrate storage tank, received raw industrial effluent, previously subjected to a primary treatment to reduce suspended solids.
- b) Recirculation tank received a fraction of the treated effluent leaving the reactor (the other part of the treated effluent was eliminated).
- c) Mixing tank, for mixing the fresh and recirculated effluent and feeding the reactor.

Temperature, measured in effluent at outlet point of reactor was, on average 25° C.

For the initial three months of the trial, the reactor was fed with 9 g/l of COD citric industrial effluent saved from the last manufacturing season that was had been stored at low temperature (4° C) in a cold chamber. When the current season began, fresh effluent was incorporated with a monthly average values of up to 15 g/l COD and pH of 4.2. In special situations, values of the factory effluent reached just over 19 g/l of COD.

Reactor input flow (Q_e), an upflow velocity (V_{up}) were established according to literature suggestions (Chernicharo de Lemos, 2007).

At this point it should be borne in mind that, although a certain upflow velocity is required as a selection pressure to favor granulation, a very high value would produce the evacuation of the microorganisms with subsequent reactor's washing.

In order to avoid the loss of sludge and taking into account that dispersed one was used as inoculums, started up was done at V_{up} of about 0.2 m/h, reaching, at the end of the test, a V_{up} of 0.9 m/h.

The modifications of the organic loads were made according to process stability criteria, taking alpha ratio as an indicator parameter. When the alpha ratio values were ≥

Table 2. Characterization of dispersed sludge for pilot granulation test.

TS [g/l]	FS [g/l]	VS [g/l]	TSS [g/l]	FSS [g/l]	VSS [g/l]	Specific Methanogenic Activity (SMA)
[gCOD/gVSS. d]						
16.18	4.79	11.39	12.95	2.92	10.03	0.462

As inoculums sludge obtained from the anaerobic pond of a textile industry was used. Table 2, shows its characterization.

Reactor was inoculated with 10 liters of sludge and water to complete its volume. The concentration of biomass inside the reactor reached 3.34 gVSS/l. As it was calculated in equation 1:

$$X_f = \frac{X_i \times X_r}{V_f} \quad \text{Ec. 1}$$

- X_i = initial sludge concentration [g VSS/l].
- X_r = final sludge concentration in the reactor [gVSS/l].
- V_i = initial volume of concentrated sludge loaded into the reactor [l].
- V_r = effective volume of reactor [l].

Replacing in equation 1:

$$X_f = \frac{10.03 \frac{g}{l} \times 10 l}{30 l} = 3.34 \frac{gVSS}{l}$$

0.5 feed was cut off and reactor contents were recirculated until this parameter was below 0.3.

Daily flow, temperature and pH controls and periodic COD determinations of the raw, feed and recycle effluent were performed. Sludge in reactor was analyzed monthly. The operation time was 224 days, between march and october.

Maximum theoretical OLR that could support the reactor considering this concentration of microorganisms and their biological activity was calculated as forward:

$$OLR = X_f \times SMA \quad \text{Ec. 2}$$

Where:

- OLR: organic loading rate [gCOD/l.d]
- X_r: sludge concentration in the reactor [gVSS/l]
- SMA: specific methanogenic activity [gCOD/gVSS.d]

Replacing in equation 2:

$$OLR = 3.34gVSS/l \times 0.462 gCOD/(gVSS.d) = 1.54 gCOD/(l.d)$$

To calculate feed flow, we used the following expression:

$$Q_a = \frac{OLR \times V}{COD} \quad \text{Ec. 3}$$

Where:

Q_a = feed flow (l/d)a

Q_a = feed flow (l/d)

OLR = organic loading rate (gCOD/l.d)

COD = organic matter concentration of influent to be treated (gCOD/l)

V = effective volume of the reactor (l)

Replacing in equation 3:

$$Q_a = 1.54 \frac{gCOD}{l.d} \times \frac{30 l}{10 \frac{gCOD}{l}} = 4.62 \frac{l}{d}$$

$$Q_a = 4.6 \frac{l}{d} \times \frac{1 d}{24 h} = 0.19 \frac{l}{h}$$

Feed flow (Q_a) represented the maximum flow rate of influent to be treated. In occasion, due to operating circumstances, a lower value could be used.

