

SIIO, Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa

Diseño y optimización de la cadena de suministros de biorrefinerías de caña de azúcar

Jonathan Wheeler, Lucas M. Machín Ferrero, Pablo M. Jeger, Isabel Salas Tonello,
Fernando D. Mele

Universidad Nacional de Tucumán, FACET, Av. Independencia 1800,
T4002BLR S. M: de Tucumán, Argentina
jwheeler.ing@gmail.com
lucasmachinferrero@gmail.com
pjeger@herrera.unt.edu.ar
isasalast@gmail.com
fmele@herrera.unt.edu.ar

Resumen. La industria sucroalcoholera enfrenta actualmente una serie de desafíos para garantizar la rentabilidad de la actividad. El descenso del consumo per cápita de azúcar y la limitación en los cupos de bioetanol para el corte de los combustibles fósiles, sumados a la incertidumbre en la producción en la etapa agrícola, plantean la necesidad de buscar alternativas eficientes para el uso de la materia prima. Incorporar nuevas opciones productivas que le aporten alto valor agregado a la caña de azúcar, puede resultar una de las formas de afrontar la incertidumbre en la etapa agrícola y lograr dar robustez ante posibles cambios en el mercado. En este trabajo se propone resolver este problema, a partir del diseño de la cadena de suministros de una biorrefinería de caña de azúcar utilizando herramientas de optimización. Se plantea la resolución de una formulación lineal mixta entera (MILP) que incluye únicamente los procesos más prometedores seleccionados previamente mediante una formulación lineal (LP), a partir de una superestructura que considera un conjunto de tecnologías que se adaptan al uso de materia prima y a la estructura de los procesos ya existentes.

1 Introducción

La producción de azúcar y etanol a partir de caña de azúcar se ve afectada principalmente por la variabilidad de la actividad agrícola, cuyos rindes dependen fuertemente de las condiciones climáticas y las características del laboreo. Esta variabilidad afecta tanto a la cantidad como a la calidad de la caña de azúcar a procesar, lo que repercute en los rendimientos de producción y afecta sensiblemente la planificación de las actividades a nivel operativo, táctico y estratégico. Adicionalmente, el mercado de los productos principales de la industria azucarera (azúcar y etanol) enfrenta dos situaciones de cuidado. Por un lado, la producción de azúcar se encuentra estancada desde 2010 dado un paulatino descenso del consumo en el mercado interno y la imposibilidad de colocar este producto internacionalmente [1]. Además, el vuelco de la industria de bebidas gaseosas a utilizar endulzantes artificiales podría disminuir el consumo interno

dado que utiliza cerca del 50% del azúcar total producido [2]. Por otro lado, la producción de bioetanol ha alcanzado el nivel para abastecer a la industria de combustibles y llegar al 12% en el corte (aproximadamente 1,1 millones de toneladas). Puesto que se esperan modificaciones en este porcentaje a mediano plazo (15% en 5 años y 20% en 10 años aproximadamente), pero a su vez una disminución en su precio por la baja de subsidios [3,4], la producción de bioetanol deberá adaptarse a esta necesidad sin perder rentabilidad. Para hacer frente a estas situaciones de mercado y evitar los efectos indeseables de la variabilidad en la etapa agrícola será necesario lograr una coordinación eficiente de los recursos disponibles en todas las etapas de la cadena de valor, optimizando su uso para beneficio del conjunto de los actores de la actividad.

Una tendencia actual en la industria de la caña de azúcar es la transformación de sus plantas tradicionales (azúcar y etanol) en biorrefinerías [5,6]. Esto implica incorporar un conjunto de tecnologías a los procesos existentes que, utilizando la caña de azúcar o alguno de los materiales intermedios de su industrialización, permitan la obtención de nuevos productos. Este nuevo esquema productivo puede permitir un mejor aprovechamiento de la materia prima y de los productos intermedios para mejorar la rentabilidad. Para diseñar una biorrefinería será necesario determinar las tecnologías que pueden adaptarse a la industria sucroalcoholera y seleccionar aquellas cuyos productos puedan ser vendidos en el mercado con mayor facilidad para obtener un mayor beneficio económico. Cada una de estas tecnologías tendrá un costo de capital asociado, por lo que habrá que determinar cuáles son las inversiones necesarias para el funcionamiento de la cadena de valor y la magnitud de los flujos de materiales de los procesos seleccionados. A partir del diseño óptimo de la cadena de suministros (CS) de la actividad mediante programación matemática, se puede coordinar eficientemente los recursos de la actividad y abordar los aspectos mencionados simultáneamente. En este trabajo se propone una estrategia para el diseño de la CS de la industria de la caña de azúcar incorporando nuevas alternativas tecnológicas que permitan ampliar la oferta de productos para el mercado interno.

