

Optimización de la cadena de suministros de bioetanol en la República Argentina

Ploper A.^{1,2}, Mele F. D.^{2,3}

¹ ITANOA-CONICET (Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentina, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Av. William Cross 3150 (T4101XAC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.

² Depto. de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial, FACET, UNT (Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán) Av. Independencia 1800 (T4002BLR), San Miguel de Tucumán, Tucumán, R. Argentina.

³ CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, San Miguel de Tucumán, Tucumán, R. Argentina.

aploper@herrera.unt.edu.ar - fmele@herrera.unt.edu.ar

Resumen. La industria de los biocombustibles enfrenta hoy en día una serie de desafíos para afianzar la sustentabilidad energética, lo que hace necesario el planteo de alternativas más eficientes. En este trabajo se propone el diseño y modelado de la cadena de suministros (CS) del bioetanol en la Argentina para un hipotético aumento del corte obligatorio en naftas del 12% al 18% utilizando herramientas de optimización de procesos. Se plantean un modelo lineal mixto entero (MILP) que incluye las tecnologías utilizadas actualmente para la producción de alcohol anhidro para dos escenarios diferentes. Se obtienen valores óptimos del valor actual neto (VAN) que combina la producción de los dos sectores alcoholeros, el maicero y el cañero. Los modelos además calculan las inversiones, flujos de insumos y de productos, número de plantas, número de almacenes, ventas y cantidades a producir de cada producto, entre algunas de las variables más relevantes.

Palabras clave: Etanol, supply chain, programación lineal mixta entera.

1 Introducción

El creciente desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles tiene su fundamento en dos inquietudes para la sociedad actual: El aumento de la temperatura terrestre y el inminente agotamiento de los recursos fósiles [1], los cuales abastecen casi el 80% del suministro de energía mundial [2].

La producción mundial de bioetanol en 2020 fue de 26 059 millones de galones [3]. Estados Unidos es el mayor productor de bioetanol de mundo (Fig. 1), utilizando

como materia prima maíz, mientras que el segundo país en la lista es Brasil, que utiliza caña de azúcar como insumo preponderante, aunque la producción de etanol de maíz está avanzando mucho en el vecino país [4].

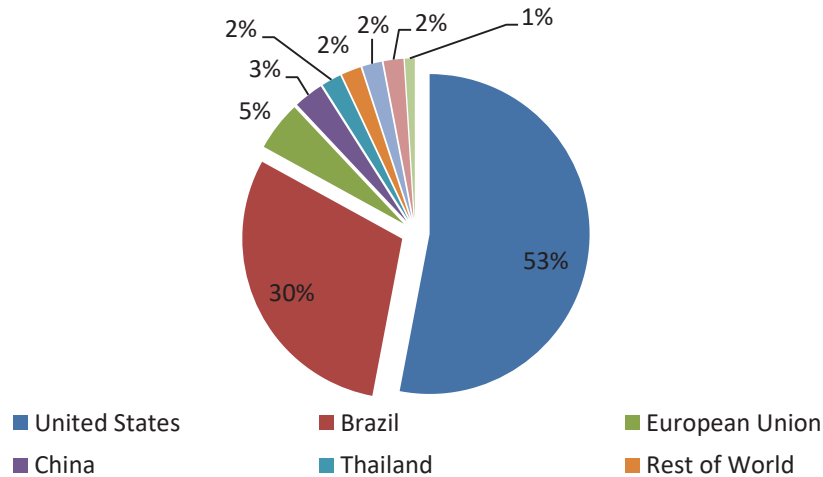


Fig. 1. Producción anual de bioetanol por países.

La Argentina tiene un territorio beneficiado por sus condiciones naturales climáticas y edáficas, las que permiten una intensa actividad agrícola y el surgimiento de empresas agroindustriales en gran parte de su extensión. Dispone de grandes extensiones de tierra aptas para el cultivo de maíz y la plantación de caña de azúcar [5], por lo tanto, la producción de alcohol para combustibles está dividida por ley en partes iguales para ambos cultivos. Históricamente, el alcohol fue un subproducto de la industria del azúcar del norte del país y no fue hasta la sanción de la ley 26.093 de biocombustibles que el sector maicero comenzó a instalar plantas productoras de etanol, en la segunda década de este siglo.