The reactor inlet flow was calculated as follows:

$$Q_e = V u_p \times A \quad \text{Ec. 4}$$

Where:

Q_e = reactor inflow rate (m³/d)

V_{up} = upflow velocity (m/h)

A = reactor area (m²)

Replacing in equation 4:

$$Q_e = 0.2 \frac{m}{h} \times 0.0225 m^2$$

$$Q_e = 0.0045 \frac{m^3}{h} \quad Q_e = 0.0045 \frac{m^3}{h} \times 1000 \frac{l}{m^3} = 4.5 \frac{l}{h}$$

Figure 2 shows the calculated flows and its directions.

Q_a : feed flow.

Q_e : inflow to the UASB reactor.

Q_{te} : treated effluent flow rate or outflow = Q_a .

RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 3 shows the monthly averages of the operating variables recorded during the granulation process in the pilot reactor.

Figure 3 shows daily measurements of pH in feeding and effluent currents of the reactor, they give an idea of the process stability. Variations observed on pH values in feed current are due, mainly, to the lack of homogeneity in the aggregate of lime during primary treatment of the industrial effluent.

Feed flows were handled according to the influent COD values. Figure 4 shows that the hydraulic retention time (HRT) decreased in the first 50 days, from a value of 35 days to values around 2 days, but there were also variations of HRT due to fluctuations in the pump flow rate. The high dispersion observed in organic loading rate (OLR) values (figure 4), are attributed both to the difficulties in maintaining a constant flow rate and to the COD variations in the influent.

Figure 5, shows the evolution of COD values on

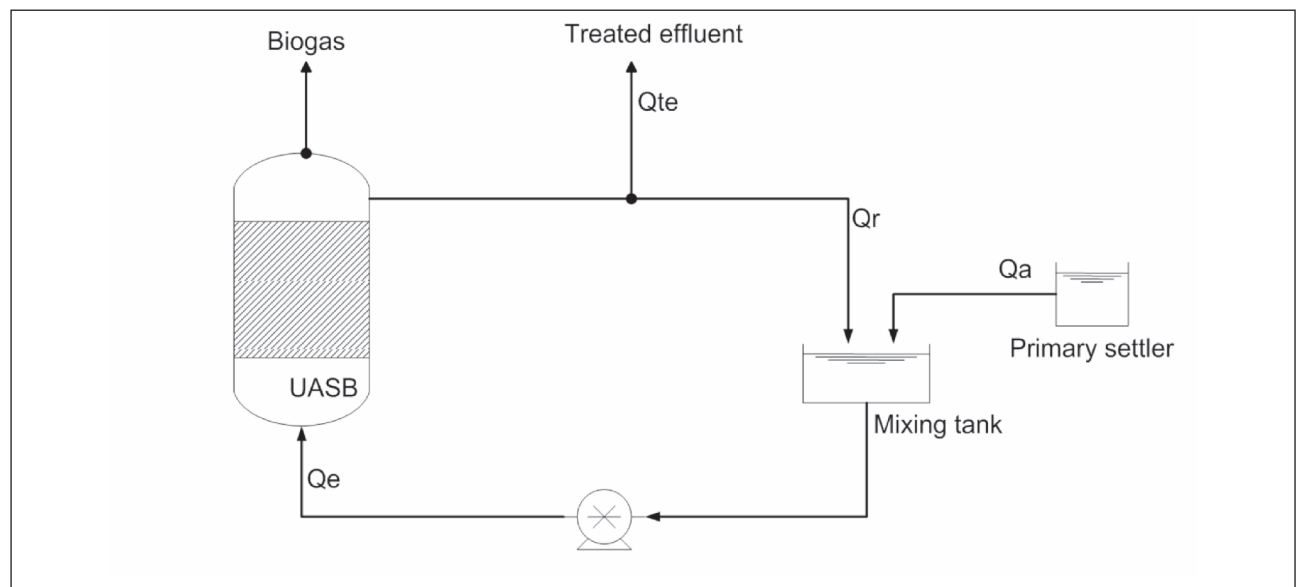


Figure 2. Reactor flow diagram

Table 3. Operational variables of the pilot reactor during the test.

