

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA



TESIS DE DOCTORADO

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS CADENAS
DE SUMINISTROS DE BIORREFINERÍAS
SUSTENTABLES EN LA ARGENTINA**

Lucas Maximiliano Machin Ferrero

2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

TESIS DE DOCTORADO

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS CADENAS DE
SUMINISTROS DE BIORREFINERÍAS SUSTENTABLES EN
LA ARGENTINA**

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad Nacional de Tucumán y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título similar en esta institución u otras. La misma contiene los resultados obtenidos de la investigación llevada a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (Universidad Nacional de Tucumán) durante el período comprendido entre el 1 de abril de 2018 y el 31 de marzo de 2023, bajo la dirección del Dr. Fernando Daniel Mele.



Lucas Maximiliano Machin Ferrero

Índice

Índice	5
Agradecimientos	9
Prólogo.....	11
Resumen	13
<i>Abstract</i>	15
Trabajos publicados con relación a esta Tesis.....	17
1 CAPÍTULO 1.....	19
Resumen	21
Resumen gráfico.....	23
Introducción.....	25
1.1 Un cambio necesario	25
1.2 Actividad industrial y biorrefinerías.....	26
1.3 Sustentabilidad y desarrollo sustentable	27
1.4 Diseño de cadenas de suministros de biorrefinerías.....	28
1.5 Contexto regional	30
1.5.1 La bioeconomía	30
1.5.2 La bioeconomía en la Argentina	32
1.5.3 La industria de la caña de azúcar	35
1.5.4 La industria del limón	37
1.6 A modo de conclusión	39
1.7 Objetivos y estructura de la Tesis	40
1.8 Referencias.....	41
2 CAPÍTULO 2.....	47
Resumen	49
Resumen gráfico.....	51
Diseño óptimo de cadenas de suministros de biorrefinerías.....	53
2.1 Introducción	53
2.2 Estado del conocimiento	54
2.3 Contribuciones de esta propuesta.....	56
2.4 Planteo del problema y metodología propuesta.....	57
2.5 Formulación matemática.....	57
2.6 Casos de estudio	66
2.7 Resultados	74
2.8 Conclusiones	80
2.9 Notación.....	81
2.9.1 Índices.....	81

2.9.2	Conjuntos	81
2.9.3	Parámetros	82
2.9.4	Variables.....	83
2.9.5	Variables y parámetros para el modelo lineal del nivel de inventario	85
2.10	Referencias.....	85
3	CAPÍTULO 3.....	91
	Resumen.....	93
	Resumen gráfico.....	95
	Evaluación ambiental de cadenas de suministros de biorrefinerías regionales	97
3.1	Introducción.....	97
3.2	El Análisis de Ciclo de Vida.....	98
3.3	Cadenas de suministros de biorrefinerías regionales	100
3.4	Producción de biomasa	101
3.5	Producción de caña de azúcar	102
3.6	Producción de limón.....	108
3.7	Tecnologías convencionales de procesamiento	116
3.7.1	Industrialización de la caña de azúcar.....	116
3.7.2	Industrialización del limón.....	117
3.8	Nuevas tecnologías de procesamiento en biorrefinerías.....	119
3.8.1	Tecnologías de aprovechamiento de caña de azúcar.....	119
3.8.2	Tecnologías de aprovechamiento de limón	121
3.9	Transporte	124
3.10	Aplicación del modelado ambiental a una biorrefinería de limón.....	124
3.10.1	Modelo de caracterización y categorías de impacto ambiental.....	129
3.10.2	Resultados.....	130
3.11	Conclusiones.....	137
3.12	Referencias.....	138
4	CAPÍTULO 4.....	145
	Resumen.....	147
	Resumen gráfico.....	149
	Diseño y optimización de cadenas de suministros de biorrefinerías sustentablemente eficientes.....	151
4.1	Introducción.....	151
4.2	Enfoque propuesto.....	153
4.3	Metodología propuesta	155
4.3.1	Etapa 1 (S1): optimización económica.....	155
4.3.2	Etapa 2 (S2): evaluación ambiental y social.....	156
4.3.3	Etapa 3 (S3): Análisis Envoltante de Datos.....	159
4.4	Caso de estudio.....	161

4.4.1	Etapa 1 (S1).....	161
4.4.1	Etapa 2 (S2).....	165
4.4.2	Etapa 3 (S3).....	170
4.5	Resultados	170
4.6	Conclusiones	177
4.7	Notación.....	177
4.7.1	Índices.....	177
4.7.2	Conjuntos	178
4.7.3	Parámetros	178
4.7.4	Variables.....	179
4.8	Referencias.....	181
5	CAPÍTULO 5.....	185
	Conclusiones y proyecciones	187
5.1	Referencias.....	189
	ANEXO A.....	191
	Distancia y tiempo de viaje entre regiones.....	191
	Parámetros de transporte.....	197
	Tecnologías de producción.....	198
	ANEXO B	203
	ANEXO C.....	211
	Tecnologías de producción.....	211

Agradecimientos

A Dios.

A mi familia y amigos.

A mi director de Tesis, Dr. Fernando Daniel Mele.

A la Comisión de Supervisión de Tesis.

A la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Prólogo

La presente Tesis Doctoral titulada DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS CADENAS DE SUMINISTROS DE BIORREFINERÍAS SUSTENTABLES EN LA ARGENTINA se expone a lo largo de cinco capítulos.

En el primero de ellos se presenta una introducción sobre el modelado y la optimización de cadenas de suministros (CS) sustentables y el contexto regional que motivan y justifican el tema de Tesis. Se presentan el objetivo general y los objetivos específicos de la Tesis.

La formulación de un modelo lineal mixto entero (MILP) con el fin de diseñar CS de biorrefinerías que representen los mínimos costos posibles se presenta y describe en el segundo capítulo.

El tercer capítulo contiene la labor de adaptación y elaboración de los inventarios de entradas y salidas de materiales y energía de cada componente de las CS estudiadas para poder calcular los indicadores ambientales correspondientes mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (LCA).

En el cuarto capítulo, se propone una metodología para el diseño y selección de CS sustentables realizando una clasificación basada en el modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA) con el fin de evaluar la eficiencia de cada una de las CS diseñadas de acuerdo con diferentes indicadores económicos, ambientales y sociales.

En cada uno de los capítulos mencionados se analizan casos de estudio y potenciales escenarios de biorrefinerías de biomasa a escala real en la Argentina.

Por último, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones de la Tesis y se plantea el trabajo futuro según la experiencia adquirida durante su desarrollo.

Cada capítulo está acompañado de un resumen, la notación adoptada y las referencias citadas. Al final del documento se presenta un conjunto de anexos con información adicional que complementa el contenido de la Tesis.

Resumen

El uso integral de la biomasa como materia prima para producir alimentos, energía y productos resultará decisivo para conseguir un desarrollo sustentable. El concepto de biorrefinería permite a regiones con abundantes recursos naturales aprovechar considerablemente la biomasa disponible, consiguiendo una progresiva independencia de los recursos fósiles. El desarrollo de biorrefinerías es clave para participar en un entorno de bioeconomía, permitiendo producir productos de mayor valor agregado, biocombustibles y bioenergía, en simultáneo. El paradigma tecno-productivo de la bioeconomía puede representar para la Argentina una vía hacia el desarrollo del país. En este contexto, la provincia de Tucumán presenta un futuro prometedor a partir de sus agroindustrias más representativas: de la caña de azúcar y del limón. Para que la transición hacia cadenas de suministros (CS) de biorrefinerías sea eficiente, es preciso identificar *a priori*, mediante una planificación estratégica, la inversión necesaria para implementar las tecnologías de procesamiento adecuadas y la distribución de los flujos de materiales y energía a lo largo de toda la CS en propuestas que resulten sustentables —de óptimo desempeño económico, ambiental y social—. Esta Tesis doctoral presenta un marco para el diseño multicriterio de CS de biorrefinerías bajo consideraciones de sustentabilidad. En ella se desarrolla un modelo lineal mixto entero (MILP) con el fin de diseñar CS de biorrefinerías que representen los mínimos costos posibles. A partir de estos óptimos económicos, se propone una metodología para la evaluación ambiental y social de las CS, y la posterior clasificación de ellas utilizando el modelo de Análisis Envoltante de Datos (DEA). Así se puede evaluar la eficiencia de cada una de las CS diseñadas de acuerdo con diferentes indicadores. Para caracterizar ambientalmente los sistemas bajo estudio, se utiliza la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA), se realizan tareas de adaptación y elaboración de los inventarios de entradas y salidas de materiales y energía de cada componente de las CS estudiadas y se calculan los indicadores ambientales correspondientes. Para la caracterización social se recurre a indicadores que combinan datos del mercado laboral regional. Las capacidades de este enfoque se exponen a través de casos de estudio de complejidad real que involucran situaciones actuales y proyectadas de disponibilidad de biomasa en el Noroeste de la Argentina. Esta propuesta contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12 y 13) de la Organización de las Naciones Unidas y busca realizar aportes metodológicos en el área del diseño, con criterios de sustentabilidad, de CS óptimas de biorrefinerías teniendo en cuenta las circunstancias de la región y el país.

Palabras clave: biomasa; Análisis de Ciclo de Vida; programación lineal mixta entera; Análisis Envoltante de Datos; sustentabilidad.

Abstract

A more comprehensive use of biomass as raw material to produce food, energy and products would result in an important contribution towards the Sustainable Development Goals (SDG). The concept of biorefinery allows regions with abundant natural resources to make the most of available biomass for these purposes, achieving progressive independence from fossil resources. The development of biorefineries is key to participating in a bioeconomy environment, making it possible to produce products with higher added value, biofuels and bioenergy simultaneously. The techno-productive paradigm of the bioeconomy can stand for Argentina a pathway towards the development of the country. In this context, the province of Tucumán presents a promising future based on its most representative agro-industries (based on sugarcane and lemon). For the efficient transition to biorefinery supply chains (SC), it is necessary to identify a priori, through strategic planning, the investment necessary to implement the appropriate processing technologies and the distribution of material and energy flows throughout the SC in proposals that are sustainable, i.e., of optimal economic, environmental and social performance. This doctoral thesis presents a framework for the multicriteria design of SC of biorefineries under sustainability considerations. A mixed-integer linear model (MILP) is developed in order to design SC of biorefineries that represent the minimum possible costs. Based on these economic optimal solutions, a methodology is proposed for the environmental and social evaluation of SC, and their subsequent classification using the Data Envelopment Analysis (DEA) model. Thus, the efficiency of each of the SC designed can be evaluated according to different indicators. To characterize the systems under study from an environmental point of view, the Life Cycle Assessment (LCA) is used. Tasks of adaptation and developing of inventories (inputs and outputs of materials and energy) are conducted for each component of the SC studied and the environmental indicators are calculated. For the social characterization, indicators that combine data from the regional labor market are used. The capabilities of the proposed methodology are exposed through full-scale case studies with current and projected situations of biomass availability in northwestern Argentina. This proposal contributes to the SDG (SDG 12 and 13) of the United Nations and seeks to make methodological contributions in the area of optimal design of biorefinery SC with sustainability criteria considering the context of the region and the country.

Keywords: *biomass; Life Cycle Assessment; mixed-integer linear programming; Data Envelopment Analysis; sustainability.*

Trabajos publicados con relación a esta Tesis

Artículos publicados en revistas

1. **Machin Ferrero, L. M.**; Cabrera-Jiménez, R.; Wheeler, J.; Pozo, C.; Gavaldà, J.; Mele, F. D. An integrated approach to the optimal design of sustainably efficient biorefinery supply chains. Application to a case in Argentina. *Journal of Cleaner Production* (en proceso de revisión).
2. **Machin Ferrero, L.M.**; Cabrera Jiménez, R.; Wheeler, J.; Pozo Fernández, C.; Mele, F. (2023). Diseño óptimo de cadenas de suministros de biorrefinerías sustentablemente eficientes. *Electronic Journal of SADIO (EJS)*, 22(1), 168-185. Recuperado a partir de <https://publicaciones.sadio.org.ar/index.php/EJS/article/view/462>
3. **Machin Ferrero, L. M.**; Wheeler, J.; Mele, F. D. (2022). Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 672-684. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.014>
4. **Machin Ferrero, L. M.**; Mele, F. D. (2022). Optimal Design of Sugar-Cane-Based Biorefinery Networks in Argentina. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(24), 7916-7928. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00921>
5. **Machin Ferrero, L. M.**; Araujo, P. Z.; Valdeón, D. H.; Nishihara Hun, A. L.; Mele, F. D. (2022). Water footprint of lemon production in Argentina. *Science of The Total Environment*, 816, 151614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151614>
6. **Machin Ferrero, L. M.**; Araujo, P. Z.; Nishihara Hun, A. L.; Valdeón, D. H.; Mele, F. D. (2021). Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(7), 1505-1519. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5>

Trabajos en eventos científico-tecnológicos publicados

1. **Machin Ferrero, L. M.**; Cabrera Jiménez, R.; Wheeler, J.; Mele, F. D. *Diseño óptimo de la cadena de suministros de biorrefinerías sosteniblemente eficientes*. X Encuentro Argentino de Ciclo de Vida, IX Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica, ENARCIV 2022, 3-4 de noviembre de 2022, Córdoba, Argentina. Actas del X Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y del IX Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica: ENARCIV 2022. Editores: Bongiovanni R.; Tuninetti L.; Nardi N.; Angelelli M.; Barrera V.; Burrioni L.; Lirio L. Oncativo: Ed. Oncoi Tiú, 2023. Libro digital. ISBN 978-987-96657-7-0.
2. **Machin Ferrero, L. M.**; Cabrera Jiménez, R.; Wheeler, J.; Pozo, C.; Mele, F. D. *Optimal design of sustainably efficient biorefineries supply chains*. Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO), 51 JAIIO (Eds. M. Cóccola, M. L. Schuverdt), Buenos Aires, Argentina, 17-27 de octubre de 2022. ISSN: 2451-7496, p. 156-169.
3. **Machin Ferrero, L. M.**; Mele, F. D. *Supply chain of sugarcane and its lignocellulosic biomass biorefineries in Argentina - An optimal design approach*. Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO), 50 JAIIO (Eds. M. Cóccola, I. Koch, F. Hormann), Argentina, 18-29 octubre de 2021. ISSN: 2618-3277, p. 197-209. Virtual.
4. Wheeler, J.; Brun, L. E.; **Machin Ferrero, L. M.**; Mele, F. D. *Selección de vías de procesos para el diseño de biorrefinerías de limón*. Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO), 48 JAIIO (Eds. R. Giandini, C. Martínez), Salta, Argentina, 18-20 septiembre de 2019. ISSN: 2451-7496, p. 2-14.

5. Wheeler, J.; **Machin Ferrero, L. M.**; Mele, F. D. *LCA de la producción de etanol y metano en una biorrefinería de limón*. VIII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VII Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2019) Mendoza, Argentina, 4 al 6 de noviembre de 2019. En Actas del VIII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VII Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (Ed. R. Piastrellini, G. R. Henderson), Buenos Aires: edUTecNe, 2020. ISBN: 978-987-4998-48-4.
6. Araujo, P. Z.; **Machin Ferrero, L. M.**; Nishihara Hun, A. L.; Valdeón, D. H.; Mele, F. D. *Huella de agua de la industria del limón en la provincia de Tucumán*. VIII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VII Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2019) Mendoza, Argentina, 4 al 6 de noviembre de 2019. En Actas del VIII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VII Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (Ed. R. Piastrellini, G. R. Henderson), Buenos Aires: edUTecNe, 2020. ISBN: 978-987-4998-48-4.
7. Araujo, P. Z.; **Machin Ferrero, L. M.**; Nishihara Hun, A. L.; Mele, F. D. *Estudio de la huella hídrica de la producción de limón en la provincia de Tucumán (Argentina)*. Proceedings of the 8th International Conference on Life Cycle Assessment (CILCA 2019) (Eds. A. Quirós, C. Naranjo), Cartago, Costa Rica, 15-19 julio 2019. ISBN: 978-9972-674-11-2.
8. **Machin Ferrero, L. M.**; Wheeler, J.; Mele, F. D. *Selección de vías de proceso para la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica de caña de azúcar*. X Congreso Argentino de Ingeniería Química, Asociación Argentina de Ingenieros Químicos, Santa Fe, Argentina, 5-7 agosto 2019. ISSN: 1850 3519.
9. Wheeler, J.; **Machin Ferrero, L. M.**; Jeger, P. M.; Salas Tonello, I.; Mele, F. D. *Diseño y optimización de la cadena de suministros de biorrefinerías de caña de azúcar*. Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO), 47 JAIIO (Eds. C. Zamoszczyk y A. Garrido), Buenos Aires, Argentina, 3-7 septiembre de 2018. ISSN: 2618-3277, p. 1-14.
10. **Machin Ferrero, L. M.**; Mele, F. D. *Diseño y optimización de biorrefinerías de caña de azúcar con criterios de sustentabilidad*. XXVI Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM (XXVI JJI), Mendoza, Argentina, 17 al 19 de octubre de 2018.
11. **Machin Ferrero, L. M.**; Wheeler, J.; Mele, F. D. *Selección de rutas alternativas para el diseño de biorrefinerías sustentables a partir de caña de azúcar*. VII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VI Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2018): Rumbo a la consolidación de inventarios nacionales Zavalla, Argentina, 3 al 5 de octubre de 2018. En Actas del VII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VI Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (Ed. S. R. Feldman, E. Jozami, G. C. Rótolo), Buenos Aires: Ediciones INTA, 2020. ISBN: 978-987-8333-39-7.
12. **Machin Ferrero, L. M.**; Araujo, P. Z.; Mele, F. D. *Estudios de sustentabilidad de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar*. VII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VI Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2018): Rumbo a la consolidación de inventarios nacionales Zavalla, Argentina, 3 al 5 de octubre de 2018. En Actas del VII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VI Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (Ed. S. R. Feldman, E. Jozami, G. C. Rótolo), Buenos Aires: Ediciones INTA, 2020. ISBN: 978-987-8333-39-7.

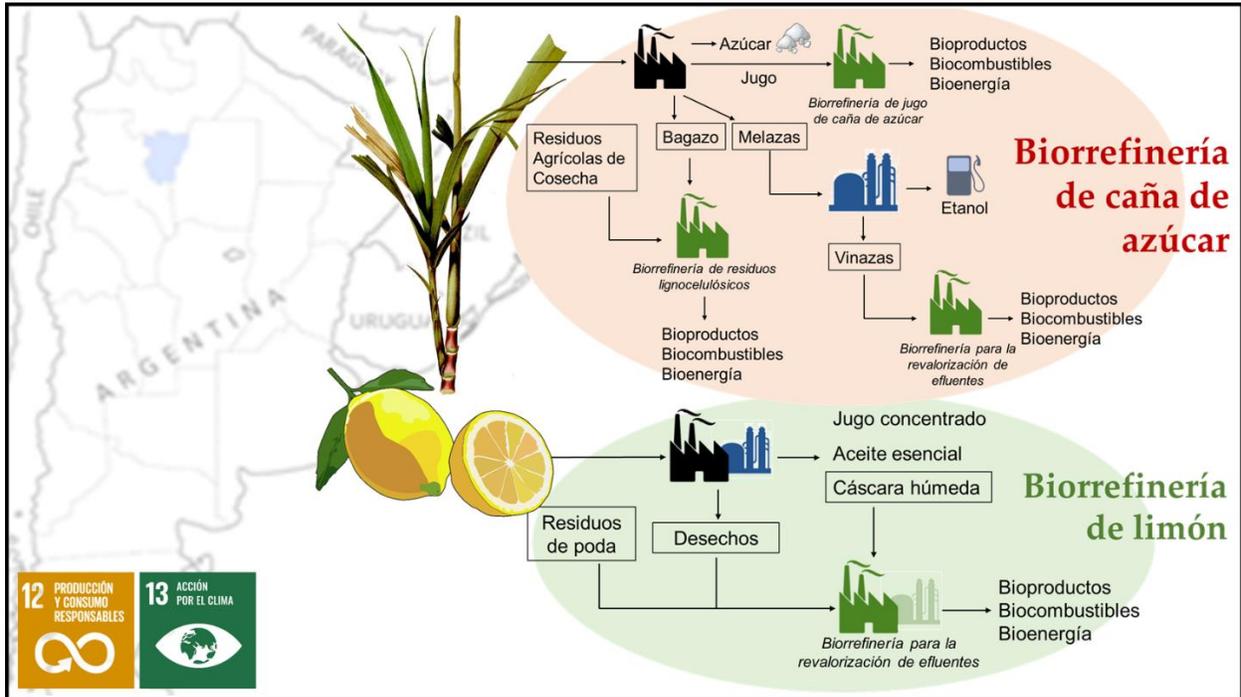
CAPÍTULO 1

Resumen

Ante problemáticas actuales tales como el agotamiento de recursos, el cambio climático, la contaminación del aire, agua y suelo, es imperiosa una transición de materias primas fósiles a renovables bajo lineamientos orientados a un desarrollo sustentable en el tiempo como una de las principales respuestas de precaución, adaptación y mitigación de las problemáticas mencionadas. Los esquemas productivos alternativos basados en biorrefinación y economía circular pueden representar herramientas para lograrlo mediante la fabricación de biocombustibles, bioproductos, productos alimenticios y bioenergía a partir de los recursos locales biomásicos disponibles. La Argentina es un país que se caracteriza por avances importantes en la producción primaria pero menores en el ámbito industrial, por lo que se posiciona como un país de alto potencial bioeconómico. En este contexto, la provincia de Tucumán presenta un futuro prometedor al formar parte de una biorregión de alta productividad por sus agroindustrias más representativas: de la caña de azúcar y del limón. Para que la transición hacia cadenas de suministros de biorrefinerías sea eficiente, es preciso identificar *a priori*, mediante una planificación estratégica, la inversión necesaria para implementar las tecnologías de procesamiento adecuadas y la distribución de los flujos de materiales y energía a lo largo de toda la cadena de suministros en propuestas que resulten sustentables —de óptimo desempeño económico, ambiental y social—.