Dado que las posibilidades tecnológicas para el aprovechamiento de sustratos azucarados (como lo es la caña de azúcar y los productos intermedios melaza y miel) son muchas y variadas, se propone en primer lugar realizar una preselección de aquellas tecnologías que resulten más prometedoras económicamente [7]. Para ello se implementa un modelo lineal (LP) que maximiza las ganancias netas de la producción considerando los precios de venta y los costos de producción. A partir de esta selección de tecnologías, se procede a diseñar un plan estratégico para la CS de la actividad para determinar el conjunto de inversiones necesarias, los flujos de materiales, y el diseño de la red de distribución de los productos terminados. Este paso se resuelve a través de un modelo lineal mixto entero (MILP) que maximiza el valor actual neto (VAN) del funcionamiento de la CS en un horizonte de tiempo determinado. De esta forma se busca simplificar el problema que implica resolver el diseño de la CS contemplando todas las posibilidades simultáneamente, lo que conllevaría la necesidad de tener disponibilidad de toda la información asociada al diseño y costos de inversión de cada una de las tecnologías a considerar, lo cuál puede implicar costos y tiempos prohibitivos. A diferencia de lo realizado en [7], aquí se amplía el estudio de la CS, con un caso de estudio real, y se verifica la bondad computacional de la estrategia propuesta.

2 Planteo del problema y metodología propuesta

Se desea diseñar la CS de la industria de la caña de azúcar, que actualmente obtiene dos productos (azúcar y alcohol), considerando un conjunto de posibilidades tecnológicas para producir nuevos productos. Si se conocen P procesos que se pueden instalar junto con las plantas actuales que utilizan la misma materia prima o alguno de los productos intermedios (melaza, miel, bagazo) para producir I nuevos productos, se desea determinar el diseño de una CS que considere la posibilidad de implementarlos. El diseño de la CS incluye la determinación de cuáles tecnologías deben instalarse para mejorar el beneficio de la cadena de producción, establecer cuáles serán los flujos de materiales (materias primas, productos intermedios, productos terminados y desechos) y el conjunto de inversiones necesarias para lograr este funcionamiento.

Con este fin, se propone un método que involucra dos etapas de optimización. En la primera, se busca determinar cuáles de las tecnologías que se pueden adaptar a la actividad pueden brindarle mayor beneficio económico a la cadena a partir de un mejor aprovechamiento de la materia prima existente. Para esto, se utiliza un modelo LP que tiene como objetivo maximizar los beneficios económicos de diferentes vías para el aprovechamiento de la caña de azúcar. Esto implica establecer los flujos de materiales a través de cada uno de los P procesos. Luego, se diseña la CS de la actividad incorporando la posibilidad de instalar plantas de los Q procesos ($Q \subset P$) que resultaron más prometedoros. Para ello se utiliza un modelo MILP que tiene como objetivo maximizar las ganancias de una CS de tres escalones: producción–almacenamiento–distribución a los mercados. En ambas etapas se consideró la existencia de dos escenarios posibles para la producción agrícola [8]. De esta forma, se obtiene el diseño de una CS con Q procesos (biorrefinería) como estrategia para enfrentar la incertidumbre de la etapa agrícola y los desafíos del mercado. Además, desde el punto de vista computacional, la estrategia utilizada permitiría simplificar el modelo MILP de la segunda etapa al considerar sólo un subconjunto de los procesos originales, reduciendo los tiempos de cómputo (comparado con la resolución del problema de P procesos).

3 Caso de estudio

A continuación, se estudia el diseño de la CS de la industria nacional de caña de azúcar, considerando la posibilidad de constituir biorrefinerías en la provincia de Tucumán que es la mayor productora de azúcar y bioetanol de caña del país (64% de azúcar y 25% del bioetanol, aproximadamente).

3.1 La actividad sucroalcoholera

La provincia de Tucumán es una de las principales productoras de caña de azúcar del país con 15 ingenios azucareros, 12 destilerías y 5 plantas deshidratadoras de etanol (acopladas a las plantas azucareras). En cada una de las plantas de procesamiento de la caña se utilizan las mismas tecnologías y esquemas de producción. En el proceso, la caña de azúcar se muele para obtener jugo (agua y sacarosa principalmente), el cual se

utiliza para producir azúcar blanco o crudo (P1), o se fermenta para producir etanol (P2). En la P1 se genera un subproducto azucarado (melaza) que se utiliza también para producir etanol (P3). Tanto en la P1 como en la P2 se genera bagazo, un material lignocelulósico que se utiliza para la producción del vapor necesario para los procesos (P4). En la Fig. 1 se ilustra la relación mencionada entre productos y tecnologías.

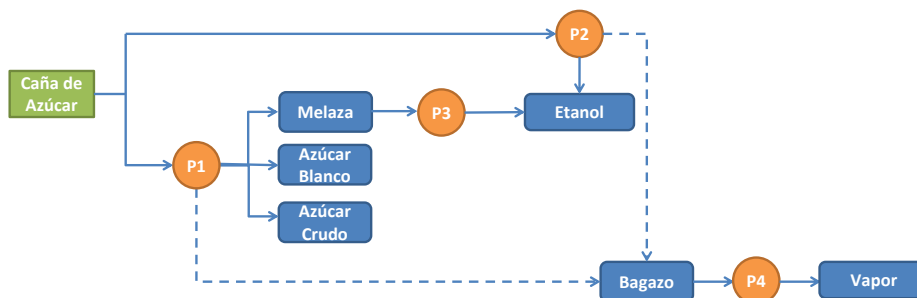


Fig. 1. Diagrama de flujo de los materiales en la industria de la caña de azúcar. En línea de trazo se muestra el bagazo.