2 Objetivos

Actualmente, cada sector — cañero y maicero— trabaja independientemente del otro, tanto en la producción como en toda la cadena de suministros (CS). Esta condición de aislamiento plantea el desafío de integrar la cadena de producción, distribución y almacenamiento de alcohol buscando optimizar el consumo de recursos y los costos, alcanzando un mejor desempeño económico y un aumento en la productividad general de la actividad alcoholera. Las decisiones orientadas al diseño, planificación, producción y entrega de productos y subproductos a los clientes finales son el foco de la gestión de la CS (*supply chain management*, SCM). La Ingeniería de Sistemas de Procesos ha desarrollado en los últimos años herramientas matemáticas para ayudar en la toma de decisiones en esta área. Un ejemplo de estos modelos es el trabajo de Mele et al [6], el cual propone el uso de programación matemática para optimizar las decisiones estratégicas y tácticas en la industria de la caña de azúcar argentina.

Así, el objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para determinar la evolución de la CS ante un aumento de la demanda de etanol del 50% considerando el contexto vigente de dos materias primas. Esto implica determinar la ubicación de las nuevas plantas, los flujos de materiales, el diseño de la red de distribución de los productos terminados y almacenamiento. El modelo es del tipo lineal mixto entero (MILP) y busca maximizar el valor actual neto (VAN) de la CS en un horizonte de tiempo prefijado.

3 Materiales y métodos

Se modela una CS de tres etapas: producción, almacenamiento y mercado. Esta red cuenta con productores de caña de azúcar y maíz, plantas de producción a partir de ambos cultivos, almacenes de producto terminado y mercados finales. Se supone un aumento en la demanda de alcohol debido a un incremento en el corte de las naftas del 12% al 18%. El horizonte de planificación se divide en 10 períodos (años) y el área geográfica se divide en un conjunto de regiones (provincias) donde se pueden establecer los nodos de la CS. Se considera que cada región tiene una capacidad de cultivo de maíz y de caña de azúcar en cada intervalo de tiempo. El problema de diseño de la CS se puede expresarse de la siguiente forma.

Dado un horizonte de 10 años, precios de venta de los productos, parámetros de costos para la producción, almacenamiento y transporte de materiales, tasa impositiva, datos de capacidad para plantas y almacenes, inversión de capital fijo, tasa de interés, período de retención de almacenamiento, impuesto de disposición de residuos y límite superior en la inversión de capital, el objetivo del modelo es determinar la configuración de la CS de bioetanol y las decisiones de planificación asociadas que maximicen el VAN del sector. Las decisiones que el modelo debe tomar incluyen el número, la ubicación y la capacidad de las plantas de producción y los almacenes que se instalarán en cada región, las tasas de producción y los flujos de materias primas, residuos y productos finales.

Se modelan dos escenarios diferentes, un caso base donde se ignoren las plantas que actualmente operan en la Argentina y otro caso donde se fuerce al modelo a instalar las plantas ya existentes en el país para producir azúcar y alcohol. En ambos modelos, la demanda de azúcar blanco y etanol tendrán un aumento anual del 5%.

Existen cuatro tecnologías para las plantas productoras, tres para el procesamiento de caña de azúcar y una para maíz. En la primera tecnología (T1), se obtiene azúcar blanco como producto principal a partir de caña de azúcar y como subproductos azúcar crudo y melaza. En la segunda tecnología (T2), se produce bioetanol a partir de melaza fermentada y se obtiene como residuo vinaza, un residuo altamente contaminante que presenta en su composición química altos contenidos de materia orgánica y sales. En la tecnología tres (T3), se procesa caña de azúcar directamente para producir alcohol, es decir, se extrae el jugo de caña y, previo acondicionamiento, se deriva a fermentación. En la tecnología T4, se procesa el maíz para obtener alcohol como producto principal y un subproducto llamado burlanda o DGS (Distillers Grains with Solubles), un material rico en proteínas, fibras y lípidos que se incorpora a la

dieta de rumiantes [7]. Cada una de las tecnologías tiene asociada coeficientes de balances de masa, costos fijos de capital y operación y puede aumentar su capacidad con el tiempo para afrontar aumentos de demanda específicos.

3.1 Restricciones de balances de masa

El balance de masa global para un producto i , en la región g , en el año inicial está representado por la ec. 1 y para los siguientes años por la ec. 2. En dicha ecuación, el inventario inicial de ese año (igual al inventario final del período anterior ST_{isgt-1}) más la cantidad producida o consumida (PT_{igt}), la cantidad de materia prima comprada (PU_{igt}), y el flujo de entrada desde otras provincias ($Q_{ilg'gt}$), debe ser igual al inventario final (ST_{isgt}), más la cantidad vendida a los clientes (DTS_{igt}), más el flujo de salida hacia otras provincias ($Q_{ilgg't}$), y la cantidad de residuos generados (W_{igt}).