Palabras clave: biorrefinerías; biomasa; caña de azúcar; limón; cadenas de suministros; sustentabilidad.

Resumen gráfico



Introducción

1.1 Un cambio necesario

Los gobiernos, las empresas y la sociedad están experimentando una presión cada vez mayor para hacer frente a ciertos problemas que vienen adquiriendo sustancial relevancia y que se proyectan como los grandes desafíos del futuro a causa de los niveles de vida y el crecimiento de la población mundial. Se presentan como tales el agotamiento de recursos, el cambio climático y la contaminación del aire, agua y suelo, entre otros.

El cambio climático se está manifestando rápidamente en forma de sequías, incendios, inundaciones, escasez de recursos y pérdida de especies, entre otros impactos. Entre los diez riesgos más graves a escala mundial, el “fracaso de la acción climática” se destaca como la principal amenaza a mediano-largo plazo para un mundo incapaz de hacer cumplir, promulgar o invertir en medidas efectivas de adaptación y mitigación del cambio climático, preservar los ecosistemas, proteger a las poblaciones y hacer la transición a una economía neutra en carbono (WEF 2022).

La mayoría de los combustibles disponibles comercialmente, además de muchos otros productos, provienen de materias primas fósiles. Como es común cuando se piensa en reducir gradualmente el consumo de petróleo, es crucial establecer rutas químicas con sus respectivas cadenas de valor a partir de fuentes renovables para reemplazar a los productos derivados del petróleo de manera eficiente y sustentable sin llevar a crisis relacionadas con los alimentos, el agua y otros recursos naturales (RRNN¹) a escala global como resultado de la sobreexplotación o la mala gestión.

En este contexto, es imperiosa una transición de materias primas fósiles a renovables bajo lineamientos orientados a un desarrollo sustentable en el tiempo como una de las principales respuestas de precaución, adaptación y mitigación de las problemáticas mencionadas. El principal objetivo estratégico es la transición efectiva del uso de recursos fósiles como carbón, petróleo y gas al de materias primas renovables, basadas

¹ Abreviaturas: 1G: primera generación, 2G: segunda generación, CS: cadenas de suministros, GCS: gestión de cadenas de suministros, LCA: análisis de ciclo de vida, ODS: objetivo del desarrollo sostenible, RAC: residuos agrícolas de cosecha y RRNN: recursos naturales.

principalmente en biomasa (Dimian *et al.* 2019). Dadas las complejas implicancias del cambio tecnológico, económico y social a esta escala, y la naturaleza insuficiente de los compromisos públicos y privados actuales, es probable que la transición sea desordenada (WEF 2022) e inconexa con otras acciones simultáneas. Por lo tanto, todo proyecto en el largo plazo debe considerar este cambio y brindar soluciones estratégicas manteniendo un enfoque holístico de las consecuencias de las actividades antrópicas.

1.2 Actividad industrial y biorrefinerías

La reconstrucción de la industria sobre la base de nuevas materias primas se acelerará considerablemente en los próximos años. En la industria química convencional, el uso de materias primas renovables impulsa el desarrollo de nuevos catalizadores y la producción de químicos "verdes" (Dimian *et al.* 2019). Por otro lado, para la agroindustria esta reconstrucción se traduce en la diversificación de la cartera de productos hacia una que pueda suplir los requerimientos del mercado futuro. Las biorrefinerías integradas surgen como un nuevo concepto industrial para la fabricación de biocombustibles, bioproductos, productos alimenticios y bioenergía a partir de los recursos locales biomásicos disponibles (Fig. 1.1). Este concepto permitiría a las regiones con abundantes RRNN aprovechar al máximo la biomasa disponible para estos fines, logrando una progresiva independencia de los recursos fósiles (Cherubini 2010, Aresta *et al.* 2021).

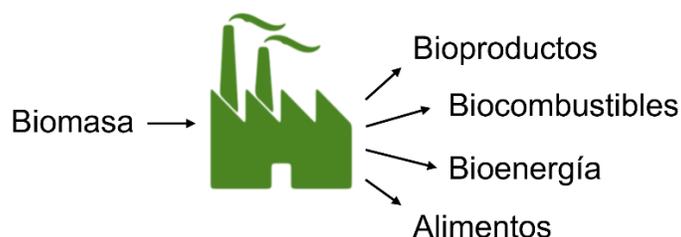


Figura 1.1. Concepto de biorrefinería. Esquema ilustrativo.

Los procesos basados en RRNN ofrecen múltiples alternativas de creación de valor mediante la producción e introducción de bioproductos en el mercado, con métodos de producción nuevos y más eficientes (Giner 2009) que mejoran la rentabilidad y circularidad de las actividades involucradas (Ubando *et al.* 2020). Se puede abastecer al mercado de productos finales o intermedios para otros procesos, estableciendo así una producción en cascada dentro de una red de procesos de base biológica (Anlló y Bisang 2015). Además, la agroindustria tiene un gran potencial de aplicación de estrategias de economía circular como la recuperación de energía a través de la producción *in situ* de

biogás y electricidad a partir de corrientes internas o efluentes del proceso (Kalmykova *et al.* 2018) para autoabastecerse energéticamente o exportar el excedente.

En este punto, debe quedar lo suficientemente claro que estos nuevos procesos y esquemas de producción tendrán que ser beneficiosos desde el punto de vista ambiental y social con respecto a las actividades tradicionales. Aunque inicialmente se pueden suponer estos beneficios, los esquemas productivos alternativos basados en biorrefinación y economía circular implican diferentes requisitos de energía y materiales y, como consecuencia, impactos ambientales y sociales que pueden resultar contrarios a la intuición.

1.3 Sustentabilidad y desarrollo sustentable

El concepto de sustentabilidad involucra tres pilares fundamentales: el económico, el ambiental y el social; y que se logra solo cuando los tres aspectos son considerados simultánea y equilibradamente. En 2015, las Naciones Unidas aprobaron 17 objetivos globales como parte de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, estableciéndose un plan para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos (Naciones Unidas 2022). Cada objetivo del desarrollo sostenible (ODS) tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos años a través de múltiples actores (los gobiernos, el sector privado y la sociedad). Específicamente, en lo que respecta la actividad industrial como uno de los actores directos, los objetivos llamados “producción y consumo responsables” (ODS 12) y “acción climática” (ODS 13) pueden considerarse los más trascendentes. El ODS 12 busca lograr la gestión sustentable y el uso eficiente de los RRNN, reducir la generación de residuos y las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministros, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida y adoptar prácticas sustentables, entre otros. El ODS 13, además de relacionarse con las acciones de adaptación de las consecuencias del cambio climático, busca la prevención y mitigación mediante la incorporación de medidas relativas al cambio climático: transición verde hacia una descarbonización de todos los aspectos de la economía, empleos verdes, crecimiento sustentable e inclusivo y soluciones sustentables con el fin último de eliminar el consumo de combustibles fósiles.

Es deber de cada país tomar acciones para el cumplimiento de los ODS conociendo *a priori* su potencial a futuro para lograrlo. Por ejemplo, en la mayoría de los países europeos, la

investigación e innovación relacionadas con la bioeconomía fueron prioridades estratégicas en 2020 (Haarich *et al.* 2017), mientras que en las próximas décadas se proyectan objetivos relacionados con minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (European Commission 2023) y maximizar la eficiencia en el uso de RRNN.

La necesidad de ciertos países de migrar hacia una economía basada en recursos biológicos toma fuerza en cuanto representa una respuesta a los desafíos ambientales, pero también puede permitir la reducción de la dependencia de una región o país de productos manufacturados y combustibles fósiles importados dentro del sistema internacional de comercio.

Las biorrefinerías por sí mismas representan una herramienta para que los procesos productivos transiten el camino del desarrollo sustentable. Es aquí donde el concepto de economía circular junto con el de biorrefinerías se potencian para maximizar el uso de los RRNN y minimizar el uso de energía con la menor cantidad de emisiones posibles.

Con el fin último de afrontar las problemáticas y desafíos globales anteriormente mencionados, se requiere la combinación equilibrada de experiencia industrial y compromiso con el desarrollo sustentable durante el procesamiento de los RRNN. Una transición de forma desordenada hacia un uso integral de RRNN, caracterizada por trayectorias divergentes entre sectores, separará aún más a los actores creando barreras para la cooperación (WEF 2022). Para evitar estos errores el foco debe estar puesto no solo en la etapa industrial. Las decisiones clave con respecto a la selección y el uso adecuado de las materias primas, la selección de bioproductos, la planificación de la producción y las tareas de distribución, también deben abordarse y evaluarse adecuadamente en conjunto para garantizar la gestión sustentable de toda la cadena de valor (Ekşioğlu *et al.* 2009, Sharma *et al.*, 2013). Aquí el diseño y gestión adecuados de las cadenas de suministros (CS) de las biorrefinerías de forma estratégica toma un papel predominante.

1.4 Diseño de cadenas de suministros de biorrefinerías

La CS de una compañía industrial está constituida por proveedores, fábricas, almacenes y centros de distribución hacia el mercado conectados entre sí por lazos de intercambio de materiales, información o valores (Shapiro 2004). Las materias primas son adquiridas, transformadas y entregadas a los centros de consumo para satisfacer la demanda de los clientes. La posibilidad de llevar a cabo una gestión integrada de las actividades y

procesos puede reducir la propagación de eventos inesperados o indeseables y mejorar el beneficio de las partes involucradas (Simchi-Levi *et al.* 2021).

La gestión de las CS (GCS) se puede llevar a cabo en diferentes niveles de planificación: estratégico, táctico u operacional. El diseño de la red y estructura de la CS corresponde al nivel estratégico ya que las decisiones tomadas van a permanecer en períodos de tiempos prolongados, del orden de años (Shapiro 2006).

La naturaleza regional de la producción de biomasa y su carácter perecedero plantean limitaciones particulares e inevitables que deben abordarse en cuanto al suministro, recolección, transporte y almacenamiento de insumos biomásicos y bioproductos (Cardoen *et al.* 2015). En especial, los aspectos logísticos deben considerarse cuidadosamente para integrar los procesos productivos con los de provisión de biomasa y de distribución de bioproductos a los mercados (Ubando *et al.* 2020).

La GCS de biorrefinerías es una tarea compleja en la que se deben tomar numerosas decisiones de diseño, planificación de la producción y distribución de productos (Espinoza Pérez *et al.* 2017) con el objetivo de aumentar las ventas y, al mismo tiempo, reducir los gastos operativos y de inventario (Hugos 2018). Un pensamiento más adecuado, en el marco del desarrollo sostenible, busca la GCS sustentables al diseñar CS implementando prácticas “verdes” sin descuidar los pilares de la sustentabilidad (Paksoy *et al.* 2019). Por ello, en los últimos años ha sido creciente el interés por evaluar el desempeño de las CS en múltiples aspectos: operacional, económico, ambiental y social (Avelar-Sosa *et al.* 2019).

La programación matemática y las técnicas de optimización en general resultan muy útiles como herramientas idóneas para la GCS (Geunes y Pardalos 2005, Voß y Woodruff 2006, Fazlollahtabar 2018), en especial para las tareas de planificación en la industria de procesos (Engell 2008). Sin embargo, los problemas de GCS se vuelven más complejos cuando se incorporan múltiples criterios de sustentabilidad (Lawrence *et al.* 2010), múltiples materias primas (biomasa) a procesar y una extensa cartera de bioproductos (Eskandarpour *et al.* 2015).

Desde el punto de vista ambiental, el desarrollo sustentable requiere que los impactos adversos sobre la calidad del aire, el agua y otros elementos naturales se minimicen para mantener la integridad general del ecosistema (Keeble 1988). Como consecuencia, la biorrefinación sustentable requiere especial esfuerzo en la minimización del consumo de

materiales y energía externos, la reducción y reúso de residuos, materiales tóxicos y gases para evitar sus consecuencias en la salud humana y el ambiente (Dimian *et al.* 2019). Además, la provisión de materias primas, las etapas de transporte, el almacenamiento de productos y su uso tienen un papel importante en el desempeño ambiental global del sistema (sustentabilidad de la CS) (Khan 2018).

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) constituye una metodología esencial para evaluar el impacto ambiental de implementar estrategias orientadas a la mejora ambiental y la economía circular (ISO 14040, ISO 14044, Hauschild 2018, Peña *et al.* 2021). En el Capítulo 3, se presenta la descripción y el estado del conocimiento sobre el uso de LCA para la evaluación del desempeño ambiental de CS y los perfiles ambientales de la biomasa y sus bioproductos derivados considerados en esta Tesis.

Un concepto estrechamente relacionado con el desarrollo sustentable es el de ecoeficiencia. La ecoeficiencia asociada a un sistema contempla su desempeño económico y ambiental. Sin embargo, lograr que un proceso (o los productos obtenidos) sea ecoeficiente no es suficiente para garantizar su sustentabilidad. Es imperativo integrar los aspectos sociales (por ejemplo: creación de empleo, ingresos dignos, etc.) que han recibido menos atención que las dimensiones económica y ambiental y cuya inclusión en la bibliografía no es común, presumiblemente debido a la complejidad de su análisis (Yawar y Seuring 2017, Mani y Delgado 2018). Así, por ejemplo, el proyecto de implementación de una biorrefinería para valorizar los recursos locales de biomasa puede considerar como objetivos claves la rentabilidad (pilar económico) y la creación de puestos de trabajo (pilar social) minimizando los impactos negativos en el ambiente (pilar ambiental) (Dimian *et al.* 2019).

Hoy en día, la GCS basadas en RRNN es un área de investigación muy activa y se han desarrollado muchos trabajos de modelado y optimización en todo el mundo sobre CS de biorrefinerías de diferentes tipos, con diferentes objetivos y en diferentes contextos. Un estado del conocimiento de esta área de investigación se presenta en el Capítulo 2.

1.5 Contexto regional

1.5.1 La bioeconomía

Se encuentran en la bibliografía numerosas definiciones de bioeconomía. Algunos autores la consideran como una rama de la economía, otros la asocian a un paradigma productivo en ciernes basado esencialmente en un modelo de transformación sustentable

de RRNN renovables a escala temporal humana, y otros hacen referencia a la bioeconomía como a un conjunto de estrategias nacionales de apropiación y puesta en valor de RRNN (Anlló y Bisang 2015).

Una visión de la bioeconomía aceptada a nivel local la define como la producción, transformación mediante nuevas tecnologías y uso innovador de los RRNN para agregar valor localmente y generar oportunidades nuevas, eficientes y sustentables de producción, utilización y consumo de tales recursos (Lengyel y Zanazzi 2020). La principal característica de esta visión es su amplitud en cuanto a todos los actores involucrados en las actividades, ya que incluye todos los sectores basados en RRNN y también involucra a los sectores que usan estos recursos (por ejemplo, la industria). En consecuencia, la bioeconomía no es un sector más de la economía, sino que implica una estrategia productiva transversal tendiendo hacia una “red de redes” basadas en RRNN caracterizada por la transectorialidad e interdisciplinariedad (Rodríguez *et al.* 2018).

Dentro de este paradigma, un principio rector es producir más con menos. Esto implica el procesamiento de residuos en la etapa industrial tendiente a “efluentes cero” donde se logra el máximo aprovechamiento y valorización de la biomasa. En aspectos como este, es necesario el aporte de conocimiento e inversiones y la inclusión de objetivos acordes en políticas públicas. La generación de biomasa en grandes cantidades, de manera sustentable y equilibrada, es parte de la base del nuevo equilibrio que se alcance (Anlló y Bisang 2015). Por ende, aquellas regiones con gran capacidad de generación de biomasa serán centrales para poder cumplir con los objetivos socio-económico-ambientales del futuro.

El concepto de bioeconomía abarca a las biorrefinerías como herramienta o medio, en el campo de la producción industrial, para cumplir sus objetivos, tendiendo a un uso más eficiente y sustentable de la biomasa. Las biorrefinerías representan el claro ejemplo de adscribir las actividades de procesamiento, tanto de alimentos como de no-alimentos, al marco de la bioeconomía. Según el tipo de biomasa utilizada, se abre un abanico muy amplio de sectores económicos que pueden estar vinculados a la bioeconomía (agropecuaria, forestal, alimenticio, acuícola, químico y de materiales y energético) y que conformarán la red de la bioeconomía (Anlló y Bisang 2015).

1.5.2 La bioeconomía en la Argentina

La República Argentina posee un extenso territorio, gran variedad climática y de biodiversidad, una importante superficie de bosques nativos e implantados, y sectores agrícola-ganaderos y agroindustriales altamente competitivos que le conceden múltiples oportunidades para el desarrollo de la bioeconomía local. También cuenta con regiones con un discreto desarrollo de la bioeconomía manifiesto en cadena de valor de diferentes materias primas. Es un país que se caracteriza por avances importantes en cuanto a producción primaria, pero menores en los ámbitos industrial y biotecnológico.

Se puede posicionar a la Argentina como un país de alto potencial bioeconómico, tal como lo verifica el Proyecto WISDOM (FAO 2009) donde se concluye que la biomasa argentina, en términos energéticos, puede satisfacer el 47 % de la demanda primaria del país. Sin duda, el fuerte es la abundancia de recursos ecosistémicos en ciertas regiones. Sin embargo, aún no presenta grandes aportes desde el punto de vista de nuevos procesos para la producción de bioproductos. Particularmente, en las últimas décadas, la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiésel) representa importantes avances en materia de un aprovechamiento más integral de la materia prima biomásica (caña de azúcar, maíz y soja) con respecto a otras actividades agroindustriales. Estos indicios constituyen un buen punto de partida para el desarrollo de nuevas cadenas de valor en los que se verifica la importancia del apoyo del Estado mediante políticas públicas y el interés de nuevos inversores para lograr el despliegue de la bioeconomía argentina.

Asimismo, se debe destacar la necesidad de conocimiento industrial y científico, para lo cual el país cuenta con instituciones especialistas en cada biorregión, entre ellas, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y las universidades públicas y privadas. Orientar más recursos a la innovación productiva es condición para garantizar un crecimiento sostenido, basado en una mejora sistemática de la productividad y la competitividad de la Argentina (PNUD 2013). El Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030 (PNCTI 2023) y la creación de Programa Nacional de Bioeconomía para la Innovación y el Desarrollo Regional (MINCYT 2022) son pasos importantes para la innovación en la Argentina en materia de bioeconomía.

Por lo general, todos los proyectos nacionales dentro del marco de la bioeconomía deben tener como objetivo último un perfil de bioeconomía integrado y avanzado entre regiones

o dentro de una misma región bioeconómica. Es por este motivo que se viene avanzando en definir las biorregiones en la Argentina (Lengyel y Zanazzi 2020), tarea compleja por la heterogeneidad antes mencionada. Sin embargo, en función del tipo de cobertura vegetal y la contigüidad espacial de las regiones se han definido las biorregiones presentadas en la Fig. 1.2.