La rentabilidad de la actividad se ve fuertemente afectada por la variación en los rendimientos de la etapa agrícola. Si la cantidad de caña es elevada, aumenta el *stock* de azúcar (el cupo de etanol es fijo) y el precio de este insumo disminuye afectando las ganancias del conjunto (campo-industria). Además, no es posible en la actualidad exportar los saldos en su totalidad. La actividad espera para el futuro un aumento en los cupos para producir etanol [4], pero con una disminución de su valor. Además, el sector enfrenta una posible disminución de la demanda de azúcar. Esto requerirá un esfuerzo adicional para coordinar los recursos eficientemente con el fin de cumplir con las demandas del mercado y mantener la rentabilidad del sector.

3.2 Procesos alternativos

Los procesos seleccionados para acoplar a la actividad de la caña de azúcar responden tanto al alto valor de mercado como a la factibilidad de incorporación a los procesos existentes [5, 6, 9]. Estos procesos son los de producción de biobutanol [10], PHB [11], ácido cítrico [12] y de cogeneración de electricidad por combustión de bagazo [13].

Polihidroxibutirato (PHB) . Es un termoplástico biodegradable y biocompatible, por lo que resulta tanto de interés económico como ambiental. La descripción del proceso de obtención puede verse en [14], mientras que el detalle de la extracción y purificación en [10].

Biobutanol. Es un bioproducto de interés para la industria química y como combustible. Se obtiene mediante la fermentación de sustratos azucarados y una posterior destilación de la mezcla resultante (butanol, acetona, etanol, agua) [15].

Ácido cítrico. Es un insumo de múltiples aplicaciones, principalmente en la industria alimenticia. Se puede obtener a partir de la fermentación de melazas o sustratos azucarados [11].

Cogeneración. Esta tecnología permite la producción simultánea de vapor y electricidad a partir de la quema del bagazo al ser acoplada a una instalación que procesa caña de azúcar. Existe una gran variedad de posibilidades tecnológicas para este fin [5,12].

3.3 Selección de vías de procesos

En esta etapa se busca determinar cuáles de las P tecnologías propuestas para la diversificación de la producción a partir de caña de azúcar resultan más prometedoras para la cadena de valor. En la Fig. 2 se puede ver un diagrama de flujo de las posibles vías para el procesamiento de la caña de azúcar a partir de las distintas tecnologías: T1 y T2 para la producción de azúcar; T3, T4 y T5 para la producción de etanol a partir de melaza, miel y jugo, respectivamente; T6, T9 y T12 para la producción de butanol a partir de jugo, melaza y miel, respectivamente; T7, T10 y T13 para ácido cítrico a partir de jugo, melaza y miel respectivamente; T8, T11 y T14 para la producción de PHB a partir de jugo, melaza y miel, respectivamente; y T15 para producir electricidad a partir de bagazo. Los procesos de producción de etanol y butanol generan como residuos vinazas cuyas características varían según la materia prima utilizada.

Se utiliza un modelo LP que busca determinar los flujos de materiales que ingresan o se producen en una tecnología para maximizar los ingresos netos de la actividad. Para la selección se utiliza el precio de los productos, los rendimientos de producción, los costos de producción —basados principalmente en los costos energéticos y de mano de obra—, y los costos que generan los residuos (vinazas). Se considera en el estudio la capacidad de materia prima disponible en la provincia de Tucumán en dos escenarios distintos, se supone el uso de al menos un 50% de la capacidad instalada para cubrir la demanda de los productos que actualmente se producen (azúcar y etanol) y se le exige cumplir con la demanda de etanol y azúcar en un 95 y 80 por ciento, respectivamente.

Algoritmo. El problema se modela con una formulación LP, implementada en GAMS® v.24.0.2, que incluye las siguientes ecuaciones:

Objetivo. La función objetivo (ingresos netos) es igual a las ventas de productos (REV) menos los costos de producción (TPC) y los de tratamiento de residuos (DPC).

$$FO = REV - TPC - DPC \quad (1)$$

Las ventas dependen del precio de los productos (PR_i) y de las cantidades producidas (TP_i). SEP_i representa el conjunto de materiales que se pueden vender.