$$\begin{aligned}
 W_{igt} + \sum_{s \in IS(i,s)} ST_{isgt} + DTS_{igt} + \sum_{l \in IL(i,l)} \sum_{g' \neq g} Q_{ilgg't} \\
 = 0 + PU_{igt} + PT_{igt} \\
 + \sum_{l \in IL(i,l)} \sum_{g' \neq g} Q_{ilg'gt}; \quad \forall i, g; t = 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 W_{igt} + \sum_{s \in IS(i,s)} ST_{isgt} + DTS_{igt} + \sum_{l \in IL(i,l)} \sum_{g' \neq g} Q_{ilgg't} \\
 = \sum_{s \in IS(i,s)} ST_{isgt-1} + PU_{igt} + PT_{igt} \\
 + \sum_{l \in IL(i,l)} \sum_{g' \neq g} Q_{ilg'gt}; \quad \forall i, g; t > 1
 \end{aligned} \tag{2}$$

En esta ecuación, $IS(i, s)$ es un conjunto de pares ordenados que asocia al producto i al tipo de almacenamiento adecuado s , mientras que $IL(i, l)$ relaciona al producto i con la forma de transporte l . PU_{igt} sólo toma valores distintos de cero para materias primas como la caña de azúcar y el maíz.

La producción total del producto i en la región g se calcula a partir de la ec. 3. El coeficiente de balance de masa ρ de los principales productos se normaliza a 1. La producción total de cada producto i en cada región g (PT_{igt}) se calcula luego a partir de los coeficientes de balance de masa de cada tecnología, ρ_{pi} , y la producción del producto principal PE_{ipgt} . Los coeficientes ρ_{pi} son positivos para las materias primas y negativos para los productos.

$$PT_{igt} = - \sum_p \rho_{pi} \cdot PE_{i^*pgt} \quad \forall i, g, t, \quad \forall i^* \in IM(i, p) \tag{3}$$

$IM(i, p)$ define los principales productos de cada tecnología (azúcar blanco en T1 y etanol en las tres restantes). En la ecuación 3 se diferencia i^* de i pues i^* solo considera los productos principales de cada tecnología.

La capacidad de almacenamiento ($SCap_{sgt}$) es el límite superior del inventario total de cada producto i almacenado en el tipo de almacén s durante el año t (ST_{isgt}) (ec. 4).

$$\sum_{i \in IS(i,s)} ST_{isgt} \leq SCap_{sgt} \quad \forall s, g, t \quad (4)$$

Se define un nivel de inventario medio (AIL_{igt}) como una función de la cantidad de material entregado a los clientes en un periodo de almacenamiento β (por ejemplo, 10 días).

$$AIL_{igt} = \left(\frac{1}{365}\right) \cdot \beta \cdot DTS_{igt} \quad \forall i, g, t \quad (5)$$

El periodo de almacenamiento es una forma de estimar el número de días que un producto permanecerá almacenado. Para garantizar la flexibilidad en respuesta a los cambios en la oferta y la demanda, la capacidad total de almacenamiento de una región se define como mínimo el doble del inventario medio del producto i (ec. 6).

$$2 \cdot AIL_{igt} \leq \sum_{s \in IS(i,s)} SCap_{sgt} \quad \forall i, g, t \quad (6)$$

La demanda de cada producto i en cada región g y en cada año t (SD_{igt}) determina el límite superior de ventas (DTS_{igt}).

$$DTS_{igt} \leq SD_{igt} \quad \forall i, g, t \quad (7)$$

Se asume que la demanda de los principales productos (azúcar blanco y etanol) se tiene que satisfacer hasta un cierto grado α ($0 \leq \alpha \leq 1$) ya que el azúcar es un producto alimenticio básico requerido por el mercado y el etanol debe mezclarse con las naftas por ley nacional. Se supone un valor de $\alpha = 0,8$.

$$DTS_{igt} \geq \alpha \cdot SD_{igt} \quad \forall g, t; i = \text{azúcar blanco, etanol} \quad (8)$$

La producción de caña de azúcar y de maíz en la región g durante el intervalo de tiempo t está limitada por la capacidad de la región para producir dichos cultivos ($CapCrop_{igt}$).

$$PU_{igt} \leq CapCrop_{igt} \quad \forall g, t; i = \text{caña de azúcar, maíz} \quad (9)$$

3.2 Restricciones de capacidad

La tasa de producción PE_{ipgt} está limitada por un porcentaje τ de la capacidad de producción existente ($PCap_{pgt}$) y por la propia capacidad existente (ec. 10).

$$\tau \cdot PCap_{pgt} \leq PE_{ipgt} \leq PCap_{pgt}, \quad \forall i \in IM(i, p), p, g, t \quad (10)$$