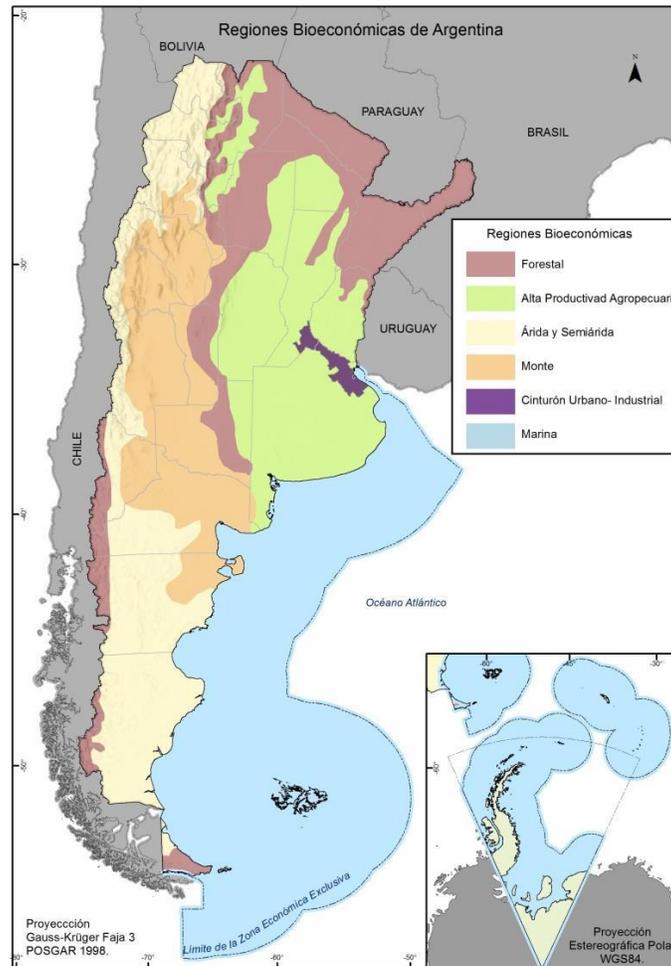


Figura 1.2. Mapa de las regiones bioeconómicas (biorregiones) de la Argentina (tomado de La Bioeconomía Argentina Nuevas Opciones de Desarrollo – Lengyel y Zanazzi 2020).

La dimensión “biorregional” tiene un rol muy importante llevando a la especialización territorial que surge de analizar las diferentes especializaciones temáticas de bioeconomía en regiones argentinas. Esto conlleva a unificar esfuerzos hacia ciertas direcciones específicas para cada biorregión.

La biorregión agropecuaria de alta productividad se extiende por la llanura pampeana fértil con continuidad en el oeste y norte, caracterizada por cultivos de soja, y por los

sectores no áridos de la provincia de Tucumán, Salta y partes de Jujuy, caracterizada por cultivos de caña de azúcar, granos y cítricos. En el Noroeste del país, se encuentra la provincia de Tucumán que participa de la biorregión de alta productividad agropecuaria, ya que presenta principalmente cobertura de cultivos de caña de azúcar y limón y concentra su industrialización a nivel nacional (MH 2018, Lengyel y Zanazzi 2020). Como se aprecia en la Fig. 1.3, las extensiones de cultivos de caña de azúcar y limón abarcan gran superficie de la provincia: 276.400 hectáreas destinadas al cultivo de caña de azúcar y 45.660 hectáreas al cultivo de limón (EEAOC 2021 y 2022).

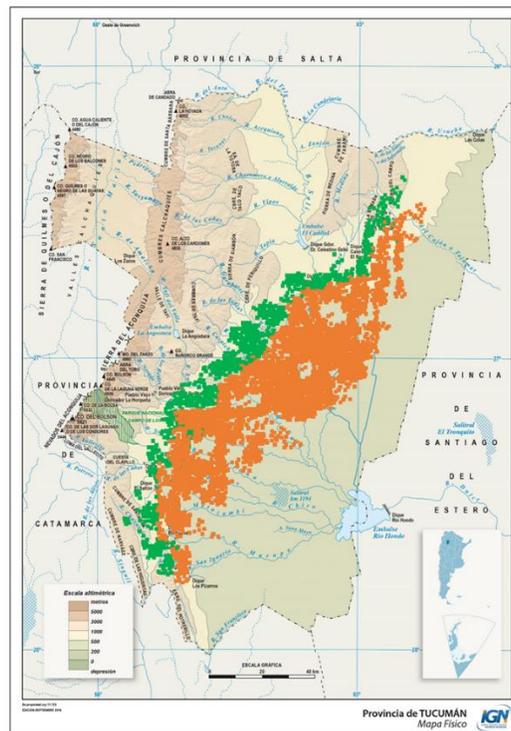


Figura 1.3. Distribución espacial de los cultivos de caña de azúcar (naranja) y cítricos (verde) implantados en la provincia de Tucumán (elaborado en base a reportes agroindustriales de EEAOC, EEAOC 2021 y 2022; mapa autoría del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina²).

En esta biorregión, los impulsores son complejos industriales ya existentes con un fuerte potencial industrial y tecnológico que intentan responder a las nuevas demandas y abrir nuevos mercados con productos de base biológica o que buscan una mayor competitividad a través de procesos de producción nuevos y más eficientes. Esto

² <https://www.ign.gov.ar/>

convierte al Noroeste del país y, en particular, a la provincia de Tucumán en un actor importante hacia el desarrollo de la bioeconomía en el país ya que las actividades agrícolas que allí se desarrollan pueden ser la base para la producción de alimentos, nuevos productos de base biológica, biocombustibles y bioenergía.

A continuación, se analizan brevemente las industrias de la caña de azúcar y el limón de la provincia de Tucumán y su potencial para implementar cambios y aportar a una bioeconomía basada en el establecimiento y operación de biorrefinerías. Estos cultivos son objeto de los casos de estudio desarrollados en este trabajo de Tesis.

1.5.3 La industria de la caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es el principal cultivo agrícola del mundo por volumen (FAOSTAT 2023) y la industria de la caña de azúcar está lista para convertirse en un participante clave en el crecimiento de la producción global de biocombustibles, bioenergía y bioproductos (O'Hara y Mundree 2016). Para desarrollar industrias y procesos sustentables sobre la base de caña de azúcar, se deben realizar mejoras significativas en el área de logística integrada para la caña de azúcar y sus derivados, reducción del uso de agua y energía de proceso, valorización de subproductos, producción de productos de segunda generación (2G), entre otros (De Matos *et al.* 2019).

La provincia de Tucumán es la principal productora de caña de azúcar de la Argentina, de cuyo procesamiento se obtiene alrededor del 70% de la producción nacional de azúcar (CAA 2023) y, además, se coproduce bioetanol de primera generación (1G) a partir de las melazas efluentes del proceso. La economía de la provincia depende fuertemente de la actividad sucroalcoholera y es de crucial importancia como fuente de empleo en la zona norte de la biorregión (Tucumán, Salta y Jujuy). Es así que, por ejemplo, en el año 2014, la producción de caña representó el 47,6 % del valor agregado del sector agropecuario provincial y 4,8 % del total del Valor Bruto de Producción Nacional (MH 2018).

En sus comienzos, la industria solo producía azúcar en un proceso con numerosos residuos, entre los que destacan el bagazo, los residuos agrícolas de cosecha (RAC) y las melazas (Fig. 1.4 A). Se considera que la región ya tiene antecedentes en el contexto de la bioeconomía, y las fábricas de azúcar (ingenios) son el claro ejemplo ya que migraron de una industria exclusivamente azucarera hacia la industria sucroalcoholera, produciendo bioetanol a partir de las melazas residuales (Fig. 1.4 B). También se atribuye a una acción

de economía circular la utilización del bagazo como fuente de energía en las calderas de los ingenios, lo que logró reemplazar el consumo de energía fósil del proceso.

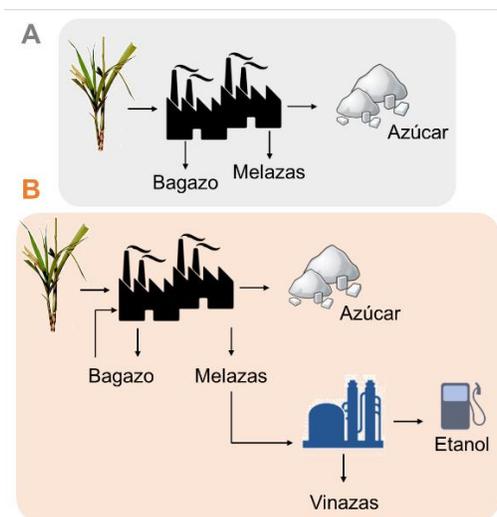


Figura 1.4. Esquema simplificado de la primera industria azucarera tucumana (A) y de la actual industria sucroalcoholera tucumana (B).

La producción de bioetanol creció a partir de la Ley de Biocombustibles (implementada en 2010), ya que en 2016 hubo un aumento en el corte de naftas con este alcohol, del 10% al 12% en volumen, que se prevé seguirá aumentando hasta alcanzar un corte del 25%. Esta política ocasionó que, en los últimos años, la industria sucroalcoholera presente una tendencia a la baja en la producción de azúcar en simultáneo con una reconfiguración hacia la elaboración de bioetanol (MH 2018). En este camino, la industria de la caña de azúcar es una candidata para la producción de nuevos productos de mayor valor agregado a través del concepto de biorrefinería (Sherpa *et al.* 2017, Santos *et al.* 2020), y así poder diversificar la matriz productiva incorporando tecnologías para obtener nuevos productos: electricidad, biopolímeros (Vaz Rossell *et al.* 2005), biogás, y productos químicos (Mariano *et al.* 2013; Machado *et al.* 2016), operándose las plantas como verdaderas biorrefinerías a partir del recurso vegetal (Chandel y Silveira 2017) (Fig. 1.5). Con el fin de aumentar la productividad, se pueden procesar las fracciones lignocelulósicas de la caña de azúcar como el bagazo (residuo fibroso de la molienda de la caña de azúcar) y los RAC (parte de las hojas y el despunte generados en la cosecha) para la obtención de azúcares hidrolizados susceptibles de seguir su camino hacia la producción de bioproductos de base lignocelulósica, por ejemplo, bioetanol 2G (Macrelli *et al.* 2012, Gubicza *et al.* 2016, Mesa *et al.* 2016, Mandegari *et al.* 2017). Se han realizado

trabajos de caracterización a nivel provincial de este material lignocelulósico (Manfredi 2018), donde se destaca su atractivo para la producción de azúcares fermentables debido a su alto contenido en polisacáridos. Esto motiva el procesamiento posterior hacia biocombustibles 2G (De Araújo Guilherme *et al.* 2019) y bioproductos 2G (Poppe *et al.* 2017).

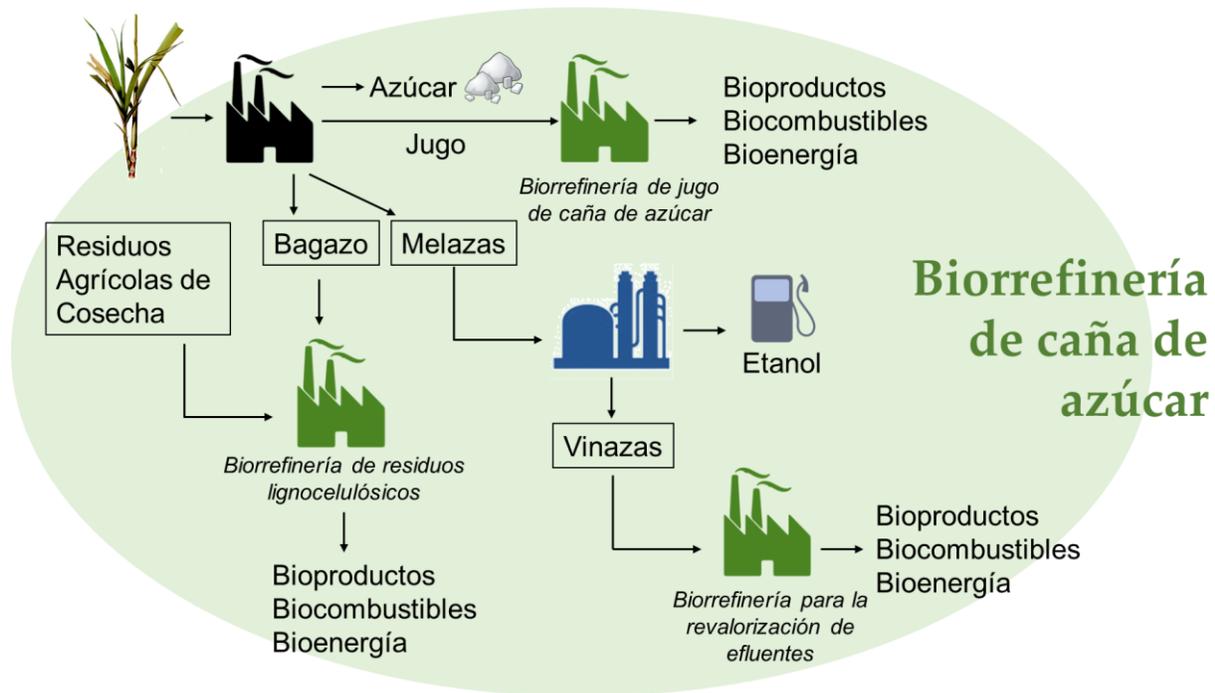


Figura 1.5. Esquema simplificado de una biorrefinería aplicada al procesamiento de caña de azúcar.

1.5.4 La industria del limón

La industria de los cítricos es una de las industrias de procesamiento de frutas más grandes del mundo. En el caso del limón (*Citrus × limon*), además de la fruta fresca, se obtienen principalmente dos productos derivados: jugo concentrado y aceite esencial (USDA 2021). La Argentina es uno de los ocho mayores productores mundiales de limón y el primer procesador mundial de esta fruta (Federcitrus 2018). En el Noroeste Argentino, la provincia de Tucumán, centro de la biorregión de alta productividad agrícola, se destaca por la producción e industrialización de limones (Lengyel y Zanazzi 2020). Esta provincia representa alrededor del 75 % de la producción nacional de limones, de cuyo total, un 75 % se destina para industrialización y 25 % para su venta como fruta fresca (Federcitrus 2018). El país participa fuertemente en el mercado mundial con jugo concentrado, cuya producción es de 65.000-75.000 t/año frente a las 120.000 t/año de

demanda mundial (Juice Hedge 2021), y aceite esencial, con un valor de mercado muy alto (aprox. US\$ 35.000 por tonelada) (Rodríguez *et al.* 2019). Además del jugo concentrado y el aceite esencial, se producen como coproductos pulpa de limón y cáscara deshidratada en algunas fábricas de la región (Fig. 1.6 A).

Al analizar la industrialización del limón en su esquema actual, especialmente en América del Sur, aparece una situación especial: la mayor parte de la cáscara de limón se deshidrata y se envía a Europa o a América del Norte para la producción de pectina, en un proceso poco rentable y altamente dependiente de combustibles fósiles. Además, durante el proceso de industrialización se genera una cantidad apreciable de residuos que se caracterizan por su bajo costo, gran volumen (50 % en peso de lo que ingresa) y alto contenido de carbohidratos (Satari y Karimi 2018).

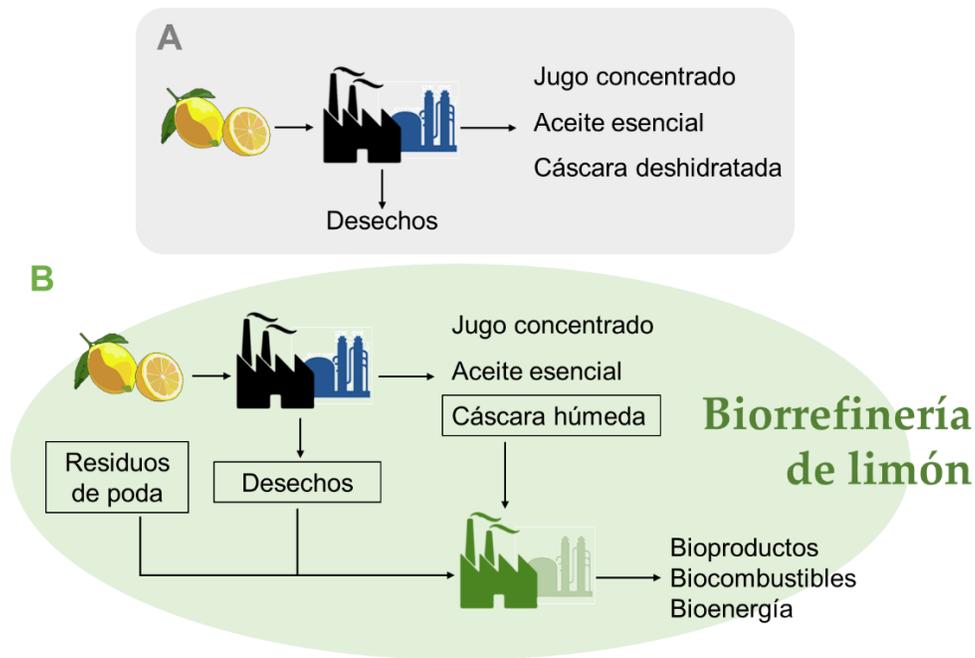


Figura 1.6. Esquema simplificado de la actual industria cítrica tucumana (A) y de una biorrefinería aplicada al procesamiento de limón (B).

El agregado de valor a estas fracciones de desecho y a la cáscara de limón (en lugar de secarla y exportarla) se ve favorecido por la posibilidad de obtener azúcares fermentables mediante procesos que operan en condiciones moderadas de temperatura y presión, lo que reduce sustancialmente los costos de producción. De esta manera, podría imaginarse una planta procesadora de limones como una biorrefinería (Fig. 1.6 B) con diferentes procesos para la valorización de los cítricos, por ejemplo, producción de ácido succínico,

etanol, biogás, pectina, enzimas, proteína celular y terpenos (limoneno) (Pourbafrani *et al.*, 2010).

En los últimos años, en materia de políticas públicas, se estableció el Programa RenovAr que busca dar apoyo a la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (RenovAr 2023). Esto permitió impulsar la producción de biogás a partir de efluentes cítricos y establecer una planta de generación de energía eléctrica como coproducto disponible para la venta, lo que aumenta el beneficio económico de la actividad global. Estas acciones son concebidas bajo una filosofía de economía circular en un marco de bioeconomía regional. Los antecedentes mencionados demuestran la factibilidad de encaminar industrias específicas, en este caso las más importantes de la provincia, dentro de proyectos de índole bioeconómico.

1.6 A modo de conclusión

En la última década, la bioeconomía aparece como un paradigma tecno-productivo en formación. Para la Argentina puede representar una vía hacia el desarrollo del país, aunque requiere nuevos proyectos e iniciativas promovidos por autoridades públicas regionales y locales, por grupos y empresas privadas, o por universidades, centros de investigación o proveedores de servicios de tecnología e innovación para su despliegue a nivel biorregional. El desarrollo de biorrefinerías es clave para participar en un entorno de bioeconomía, permitiendo producir productos de mayor valor agregado, biocombustibles y bioenergía en simultáneo. En este contexto, la provincia de Tucumán presenta un futuro prometedor a partir de sus agroindustrias más representativas: de la caña de azúcar y del limón.

Para que la transición hacia CS de biorrefinerías sea eficiente, es preciso identificar *a priori*, mediante una planificación estratégica, la inversión necesaria para implementar las tecnologías de procesamiento adecuadas y la distribución de los flujos de materiales y energía a lo largo de toda la CS en propuestas que resulten sustentables —de óptimo desempeño económico, ambiental y social—. Esta Tesis contribuye a los ODS 12 y 13 y busca, en resumen, realizar aportes en el diseño de CS óptimas de biorrefinerías con criterios de sustentabilidad teniendo en cuenta las circunstancias regionales.

1.7 Objetivos y estructura de la Tesis

Esta Tesis doctoral tiene como objetivo general: realizar tareas de investigación y desarrollo en el área de sistemas de soporte a la toma de decisiones para la GCS y la planificación estratégica del sector de la agroindustria regional, considerando simultáneamente aspectos técnicos, económico-financieros y ambientales.