	COD feeding [mg/l]	OLR Aver. [gCOD/l.d]	T [°C] recycle	pH recycle	Qa Aver. [ml/h]	As. Aver. [m/h]
Start	9040	0.56	27.60	7.60	78.00	0.20
Month 1	9640	1.85	26.40	7.60	240.00	0.67
Month 2	9420	3.15	25.90	7.40	417.60	0.77
Month 3	14470	4.20	24.60	7.24	362.40	0.79
Month 4	13535	4.85	24.10	7.11	447.60	0.79
Month 5	11928	2.83	24.29	7.56	296.40	0.84
Month 6	12986	7.47	24.69	7.42	718.80	0.86
Month 7	13188	7.45	24.70	7.42	720.10	0.92
Month 8	14754	1.97	25.40	7.95	380.00	0.88

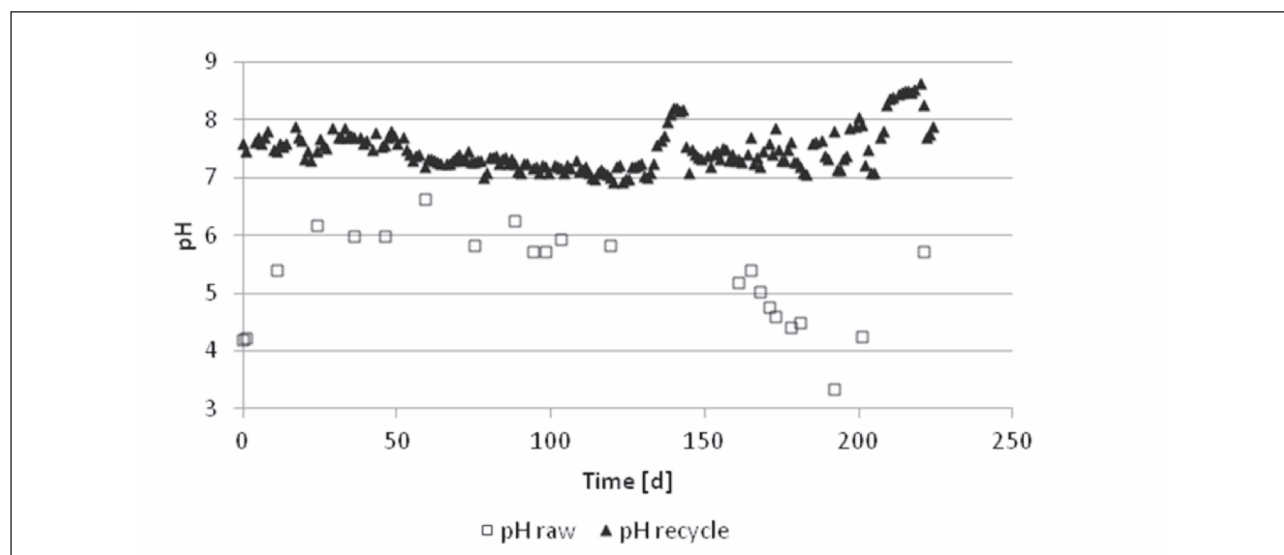


Figure 3. Evolution of the inlet (raw) and outlet (recycle) pH.