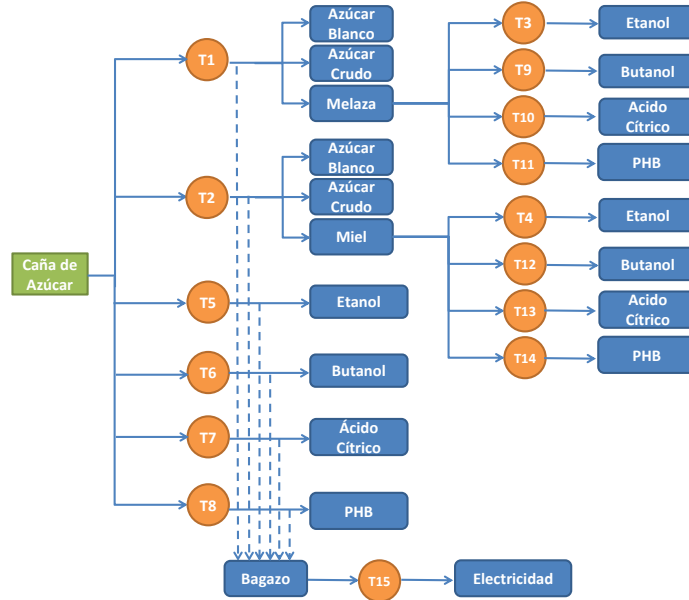


Fig. 2. Diagrama de procesos propuesto para la diversificación de la matriz productiva de la industria de la caña de azúcar

$$REV = \sum_i TP_i \cdot PR_i \quad i \in SEP_i \quad (2)$$

Los costos de producción están relacionados con el flujo del producto principal i de cada proceso p (F_{ip} , $i \in IM_{ip}$) y a su costo unitario (CV_p).

$$TPC = \sum_p CV_p \cdot \sum_{i \in IM(i,p)} F_{ip} \quad (3)$$

Los flujos de vinaza (residuos) generan costos de tratamiento y disposición final (DPC).

$$DPC = DC \cdot \sum_p F_{i,p} \quad i = vinazaI, vinazaII, vinazaIII \quad (4)$$

Restricciones. La cantidad de materia prima que se produce en la etapa agrícola, las demandas de los productos y los balances de materia prima constituyen las restricciones a este problema. La cantidad total producida de un producto viene dada por la Ec. 5 (TP_i , $i \in SEP_i$). Este valor tiene que ser inferior a la demanda de dicho producto (DMM_i) en el mercado (Ec. 6).

$$TP_i = - \sum_p F_{ip} \quad i \in SEP_i \quad (5)$$

$$TP_i \leq DMM_i \quad i \in SEP_i \quad (6)$$

El flujo de un producto está asociado al flujo del producto principal de cada tecnología p y al coeficiente del balance de materia (ρ_{pi}) como muestra la Ec. 7. Estos coeficientes son positivos para los flujos de entrada y negativos para los de salida.

$$F_{ip} = \rho_{pi} \cdot F_{i \in M_{ip}, p} \quad (7)$$

La cantidad de caña utilizada en los distintos procesos debe ser menor a la capacidad de producción de la etapa agrícola ($CROP$) como se ve en la Ec. 8.

$$\sum_p F_{caña, p} \leq CROP \quad (8)$$

Resultados. En la resolución del problema se consideraron dos escenarios posibles según las condiciones del clima y la zafra [7]: un caso de máxima y uno de mínima. En la Tabla 1 se describen estos escenarios.

Tabla 1. Escenarios a considerar para la producción de caña de azúcar [7]

| Escenario, descripción | Cantidad de caña (t) | Rendimiento (t azúcar/t caña) |
|---|----------------------|-------------------------------|
| 1 Buena maduración, ausencia de heladas o heladas leves, buenas condiciones para el desarrollo de la zafra. | 14.900.000 | 10.70% |
| 2 Malas condiciones para la maduración, heladas severas y abundancia de lluvias durante la zafra. | 14.080.500 | 9.50% |

Para resolver el problema se utilizó CPLEX 11.0, en un procesador Intel® Core 2 Duo, 4GB de RAM. Las vías de producción seleccionadas para ambos escenarios se muestran en las Fig. 3 y 4.

Se puede observar que ante un escenario favorable (escenario 1), se utilizan las tecnologías T2 y T3 para la producción de azúcar, T3 y T5 para la de etanol, T8 y T14 para el PHB, y T13 para el ácido cítrico. Las demandas de estos productos se cubren completamente excepto para el ácido cítrico, que sería el producto menos rentable. Esto mismo se puede observar ante un escenario con menos materia prima (escenario 2), en el que no se produce ácido cítrico. Además, en este último escenario, el PHB sólo se produce mediante la tecnología T14 y su demanda es la que menos se satisface. En ambos escenarios se decide incluir la tecnología para la producción de electricidad mediante cogeneración (T15). Para lograr un diseño robusto (más conservador) de la CS, se decide elegir aquellas tecnologías que resultan del escenario 2. Por lo tanto se procederá al diseño de la CS de biorrefinerías considerando las tecnologías T1 a T3, T5, T12, T14 y T15.