Dentro de este marco se plantean tres objetivos específicos:

- (i) Desarrollar estrategias de optimización basadas en programación matemática para resolver cuestiones relacionadas con la CS de biorrefinerías regionales (planificación de la producción, gestión de recursos, matriz productiva, etc.) en ambientes multi-criterio.
- (ii) Estudiar la sustentabilidad de las CS de biorrefinerías mediante la consideración explícita de aspectos ambientales con herramientas tales como el LCA. Determinar el desempeño ambiental de los diferentes componentes de estas CS.
- (iii) Demostrar la utilidad práctica de los algoritmos y métodos que se desarrollen mediante aplicaciones académicas e industriales, para dar mayor flexibilidad, competitividad y rentabilidad al sector productivo, con vistas a mejorar la posición de estas empresas en los mercados y favorecer el desarrollo y la sustentabilidad de la región.

La Tesis está estructurada de la siguiente manera:

Primeramente, se presenta un estado del conocimiento del modelado matemático y la optimización (Capítulo 2) aplicados a CS de biorrefinerías. Se señala el aporte de esta Tesis en este ámbito y luego se describe la formulación de un modelo lineal mixto entero (MILP) que busca minimizar el costo total con el fin de diseñar CS que responden a determinados parámetros de disponibilidad de biomasa y patrones de demanda de bioproductos. Se analizan las capacidades del modelo propuesto a través de cuatro escenarios potenciales de biorrefinerías de caña de azúcar a escala real ubicados en la Argentina.

A continuación (Capítulo 3), se realiza un análisis bibliográfico de la metodología e indicadores para la evaluación ambiental de sistemas y productos. Se hace hincapié en aquellos utilizados para representar el desempeño ambiental de las CS de biorrefinerías. Luego, para poder calcular los indicadores correspondientes, se adaptan y elaboran inventarios para cada componente de la CS planteada en el modelado anterior (es decir, producción de materia prima, transporte, procesamiento de biomasa, etc.). Finalmente,

se realiza un análisis de escenarios, en este caso, de biorrefinerías de limón y estrategias de economía circular mediante múltiples indicadores de LCA.

En el Capítulo 4, se propone una metodología para el diseño y selección de CS sustentables. Se plantea un enfoque de diseño de CS basado en el modelo del Capítulo 2 del que resultan diferentes CS que responden a distintos patrones de demanda de bioproductos, seguido de una clasificación basada en el modelo de análisis envolvente de datos (DEA) para evaluar la eficiencia de cada una de las CS de acuerdo con diferentes indicadores económicos, ambientales (como los evaluados en el Capítulo 3) y sociales. La utilidad de este enfoque se demuestra a través de un caso de estudio centrado en el diseño de CS de biorrefinerías en el Noroeste Argentino a partir de biomasa regional (caña de azúcar y limón).

Por último (Capítulo 5), se presentan las conclusiones de la Tesis y se plantean líneas de trabajo futuro que puedan derivarse.

1.8 Referencias

Anlló, G., Bisang R. (2015). Bioeconomía. Cambio estructural, nuevos desafíos y respuestas globales: Una ventana de oportunidad para las producciones basadas en Recursos Naturales Renovables. *Series Tendencias, diagnósticos y prospecciones*. Unidad para el Cambio Rural (UCAR). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.

Aresta, M., Dibenedetto, A., Dumeignil, F. (Eds.). (2021). *Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels: Towards Circular Economy*. Walter de Gruyter GmbH y Co KG.

Avelar-Sosa, L., García-Alcaraz, J. L., Maldonado-Macías, A. A. (2019). Evaluation of Supply Chain Performance. *Management and Industrial Engineering*. Cham: Springer International Publishing.

CAA. (2023) Centro Azucarero Argentino. <http://centroazucarero.com.ar> (consultado en abril de 2023).

Cardoen, D., Joshi, P., Diels, L., Sarma, P. M., Pant, D. (2015). Agriculture biomass in India: Part 1. Estimation and characterization. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.003>

Chandel, A., Silveira, M. H. L. (Eds.). (2017). *Advances in sugarcane biorefinery: technologies, commercialization, policy issues and paradigm shift for bioethanol and by-products*. Elsevier.

Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>

Araujo Guilherme, A., Dantas, P. V. F., Padilha, C. E. de A., dos Santos, E. S., de Macedo, G. R. (2019). Ethanol production from sugarcane bagasse: Use of different fermentation strategies to enhance an environmental-friendly process. *Journal of Environmental Management*, 234 (diciembre 2018), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.102>

De Matos, M., Santos, F., Eichler, P. (2019). Sugarcane world scenario. En *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00001-9>

Dimian, A. C., Bildea, C. S., Kiss, A. A. (2019). *Applications in design and simulation of sustainable chemical processes*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-06856-3>

EEOC (2021). Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2021 en Tucumán. Reporte agroindustrial. N° 217. ISSN 2346-9102.

EEOC (2022). Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. Estimación del área implantada con cítricos en Tucumán en 2022 y comparación con años precedentes. Reporte agroindustrial. N° 257. ISSN 2346-9102.

Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1342–1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>

Engell, S. (Ed.). (2008). *Logistic optimization of chemical production processes*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527622771>

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>.

Espinoza Pérez, A. T., Camargo, M., Narváez Rincón, P. C., Alfaro Marchant, M. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69 (octubre 2016), 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084>

European Commission. Going climate-neutral by 2050. Sitio web: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (consultado en enero de 2023).

FAO (2009). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Análisis del balance de energía derivada de la biomasa en Argentina - WISDOM Argentina - Informe Final. FAO Departamento. Forestal Dendroenergía, 120. Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/Balance_de_Energia.pdf (consultado en noviembre de 2022).

FAOSTAT. (2023) División de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/es/#data> (consultado en abril de 2023).

Fazlollahtabar, H. (2018). *Supply Chain Management Models: Forward, Reverse, Uncertain, and Intelligent Foundations with Case Studies*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/b22492>

FederCitrus. (2018). Argentine Citrus Federation. The Argentine citrus industry. <https://www.federCitrus.org/statistics> (consultado en enero de 2023).

Geunes, J., Pardalos, P. M. (Eds.). (2005). *Supply chain optimization* (Vol. 98). Springer Science & Business Media.

Giner, C. (2009). New Avenues of Value Creation in the Agro-Food Sector. *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, 13, OECD Publishing, París. <http://dx.doi.org/10.1787/221300175226>

Gubicza, K., Nieves, I. U., Sagues, W. J., Barta, Z., Shanmugam, K. T., Ingram, L. O. (2016). Techno-economic analysis of ethanol production from sugarcane bagasse using a liquefaction plus simultaneous saccharification and co-fermentation process. *Bioresource Technology*, 208, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.093>

Haarich, S., Kirchmayr-Novak, S., Fontenl, A., Toptsidou, M., Hans, S. (2017). Bioeconomy development in EU regions. *Mapping of EU Member States'/regions' Research and Innovation plans & Strategies for Smart Specialisation (RIS3) on Bioeconomy. Final Report*.

Hauschild, M. Z. (2018). Introduction to LCA methodology. En *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_6

Hugos, M. H. (2018). *Essentials of supply chain management*. John Wiley & Sons.

ISO 14040. (2006). Environmental management—life cycle assessment principles and framework. International Organization for Standardization, Suiza, Ginebra.

ISO 14044. (2006). Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Suiza, Ginebra.

Juice Hedge: a reputed fruit juice industry practitioner, www.juicehedge.com/juice/lemon/ (consultado en abril de 2021).

Kalmykova, Y., Sadagopan, M., Rosado, L. (2018). Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135 (febrero 2017), 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>

Keeble, B. R. (1988). The Brundtland report: 'Our common future'. *Medicine and war*, 4(1), 17-25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>.

Khan, O. (2018). *Product Design and the Supply Chain: competing through design*. Kogan Page Publishers.

Lawrence, K. D., Klimberg, R. K., Miori, V. M. (Eds.). (2010). *The supply chain in manufacturing, distribution, and transportation: modeling, optimization, and applications*. CRC press.

Lengyel, M., Zanazzi, L. (2020). Bioeconomía y desarrollo en la Argentina: oportunidades y decisiones estratégicas. <http://www.ciecti.org.ar/publicaciones/bioeconomia-y-desarrollo-en-la-argentina-oportunidades-y-decisiones-estrategicas/> (consultado en junio de 2022).

Machado, P. G., Walter, A., Cunha, M. (2016). Bio-based propylene production in a sugarcane biorefinery: A techno-economic evaluation for Brazilian conditions. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(5), 623-633.

Macrelli, S., Zacchi, G., Mogensen, J. (2012). Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process. *Biotechnology for Biofuels*, 5(1), art. 152. <http://dx.doi.org/10.1186/1754-6834-5-22%0A>

Mandegari, M. A., Farzad, S., Görgens, J. F. (2017). Economic and environmental assessment of cellulosic ethanol production scenarios annexed to a typical sugar mill. *Bioresource Technology*, 224, 314-326. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.074>

Manfredi, A. P. (2018). Desarrollo de estrategias para la producción de bioetanol utilizando hidrolizados de recursos lignocelulósico. Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán.

Mani, V., Delgado, C. (2018). *Supply Chain Social Sustainability and Manufacturing: Measurement and Performance Outcomes from India*. Springer.

Mariano, A. P., Dias, M. O. S., Junqueira, T. L., Cunha, M. P., Bonomi, A., Filho, R. M. (2013). Utilization of pentoses from sugarcane biomass: Techno-economics of biogas vs. butanol production. *Bioresource Technology*, 142, 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.052>

Mesa, L., López, N., Cara, C., Castro, E., González, E., Mussatto, S. I. (2016). Techno-economic evaluation of strategies based on two steps organosolv pretreatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for ethanol production. *Renewable Energy*, 86, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.105>

MH (2018). Ministerio de Hacienda de la República Argentina. Informe de Cadenas de Valor: Caña de Azúcar. ISSN 2525-0221. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadenas_de_valor_azucar.pdf (consultado en enero de 2023).

MINCYT (2022). Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República Argentina. Programa nacional de bioeconomía para la innovación y el desarrollo regional. Resolución 720/2022. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-720-2022-375346> (consultado en enero de 2023).

Naciones Unidas. The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. <https://sdgs.un.org/es/goals> (consultado en junio de 2022).

- O'Hara, I., Mundree, S. (Eds.). (2016). *Sugarcane-based biofuels and bioproducts*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118719862.ch1>
- Paksoy, T., Weber, G. W., Huber, S. (2019). Lean and green supply chain management. *International Series in Operations Research & Management Science*, 273. Springer.
- Peña, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Caldeira-Pires, A., Weidema, B., Mieras, E., Wang, F., Fava, J., Canals, L. M. i., Cordella, M., Arbuckle, P., Valdivia, S., Fallaha, S., Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), 215–220. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>
- PNCTI (2023). Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República Argentina. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/plan-nacional-cti/plan-cti> (consultado en enero de 2023).
- PNUD (2013) Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe nacional sobre desarrollo humano 2013. Argentina en un mundo incierto: Asegurar el desarrollo humano en el siglo XXI. – 1ra ed. - Buenos Aires: Programa Naciones Unidas para el Desarrollo. Disponible en: <https://www.undp.org/es/argentina/publications/informe-nacional-sobre-desarrollo-humano-2013-argentina-en-un-mundo-incierto-asegurar-el-desarrollo-humano-en-el-siglo-xxi> (consultado en noviembre de 2022).
- Poppe, M. K., Nogueira, L. A. H., Macedo, I. D. C. (2017). Second-generation sugarcane bioenergy & biochemicals: advance low-carbon fuels for transport and industry. <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/5118> (consultado en noviembre de 2022).
- Pourbafrani, M., Forgács, G., Horváth, I. S., Niklasson, C., Taherzadeh, M. J. (2010). Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource Technology*, 101(11), 4246–4250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.077>
- RenovAr (2023). Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Ministerio de Economía de la República Argentina. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/renovar> (consultado en enero de 2023).
- Rodríguez G., Paredes V., Pérez D., Salas H. (2019). Reporte agroindustrial 165. Reporte Agroindustrial. Estadísticas y márgenes de cultivos tucumanos. EEAOC. N° 165. ISSN 2346-9102. <https://www.eeaoc.gov.ar/?articulo=ra-165-resultados-productivos-y-economicos-del-cultivo-de-limon-en-tucuman-2017-2018> (consultado en noviembre de 2022).
- Rodríguez, A. G., Miandaini, A. O., Hirschfeld, M. A. (2018). Bioeconomía en América Latina y el Caribe, 2018. Memoria del seminario regional realizado en Santiago, los días 24 y 25 de enero de 2018, 72.
- Santos, F., Eichler, P., Machado, G., De Mattia, J., de Souza, G. (2020). By-products of the sugarcane industry. *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00002-0>
- Satari, B., Karimi, K. (2018). Resources, Conservation & Recycling Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent advances, and future perspectives in total valorization. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 153-167.
- Shapiro J. (2006). *Modelling the Supply Chain*. 2^{da} edición. Pearson. Duxbury.
- Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers and Chemical Engineering*, 28(6–7), 855–861. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.013>
- Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049>

Sherpa, K. C., Rajak, R. C., Banerjee, R. (2017). Sugarcane: A potential agricultural crop for bioeconomy through biorefinery. En *Lignocellulosic Production and Industrial Applications*, 171–196. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119323686.ch8>

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (2021). *Designing & Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. 4^{ta} edición. McGraw-Hill.

Ubando, A. T., Felix, C. B., Chen, W. H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299 (noviembre 2019). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>

USDA. (2021). United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Citrus: World Markets and Trade. July 2021. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf> (consultado en abril de 2023).

Vaz Rossell, C. E., Mantelatto, P. E., Agnelli, J. A., Nascimento, J. (2005). Sugar-based biorefinery–technology for integrated production of poly (3-hydroxybutyrate), sugar, and ethanol. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*, 209-226.

Voß, S., Woodruff, D. L. (2006). *Introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain* (Vol. 240). Springer Science & Business Media.

WEF. World Economic Forum. The Global Risks Report 2022 17th Edition. 2022. Disponible en: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022/> (consultado en diciembre de 2022).

Yawar, S. A., Seuring, S. (2017). Management of Social Issues in Supply Chains: A Literature Review Exploring Social Issues, Actions and Performance Outcomes. *Journal of Business Ethics*, 141(3), 621–643. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2719-9>

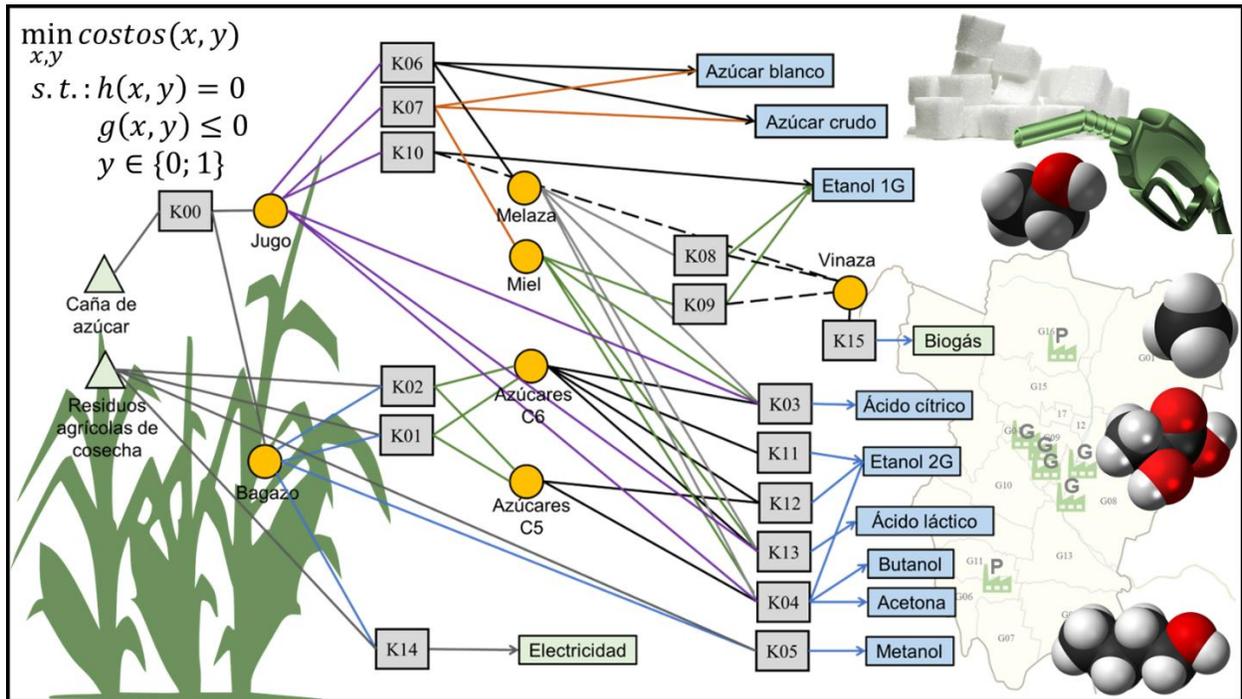
CAPÍTULO 2

Resumen

La caña de azúcar, un recurso agrícola extremadamente abundante, es una materia prima clave para la producción sustentable de biocombustibles y bioproductos (O'Hara y Mundree 2016). Aunque se cultiva principalmente para la producción de azúcar y etanol de primera generación, esta gramínea es una excelente candidata para ser procesada en biorrefinerías. Este capítulo se enfoca en el uso de la programación matemática para la toma de decisiones estratégicas en la cadena de suministros (CS) de la caña de azúcar. Para el diseño, se formula un modelo lineal mixto entero (MILP) que busca minimizar el costo total de una CS con instancias de procesamiento, transporte y almacenamiento que además incluye la selección de una serie de posibles tecnologías y bioproductos diferentes. Las capacidades del modelo propuesto se ilustran a través de un caso de estudio basado en cuatro escenarios a escala real en la Argentina. Los resultados no solo muestran la configuración óptima de la CS para diferentes patrones de demanda, sino también las tecnologías que operan dentro de las biorrefinerías y la posibilidad de recircular recursos. Dado un conjunto de parámetros reales específicos, como la disponibilidad de biomasa, la demanda del producto y los costos unitarios, el modelo es una herramienta útil para establecer políticas estratégicas en el campo de la agroindustria y la bioenergía.

Palabras clave: programación lineal mixta entera; diseño de cadenas de suministros; biorrefinería de caña de azúcar; mínimos costos.

Resumen gráfico



Diseño óptimo de cadenas de suministros de biorrefinerías

2.1 Introducción

La mayoría de los productos y combustibles disponibles comercialmente provienen de materias primas fósiles. Como es común cuando se piensa en reducir gradualmente el consumo de petróleo, es crucial establecer rutas químicas y sus cadenas de suministros (CS³) a partir de fuentes renovables (por ejemplo, biomasa a través de biorrefinerías) para reemplazar a los petroquímicos de manera eficiente y sustentable.

La caña de azúcar es el cultivo agrícola líder en el mundo en volumen de producción (FAOSTAT 2023), y la industria de la caña de azúcar está preparada para convertirse en un participante clave en el crecimiento de la producción global de biocombustibles, bioenergía y bioproductos (O'Hara y Mundree 2016). Para enfrentar los desafíos globales de desarrollar actividades y procesos sustentables en base a la caña de azúcar, se deben realizar mejoras significativas en el área de logística integral de la caña de azúcar y sus derivados, reducir el uso de agua y energía de proceso, valorizar subproductos y desechos, y producir etanol de segunda generación (etanol 2G), entre otras (De Matos *et al.* 2019). Además, las tecnologías y procesos emergentes deben ser capaces de manejar más de un tipo de materia prima para resolver los problemas de estacionalidad y, por lo tanto, reducir el tiempo de inactividad de las biorrefinerías (Ubando *et al.* 2020).

La provincia de Tucumán es la principal productora de caña de azúcar en la Argentina (CAA 2022), satisfaciendo una cuota importante de la demanda nacional de azúcar y bioetanol de primera generación (etanol 1G) (Dujovne *et al.* 2018). El azúcar se destina principalmente al mercado interno y a la industria de alimentos y bebidas, mientras que el bioetanol se utiliza para la mezcla de combustibles regulada por leyes nacionales en una proporción de etanol/combustible de 12% en volumen. La mayoría de las fábricas utilizan bagazo (residuo lignocelulósico de la molienda de la caña de azúcar) para generar vapor y energía eléctrica, cubriendo las necesidades energéticas del proceso. Sin

³ Abreviaturas: 1G: primera generación, 2G: segunda generación, CS: cadena de suministros, MILP: programación lineal mixta entera, RAC: residuos agrícolas de cosecha, TBC: costos de instalación y operación de biorrefinerías, TMC: costos de producción de biomasa, TSC: costos de instalación y operación de almacenes, TTC: costos de transporte de materias primas y productos.

embargo, el bagazo y también los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar (RAC) son materiales lignocelulósicos que contienen polímeros estructurales a partir de los cuales se pueden obtener azúcares (Manfredi 2018) y otros productos valiosos (Santos *et al.* 2019). La implementación de biorrefinerías lignocelulósicas presenta un enorme potencial de uso de biomasa sin competir con productos alimenticios que aún serían coproducidos (por ejemplo, azúcar) y es un mejor enfoque para alcanzar el máximo aprovechamiento de la biomasa disponible por hectárea.