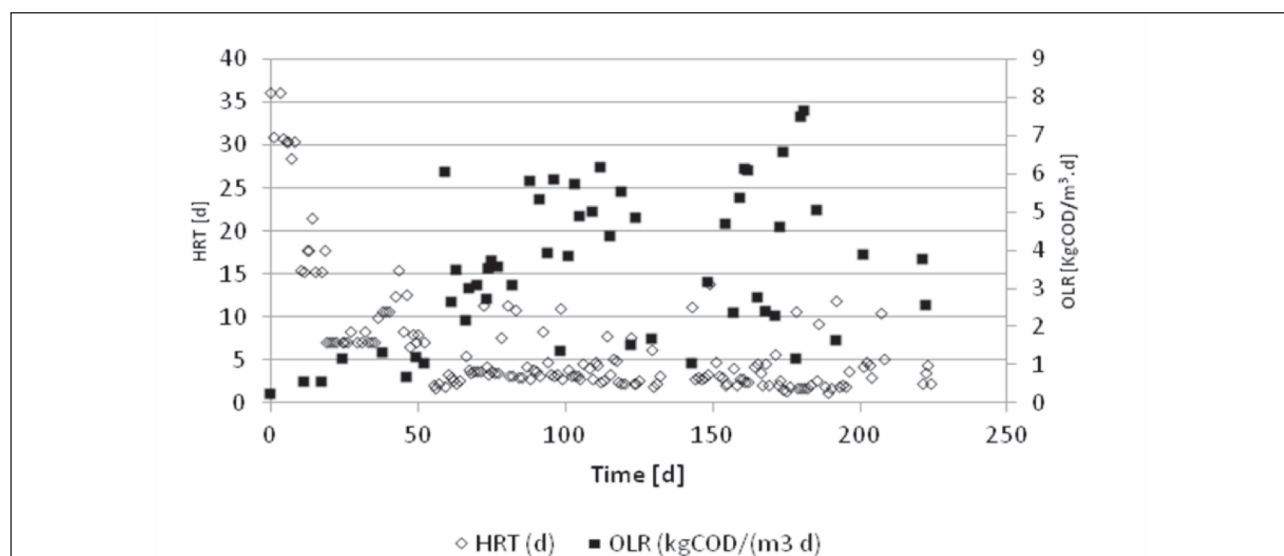


Figure 4. Evolution of HRT and OLR.

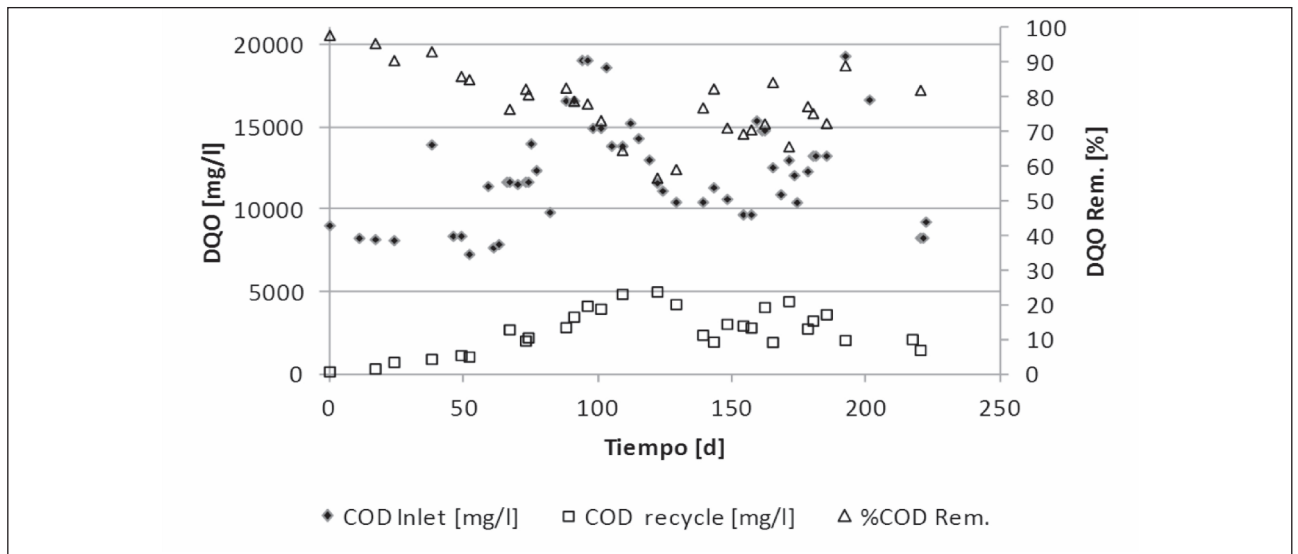


Figure 5. Inlet and outlet (recycle) COD evolution on time and removal percentage.

feed and outlet currents of the reactor, associated with the removal percentage COD. Removal Average was around 75%, lower than the 90% obtained in experiments carried out by Russo *et al.* (2010). That difference is attributed to the type of sludge (dispersed sludge against granular sludge). However, similar OLR could be reached without other critical problems. This situation is also reflected in the graph in Figure 6.

Figure 7 shows in chronological order, the sequence of granulation progress in sludge into the reactor, from the fifth month until the sixth.

Figure 8 shows the average particle size evolution inside the reactor through the time.