La capacidad de producción $PCap_{pgt}$ representa la suma de las capacidades de todas las plantas existentes de cada tecnología p , en cada provincia g y en cualquier periodo de tiempo t . $PCap_{pgt}$ es igual a la suma de la capacidad existente al final del periodo anterior más la expansión de la capacidad en ese periodo ($PCapE_{pgt}$).

$$PCap_{pgt} = PCapE_{pgt} \quad \forall p, g; t = 1 \quad (11)$$

$$PCap_{pgt} = PCap_{pgt-1} + PCapE_{pgt} \quad \forall p, g; t > 1 \quad (12)$$

Las ecuaciones 13 y 14 limitan las ampliaciones de capacidad de producción entre dos límites ($PCapMin_p$ y $PCapMax_p$). La variable entera NP_{pgt} representa el número de plantas de tecnología p instaladas en la región g y el periodo de tiempo t .

$$PCapE_{pgt} \leq PCapMax_p \cdot NP_{pgt} \quad \forall p, g, t \quad (13)$$

$$PCapMin_p \cdot NP_{pgt} \leq PCapE_{pgt} \quad \forall p, g, t \quad (14)$$

La expansión de la capacidad de almacenamiento está limitada por los límites inferior ($SCapMin_s$) y superior ($SCapMax_s$). La variable entera NS_{sgt} representa el número de almacenes instalados en la región g durante el periodo de tiempo t (ec. 15 y 16).

$$SCapMin_s \cdot NS_{sgt} \leq SCapE_{sgt} \quad \forall s, g, t \quad (15)$$

$$SCapE_{sgt} \leq SCapMax_s \cdot NS_{sgt} \quad \forall s, g, t \quad (16)$$

La tecnología de almacenamiento s tiene una capacidad en cualquier periodo de tiempo t igual a la capacidad existente al final del periodo anterior más el aumento de capacidad en el periodo actual ($SCapE_{sgt}$) (ec. 17 y 18).

$$SCap_{sgt} = SCapE_{sgt} \quad \forall s, g; t = 1 \quad (17)$$

$$SCap_{sgt} = SCap_{sgt-1} + SCapE_{sgt} \quad \forall s, g; t > 1 \quad (18)$$

3.3 Restricciones de transporte.

Los flujos de producto están limitados por los límites de capacidad inferior y superior, $Qmin_l$ y $Qmax_l$, respectivamente (ec. 19 y 20).

$$Qmin_l \cdot X_{lgg't} \leq \sum_{I \in IL(i,l)} Q_{ilgg't} \quad \forall l, t, g, g' (g \neq g') \quad (19)$$

$$\sum_{I \in IL(i,l)} Q_{ilgg't} \leq Qmax_l \cdot X_{lgg't} \quad \forall l, t, g, g' (g \neq g') \quad (20)$$

Un vínculo de transporte entre dos regiones, g y g' , se representa mediante una variable binaria $X_{lgg't}$, que es igual a 1 si se establece el vínculo de transporte entre

las dos regiones y a 0 en caso contrario (ec. 21). Una región puede importar o exportar material i , pero no ambas situaciones simultáneamente.

$$X_{lgg't} + X_{lg'gt} \leq 1 \quad \forall l, t, g, g' (g \neq g') \quad (21)$$

3.4 Función objetivo. Modelado económico

El modelo pretende optimizar el desempeño económico de toda la CS a lo largo de un periodo de diez años. El objetivo económico está representado por el valor actual neto (NPV por sus siglas en inglés) (Ec 22).

$$NPV = \sum_t \frac{CFLOW_t}{(1 + INTR)^{t-1}} \quad (22)$$

La tasa de interés está representada por $INTR$. El flujo de caja $CFLOW_t$ se calcula a partir del beneficio neto $NETE_t$, que es el beneficio después de impuestos menos la fracción del capital total amortizable ($FTDC_t$) (ec. 23).

$$CFLOW_t = NETE_t - FTDC_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T - 1 \quad (23)$$

Al calcular el flujo de caja del último año ($t = T$), se supone que un porcentaje de la inversión total en capital fijo ($TFCI$) puede recuperarse al final del periodo. Este valor está representado por SV . El modelo supone que la inversión total se divide en pagos iguales cada año.

$$CFLOW_t = NETE_t - FTDC_t + TFCI \cdot SV \quad t = T \quad (24)$$

$$FTDC_t = \frac{TFCI}{CARD_t} \quad \forall t \quad (25)$$

Los beneficios ($NETE_t$) se calculan restando los costos operativos (producción y almacenamiento) y transporte (FOC_t y TOC_t) de los ingresos por ventas (REV_t) (ec. 26). TAX es la tasa impositiva y DEP_t es el valor amortizable (se define en la ec. 34).