2.2 Estado del conocimiento

La gestión de CS de biorrefinerías es una tarea compleja que requiere tomar numerosas decisiones de diseño, planificación de la producción y distribución de productos (Espinoza Pérez *et al.* 2017). Es un área de investigación muy activa en la que se han desarrollado muchos trabajos de modelado y optimización en todo el mundo sobre CS de biorrefinerías de diferentes tipos, con diferentes objetivos y en diferentes contextos. A modo de ejemplos, se citan algunos de estos trabajos. Ekşioğlu *et al.* (2009) proponen un modelo matemático para gestionar la logística de una biorrefinería orientada a biocombustibles contemplando número, tamaño de las instalaciones y ubicación para producir, transportar y almacenar biocombustibles y utilizando la biomasa disponible en Misisipi (EE. UU.). Mansoornejad *et al.* (2010) presentan una metodología en la que se vincula el diseño de la cartera de productos y de la CS de una biorrefinería forestal con un estudio de las variaciones del mercado a través de la generación de escenarios de precio y demanda aplicada a un caso de estudio en Montreal (Canadá). Ulonska *et al.* (2018) publican un análisis exhaustivo de una CS forestal que incluye la optimización del rendimiento del proceso y la selección de la cartera de productos bajo criterios ambientales y económicos (potencial de calentamiento global y beneficios económicos, respectivamente). Bowling *et al.* (2011) estudian la planificación óptima de la producción y la ubicación de las instalaciones de una biorrefinería que maximiza el beneficio neto general al mismo tiempo que linealiza las funciones de costo. Marvin *et al.* (2013) proponen un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para determinar la ubicación y la capacidad de las instalaciones de procesamiento de biomasa y aplicarlo para evaluar la viabilidad de cumplir con los mandatos gubernamentales de biocombustibles a través de varios tipos de tecnologías de procesamiento y biomasa en el centro oeste de EE. UU. Roni *et al.* (2019) estudian un caso con múltiples fuentes de biomasa para analizar la logística de suministro de materia prima a la biorrefinería a

través de la ubicación de los almacenes, minimizando el costo total de la materia prima entregada. En 2020, Galanopoulos *et al.* (2020) publican un modelo MILP de CS utilizando AIMMS® y un modelo de simulación de planta de proceso en Aspen Plus® para la optimización de una biorrefinería de residuos de cereales en Alemania que produce etanol, levulinato de etilo y electricidad, utilizando una función objetivo económico-ambiental. Es esencial subrayar la importante incertidumbre asociada a los precios de mercado y las demandas de los nuevos bioproductos, así como la necesidad de políticas gubernamentales que apoyen el desarrollo y la aplicación de tecnologías novedosas para la diversificación y ecologización de las industrias actuales (Yue *et al.* 2014). En este sentido, Kim *et al.* (2013) centran su investigación en identificar vías y estrategias óptimas de producción de combustibles dentro de una superestructura de tecnologías conocidas y en desarrollo sin considerar su CS. Santibañez-Aguilar *et al.* (2014) desarrollan un modelo que incluye simultáneamente aspectos económicos, ambientales y sociales en la evaluación del diseño CS de biorrefinerías considerando múltiples materias primas y bioproductos.

Específicamente para la CS de biorrefinerías de caña de azúcar, se han publicado algunas contribuciones, entre las que se pueden mencionar las siguientes: Khatiwada *et al.* (2016) analizan biorrefinerías de caña de azúcar para la producción de energía minimizando costos y emisiones. Se utiliza un modelo MILP y espacialmente explícito para evaluar algunas opciones tecnológicas, el patrón de demanda de energía y el comercio de biocombustibles. Costa *et al.* (2016) tratan un caso de optimización multiobjetivo no lineal con objetivos ambientales y técnicos en conflicto aplicado a una biorrefinería de caña de azúcar brasileña que produce bioetanol (1G y 2G), bioelectricidad y vinaza concentrada. Martínez-Guido *et al.* (2016) abordan la producción de bioetanol a partir de residuos de la industria de la caña de azúcar para construir una biorrefinería sustentable en Michoacán (México) con beneficios económicos, ambientales y sociales. Gilani y Sahebi (2021) proponen un MILP para diseñar una CS internacional de caña de azúcar a biocombustibles también con criterios socioambientales-económicos. El precio de exportación de biocombustibles y las demandas de los mercados interno/externo se encuentran entre los parámetros inciertos de CS abordados a través de la programación probabilística. Morales Chavez *et al.* (2020) se enfocan en las operaciones *upstream* considerando sincronizar el cronograma de corte de caña (mecánico o manual) con el mantenimiento de cosechadoras y elevadores, y el transporte, bajo una perspectiva

multiobjetivo. Kostin *et al.* (2018) y Macowski *et al.* (2020) evalúan la CS de la caña de azúcar brasileña mediante optimización económica y multiobjetivo, respectivamente.

Con respecto a la industria azucarera argentina, Mele *et al.* (2011) desarrollan un modelo bi-objetivo considerando la maximización de la rentabilidad y la minimización del impacto ambiental, integrando la CS nacional de bioetanol y azúcar. Luego, Kostin *et al.* (2012) amplían el modelo anterior considerando la incertidumbre de la demanda, lo cual ha servido como base para el desarrollo de los trabajos en Brasil previamente citados (Kostin *et al.* 2018, Macowski *et al.* 2020).

2.3 Contribuciones de esta propuesta

Si bien muchos trabajos han avanzado en aspectos tales como la consideración de objetivos múltiples y la incertidumbre en los parámetros, en este capítulo se busca profundizar, en primera instancia, en la formulación de un modelo determinístico para abordar otros aspectos en trabajos posteriores (ver Capítulo 4). Luego, una contribución de este trabajo se enfoca en el uso de programación matemática para derivar decisiones estratégicas óptimas hacia la integración de la CS de caña de azúcar, bioetanol, azúcar y nuevos bioproductos, lo que constituye un enfoque novedoso en la Argentina. Para ello es necesario tomar un conjunto de decisiones sobre la topología, las capacidades y los flujos de materiales en la red, que impactan directamente en la economía de la CS. El objetivo principal es transformar la CS de caña de azúcar en una red integrada de biorrefinerías capaz de producir múltiples productos mediante el aprovechamiento integral de la biomasa disponible, lo cual es un tema de interés mundial. Las características más destacables del modelo propuesto son: (i) planificación multiperíodo, (ii) múltiples materias primas (incluyendo la fracción lignocelulósica y residuos), (iii) integración de diferentes tecnologías en las plantas y (iv) cartera multiproducto.

Además, se pueden destacar como contribuciones importantes: (i) el modelado es lo suficientemente general como para representar cualquier CS de biomasa que cubra una amplia gama de actividades, es decir, adquisición y transformación de materias primas, almacenamiento y distribución de productos a los clientes finales, considerando cuidadosamente la inclusión de múltiples tecnologías en cada biorrefinería de la CS; y (ii) la inclusión de recirculación de flujos de energía, biogás y bioelectricidad, que es una posibilidad con ventajas potenciales de rentabilidad de los sistemas basados en biomasa.

El capítulo está organizado de la siguiente manera. Primero se describe brevemente el planteo del problema y la metodología propuesta, y se presenta la formulación matemática del modelo. Luego, el modelo se aplica a un caso de estudio sobre la industria de la caña de azúcar argentina. Las conclusiones se recogen finalmente en el último apartado.

2.4 Planteo del problema y metodología propuesta

Este estudio propone un modelo matemático para determinar la configuración óptima de CS de biorrefinerías basadas en caña de azúcar considerando tres niveles (producción-almacenamiento-mercado) y las decisiones de planificación asociadas que minimicen los costos totales para satisfacer distintos patrones de demanda de los bioproductos a lo largo de un horizonte de planificación dado. Las decisiones por tomar incluyen:

- los flujos de biomasa a procesar
- la cantidad, ubicaciones, capacidades y niveles de producción de las biorrefinerías
- la cantidad, ubicaciones, capacidades y niveles de producción de las tecnologías de conversión que se incluirán en cada una de las biorrefinerías
- la cantidad, ubicaciones y capacidades los centros de almacenamiento
- las rutas y modos o tipos de transporte entre regiones de la red resultante
- las cantidades de productos a entregar en los puntos de demanda

2.5 Formulación matemática

El modelo propuesto para la CS de caña de azúcar resulta una formulación MILP. Se consideran las siguientes actividades de la CS, tanto vigentes como potenciales, de la industria azucarera argentina: producción agrícola, procesamiento, almacenamiento de productos, distribución y comercialización. El modelo se caracteriza por ser multi-período, multi-materia prima y multi-producto. Los símbolos, índices y conjuntos utilizados en la formulación se encuentran enumerados completamente en la sección Notación, al final del capítulo.

La función objetivo está representada por los costos totales actualizados asociados a la CS y consiste en la suma de los costos relacionados con la producción de biomasa (TMC), la instalación y operación de biorrefinerías (TBC), la instalación y operación de almacenes (TSC) y el transporte de materias primas y productos (TTC), en toda la CS.

El modelo distingue entre tipos de materiales según sean estas materias primas, productos intermedios o productos finales. También, entre las regiones, se diferencian aquellas que pueden ser productoras de biomasa, las que puedan albergar biorrefinerías, donde se pueden instalar almacenes y las que puedan representar puntos de demanda para productos.

Los TMC para cualquier período de tiempo t se calculan multiplicando los costos unitarios de producción (θ_i^{V0}) de cada tipo de materia prima $i \in IR(i)$ por la cantidad anual de materia prima producida y consumida en la región $g \in GH$ ($H_{i,g,t}$) más la cantidad anual producida y consumida en la región g que va a otras regiones $g' \in GB$ (el segundo término entre paréntesis) (Ec. 2.1). El conjunto $IL(i, l)$ relaciona el material i con su correspondiente modo de transporte l . Si bien el modelo puede extenderse a otras CS basadas en biomasa, si se considera como ejemplo el caso de cultivo de caña de azúcar, habría dos materias primas, la caña de azúcar, cuyo costo de producción incluye los costos de cultivo y cosecha de la caña y de los RAC. Los costos asociados a estos últimos incluyen el hilerado o acordonado, el enfardado y la recolección (Casen *et al.* 2014).

$$TMC_t = \sum_{g \in GH} \sum_{i \in IR} \theta_i^{V0} (H_{i,g,t} + \sum_{g,g' \in GB, g' \neq g} \sum_{i,l \in IL} Q_{i,l,g,g',t}) \quad \forall t \quad (2.1)$$

Los requerimientos de materia prima están limitados por la capacidad de la plantación de caña de azúcar existente ($CapCrop_{i,g,t}$) en las regiones $g \in GH(g)$ (Ec. 2.2). El parámetro $\eta_{i,g,t}$ representa el porcentaje de disponibilidad de materia prima a causa de factores externos como pueden ser las condiciones climáticas.

$$H_{i,g,t} + \sum_{g,g' \in GB, g' \neq g} \sum_{i,l \in IL} Q_{i,l,g,g',t} \leq \frac{\eta_{i,g,t}}{100} CapCrop_{i,g,t} \quad \forall i \in IR, g \in GH, t \quad (2.2)$$

En las regiones $g \in GB(g)$, se pueden instalar biorrefinerías b de capacidad cb con tecnologías de procesamiento de biomasa k de capacidades ck . Para las biorrefinerías, las capacidades se expresan en toneladas por año de materia prima, para las tecnologías se expresan en toneladas por año de su producto de salida (ya sea producto final o producto intermedio). Los TBC para cualquier período de tiempo t están compuestos por los costos fijos asociados a la instalación de cada tecnología ($\theta_{k,ck}^{F1}$) y sus costos unitarios de producción (θ_k^{V1}), según el nivel de producción $X_{k,b,g,t}$, en el período t , expresado en toneladas por año (Ec. 2.3). $X_{k,b,g,t}$ son variables continuas que representan la cantidad producida por la tecnología k en un período de tiempo t para satisfacer las restricciones de demanda en los mercados. Teniendo en cuenta las relaciones de masa asociadas a las

tecnologías, la conversión de los insumos en coproductos es sencilla. La variable binaria $z_{k,ck,b,g,t}$ es igual a 1 si la tecnología k con capacidad ck está instalada en una biorrefinería b en la región g en el período t , y 0 en caso contrario.

$$TBC_t = \sum_{g \in GB} \sum_b \sum_k \sum_{ck} \theta_{k,ck}^{F1} z_{k,ck,b,g,t} + \sum_{g \in GB} \sum_b \sum_k \theta_k^{V1} X_{k,b,g,t} \quad \forall t \quad (2.3)$$

El nivel de producción de una tecnología dada k está limitado (Ec. 2.4) por la capacidad ($Kcapmax_{k,ck}$) que toma valores discretos: pequeño, mediano o grande. Las ecuaciones 2.5 a 2.7 son restricciones de existencia asociadas a la instalación de biorrefinerías y tecnologías en una región $g \in GB(g)$. La variable binaria $y_{cb,b,g,t}$ es igual a 1 si se instala una biorrefinería b con una capacidad total cb en la región g y tiempo t , y 0 en caso contrario.

$$X_{k,b,g,t} \leq \sum_{ck} \sum_{t' \leq t} z_{k,ck,b,g,t'} Kcapmax_{k,ck} \quad \forall k, b, g \in GB, t \quad (2.4)$$

$$z_{k,ck,b,g,t} \leq \sum_{t'} \sum_{cb} y_{cb,b,g,t'} \quad \forall k, ck, b, t, g \in GB \quad (2.5)$$

$$\sum_{ck} \sum_t z_{k,ck,b,g,t} \leq 1 \quad \forall k, b, g \in GB \quad (2.6)$$

$$\sum_{cb} \sum_t y_{cb,b,g,t} \leq 1 \quad \forall b, g \in GB \quad (2.7)$$

La cantidad de materia prima producida y requerida en una región g así como la materia prima que proviene de otras regiones g' deben distribuirse entre cada una de las biorrefinerías existentes b (Ec. 2.8 y 2.9) (Fig. 2.1 A). La cantidad disponible de biomasa producida en una región que podría usarse en una biorrefinería b en la misma región está representada por $HH_{i,b,g,t}$ (Fig. 2.1 B). La cantidad que ingresa a una biorrefinería b a través de los diferentes modos de transporte desde otras regiones está representada por $QQ_{i,b,g,t}$ (Fig. 2.1 C).

$$H_{i,g,t} = \sum_b HH_{i,b,g,t} \quad \forall i \in IR, g \in GB, t \quad (2.8)$$

$$\sum_{g' \in GH, g' \neq g} \sum_{i,l \in IL} Q_{i,l,g',g,t} = \sum_b QQ_{i,b,g,t} \quad \forall i \in IR, g \in GB, t \quad (2.9)$$

Una vez que se instala una biorrefinería en una región $g \in GB(g)$, se debe cumplir el balance de masa general para cada material (Ec. 2.10). Se establece que la cantidad de i que ingresa a la biorrefinería a través de los diferentes modos de transporte ($QQ_{i,b,g,t}$) y la cantidad disponible en la región ($HH_{i,b,g,t}$), sumado a la cantidad producida (en tecnologías $k \in K^+(k, i)$), debe ser igual al consumo de este material (en otras tecnologías $k \in K^-(k, i)$) sumado a lo que sale de la biorrefinería y se transporta a otras regiones

($QQ_{i,b,g,t}$). Los conjuntos $K^-(k,i)$ y $K^+(k,i)$ vinculan tecnologías k que consumen o producen material i , respectivamente. Para todos los materiales, se permite tener una cantidad sin procesar o efluente que resulte en las variables continuas $EFF_{i,b,g,t}$. Cabe destacar que no todos los términos toman valores para todos los materiales en la Ec. 2.10. Por ejemplo, para productos finales, $QQ_{i,b,g,t}$ en el lado derecho de la ecuación tomará valores porque los productos deben transportarse fuera de la biorrefinería, mientras que $QQ_{i,b,g,t}$ del lado izquierdo será cero ya que ningún producto final ingresa a la biorrefinería.

$$\begin{aligned}
 QQ_{i,b,g,t} + HH_{i,b,g,t} + \sum_{k \in K^+} \rho_{i,k} X_{k,b,g,t} &= \sum_{k \in K^-} \rho_{i,k} XL_{i,k,b,g,t} \\
 + QQ_{i,b,g,t} + EFF_{i,b,g,t} \quad \forall i, b, g \in GB, t &
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

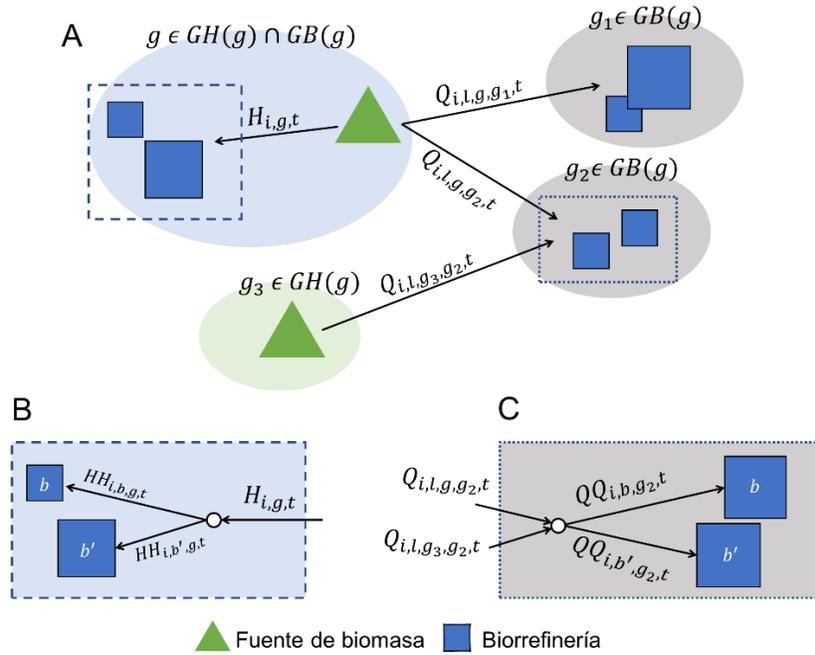


Figura 2.1. Distribución de materia prima en un período dado t entre regiones (A), y dentro de una misma región (B y C).

La cantidad total de efluente generado por las biorrefinerías en una región g , $EF_{i,g,t}$, se cuantifica en la Ec. 2.11. Para algunos materiales, como el biogás o la energía eléctrica, esta cantidad puede ser utilizada por otras tecnologías.

$$EF_{i,g,t} = \sum_b EFF_{i,b,g,t} \quad \forall i, g \in GB, t
 \tag{2.11}$$

La variable $H_{i,g,t}$ es distinta de cero si existe una biorrefinería instalada en la misma región de donde proviene la biomasa, es decir, $g \in GH(g) \cap GB(g)$, en el período analizado o en períodos anteriores (Ec. 2.12). En la Ec. 2.12, U representa un escalar suficientemente grande.

$$H_{i,g,t} \leq \left(\sum_{t' \leq t} \sum_{cb} y_{b,cb,g,t'} \right) U \quad \forall i \in IR, b, t, g \in GB \quad (2.12)$$

Como es común en el contexto de biorrefinerías, hay casos en los que múltiples materias primas o productos intermedios son procesados por la misma tecnología para producir la cantidad de producto deseado. Entonces, el nivel de producción para tecnologías ($X_{k,b,g,t}, k \in K^-(k, i)$) puede satisfacerse a partir de flujos de diferentes materiales ($XL_{i,k,b,g,t}$) (Ec. 2.13).

$$X_{k,b,g,t} = \sum_{i \in K^-} XL_{i,k,b,g,t} \quad \forall k, t, g \in GB \quad (2.13)$$

El modelo permite instalar tecnologías para la producción de productos que pueden recircularse como insumos de las biorrefinerías con el objetivo de reducir el consumo de insumos externos. Para el caso de la caña de azúcar, estas tecnologías corresponden a la producción de biogás a partir de desechos líquidos (por ejemplo, vinazas) o de energía eléctrica a partir de materiales lignocelulósicos para reducir el consumo de energía externa de la biorrefinería. Esta estrategia de recirculación de flujos energéticos es una clara implementación de economía circular en sistemas industriales, cuya motivación es que todas las biorrefinerías de una región determinada puedan anexarse y compartir sinérgicamente servicios auxiliares formando un entorno de simbiosis industrial.