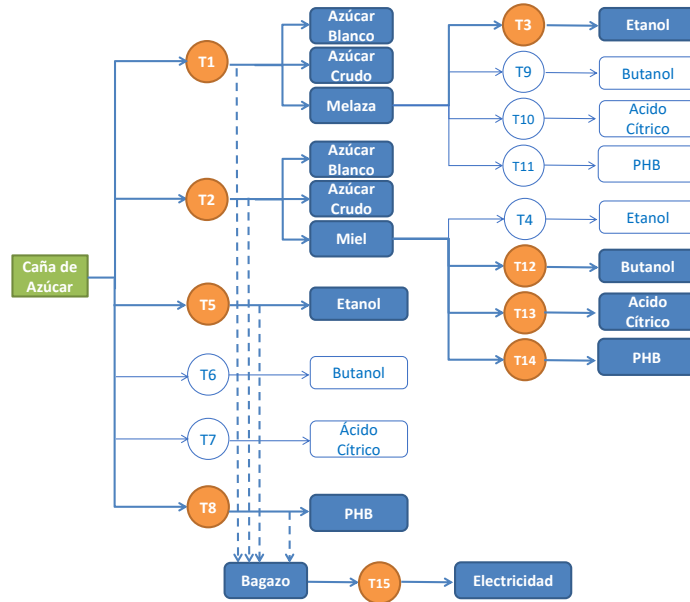


Fig. 3. Vías de proceso seleccionadas (sombreadas) para el escenario 1

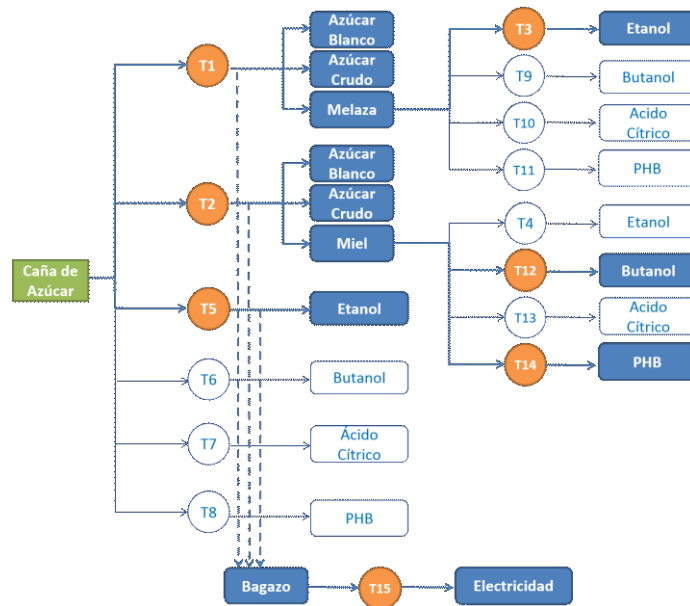


Fig. 4. Vías de proceso seleccionadas (sombreadas) para el escenario 2

3.4 Diseño de la cadena de suministros

A partir de las tecnologías seleccionadas en la sección anterior, se procede al diseño de la CS para la Argentina, considerando la posibilidad de instalar biorrefinerías sólo en la provincia de Tucumán. El diseño se realiza tomando en cuenta tres etapas: industria-almacén-distribución a diferencia de [7], donde sólo se ve un caso sencillo de CS. Se considera cada etapa de la cadena tomando en cuenta la actividad de todos los actores participantes de forma conjunta, es decir que la capacidad de cada sector viene dada por la suma de las capacidades de todos los actores que intervienen en esa etapa. De esta forma, se adopta un enfoque centralizado que puede resultar de utilidad para la toma de decisiones a nivel gubernamental y puede permitir desarrollar estrategias para el fomento de las decisiones resultantes.

El modelo aquí planteado busca determinar el conjunto de tecnologías a instalar en la provincia de Tucumán para convertir los actuales ingenios en biorrefinerías y desarrollar un plan estratégico que, por un lado, mejore la rentabilidad del sector a partir de nuevos productos, y por otro permita afrontar los desafíos del mercado de biocombustibles y del azúcar. Particularmente, se busca conocer el conjunto de inversiones a realizar para crear nuevas instalaciones productivas, de almacenamiento y de transporte, los flujos de materiales a través de las plantas productivas y el destino de los flujos de productos terminados para cubrir la demanda de las distintas regiones de la Argentina. Este plan se encuentra enmarcado en las políticas productivas del sector de combustibles que buscará llevar el corte de las naftas al 15% en 4 años y al 20% en 10 años [4], desarrollo que se encuentra limitado por las capacidades de producción de materia prima y las demandas del mercado. El horizonte de tiempo considerado es de diez años, estableciendo que la demanda de azúcar decaerá un diez por ciento de manera lineal basado en las expectativas del mercado de la industria de las bebidas gaseosas. Se consideran, también, las instalaciones productivas existentes en las otras regiones con capacidad de cultivo (Salta, Jujuy, Santa Fe y Misiones) y la posibilidad de instalar nuevas plantas, pero sólo de las tecnologías existentes (T1, T2, T3 y T5), en ellas.

Formalmente, el diseño de la CS para establecer biorrefinerías en la provincia de Tucumán se puede definir como: dados los costos de producción, almacenamiento y transporte, de las instalaciones de almacenamiento, productivas y de transporte, de materia prima, los precios de los productos, los costos de tratamiento de los residuos (vinazas), la tasa de interés e impuestos y el horizonte de tiempo, se busca determinar el número de plantas, transportes y almacenes, los flujos de materiales a través de las distintas tecnologías y la distribución de los productos terminados que permita maximizar los beneficios económicos de la actividad (VAN). El modelo matemático se presenta sucintamente con las principales ecuaciones en el Apéndice.