Tiwari *et al.*, (2006) mentioned, in a review, that the OLR and V_{up} among others were determinant parameters to obtaining granules. There is a shortage of reported works that used industrial effluents, particularly effluents from the lemon processing, to reach granular sludge. That makes it difficult to compare the methodology used in the present study with other modalities. Instead of that, several works of granulations that used flocculent sludge and synthetic substrates were found. One of them, in which a solution made of glucose and nutrients was used as a feed, reported appearance of granules two months after the reactor's start up, working at temperatures close to 30°C, OLR between 2 and 8 kg COD/m³d and upflow

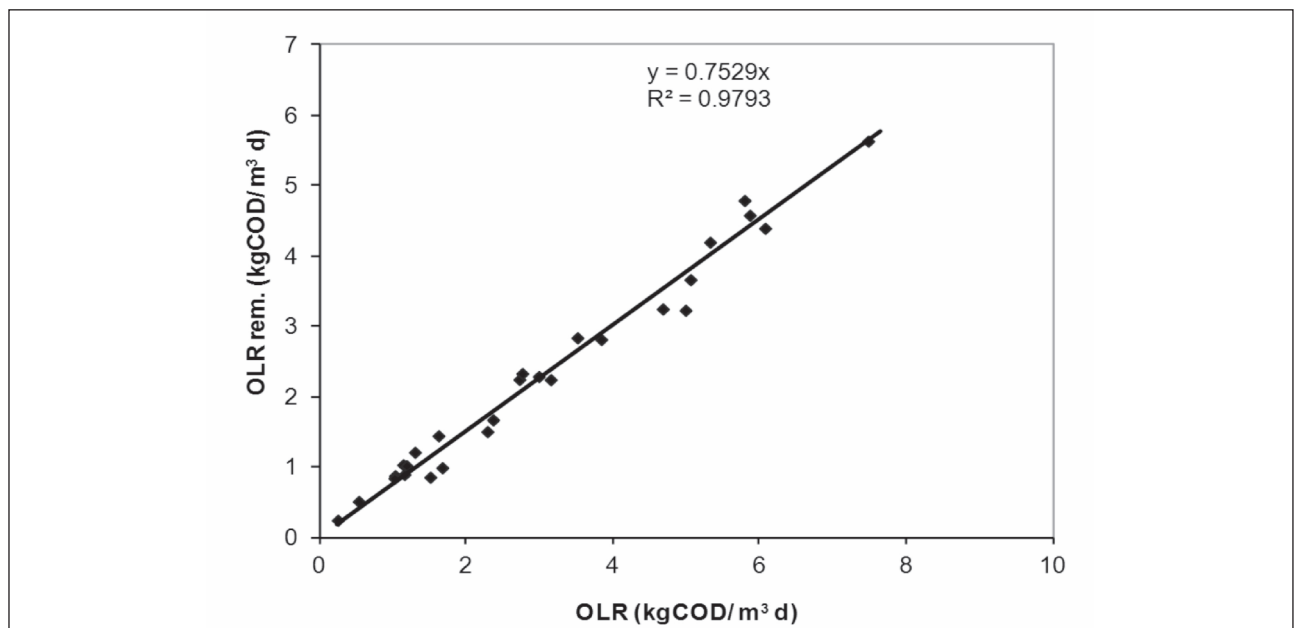


Figure 6. Relation between inlet OLR and removed OLR.