Considerando la producción *in situ* de biogás, las Ec. 2.14 y 2.15 muestran las restricciones en los balances de energía para la recirculación de biogás. El primer miembro de la Ec. 2.14 representa el consumo de gas natural en la biorrefinería debido al funcionamiento de las tecnologías que lo consumen, mientras que el segundo miembro presenta dos alternativas para suplir esas necesidades: biogás producido *in situ* ($BGP_{g,t}$) o gas natural externo ($NGP_{g,t}$). El primer miembro depende del consumo específico de gas natural por parte de cada tecnología instalada (ξ_{1k}) y de su nivel de producción ($X_{k,b,g,t}$). Además, está limitado por la producción de biogás en las biorrefinerías de la región (Ec. 2.15). β es un escalar con valor entre 0-1 que modela las pérdidas de biogás antes de llegar a la biorrefinería de destino.

$$\sum_b \sum_k \xi_{1k} X_{k,b,g,t} = NGP_{g,t} + \beta \cdot BGP_{g,t} \quad \forall g \in GB, t \quad (2.14)$$

$$BGP_{g,t} \leq EF_{biogás,g,t} \quad \forall t, g \in GB \quad (2.15)$$

El balance de electricidad es similar al del biogás. La Ec. 2.16 muestra el balance de electricidad en la región g . El primer miembro de la ecuación representa el consumo de electricidad en las biorrefinerías (primer término) y la cantidad de electricidad que podría exportarse a la red nacional ($EX_{g,t}$); el segundo miembro representa dos alternativas para suplir dichas necesidades: la electricidad producida *in situ* mediante tecnologías de cogeneración ($EF_{electr,g,t}$) o electricidad tomada de la red ($EP_{g,t}$). El consumo de electricidad en las biorrefinerías depende del consumo específico de electricidad por parte de cada tecnología instalada (ξ_{2k}) y de su nivel de producción ($X_{k,b,g,t}$).

$$\sum_b \sum_k \xi_{2k} X_{k,b,g,t} + EX_{g,t} = EP_{g,t} + EF_{electr,g,t} \quad \forall g \in GB, t \quad (2.16)$$

La cantidad de productos finales producidos en una región $g \in GB(g)$ que se transportará a centros de almacenamiento en regiones $g' \in GS(g)$ está representada por $Q_{i,l,g,g',t}$ y está compuesta por la cantidad de producto final generado en cada biorrefinería de la región g , $QQ_{i,b,g,t}$ (Ec. 2.17).

$$\sum_{g' \in GS, g' \neq g} \sum_{i,l \in IL} Q_{i,l,g,g',t} = \sum_b QQ_{i,b,g,t} \quad \forall i \in IM, g \in GB, t \quad (2.17)$$

Para cada período de tiempo, los TSC se calculan como la suma del costo de inversión para instalar un almacén de capacidad cs (θ_{cs}^{F2}) y los costos variables asociados con el nivel de inventario promedio anual ($AIL_{i,g,t}$) de cada producto (Ec. 2.18). La variable binaria $w_{cs,g,t}$ es igual a 1 si se instala un almacén con capacidad total cs en la región g , y 0 en caso contrario.

$$TSC_t = \sum_{g \in GS} \sum_{cs} \theta_{cs}^{F2} \times w_{cs,g,t} + \sum_{g \in GS} \sum_{i \in IM} \theta_i^{V2} \times AIL_{i,g,t} \quad \forall t \quad (2.18)$$

Los productos finales se pueden almacenar en regiones $g \in GS(g)$. La capacidad instalada del almacén debe ser al menos el doble del nivel de inventario promedio de productos en el almacén (Ec. 2.18) (Simchi-Levi *et al.* 1999), que se puede estimar conociendo la cantidad anual de producto a almacenar y a partir de una función empírica de tipo exponencial (Shapiro y Wagner 2009). Luego, con el fin de mantener la linealidad del modelo, esta función exponencial se reemplaza por una aproximación lineal por tramos lograda por el conjunto de Ec. 2.20 a 2.24. a_1 , a_2 y b_2 son los parámetros de las

rectas que ajustan la función exponencial; $yy_{1i,g,t}$ y $yy_{2i,g,t}$ son variables binarias que se activan según el valor de la cantidad de producto a almacenar sea mayor o menor que V^* .

$$\sum_{i \in IM} 2AIL_{i,g,t} \leq \sum_{cs} w_{cs,g,t} SCAP_{cs,g} \quad \forall g \in GS, t \quad (2.19)$$

$$AIL_{i,g,t} = a_1 V_{1i,g,t} + a_2 V_{2i,g,t} + b_2 yy_{2i,g,t} \quad \forall i \in IM, g \in GS, t \quad (2.20)$$

$$\sum_l \sum_{g' \in GD} Q_{i,l,g',t} = V_{1i,g,t} + V_{2i,g,t} \quad \forall i \in IM, g \in GS, t \quad (2.21)$$

$$0 \leq V_{1i,g,t} \leq yy_{1i,g,t} V^* \quad \forall i \in IM, g \in GS, t \quad (2.22)$$

$$yy_{2i,g,t} V^* \leq V_{2i,g,t} \leq yy_{2i,g,t} U \quad \forall i \in IM, g \in GS, t \quad (2.23)$$

$$yy_{1i,g,t} + yy_{2i,g,t} = 1 \quad \forall i \in IM, g \in GS, t \quad (2.24)$$

El balance de materia debe cumplirse para cada producto final almacenado (Ec. 2.25). La suma en el primer miembro de la Ec. 2.25 representa los flujos de productos que se transportan desde las biorrefinerías en las regiones $g' \in GB(g)$ hacia las regiones $g \in GS(g)$. La sumatoria del segundo miembro de la ecuación incluye los flujos de productos que se transportan desde los almacenes a los centros de demanda en $GD(g)$. $S_{i,g,t}$ es el inventario de un producto al final del año t mientras que $S_{i,g,t-1}$ es el nivel de inventario del año anterior. $M_{i,g,t}$ es la cantidad requerida en una región $g \in GS(g)$ para satisfacer la demanda en esa región y solo toma valores distintos de cero si hay un almacén instalado en la misma región.

$$\begin{aligned} \sum_l \sum_{g' \in GB, g' \neq g} Q_{i,l,g',g,t} + S_{i,g,t-1} &= \sum_{l,g'' \in GD} Q_{i,l,g,g'',t} \\ &+ S_{i,g,t} + M_{i,g,t} \quad \forall i \in IM, g \in GS, t \end{aligned} \quad (2.25)$$

La Ec. 2.26 es la restricción de existencia asociada a la instalación de almacenes en una región $g \in GS(g)$. La variable $M_{i,g,t}$ es distinta de cero si existe un almacén instalado en la misma región de donde se requieren los productos (regiones $g \in GS(g) \cap GD(g)$) en el período analizado o en períodos anteriores (Ec. 2.27).

$$\sum_{cs} \sum_t w_{cs,g,t} \leq 1 \quad \forall g \in GS \quad (2.26)$$

$$M_{i,g,t} \leq (\sum_{t' \leq t} \sum_{cs} w_{cs,g,t'}) U \quad \forall i \in IM, g \in GB, t \quad (2.27)$$

El destino de los productos finales es el centro de demanda de cada producto, donde la cantidad de diferentes productos finales entregados desde los centros de almacenamiento debe cumplir con los requisitos de demanda ($D_{i,g,t}$) (Ec. 2.28-2.29).

$$\sum_l \sum_{g' \in GS, g' \neq g} Q_{i,l,g',g,t} + M_{i,g,t} = J_{i,g,t} \quad \forall i \in IM, g \in GD, t \quad (2.28)$$

$$J_{i,g,t} \geq D_{i,g,t} \quad \forall i \in IM, g \in GD, t \quad (2.29)$$

Se puede destacar que, aunque podría modelarse con cierta facilidad, se ha elegido modelar la situación más frecuente en la que la biomasa no puede almacenarse por pérdidas de calidad que hacen inviable económicamente su procesado. Tal es el caso de la caña de azúcar, el limón, el sorgo dulce, la palma aceitera y muchos otros tipos de biomasa.

En cuanto al transporte, se consideran tres modos de transporte (l): para materias primas, para productos sólidos y para productos líquidos. Los TTC están compuestos por los costos de transporte entre los diferentes nodos de la CS: desde la producción de biomasa en las regiones $g \in GH(g)$ hasta las biorrefinerías en $g \in GB(g)$ ($TTCa_t$, Ec. 2.30), desde las biorrefinerías hasta los centros de almacenamiento en $g \in GS(g)$ ($TTCb_t$) y de los centros de almacenamiento a los centros de demanda en $g \in GD(g)$ ($TTCc_t$). Los costos de cada etapa de transporte dependen del número de viajes por período ($NL_{i,l,g,g',t}$) y se componen de costos generales, costos de combustible, costos salariales y costos de mantenimiento. $d_{g,g'}$ y $t_{g,g'}$ representan la distancia y el tiempo de viaje, respectivamente, entre las regiones g y g' . Para cada enlace de transporte $g - g'$ se considera la ruta compuesta por el trayecto de ida de g a g' más el trayecto de regreso de g' a g . Los costos generales están directamente asociados al número de viajes y los costos generales por viaje (GE_l). Los costos de combustible dependen del consumo de combustible por kilómetro (FC_{1l} lleno y FC_{2l} vacío) y el costo de combustible por litro (FP_l). Los costos salariales dependen del salario del conductor por hora (DW_l) y el tiempo total en la carretera ($t_{g,g'} + t_{g',g}$) más el tiempo de carga y descarga (LUT_l). Los costes de mantenimiento dependen de la distancia total recorrida y de los gastos de mantenimiento por kilómetro (ME_l).

$$\begin{aligned} TTCa_t = \sum_l \sum_{g \in GH} \sum_{g' \in GB, g' \neq g} \sum_{i \in IR} NL_{i,l,g,g',t} [GE_l + FP_l(FC_{1l}d_{g,g'} + FC_{2l}d_{g',g}) \\ + DW_l(t_{g,g'} + t_{g',g} + LUT_l) + ME_l(d_{g,g'} + d_{g',g})] \quad \forall t \end{aligned} \quad (2.30)$$

Para calcular el número de viajes, existe una restricción relacionada con las capacidades mínima y máxima de cada medio de transporte ($Lcapmin_l$ y $Lcapmax_l$) y las cantidades que deben enviarse entre los nodos de la CS, $Q_{i,l,g,g',t}$ (Ec. 2.31 para $NL_{i,l,g,g',t}$ en $TTCa_t$).

$$Lcapmin_l NL_{i,l,g,g',t} < Q_{i,l,g,g',t} < Lcapmax_l NL_{i,l,g,g',t} \quad \forall i \in IR, g \in GH, g' \in GB, t, l \quad (2.31)$$

En cuanto a los costos que reflejan el consumo de energía de las biorrefinerías, las Ec. 2.32 y 2.33 calculan los costos de gas natural (TGC_t) y electricidad (TEC_t), respectivamente. θ_{NG} y θ_E son parámetros de costos específicos en US\$ por kWh de electricidad o MJ de gas natural comprado.

$$TGC_t = \sum_{g \in GB} \theta_{NG} NGP_{g,t} \quad \forall t \quad (2.32)$$

$$TEC_t = \sum_{g \in GB} \theta_E EP_{g,t} \quad \forall t \quad (2.33)$$

Finalmente, la función objetivo es el costo actual total (Ec. 2.34) alimentado por los costos asociados a la CS (Ec. 2.35). También se consideran los costos que reflejan el consumo de energía de las biorrefinerías, gas natural y electricidad. En la Ec. 2.34, el parámetro α es la tasa de interés a considerar para actualizar los costos.

$$FO = TC_{t=1} + \sum_{t \geq 1} \frac{TC_t}{(1+\alpha)^{t-1}} \quad (2.34)$$

$$TC_t = TMC_t + TBC_t + TSC_t + TTC_t + TGC_t + TEC_t \quad \forall t \quad (2.35)$$

El problema MILP resultante se puede expresar en forma compacta de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \min_{x, Y, N} FO(x, Y, N) \\ & \text{s. a. } 1 - 35 \end{aligned} \quad (M)$$

$$x \in \mathbb{R}, Y \in \{0, 1\}, N \in \mathbb{Z}^+$$

donde x , Y y N denotan variables de decisión continuas, binarias y enteras, respectivamente, con respecto al diseño y operación de la CS. Las variables continuas representan capacidades, flujos de materiales y niveles de almacenamiento, las variables binarias modelan decisiones lógicas y las variables enteras representan el número de viajes entre regiones.

2.6 Casos de estudio

Esta sección ilustra las capacidades del modelo propuesto mediante unos casos de estudio que toman como base la biomasa disponible de la actividad cañera en Tucumán considerando situaciones de potencial interés. Teniendo en cuenta distintos patrones de demanda de productos finales, se definen los siguientes escenarios:

CASO A - CASO BASE: Situación actual de la demanda, sólo se considera la producción de azúcar y bioetanol.

CASO B - BIORREFINERÍA 1: Contemplando posibles cambios en la legislación nacional, este escenario considera un aumento del porcentaje de mezcla bioetanol/combustible desde 12 % a 25 %, lo que implica un aumento de la demanda de bioetanol para ser cubierto por bioetanol de caña de azúcar, mientras que la demanda de azúcar blanco disminuye en el período analizado.

CASO C - BIORREFINERÍA 2: Escenario en el que se decide implementar tecnologías para diversificar la industria de la caña de azúcar a través de la producción de bioproductos, en este caso ácido láctico, mientras se mantienen los patrones de demanda de etanol y azúcar blanco como en el Caso B.

CASO D - BIORREFINERÍA 3: Se evalúa la producción de varios bioproductos para que el sistema realmente actúe como un complejo de biorrefinerías capaz de ofrecer diversos bioproductos al mercado.

Para estos casos de estudio, el ámbito geográfico se ha dividido en dos zonas con diferente resolución espacial. Por un lado, la provincia de Tucumán —principal productora de caña de azúcar y sus derivados del país— se divide según las divisiones administrativas (17 departamentos). Por otro lado, la Argentina se ha dividido en 24 regiones (23 provincias y una ciudad autónoma) (Fig. 2.2). Como se dijo anteriormente, las regiones se clasifican según las que producen biomasa $GH(g)$, las que pueden procesar biomasa $GB(g)$, las que pueden almacenar productos finales $GS(g)$, y las que tienen demanda de estos últimos $GD(g)$. Las regiones productoras de biomasa y las regiones de ubicación potencial de biorrefinerías se identifican como G01 a G17 (dentro de la provincia de Tucumán). Asimismo, se denominan G18 a G40 (fuera de la provincia de Tucumán) a las regiones de ubicación potencial de los almacenes y las regiones con

demanda de productos. Por lo tanto, 23 regiones de la Argentina y 17 departamentos de Tucumán suman un total de 40 regiones geográficas consideradas en este caso de estudio.



Figura 2.2. Regiones geográficas consideradas para los casos de estudio. A la izquierda: la Argentina. A la derecha: la provincia de Tucumán con sus departamentos (región ampliada).

La distancia y el tiempo de viaje entre regiones ($d_{g,g'}$ y $t_{g,g'}$, Tablas A1 y A2 del Anexo, respectivamente) son dos parámetros que dependen de la geografía. Estos se obtienen a través de *GmapsDistance*, una librería de R que permite realizar cálculos de distancias usando Google maps (Melo y Zarruk 2022) para generar las matrices de tiempo de viaje y distancia entre regiones. Cabe señalar que la ruta de ida $d_{g,g'}$ por lo general no es idéntica a la ruta de retorno $d_{g',g}$. Por lo tanto, las distancias y el tiempo de viaje entre dos regiones dependen del punto de partida. Otros parámetros referentes al transporte como costos generales por viaje (GE_l), consumo de combustible por kilómetro (FC_{1l} lleno y FC_{2l} vacío), costo de combustible por litro (FP_l), gastos de mantenimiento por kilómetro (ME_l), tiempo de carga y descarga (LUT_l), salario del conductor por hora (DW_l) y capacidad máxima de cada medio de transporte ($Lcapmax_l$) se toman de estudios previos

(Mele *et al.* 2011, Jaldo Alvaro *et al.* 2016, Kostin *et al.* 2018) como se muestra en la Tabla A3.

Disponibilidad de biomasa

La caña de azúcar y los RAC, se consideran como materias primas en este caso de estudio. A las regiones $GH(g)$ se les asigna una disponibilidad de biomasa en toneladas de caña de azúcar cosechada por año ($CapCrop_{i,g,t}$). Este parámetro se estima considerando la distribución geográfica de los cultivos (Benedetti y Morales 2018) y los rendimientos de cosecha según los niveles de tecnología en las prácticas agrícolas. La actividad en los campos se caracteriza por niveles de tecnología bajo, medio y alto según el grado de tecnificación de las prácticas (Nishihara Hun *et al.* 2017). De esta forma, $CapCrop_{i,g,t}$ se calcula mediante la suma ponderada de las hectáreas cultivadas afectadas por el rendimiento de cada nivel tecnológico (en toneladas/hectárea).

Tabla 2.1. Capacidad de cultivo de cada región productora de biomasa, $CapCrop_{i,g,t}$ (en toneladas).

Departamento de Tucumán	Región $g \in GH(g)$	Caña de azúcar	RAC*
Burruyacú	G01	451.447	159.014
Chicligasta	G02	2.106.146	85.486
Cruz Alta	G03	1.132.258	240.239
Famaillá	G04	3.181.974	50.851
Graneros	G05	673.530	32.847
Juan Bautista Alberdi	G06	435.064	34.084
La Cocha	G07	715.398	54.013
Leales	G08	3.617.038	273.086
Lules	G09	606.177	45.766
Monteros	G10	1.583.705	119.570
Río Chico	G11	1.023.037	77.239
San Miguel de Tucumán	G12	3.641	275
Simoca	G13	2.644.970	199.695
Tafí del Valle	G14	0	0
Tafí Viejo	G15	23.665	1.787
Trancas	G16	0	0
Yerba Buena	G17	7.281	550
Total		18.205.331	1.374.502

*residuos agrícolas de cosecha

Se estima que por cada tonelada de caña cosechada se producen 151 kg de RAC (Casen *et al.* 2014). En la práctica habitual, todo el RAC se deja en el campo para evitar el deterioro del suelo y para el aporte de nutrientes. Sin embargo, los expertos aconsejan dejar solo una parte de RAC en el suelo dependiendo de la zona agroecológica (Paredes *et al.* 2016). Así, teniendo en cuenta la ponderación de los porcentajes de RAC que se recomienda dejar en el campo según la zona agroecológica, resulta que el 50% de RAC está disponible para ser utilizado como materia prima para el procesamiento en biorrefinerías. La Tabla 2.1 muestra las cantidades de esta materia prima disponible en cada región. Se supone que el porcentaje de disponibilidad de materia prima (parámetro $\eta_{i,g,t}$ en la Ec. 2.2) es del 100%.

Los costos unitarios de producción asociados a la producción de materias primas se toman de estudios y estimaciones locales (Ríos de González *et al.* 2017, Pérez *et al.* 2020a, Pérez *et al.* 2020b). Los costos relacionados con la caña de azúcar incluyen las tareas de cultivo y cosecha, mientras que para RAC incluyen las tareas de hilerado y empaçado. Los costos unitarios de producción, en US\$/t, resultan 12,0 y 10,2 para RAC y caña de azúcar, respectivamente. Los valores asociados a la producción de caña de azúcar son reportados por instituciones regionales (por ejemplo, INTA, EEAOC) y representan los costos actuales de la actividad, mientras que los asociados a los RAC son tomados de análisis prospectivos de tareas de campo que actualmente no se realizan.