Resultados. La formulación MILP para resolver la CS, se codifica también en GAMS® v.24.0.2 y se resuelve con CPLEX 11.0, en la misma computadora que el modelo LP, para los 2 escenarios con un *gap* de 0,1%. El modelo posee 150.700 ecuaciones, 154.147 variables totales y 20.670 variables discretas.

El conjunto de inversiones a realizarse en los 10 años del horizonte de tiempo considerado puede verse en la Fig. 5 para el escenario 2. Con esta capacidad agrícola, el plan resultante es el más conservador desde el punto de vista de la inversión, y éstas se

realizan en los tres primeros años. El diseño de la CS decide utilizar las mismas tecnologías que las seleccionadas por el modelo LP, dando lugar a la producción de PHB y butanol en lugar del azúcar. El criterio de selección utilizado en el LP se mantiene, a pesar de haber considerado de los costos de instalación, almacenamiento y distribución de los productos.

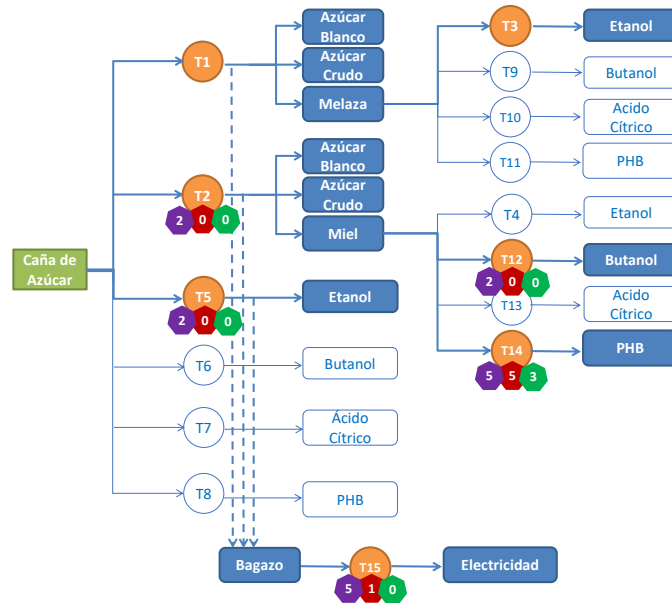


Fig. 5. Vías de procesos y número de plantas a instalar para el escenario 2. En violeta se muestran las del año 1, en rojo las del año 2 y en verde las del año 3

En la Fig. 6, se puede observar la utilización de las tecnologías seleccionadas en la producción de etanol, que es el producto necesario para el corte de combustibles. Para aumentar la producción de etanol se produce el cambio tecnológico de utilizar directamente el jugo de caña (T5) en lugar de melaza (T3).

Con fines comparativos, se resuelve el modelo MILP considerando todas las posibilidades tecnológicas (sin la selección previa con el modelo LP), para los dos escenarios. Para el escenario 1, el tiempo de cómputo fue un 18% superior al de la estrategia de dos pasos, y la función objetivo, un 6% superior. En cambio, al resolver el escenario 2, limitado por la escasez de materia prima, el tiempo de cómputo fue un 80% superior y los beneficios un 7% superior. En cuanto al diseño de la CS, para el escenario 2, se utiliza la tecnología T6 para la producción de butanol en lugar de la T12, y la producción de PHB se realiza a partir de jugo (T8), de melaza (T11) y de miel (T14). En la Fig. 7 se puede observar la producción de azúcar y etanol utilizando el modelo MILP con todas las tecnologías (completo), y el modelo MILP con las tecnologías preseleccionadas (simplificado). Para ambos productos, el modelo simplificado alcanza un mejor cumplimiento de las demandas, mientras que el modelo completo, mejora los beneficios a partir de una mayor producción de PHB y butanol.

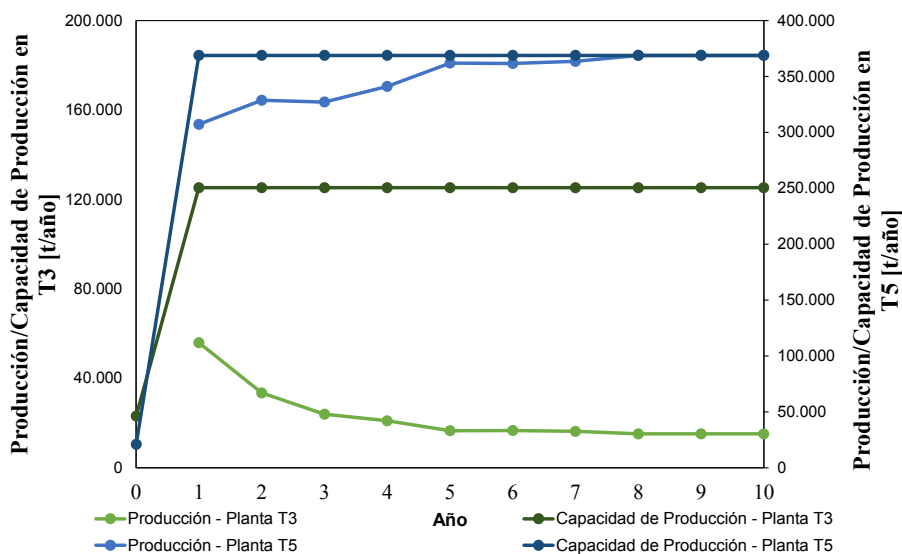


Fig. 6. Capacidad de producción tecnológica y producción de etanol en los diez años