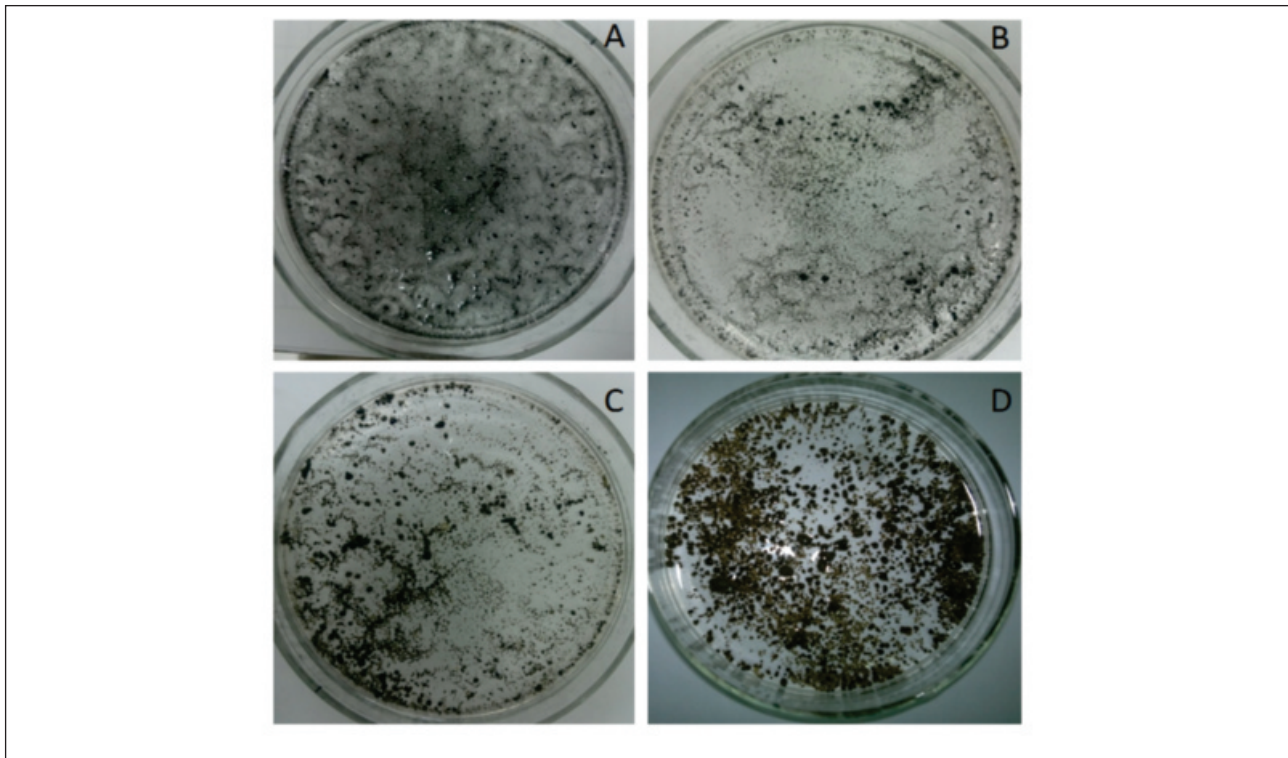


Figure 7. Photographs of the reactor sludge corresponding to the first month (A), second month (B), third month (C) and sixth month (D).

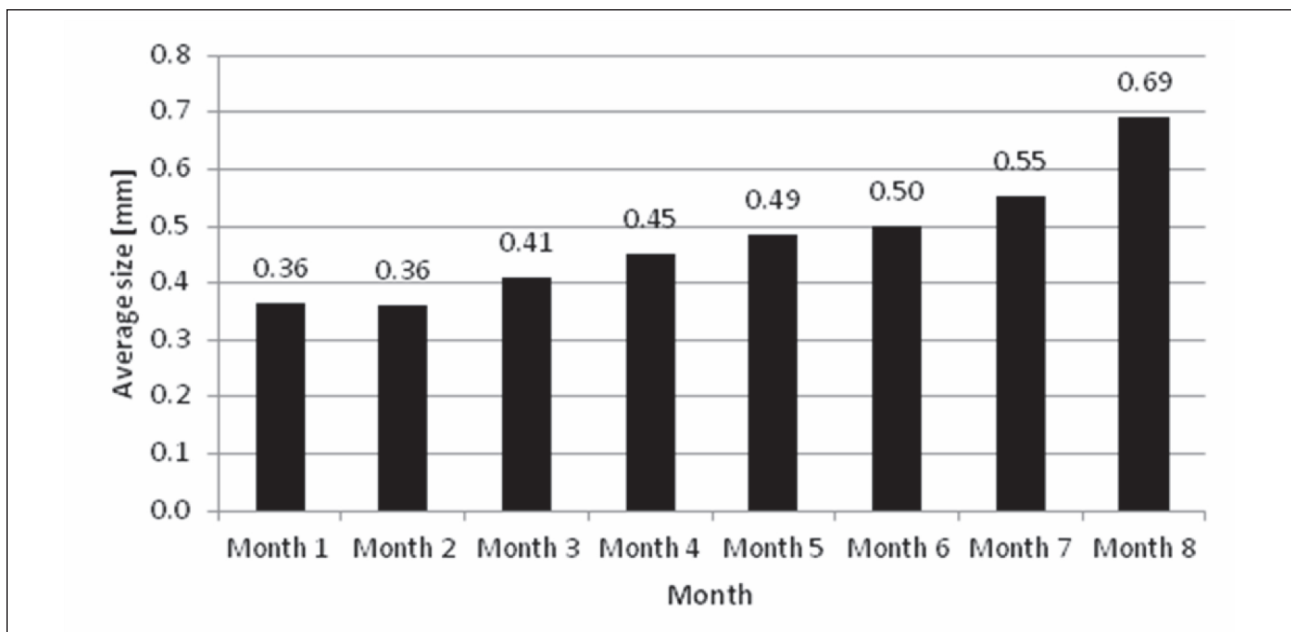


Figure 8. Average particle size evolution in time.