Tecnologías de producción

Teniendo en cuenta la cantidad de materia prima a procesar, el modelo da la posibilidad de instalar biorrefinerías de diferentes capacidades globales cb : pequeñas (270 kt/año), medianas (840 kt/año) y grandes (2273 kt/año) considerando las capacidades actuales de las instalaciones en la Argentina (Dujovne *et al.* 2018).

La caña de azúcar puede ingresar al proceso de molienda (K00) para obtenerse jugo y bagazo, un material lignocelulósico (Fig. 2.3). La Tabla A4 muestra los parámetros de rendimiento para las tecnologías consideradas. El jugo de caña de azúcar luego puede ser procesado por diferentes tecnologías como K06, K07 y K10. K06 y K07 utilizan jugo de caña de azúcar para producir azúcar blanco y azúcar crudo como coproducto, K06 también genera melaza como subproducto mientras que K07, miel (los subproductos difieren principalmente en su contenido de sacarosa) (Mele *et al.* 2011). El bioetanol se puede producir por fermentación de melaza (K08), miel (K09) o directamente del jugo de caña de azúcar (K10) (Mele *et al.* 2011). El residuo líquido efluente de la producción de

etanol es la vinaza, cuyas propiedades dependen de la materia prima utilizada en el proceso y puede ser procesada para obtener biogás mediante digestión anaeróbica (K15) (Morales *et al.* 2014 y Parsaee *et al.* 2019).

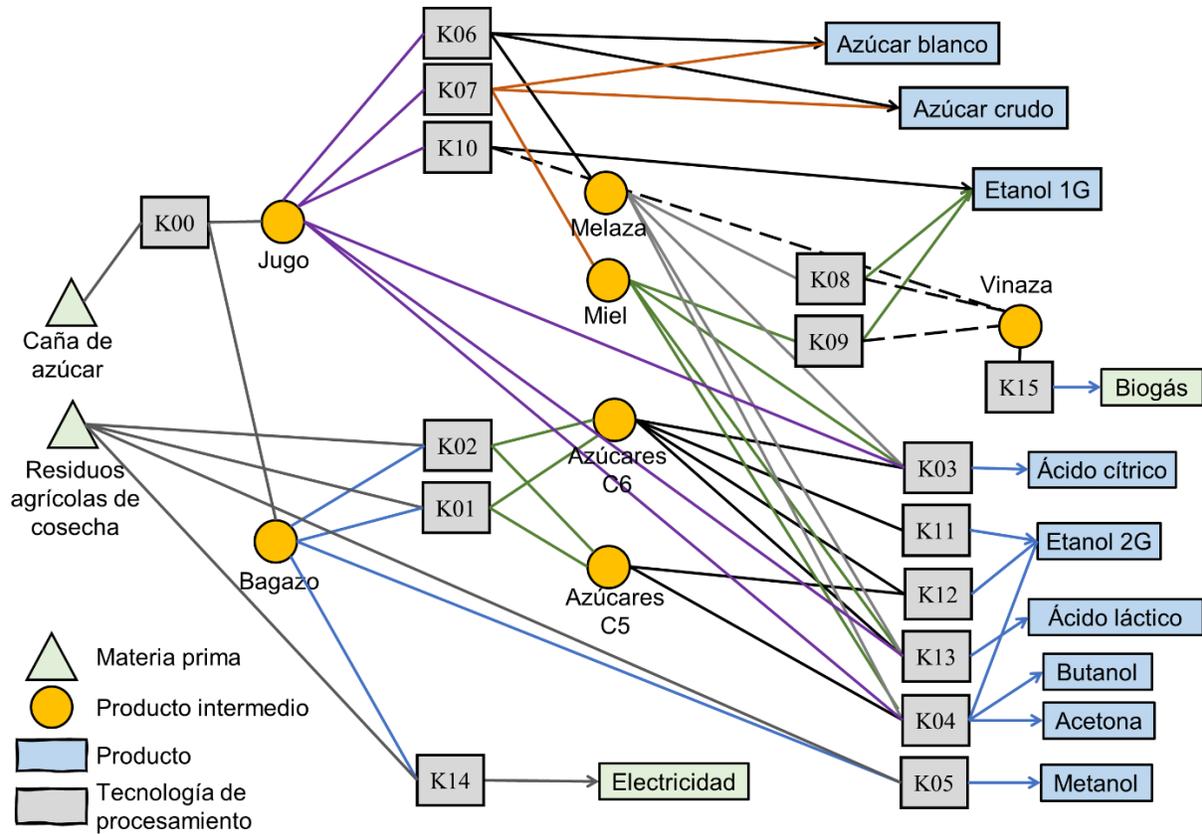


Figura 2.3. Materiales y tecnologías considerados para una biorrefinería. Se muestran únicamente los flujos de materiales.

El bagazo y los RAC son fracciones lignocelulósicas de la caña de azúcar a partir de las cuales se pueden obtener azúcares simples mediante pretratamientos adecuados. Este material ha sido caracterizado en Tucumán (Manfredi 2018), revelando su atractivo para la producción de azúcares fermentables por su alto contenido en celulosa y hemicelulosa. Asimismo, hay mucha investigación en curso sobre tecnologías para obtener compuestos químicos de cinco y seis carbonos (C5 y C6, respectivamente) mediante el pretratamiento y procesamiento de estos azúcares con el fin último de obtener biocombustibles y bioproductos de alto valor. En este caso de estudio, se consideran dos tecnologías para producir flujos de azúcar C5 y C6 a partir de los materiales lignocelulósicos disponibles: K01 y K02 (Kim *et al.* 2013). K01 produce principalmente licor de hexosas (C6) a través de sacarificación enzimática, mientras que K02 produce un licor de pentosas (C5) a través

de un pretratamiento ácido. Los efluentes de las tecnologías K01 o K02 podrían procesarse para obtener, ácido cítrico (K03) (Özüdoğru *et al.* 2019), etanol 2G a partir de azúcares C6 (K11), etanol 2G a partir de azúcares C5 y C6 (K12) (Gubicza *et al.* 2016), ácido láctico (K13) (Munagala *et al.* 2021) y butanol (K04) (Mariano *et al.* 2013, Pereira *et al.* 2015). A partir de bagazo y RAC, se podría obtener metanol (K05) (Kim *et al.* 2013) y energía eléctrica a través de K14 (Kim *et al.* 2013). En cada biorrefinería, el modelo da la posibilidad de instalar tecnologías de distintas capacidades ck (pequeñas, medianas y grandes), cuyos valores numéricos dependen de la tecnología (Tabla A5).

Los parámetros de costos de cada tecnología ($\theta_{k,ck}^F$ y θ_k^{V1}) se toman de la literatura citada anteriormente y se escalan a ck para incorporarlos como parámetros en el modelo (Tabla A6). Los costos fijos se escalan a través de las capacidades con un exponente de escalado igual a 0,6. En cuanto a los consumos de electricidad y gas natural (ξ_{1k} y ξ_{2k}), los principales consumidores de electricidad son K00 (2,5 kWh por tonelada de caña procesada) y K06, K07 y K10 (180,2 kWh por tonelada de azúcar blanco producido). Estos parámetros se toman de informes locales y entrevistas con fabricantes locales. Para el gas natural, los principales consumidores son K06, K07 y K10 (2774 MJ por tonelada de azúcar blanco) (Nishihara Hun *et al.* 2017). Los costos específicos θ_{NG} y θ_E se obtienen de entrevistas con productores locales: $5,35 \cdot 10^{-3}$ US\$/m³ y $8,8 \cdot 10^{-2}$ US\$/kWh, respectivamente. Para actualizar el costo total, se supone que la tasa de interés (α) es 0,1.

Instalaciones de almacenamiento

El modelo puede instalar almacenes de capacidad cs para almacenar los distintos bioproductos generados en las biorrefinerías y, desde allí, entregarlos a los mercados. Para los escenarios analizados, se considera que todos los almacenes tienen la misma capacidad, con costos fijos y variables. Los parámetros económicos están adaptados de la literatura (Mele *et al.* 2011). Como se dijo antes, el nivel de inventario promedio (AIL) se calcula utilizando una aproximación lineal de una función típica de la planificación estratégica de CS ($AIL = a V^b$) (Shapiro y Wagner 2009), tomando $a = 3$ y $b = 0,80$ de la literatura (Ganeshan *et al.* 2001). Esta función de almacenamiento (no lineal) se linealiza utilizando dos tramos rectos caracterizados por $a_1 = 1,13$, $a_2 = 0,67$ (pendientes), $b_1 = 0$ y $b_2 = 93,8$ (ordenadas al origen) como parámetros del modelo.

Distribución de la demanda

La Tabla 2.2 muestra la demanda de azúcar y bioetanol para el primer período en todos los escenarios definidos. Para el caso A (caso base) la demanda anual de azúcar y bioetanol se toma de los informes nacionales (MH 2018) y se asigna a las regiones proporcionalmente a su población. Las cantidades se mantienen constantes a lo largo de todo el horizonte de planificación.

Tabla 2.2. Demanda de azúcar blanco y bioetanol (productos convencionales) para el primer período en todos los casos de estudio, en toneladas por año.

Provincia	Región	Azúcar blanco	Etanol
Buenos Aires	G18	96.281	34.718
Córdoba	G19	105.721	38.122
Corrientes	G20	31.968	11.527
La Plata	G21	476.625	171.867
La Rioja	G22	12.208	4402
Mendoza	G23	54.748	19.742
Neuquén	G24	17.243	6218
Entre Ríos	G25	39.645	14.296
Misiones	G26	34.108	12.299
Chubut	G27	14.474	5219
Chaco	G28	33.227	11.981
Santa Cruz	G29	7173	2587
Salta	G30	38.639	13.933
San Juan	G31	22.025	7942
San Luis	G32	13.844	4992
Jujuy	G33	21.521	7760
Santa Fe	G34	101.945	36.761
La Pampa (General Pico)	G35	10.572	3812
Santiago	G36	27.311	9848
Catamarca	G37	10.824	3903
Río Negro (General Roca)	G38	18.879	6808
Formosa	G39	16.990	6127
Tierra del Fuego	G40	4027	1452

El caso B (biorrefinería 1) se ha diseñado con un aumento progresivo de la demanda de etanol (5% anual) al mismo tiempo que disminuye la demanda de azúcar (-5% anual) de acuerdo con una tendencia actual de consumo decreciente de productos azucarados por motivos de salud. La demanda de etanol se puede satisfacer con etanol 1G o 2G.

Para el caso C (biorrefinería 2), se considera la situación hipotética de requerimiento de ácido láctico como insumo industrial en las regiones G18, G19 y G21, que concentran la actividad industrial del país. Como en el caso anterior, se supone en simultáneo una disminución del 5% en la demanda de azúcar y un aumento del 5% en la demanda de etanol cada año.

En el caso D (biorrefinería 3), existen valores de demanda para todos los bioproductos incluidos en la estructura de la biorrefinería (Fig. 2.3). Sin embargo, se considera que para la producción de azúcar y etanol se utilizan jugos, melazas y mieles como es habitual y tradicional en la industria sucroalcoholera mediante tecnologías que ya han alcanzado un alto grado de madurez y eficiencia. El patrón de demanda de los demás bioproductos se muestra en la Tabla 2.3. El destino de cada bioproducto se selecciona en función de su hipotético uso como insumo en otras industrias del país. Para el ácido cítrico, utilizado principalmente en la industria alimentaria, las regiones G19, G32 y G18 se consideran centros de demanda ya que concentran la industria alimentaria del país. La producción de biobutanol también produce acetona y etanol como coproductos. Para los dos primeros, se considera que los centros de demanda son G21, G18 y G34, ya que el butanol y la acetona pueden utilizarse como disolventes y materias primas para la industria química en esas regiones. El etanol sigue el mismo destino que el etanol 1G y 2G de otros procesos productivos. El metanol puede satisfacer la demanda en la industria del biodiésel, ubicada principalmente en G19, G18, G34 y la industria petroquímica ubicada en G21. Se supone una disminución del 5% en la demanda de azúcar y un aumento del 10% en la demanda de etanol cada año. Como se muestra en la Tabla 2.3, las demandas de diferentes bioproductos se establecen en diferentes períodos (de T01 a T05) para demostrar la versatilidad del modelo. Una vez que aparece la demanda de un bioproducto, se mantiene constante hasta el final del horizonte de planificación.

El modelo se implementa en GAMS® y se resuelve con el *solver* MILP CPLEX 11.0 en una PC DELL DESKTOP-OMKAB82 con CPU Intel(R) Core(TM) i7-8700, 3.20 GHz y 16,0 Gb de RAM. El modelo de optimización resultante contiene 131.301 ecuaciones, 179.536 variables continuas y 15.420 variables discretas. Los tiempos de CPU empleados para encontrar las soluciones óptimas son 2937 s, 1190 s, 4860 s y 1658 s para los casos A, B, C y D, respectivamente, con *gap* inferior al 5%.

Tabla 2.3. Patrón de demanda de bioproductos para el caso C (t/año).

Período	Producto	Región				
		G18 Buenos Aires	G19 Córdoba	G21 La Plata	G32 San Luis	G34 Santa Fe
T01	Ácido cítrico	-	-	-	-	-
	Ácido láctico	-	-	-	-	-
	Butanol	-	-	-	-	-
	Metanol	30.000	30.000	10.000	30.000	30.000
T02	Ácido cítrico	-	-	-	-	-
	Ácido láctico	-	-	-	-	-
	Butanol	-	-	-	-	-
	Metanol	30.000	30.000	10.000	30.000	30.000
T03	Ácido cítrico	4000	4000	-	2000	-
	Ácido láctico	2000	1500	1500	-	-
	Butanol	-	-	-	-	-
	Metanol	30.000	30.000	10.000	30.000	30.000
T04	Ácido cítrico	4000	4000	-	2000	-
	Ácido láctico	2000	1500	1500	-	-
	Butanol	-	-	-	-	-
	Metanol	30.000	30.000	10.000	30.000	30.000
T05	Ácido cítrico	4000	4000	-	2000	-
	Ácido láctico	2000	1500	1500	-	-
	Butanol	1000	1000	-	-	1000
	Metanol	30.000	30.000	10.000	30.000	30.000
T06 – T10	Ácido cítrico	4000	4000	-	2000	-
	Ácido láctico	2000	1500	1500	-	-
	Butanol	1000	1000	-	-	1000
	Metanol	30.000	30.000	10.000	30.000	30.000

2.7 Resultados

La Fig. 2.4 muestra el número, tamaño y ubicación de las biorrefinerías para cada caso de estudio. En los casos A y B, se decide instalar siete biorrefinerías de varias capacidades. Como es de esperar, la mayoría de las biorrefinerías están en el centro de la provincia, en las regiones de mayor producción de caña de azúcar. Dos biorrefinerías pequeñas están instaladas en el norte y en el sur para procesar la caña de azúcar cosechada en las regiones circundantes. El número de tecnologías de cada tipo seleccionadas en las soluciones

óptimas se muestran en las Tablas 2.4 y 2.5 para los casos A y B, respectivamente. Allí, los productos tradicionales —azúcar y etanol— se producen con tecnologías complementarias que procesan el jugo de caña para producir azúcar (K06, K07), mientras que el etanol se produce principalmente a partir de melaza y miel (K08, K09). Las vinazas se reutilizan para producir biogás (K15), reduciendo así el consumo externo de gas natural. En ambos casos, se instala una destilería autónoma en G16 para producir etanol directamente a partir de jugo (K10). En ninguno de estos casos se procesa material lignocelulósico para cubrir la demanda de etanol.

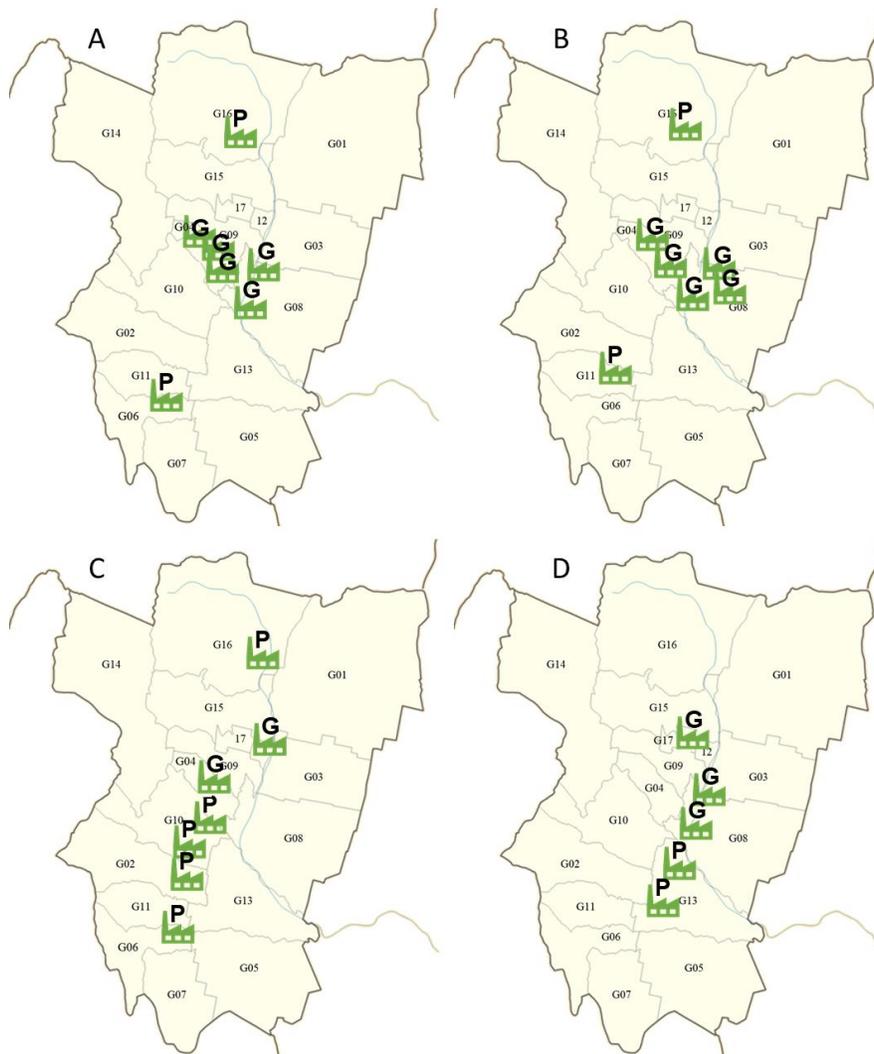


Figura 2.4. Ubicación de las biorrefinerías en regiones $GH(g)$ que representan los costos totales mínimos para las CS resultantes en: (A) Caso base, (B) Biorrefinería 1, (C) Biorrefinería 2 y (D) Biorrefinería 3. P: pequeña y G: grande.

Las soluciones óptimas utilizan el 84% y el 82% del total de caña de azúcar disponible en la provincia. Además, se coproduce azúcar crudo (219 y 217 kt/año en A y B, respectivamente), que puede ser utilizado para satisfacer demandas locales e intermitentes internas. Las vinazas no utilizadas en la producción de biogás (2,3 Mt/año en A y 2,6 Mt/año en B) pueden devolverse a los campos para fertirrigación (práctica actual). La cantidad de bagazo generado (4,5 Mt/año en A y 4,6 Mt/año en B) justifica y fomenta la implementación de tecnologías que aprovechen el material lignocelulósico. Para todos los casos analizados, se decide instalar almacenes ($w_{cs,g,t} = 1$) para los productos vendidos en todas las regiones con demanda.

Tabla 2.4. Refinerías y tecnologías instaladas en el Caso A.

Región	Número de biorrefinerías	Tamaño	Tecnologías (tipo y número)				
			K00	K07	K09	K10	K15
G04	3	grande	3	3	3	-	3
G06	1	pequeña	1	1	1	-	1
G08	2	grande	2	2	2	1	2
G16	1	pequeña	1	-	-	1	-

Tabla 2.5. Refinerías y tecnologías instaladas en el Caso B.

Región	Número de biorrefinerías	Tamaño	Tecnologías (tipo y número)						
			K00	K06	K07	K08	K09	K10	K15
G04	2	grande	2	-	2	-	2	-	2
G08	3	grande	3	3	1	2	1	2	3
G11	1	pequeña	1	-	1	-	1	-	1
G16	1	pequeña	1	1	-	-	-	1	1

En los casos C y D, al incorporarse la demanda de bioproductos derivados de la fracción lignocelulósica, el número y ubicación de las biorrefinerías, así como las tecnologías seleccionadas son diferentes de los obtenidos en los dos casos anteriores (ver Fig. 2.4 y Tablas 2.6 y 2.7).