$$NETE_t = (1 - TAX) \cdot (REV_t - FOC_t - TOC_t) + TAX \cdot DEP_t \quad \forall t \quad (26)$$

Los ingresos por ventas (REV_t) se obtienen a partir de los productos finales vendidos y sus correspondientes precios de venta (PR_{igt}). En la ecuación 27, el subconjunto $SEP(i)$ representa el conjunto de productos i que pueden venderse, es decir, los que tienen una demanda específica en cada provincia g y en cada año t .

$$REV_t = \sum_{i \in SEP(i)} \sum_g DTS_{igt} \cdot PR_{igt} \quad \forall t \quad (27)$$

Los costos de operación se calculan multiplicando los costos unitarios de producción y almacenamiento (UPC_{ipgt} y USC_{isgt}) por la cantidad producida y la cantidad media almacenada, respectivamente. También se incluye el costo de tratamiento de la vinaza (DC_t), residuo de las tecnologías T2 y T3, también llamado costo de disposición, que

se calcula multiplicando la cantidad de vinaza producida por un impuesto al vertedero LT_{ig} . Solo la vinaza se considera un residuo a disponer y por ende tiene un costo asociado.

$$FOC_t = \sum_i \sum_g \left[\sum_{p \in IM(i,p)} UPC_{ipgt} \cdot PE_{ipgt} + \sum_{s \in IS(i,s)} USC_{isgt} \cdot ALL_{igt} \right] + DC_t \quad \forall t \quad (28)$$

$$DC_t = \sum_i \sum_g W_{igt} \cdot LT_{ig} \quad \forall t \quad (29)$$

El costo del transporte TOC_t incluye el costo del combustible (FC_t), el costo laboral (LC_t) y el costo de mantenimiento (MC_t).

$$TOC_t = FC_t + LC_t + MC_t \quad \forall t \quad (30)$$

El costo del combustible es una función del precio del combustible (FP_{lt}) y el consumo de combustible, que se determina por la distancia total recorrida en un viaje ($2 \cdot EL_{gg'}$), el consumo de combustible del vehículo l en km/L (FE_l) y el número de viajes realizados por período de tiempo ($Q_{ilgg't}/TCap_l$), donde $TCap_l$ es la capacidad en toneladas por viaje.

$$FC_t = \sum_{i \in IL(i,l)} \sum_l \sum_g \sum_{g' \neq g} FP_{lt} \left[\frac{2 \cdot EL_{gg'} \cdot Q_{ilgg't}}{FE_l \cdot TCap_l} \right] \quad \forall t \quad (31)$$

El costo laboral depende del salario del conductor (DW_{lt}) y del tiempo total de entrega, que es función del tiempo de carga y descarga (LUT_l) y de la velocidad media (SP_l), entre otros factores ya definidos.

$$LC_t = \sum_{i \in IL(i,l)} \sum_l \sum_g \sum_{g' \neq g} \frac{DW_{lt} \cdot Q_{ilgg't}}{TCap_l} \left[\frac{2 \cdot EL_{gg'}}{SP_l} + LUT_l \right] \quad \forall t \quad (32)$$

El costo de mantenimiento considera el mantenimiento general de los módulos de transportes y se calcula utilizando un parámetro que es el costo de mantenimiento por distancia recorrida (ME_l).

$$MC_t = \sum_{i \in IL(i,l)} \sum_l \sum_g \sum_{g' \neq g} \frac{ME_l \cdot 2 \cdot Q_{ilgg't} \cdot EL_{gg'}}{TCap_l} \quad \forall t \quad (33)$$

El periodo de amortización (DEP_t) se calcula según el método lineal (ec. 34).

$$DEP_t = (1 - SV) \cdot \frac{TFCI}{T} \quad \forall t \quad (34)$$

$TFCI$ son los costos fijos de inversión, como la instalación de plantas y almacenes.

$$TFCI = \sum_t FCC_t \quad (35)$$

FCC_t indica la inversión en costos fijos en el periodo t , que se calcula a partir de las expansiones de capacidad de producción (PCC_t) y el aumento de la capacidad de almacenamiento (SCC_t), así como los costos de transporte en el periodo t (TCC_t) (ec. 36-38).

$$FCC_t = PCC_t + SCC_t + TCC_t \quad \forall t \quad (36)$$

$$PCC_t = \sum_p \sum_g (\alpha P_{pgt} \cdot NP_{pgt} + \beta P_{pgt} \cdot PCapE_{pgt}) \quad \forall t \quad (37)$$

$$SCC_t = \sum_s \sum_g (\alpha S_{sgt} \cdot NS_{sgt} + \beta S_{sgt} \cdot SCapE_{sgt}) \quad \forall t \quad (38)$$

Donde los coeficientes αP_{pgt} , βP_{pgt} , αS_{sgt} y βS_{sgt} representan la inversión fija y variable correspondientes a plantas y almacenes, respectivamente.