velocities above 0.2 m/h (Francese, 1993). Ghangrekar *et al.*, (2005), reported effective granulation at 80-90 days, using glucose and nutrients as a substrate, although

working at low upflow velocities, between 0.05 and 0.125 m/h, organic loads varying between 1.43 and 9.50 kg COD/m³d and temperatures between 24 and 32°C.

CONCLUSIONS

In the present work, after three months it was possible to confirm the existence of true granules of about 2 mm in diameter. The average size of the particles was 0.41 mm and its growth continued until the end of the test.

The solids in suspension inside the reactor, both from the dispersed sludge used for reactor start-up and from the feed influent, could have acted as growth nuclei for the development of the granules, according to the pressure selection theory.

Organic matter removal was lower than that obtained in other tests initiated with granular sludge. This is attributed precisely to the type of flocculent sludge with which the process was initiated. However, organics loads similar to the reached by granular sludge were achieved without critical problems.

The proposed start-up and operation of the reactor inoculated with flocculent sludge of course, took longer times and greater development of the granules was required to achieve higher organic loading rates.

It is emphasized that the initial concentration of suspended solids was not as high as some authors suggest for start-up.

The proposed starting and operating scheme was at least sufficient to reach the formation of defined anaerobic granules and to promote their growth. This result may be relevant in regions where the anaerobic treatment of the lemon processing effluents is carried out and where there are few possibilities of having industrial volumes of granular sludge.

BIBLIOGRAPHY CITED

- Alphenaar, P.A., Visser, A., Lettinga, Gatz, 1993.** The Effect Of Liquid Upward Velocity And Hydraulic Retention Time On Granulation in UASB Reactors Treating Wastewater With High Sulphate Content. *Bioresource Technology* 43, 249–258.
- Arcand, Y., Guiot, S.R., Desrochers, M., Chavarie, C., 1994.** Impact of the reactor hydrodynamics and organic loading on the size and activity of anaerobic granules. *The Chemical Engineering Journal* 56, B23–B35.
- Blonskaja, V., Menert, A., Vilu, R., 2003.** Use of two-stage anaerobic treatment for distillery waste. *Advances in Environmental Research* 7, 671–678.
- Chernicharo de Lemos, C.A., 2007.** *Biological Wastewater Treatment Series: Anaerobic Reactors*. IWA.
- Fang, H.H., Chui, H.K., 1993.** Maximum COD Loading Capacity In UASB Reactors At 37°C. *Journal of Environmental Engineering* 119, 103–119.
- Fernández-Polanco, F., Seghezzi, L., 2015.** Diseño De Reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB).
- Francesse, A., 1993.** Puesta En Marcha De Reactores Anaerobicos De Manto De Barros Y Flujo Ascendente. Universidad Nacional de San Luis.
- Ghangrekar, M.M., Asolekar, S.R., Joshi, S.G., 2005.** Characteristics of sludge developed under different loading conditions during UASB reactor start-up and granulation. *Water research* 39, 1123–33.
- Hulshoff Pol, L.W., De Castro Lopes, S.I., Lettinga, G., Lens, P.N.L., 2004.** Anaerobic sludge granulation. *Water research* 38, 1376–89.
- Kassam, Z.A., Yerushalmi, L., Guiot, Serge R, 2003.** A Market Study On The Anaerobic Wastewater Treatment Systems. *Water, Air, and Soil Pollution* 143, 179–192.
- Liu, Y., Tay, J., 2004.** State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. *Biototechnology Advances* 22, 533–563. doi:10.1016/j.biotechadv.2004.05.001
- Navarro, A.R., Lopez, Z., Salguero, J., Maldonado, M.C., 2013.** Anaerobic treatment of residual lemon pulp in digesters with semi-continuous feed. *Water Science & Technology* | 67, 514–520.
- Tiwari, M.K., Guha, S., Harendranath, C.S., Tripathi, S., 2006.** Influence of extrinsic factors on granulation in UASB reactor. *Applied microbiology and biotechnology* 71, 145–54.