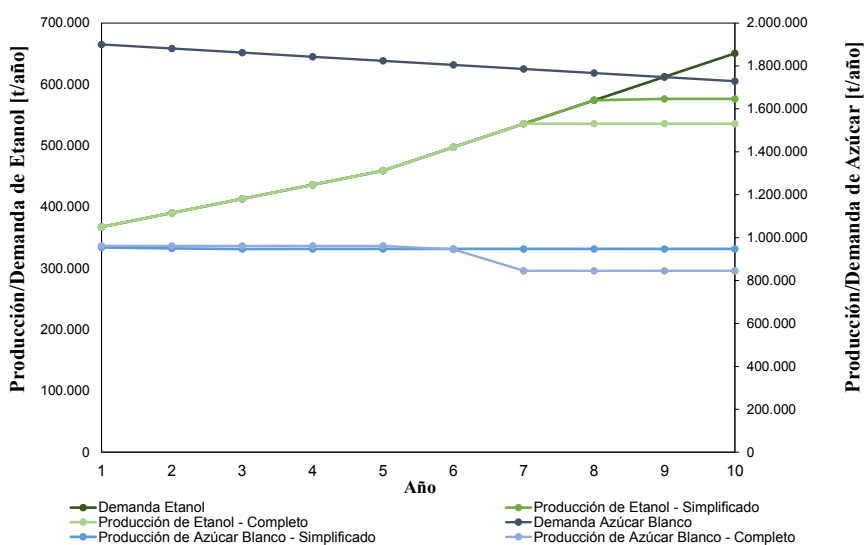


Fig. 7. Producción de azúcar y etanol para el modelo MILP que considera todas las tecnologías y el que considera sólo las seleccionadas con el modelo LP

4 Conclusiones

En el presente trabajo se ha estudiado la posibilidad de instalar biorrefinerías de caña de azúcar en la provincia de Tucumán a partir del diseño de la CS que incluye la producción, almacenamiento y distribución de los productos tradicionales (azúcar y etanol) y nuevos productos de interés comercial (PHB, butanol, ácido cítrico y bioelectricidad). El diseño busca hacer frente a posibles movimientos del mercado y a la variabilidad de los rendimientos agrícolas. Se ha utilizado una estrategia de dos pasos de optimización que permite simplificar el modelado de la CS mediante una selección previa de las tecnologías más prometedoras, lo cual reduce notablemente la búsqueda de información y el uso de los recursos informáticos (tiempos de cómputo y tamaño de las soluciones). Se ha demostrado que, utilizando un criterio de selección basado en los beneficios netos de la producción de un producto, se pueden obtener diseños de la CS similares a los que se obtienen de resolver un problema de CS considerando todas las posibilidades tecnológicas simultáneamente.

Apéndice: Modelo MILP (ecuaciones seleccionadas)

Conjuntos y subconjuntos

| | |
|---------|--|
| i | materiales |
| p | tecnologías para la producción |
| g | regiones |
| t | años |
| l | tipos de transporte |
| s | tipos de almacenes |
| $IM(p)$ | productos principales de cada tecnología p |
| SEP | materiales que se pueden vender |
| $IL(l)$ | materiales que pueden ser transportados por el medio de transporte l |
| $IS(s)$ | materiales que pueden ser guardados en un almacén tipo s |
| $SI(i)$ | almacenes que pueden guardar los materiales i |

Variables

| | |
|--------------|---|
| ST_{isgt} | inventario total del material i en la región g almacenado por s en el año t |
| PT_{igt} | producción total del material i en la región g en el año t |
| PU_{igt} | compras del material i en la región g en el año t |
| $Q_{ilgg't}$ | flujo del material i transportado por l de la región g a g' en el año t |
| DTS_{igt} | cantidad de material i enviada a la región g en el año t |
| W_{igt} | cantidad de desechos líquidos i generados en la región g en el año t |
| PE_{ipgt} | producción del material i en la tecnología p , en la región g y en el año t |

| | |
|---------------|---|
| $PCap_{pgt}$ | capacidad de producción de la tecnología p en la región g en el año t |
| $PCapE_{pgt}$ | expansión de la capacidad de la tecnología p en la región g en el año t |
| NP_{pgt} | número de plantas con la tecnología p instaladas en la región g en el año t |
| NPV | valor actual neto de la SC |
| CF_t | flujo de caja en el año t |
| $FTDC_t$ | fracción del capital total depreciable en el año t |
| NE_t | ganancias netas en el año t |