El costo del transporte durante un periodo t es igual al flujo de cada producto transportado entre cada región multiplicado por el costo de transportar una tonelada de producto un kilómetro (TMC_{it}) y por la distancia recorrida ($EL_{gg'}$). Se supone que el costo por tonelada es el mismo independientemente del producto transportado (ec. 39).

$$TCC_t = \sum_{I \in IU(i,t)} \sum_{g \neq g'} Q_{ilgg't} \cdot TMC_{it} \cdot EL_{gg'} \quad \forall t \quad (39)$$

Se define un valor máximo $FCUIL$ para la inversión total. Este valor establece un límite superior para el modelo en cuanto a la instalación de plantas, almacenes y costos logísticos.

$$TFCI \leq FCUIL \quad (40)$$

La formulación del modelo MILP puede resumirse de la siguiente manera:

$$\begin{cases} (M) & \min\{-NPV\} \\ & s.t \text{ constraints } 1 - 40 \\ & x \in \mathbb{R}, X \in \{0,1\}, N \in \mathbb{N} \end{cases}$$

En esta descripción, x representa de forma genérica todas las variables continuas del modelo, como las compras de materias primas agrícolas, los niveles de producción, las capacidades, las ventas y los flujos de productos. X representa las variables binarias (por ejemplo, el establecimiento de rutas logísticas) y N son las variables

enteras, como el número de plantas de cada tecnología y las instalaciones de almacenamiento.

4 Resultados y discusión

4.1 Caso Base

El caso base ignora las instalaciones existentes en el país y simulaba un escenario ideal de CS suponiendo que el corte de bioetanol en naftas es del 18% (actualmente es del 12%).

El código del modelo se programa en el software GAMS® y se resuelve con el *solver* MILP CPLEX 11.0. El modelo de optimización resultante contiene 44.082 ecuaciones, 67.841 variables continuas y 6.960 variables discretas y tarda alrededor de 7 segundos en resolverse en una computadora DELL Inspiron 15 3000 con un procesador Intel CORE i5.

El resultado de la optimización arroja un valor del VAN de $US\$ 8,93 \cdot 10^9$. En la tabla 1 se listan las 27 plantas de producción que el modelo decide instalar en los primeros tres años (en los años siguientes no se instalan nuevas plantas). En la figura 2 se representa un zoom del mapa de la República Argentina donde se indica en que provincias se instalan fábricas de cada tecnología. Además, el modelo instala un almacén para productos líquidos y otro para productos sólidos en cada una de las 24 regiones, algo esperable ya que existe demanda de alcohol y azúcar en todas las provincias. El modelo da como resultado también todos los flujos de productos transportados desde una provincia a otra.

Esta simulación representa el caso de la CS ideal en el cual no existen fábricas instaladas en el país. Para poder proyectar una situación más realista de cómo debería ser la evolución de la CS para un aumento del corte, se agregan restricciones que fuerzan al modelo a considerar las plantas ya existentes en el país. Este caso se muestra con el nombre “Caso Real”.

Tabla 1. Plantas instaladas Caso Base.

Tecnología	<i>g</i>	Provincia	Año 1	Año 2	Año 3
T1	G13	Salta	1	-	-
T1	G16	Tucumán	11	1	1
T2	G13	Salta	1	-	-
T2	G16	Tucumán	1	-	-
T3	G13	Salta	-	-	1
T3	G16	Tucumán	1	-	-
T4	G02	Córdoba	1	-	-
T4	G04	La Plata	3	-	-
T4	G08	Entre Ríos	1	-	-
T4	G15	San Luis	1	-	-
T4	G18	Santa Fe	1	-	-
T4	G19	La Pampa	1	-	-
T4	G20	Santiago	1	-	-

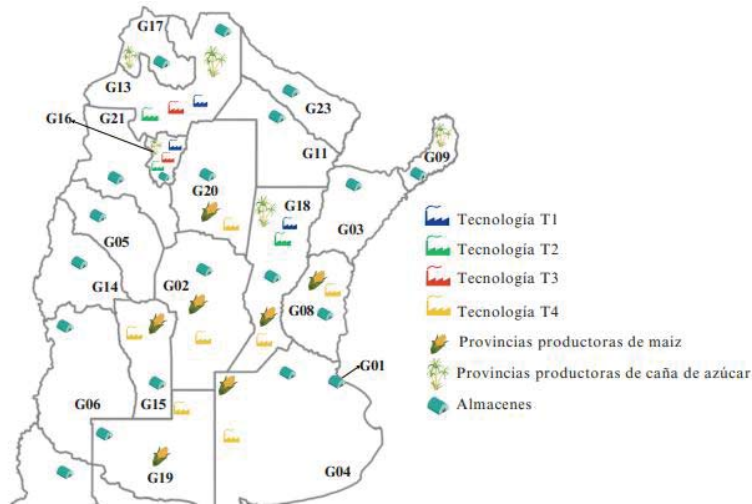


Figura 2. Detalle de la zona productiva de la CS para el Caso Base.

4.2 Caso Real

En este caso, el modelo de optimización resultante contiene 44.082 ecuaciones, 67.841 variables continuas y 6.951 variables discretas y tarda alrededor de 5 segundos en resolverse en una computadora DELL Inspiron 15 3000 con un procesador Intel CORE i5.

Este modelo toma en consideración las plantas existentes de producción de azúcar y bioetanol de la Argentina: 19 plantas de la tecnología T1 (14 en la provincia de Tucumán, 3 en Jujuy y 2 en Salta), 11 plantas de la tecnología T2 (7 ubicadas en Tucumán, 2 en Jujuy y 2 en Salta) y 6 plantas de la tecnología T4 (3 en Córdoba, 2 en San Luis y una en Santa Fe). Este cambio en las restricciones al modelo da como resultado un valor del VAN de $US\$ 8,91 \cdot 10^9$, menor que el valor del caso base. En la tabla 2 se indican las 43 plantas que el modelo instala en los primeros 4 años (no se instalan nuevas fábricas en los años siguientes) y en la figura 3 se amplía el mapa de la República Argentina donde se indica en qué provincias se instalan las fábricas.

Tabla 2. Plantas instaladas Caso Real.

Tecnología	<i>g</i>	Provincia	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
T1	G13	Salta	2	0	0	0
T1	G16	Tucumán	14	0	0	0
T1	G17	Jujuy	3	0	0	0
T2	G13	Salta	2	0	0	0
T2	G16	Tucumán	7	0	0	0
T2	G17	Jujuy	2	0	0	0
T3	G17	Jujuy	0	0	0	1
T4	G02	Córdoba	3	0	0	0
T4	G04	La Plata	3	0	0	0
T4	G08	Entre Ríos	1	0	0	0
T4	G15	San Luis	2	0	0	0
T4	G18	Santa Fe	1	0	0	0
T4	G19	La Pampa	1	0	0	0
T4	G20	Santiago	1	0	0	0

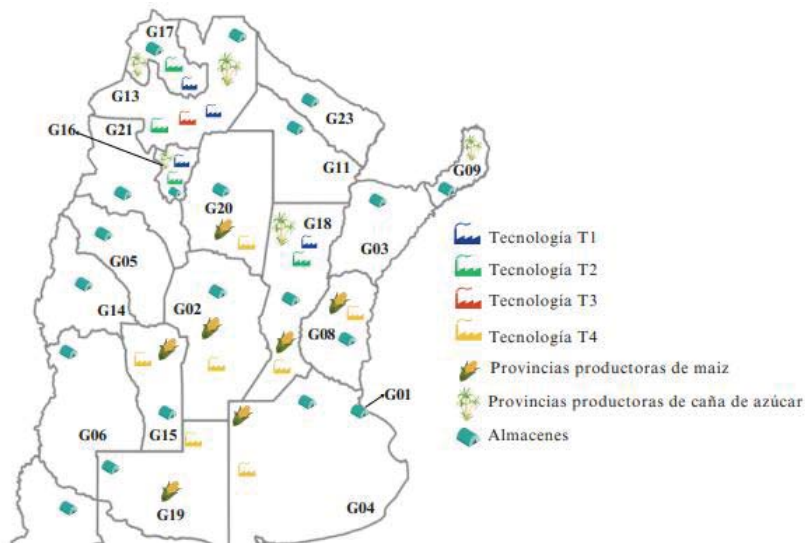


Figura 3. Detalle de la zona productiva de la CS para el Caso Real.