Parámetros

| | |
|----------------------|--|
| ρ_{pi} | coeficiente de balance del material i en la tecnología p |
| $CapCrop_{gt}$ | capacidad total de plantación de caña de azúcar en la región g en el año t |
| $SCap_{sgt}$ | capacidad de almacenamiento de s en la región g en el año t |
| SD_{igt} | demanda del producto i en la región g en el año t |
| τ | mínimo porcentaje disponible de la capacidad instalada |
| \overline{PCap}_p | máxima capacidad de la tecnología p |
| \underline{PCap}_p | mínima capacidad de la tecnología p |
| ir | tasa de corte |

Restricciones de balance de materiales.

$$\begin{aligned} \sum_{s \in IS(i,s)} ST_{isgt-1} + PT_{igt} + PU_{igt} + \sum_{l \in IL(i,l)} \sum_{g' \neq g} Q_{ilg'gt} \\ = \sum_{s \in IS(i,s)} ST_{isgt} + DTS_{igt} + \sum_{l \in IL(i,l)} \sum_{g \neq g'} Q_{ilg g't} + W_{igt} \quad \forall i, g, t \end{aligned} \quad (9)$$

$$PT_{igt} = \sum_p PE_{ipgt} \quad \forall i, g, t \quad (10)$$

$$PE_{ipgt} = \rho_{pi} PE_{i'pgt} \quad \forall i, p, g, t \quad \forall i' \in IM(i, p) \quad (11)$$

$$PU_{igt} \leq CapCrop_{gt} \quad i = \text{caña}, \quad \forall g, t \quad (12)$$

$$\sum_{i \in IS(i,s)} ST_{isgt} \leq SCap_{sgt} \quad \forall s, g, t \quad (13)$$

$$DTS_{igt} \leq SD_{igt} \quad \forall i, g, t \quad (14)$$

Restricciones de capacidad

$$\tau PCap_{pgt} \leq PE_{ipgt} \leq PCap_{pgt} \quad \forall i, p, g, t \quad (15)$$

$$PCap_{pgt} = PCap_{pgt-1} + PCapE_{pgt} \quad \forall p, g, t \quad (16)$$

$$\overline{PCap}_p NP_{pgt} \leq PCapE_{pgt} \leq \overline{PCap}_p NP_{pgt} \quad \forall p, g, t \quad (17)$$

Función objetivo

$$NPV = \sum_t \frac{CF_t}{(1 + ir)^{t-1}} \quad (18)$$

$$CF_t = NE_t - FTDC_t \quad t = 1, \dots, T-1 \quad (19)$$

Referencias

1. Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas. Informes de cadenas de valor. Azúcar. 1 (3). 2016
2. Ministerio de Agroindustria. Cadena Azúcar. Informe de Coyuntura Mensual. 2017
3. Secretaría de Energía de la Nación. República Argentina. Resolución N° 1673/2010 (2010)
4. USDA. Biofuels annuals: Argentina. 2017
5. Moncada J., El-Halwagi M. M., Cardona A. C. Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. *Bioresource Technology* 135 (2013) 533–543.
6. Grillo Renó M. L., Almazán del Olmo O., Escobar Palacio J. C., Silva Lora E. E., Venturini O. J.. Sugarcane biorefineries: Case studies applied to the Brazilian sugar–alcohol industry. *Energy Conversion and Management* 86 (2014) 981–991.
7. Wheeler J., Salas Tonello I., Mele F. D. Selección de vías de proceso y diseño de cadenas de suministros utilizando estrategias de optimización. *Proceedings. 2016, 5° Simposio Argentino de Informática Industrial*
8. EEAOC. Reporte Agroindustrial. 138 (2017)
9. Junqueira T. L., Cavalett O., Bonomi A. The Virtual Sugarcane Biorefinery—A Simulation Tool to Support Public Policies Formulation in Bioenergy *Industrial Biotechnology* 12(1) (2016) 62 – 67.
10. Roffler S., Blanch H. W., Wilke C. R. Extractive Fermentation of Acetone and Butanol: Process Design and economic evaluation. *Biotechnology Progress*. 3 (3) (1987) 131-140.
11. Shahhosseini S. Simulation and optimisation of PHB production in fed-batch culture of *Ralstonia eutropha*. *Process Biochemistry* 39 (2004) 963–969.
12. Ikram-ul H., Sikander A., Qadeer M.A., Iqbal J. Citric acid production by selected mutants of *Aspergillus niger* from cane molasses. *Bioresource Technology* 93 (2004) 125–130
13. Macedo Guerra J. P., Coleta Jr. J. R., Carvalho Martins Arruda L., Silva G. A., Kulay L. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. *International Journal of Life Cycle Assess* (2014) 19:814–825
14. Vaz Rossell C. E., Mantelatto P. E., Agnelli J. A. M., Nascimento J. Sugar-based Biorefinery: Technology for Integrated Production of Poly(3-hydroxybutyrate), Sugar, and Ethanol. *Biorefineries – Industrial Processes and Products. Status Quo and Future Directions*. 1 (2006) 209-226.
15. Pinto Mariano A., Dias M.O.S., Junqueira T. L., Cunha M. P., Bonomi A., Filho R. M. Butanol production in a first-generation Brazilian sugarcane biorefinery: Technical aspects and economics of greenfield projects.