Se puede analizar el nivel de satisfacción de la demanda en ambos modelos. El caso base, al no haber imposición del número de plantas iniciales, decide instalar la cantidad de fábricas de tecnología T1 de producción de azúcar blanco necesarias para completar el nivel de satisfacción del 80% en todas las provincias en el último año. Como la demanda aumenta 5% anualmente, esto le permite a la CS satisfacer en los primeros años un porcentaje mayor de la demanda en ciertas provincias (Se muestran algunos ejemplos en la tabla 3).

Tabla 3. Satisfacción de la demanda Caso Base.

Provincia	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Córdoba	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%
La Plata	92%	100%	100%	98%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Neuquén	80%	82%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Misiones	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Chubut	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Chaco	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%
Santa Cruz	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
San Luis	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Tucumán	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%
Jujuy	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%
La Pampa	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Santiago	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%
Tierra del Fuego	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%

Se observa cómo en provincias productoras de azúcar blanco y en sus vecinas la satisfacción en los primeros años es del 100%. Esto se debe principalmente a los costos de transporte que hacen menos rentable el envío del producto hacia destinos alejados.

Para el Caso Real, como se fuerza al modelo a instalar las plantas existentes, hay una capacidad de producción de azúcar blanco mayor a la del Caso Base, por lo que el modelo puede satisfacer la demanda del 100% en más provincias durante un mayor número de periodos (Tabla 4).

Tabla 4. Satisfacción de la demanda Caso Real.

Provincia	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Córdoba	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%
La Plata	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%
Neuquén	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%
Misiones	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	80%	80%	80%
Chubut	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Chaco	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%
Santa Cruz	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
San Luis	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%
Tucumán	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%
Jujuy	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%
La Pampa	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	80%	80%
Santiago	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80%
Tierra del Fuego	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%

El caso Base tiene una satisfacción promedio de azúcar blanco de un 88%, mientras que el caso Real una del 93%. Con el alcohol pasa algo distinto; la satisfacción de la demanda promedio es similar, siendo del 98% en el Caso Base y del 97% en el Caso Real. Esto se debe principalmente al mayor precio de venta del bioetanol, por lo que ambos escenarios tienden a satisfacer la demanda casi por completo.

Ambos modelos calculan el flujo de cada producto desde una región a otra, los almacenes instalados en cada región, las ventas de cada producto, la cantidad almacenada en cada región, los costos asociados a cada etapa, capacidad de las plantas instaladas, y una serie de otras variables que por razones de espacio no se reportan en este artículo. Asimismo, el modelo tiene la flexibilidad suficiente para reflejar numerosas situaciones hipotéticas en cuanto a patrones de demanda y consumo, variaciones del corte de etanol en naftas y variaciones en los precios de venta de los productos lo cual lo convierten en una poderosa herramienta de análisis y apoyo a la toma de decisiones estratégicas del sector.

5 Conclusiones

Este estudio presenta el diseño y modelado de la CS de la industria del bioetanol en la República Argentina ante un aumento del 50% en el corte del biocombustible en naftas, proponiendo un caso base ideal sin plantas existentes y un caso real considerando las fábricas existentes. Se obtienen valores óptimos del VAN en ambas simulaciones mediante programación lineal entera mixta que resulta de un modelo que combina la producción de los dos sectores alcohólicos, el maicero y el cañero.

Se calculan variables del modelo tales como inversiones necesarias, flujos de insumos y de productos, número de plantas de cada tecnología, número de almacenes, ventas y cantidades a producir de cada producto, por mencionar algunas.

Por último, se pone en evidencia la utilidad de la programación matemática y las metodologías de optimización para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación de las CS de las agroindustrias.

Referencias

1. N. Patel, "Environmental and economical effects of fossil fuels," *Journal of Recent Research in Engineering and Technology*, vol. 1, no. 7, p. 1, 2014.
2. IEA, "World Energy Outlook 2019," *World Energy Outlook 2019*, 2019.
3. U. S. E. I. Administration, "Annual Ethanol Production," *Annual Ethanol Production*, 2021. <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>.
4. <https://bio-e.es/la-produccion-de-etanol-a-base-de-maiz-aumenta-un-58-en-brasil/>.
5. United States Department of Agriculture (USDA) - Foreign Agricultural Service, "Argentina - Biofuels Annual," *Global Agricultural Information Network*, July 2017.
6. F. D. Mele, A. M. Kostin, G. Guillén-Gosálbez, and L. Jiménez, "Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina," *Ind Eng Chem Res*, vol. 50, no. 9, pp. 4939–4958, 2011, doi: 10.1021/ie101400g.
J. Giménez, "La burlanda revoluciona el mercado de alimentación y producción ganadera lechera y cárnica." [en línea]. Disponible: www.produccion-animal.com.ar