Tabla 2.6. Refinerías y tecnologías instaladas en el Caso C.

Región	Núm. de biorref.	Tamaño	Tecnologías (tipo y número)								
			K00	K01	K06	K07	K08	K09	K10	K13	K15
G02	1	pequeña	1	1	-	1	-	1	-	1	1
G04	1	grande	1	1	-	1	-	1	1*	1	1
G06	1	pequeña	1	-	-	1	-	1	-	-	1
G10	2	pequeña	2	1	1	2	1	2	1+1 [†]	1	2
G12	1	grande	1	1	-	1	1	1	1	1	1
G16	1	pequeña	1	1	-	1	1	1	1	1	1

* Instaladas en el segundo período

† Instaladas en el cuarto período

Tabla 2.7. Refinerías y tecnologías instaladas en el Caso D.

Región	Núm. de biorref.	Tamaño	Tecnologías (tipo y número)									
			K00, K06 y K08	K01 y K12	K02	K03	K04	K05	K07 y K09	K11	K13	K15
G08	2	grande	2	1	-	-	-	1	-	-	-	1+1*
G13	2	pequeña	2	1+1 [†]	-	-	-	-	1	1 [‡]	1*	2
G17	1	pequeña	1	1*	1*	1	1 [†]	-	-	-	-	1

* Instaladas en el segundo período

† Instaladas en el tercer período

‡ Instaladas en el cuarto período

En el caso C, se instalan siete biorrefinerías en la provincia. La demanda de ácido láctico en este caso requiere de la instalación de las tecnologías K01 y K13 en casi todas las biorrefinerías para el procesamiento del bagazo generado por K00 (molienda). Aquí, se instalan tecnologías K10 adicionales para la producción de etanol en los períodos 2 y 4 para satisfacer la creciente demanda de etanol. En este caso, la solución óptima utiliza el 82% del total de caña de azúcar disponible en la provincia. Además, debido a que la nueva demanda de ácido láctico es relativamente pequeña con respecto a la de productos convencionales, y además solo tres regiones demandan este producto, el bagazo procesado para obtener ácido láctico es solo un 2,2% (94,3 kt/año) del bagazo disponible después de la molienda. Además, existe una cantidad de azúcar crudo (219 kt/año) coproducida anualmente que puede ser utilizada para satisfacer la demanda interna. Las vinazas no utilizadas en la producción de biogás (1,7 Mt/año) pueden ser devueltas a los

cañaverales para fertirrigación. Las biorrefinerías no procesan RAC en este caso de estudio.

En el caso D, se instalan cinco biorrefinerías. Las demandas de bioproductos derivados de lignocelulósicos requieren la instalación de tecnologías en diferentes períodos de tiempo (Fig. 2.5). En particular, las tecnologías que procesan material lignocelulósico (K01 a K05 y K11 a K13) ahora se incluyen en las biorrefinerías además de las tecnologías de producción de azúcar y etanol. Estas tecnologías procesan el bagazo proveniente de K00 (molienda) y solo una biorrefinería en G08 requiere RAC para la producción de metanol a través de K05. Los períodos en los que se realizan las inversiones para la instalación de cada tecnología se muestran en la Fig. 2.5. La solución óptima solo utiliza el 56% del total de caña de azúcar disponible en la provincia principalmente para satisfacer la demanda de azúcar blanco. La creciente demanda de etanol se cubre con etanol 1G y 2G (Fig. 2.6 A). El bagazo procesado representa el 53% (682 kt/año) del bagazo disponible después de la molienda y toda la vinaza generada es biodigerida para la producción de biogás. La Fig. 2.6 B muestra el consumo de gas cubierto por biogás y gas natural para cada período.

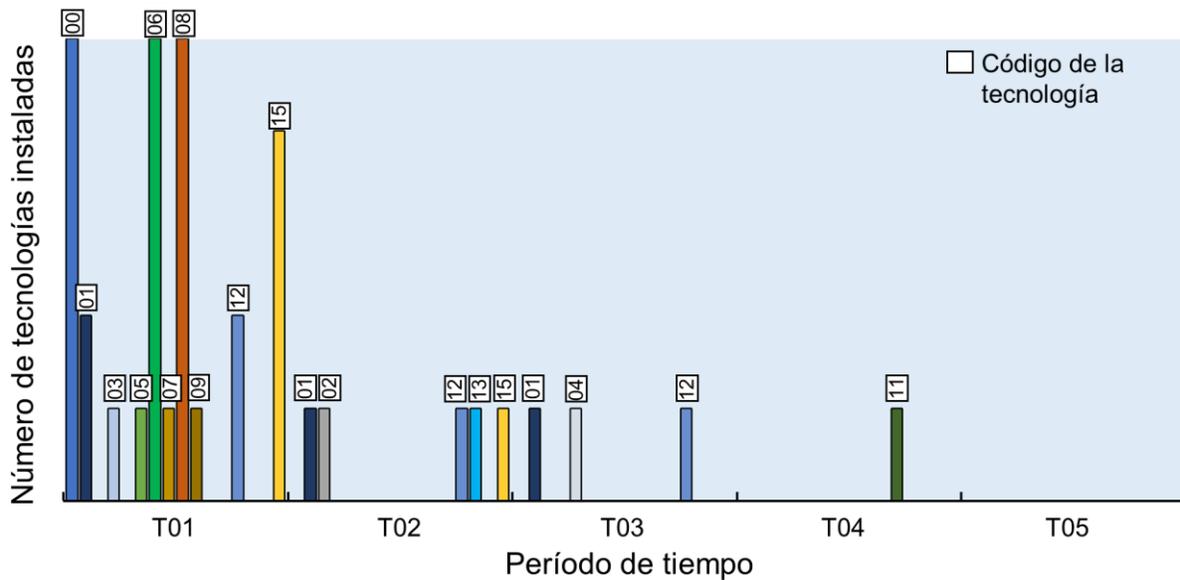


Figura 2.5. Número y tipos de tecnologías seleccionadas en el Caso D (Biorrefinería 3).

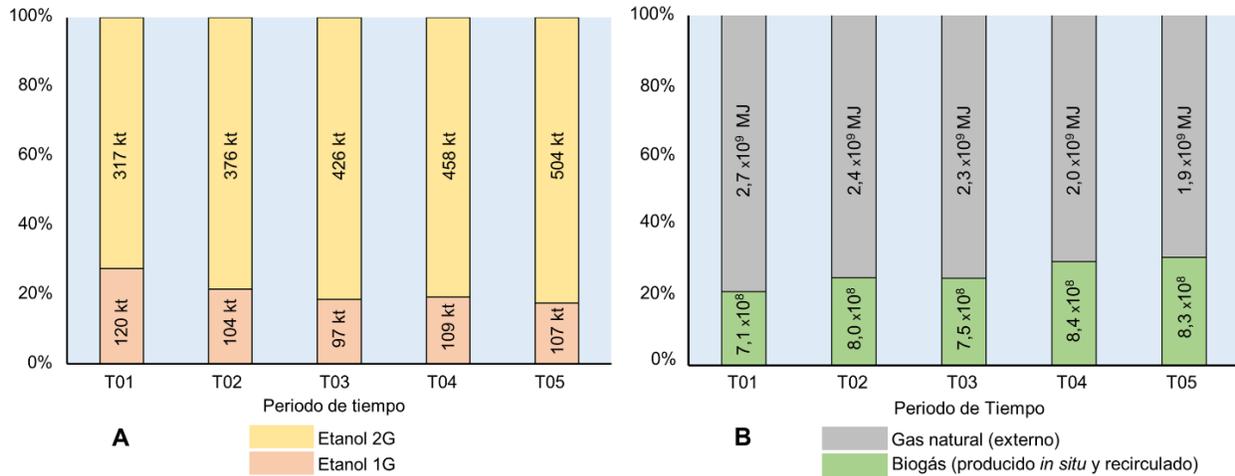


Figura 2.6. Caso D (biorrefinería 3). (A) Porcentaje de la demanda de etanol cubierta por bioetanol 1G y 2G. (B) Porcentaje de los requerimientos de gas natural cubiertos por biogás y gas natural externo.

Cabe señalar que, en todos los casos de estudio, el modelo decide instalar tecnologías para el tratamiento de vinazas con producción de biogás (K15), lo que reduce el consumo de gas natural. Asimismo, existe la producción de algunos coproductos y efluentes (por ejemplo, azúcar crudo, bagazo, melaza y vinaza) que podrían ser aprovechados por otras tecnologías para maximizar el uso de la biomasa.

El modelo de optimización genera configuraciones en las que: (i) se ubican los centros de almacenamiento para descentralizar la logística de los productos, almacenando los productos finales en aquellas regiones que demandan dichos productos, o en regiones cercanas; (ii) el procesamiento de biomasa está descentralizado, pero siempre dentro de la región de producción de biomasa (al menos una biorrefinería está ubicada al norte, al menos una al sur, concentrando biorrefinerías más grandes en el centro), lo que disminuye el costo de transporte de biomasa.

Los costos totales de inversión de la CS de los casos A, B, C y D son $226,3 \cdot 10^6$, $225,8 \cdot 10^6$, $623 \cdot 10^6$ y $553,0 \cdot 10^6$ US\$, respectivamente. La Fig. 2.7 muestra las inversiones a realizar (Fig. 2.7 A) y los componentes de costos variables (Fig. 2.7 B), respectivamente, a lo largo del horizonte de planificación para el caso D. Las inversiones más grandes se realizan al principio del horizonte de planificación, mientras que los costos variables se distribuyen uniformemente. En este último prevalecen los costos asociados a la operación de las biorrefinerías.

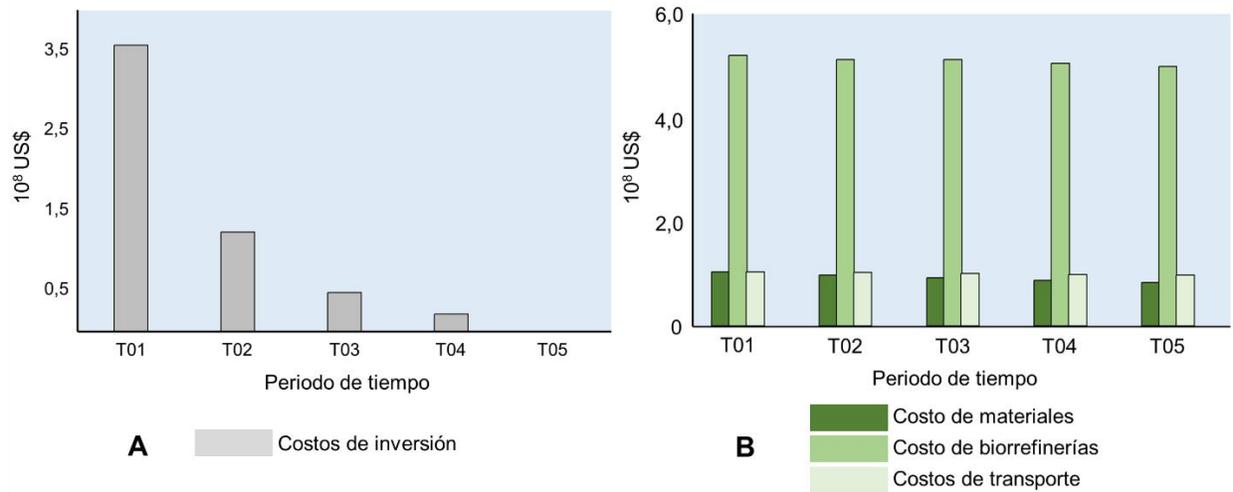


Figura 2.7. Caso D (biorrefinería 3) (A) Inversiones de la CS por período. (B) Desglose de los costos operativos de la CS.

Como se muestra, el modelo desarrollado tiene la capacidad de atender demandas que varían en el tiempo minimizando costos. De esta forma los resultados no están afectados por la incertidumbre de los precios de los bioproductos que aún no compiten en el mercado con los productos convencionales. Pero, si los precios de mercado estuvieran disponibles, la función objetivo puede modificarse para maximizar los beneficios revelando los productos más prometedores desde este punto de vista.

2.8 Conclusiones

Este trabajo aborda el diseño y planificación óptimos de la CS asociada a un entramado de biorrefinerías considerando aspectos técnicos y económicos. La tarea de diseño se realiza a través de una programación MILP que busca minimizar el costo total de la CS. Las capacidades del modelo propuesto se ilustran a través de cuatro casos de estudio basados en escenarios a escala real de la cadena de valor de la caña de azúcar en la Argentina.

Las soluciones brindan información valiosa sobre el problema de diseño y sugieren diferentes topologías de la CS según el valor de los parámetros del modelo. Los resultados no solo muestran la configuración óptima de CS, sino también las tecnologías que operan dentro de las biorrefinerías y la posibilidad de agregar valor a los efluentes y recircular recursos.

Esta herramienta está diseñada para ayudar a las autoridades en el análisis de políticas estratégicas en el campo de la agroindustria y la energía. En los capítulos siguientes se centrará la atención en añadir nuevos indicadores al modelo para la evaluación de la sustentabilidad de las CS resultantes.

2.9 Notación

2.9.1 Índices

b = biorrefinerías

cb, ck, cs = capacidades para biorrefinerías, tecnologías e instalaciones de almacenamiento

g = regiones

i = materiales

k = tecnologías

l = modos de transporte

t = períodos de tiempo

2.9.2 Conjuntos

$GB(g)$ = regiones donde se pueden instalar biorrefinerías

$GD(g)$ = regiones que tienen requisitos de demanda de productos

$GH(g)$ = regiones que pueden producir materias primas

$GS(g)$ = regiones donde se pueden instalar almacenes de productos

$II(i)$ = materiales intermedios (producidos y consumidos en la biorrefinería)

$IM(i)$ = materiales que son productos finales

$IR(i)$ = materiales que son materias primas

$IL(i, l)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan los materiales i con los modos de transporte l

$K^-(k, i)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan tecnologías k que consumen materiales i

$K^+(k, i)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan tecnologías k que producen materiales i

2.9.3 Parámetros

α = tasa de interés

β = porcentaje de biogás producido que llega a su destino

$\eta_{i,g,t}$ = variabilidad de los rendimientos agrícolas debido a condiciones externas (%)

θ_i^{V0} = costos variables asociados a la producción de materias primas [US\$/t]

$\theta_{k,ck}^{F1}$ = costos fijos asociados a la instalación de la tecnología k con capacidad ck [US\$]

θ_k^{V1} = costos variables asociados a la operación de la tecnología k [US\$/t]

θ_{cs}^{F2} = costos fijos asociados a la instalación de un almacén con capacidad cs [US\$]

θ_i^{V2} = costos variables asociados a la operación de un almacén [US\$/t]

θ_{NG} = costos específicos asociados a la compra de gas natural [US\$/MJ]

θ_E = costos específicos asociados a la compra de electricidad [US\$/kWh]

ξ_{1k} = consumo de gas natural asociado a la tecnología k [MJ/t]

ξ_{2k} = consumo de electricidad asociado a la tecnología k [kWh/t]

$\rho_{i,k}$ = coeficiente de balance de materia del material i en la tecnología k

$CapCrop_{i,g,t}$ = capacidad total de materia prima i disponible en la región g en el tiempo t [t/período]

$D_{i,g,t}$ = demanda del producto i en la región g y el período de tiempo t

$d_{g,g'}$ = distancia entre la región g y la región g' [km]

DW_l = salario del conductor [US\$/h]

FC_{1l} = consumo de combustible del tipo de transporte l (cargado) [US\$/km]

FC_{2l} = consumo de combustible del tipo de transporte l (vacío) [US\$/km]

FP_l = precio del combustible [US\$/L]

GE_l = gastos generales del tipo de transporte l [US\$/viaje]

$Kcapmax_{k,ck}$ = capacidad máxima de la tecnología k para la capacidad ck seleccionada [t/período]

$Lcapmax_l$ = capacidad máxima del tipo de transporte l [t/viaje]

$Lcapmin_l$ = capacidad mínima del tipo de transporte l [t/viaje]

LUT_l = tiempo de carga/descarga del tipo de transporte l [h]

ME_l = gastos de mantenimiento del tipo de transporte l [US\$/km]

U = escalar suficientemente grande

$SCAP_{cs,g}$ = capacidad máxima de almacenamiento para la capacidad cs seleccionada [t/período]

$time_{g,g'}$ = tiempo de viaje entre la región g y la región g' [s]

2.9.4 Variables

$ALL_{i,g,t}$ = nivel de inventario promedio del material i en la región g en el período de tiempo t [t/período]

$BGP_{g,t}$ = biogás producido en la región g y el período de tiempo t [M]/período]

$EE_{g,t}$ = electricidad requerida en la región g y el período de tiempo t [kWh/período]

$EF_{i,g,t}$ = material i generado en la región g en el período de tiempo t [t/ período]

$EFF_{i,b,g,t}$ = material i producido en la biorrefinería b , región g y período de tiempo t [t/ período]

$EEC_{k,g,t}$ = electricidad requerida por la tecnología k en la región g en el período t [kWh/ período]

$EP_{g,t}$ = electricidad comprada en la región g en el período t [kWh/período]

$EX_{g,t}$ = electricidad exportada a la red por la región g en el período de tiempo t [kWh/período]

$HH_{i,b,g,t}$ = material i disponible en la región g para el consumo en la biorrefinería b (en la misma región g) en el período de tiempo t [t/período]

$H_{i,g,t}$ = cantidad de materia prima i disponible en la región g para consumo dentro de la misma región g en el período de tiempo t [t/período]

$J_{i,g,t}$ = producto i entregado en la región g en el período t para lograr satisfacer la demanda del mismo [t/período]

$M_{i,g,t}$ = cantidad de producto i disponible en la región g utilizado para satisfacer parte o la totalidad de la demanda en la misma región en el período de tiempo t [t/período]

$NG_{g,t}$ = cantidad de gas natural requerido por la región g en período de tiempo t [M]/período]

$NL_{i,l,g,g',t}$ = número de viajes requeridos para transportar el material i a través del modo de transporte l desde la región g hacia la región g' en el período de tiempo t

$NGC_{k,g,t}$ = gas natural requerido por la tecnología k en la región g en el período t [M]/período]

$NGP_{g,t}$ = gas natural comprado en la región g en el tiempo t [kWh/período]

$Q_{i,l,g,g',t}$ = material i transportado por el modelo l de la región g a la región g' en el período de tiempo t [t/ período]

$QQ_{i,b,g,t}$ = material i , parte de $Q_{i,l,g,g',t}$ transportado a la biorrefinería b (dentro de la región g) en el período de tiempo t [t/ período]

$S_{i,g,t}$ = inventario total de material i en la región g almacenado en el período de tiempo t [t/período]

TC_t = costos totales en el período de tiempo t [US\$]

TBC_t = costos totales asociados a la instalación y operación de biorrefinerías en el período de tiempo t [US\$]

TEC_t = costos totales asociados al consumo de electricidad en el período de tiempo t [US\$]

TGC_t = costos totales asociados al consumo de gas natural en el período de tiempo t [US\$]

TMC_t = costos totales de adquisición de materiales en el período de tiempo t [US\$]

TSC_t = costos totales de almacenamiento en el período de tiempo t [US\$]

TTC_t = costos totales de transporte en el período de tiempo t [US\$]

$w_{cs,g,t}$ = variable binaria (1 si se instala un almacén de capacidad cs en la región g y período de tiempo t)

$XL_{i,k,b,g,t}$ = parte de la producción de la tecnología k instalada en la biorrefinería b en la región g y el período de tiempo t cubierto por el material i [t/período]

$X_{k,b,g,t}$ = nivel de producción de la tecnología k instalada en la biorrefinería b en la región g y período de tiempo t

$y_{b,cb,g,t}$ = variable binaria (1 si se instala una biorrefinería b de capacidad cb en la región g y período de tiempo t)

$z_{k,b,ck,g,t}$ = variable binaria (1 si se instala una tecnología k de capacidad ck en la biorrefinería b de la región g en el período de tiempo t)

2.9.5 Variables y parámetros para el modelo lineal del nivel de inventario

$V1_{i,g,t}$ = variable continua para la linealización por tramos del almacenamiento del producto i en la región g en el tiempo t [t/período]

$V2_{i,g,t}$ = variable continua para la linealización por tramos del almacenamiento del producto i en la región g en t [t/período]

V^* = parámetro para la linealización por tramos de almacenamiento [t/período]

$yy1_{i,g,t}$ = variable binaria (1 si el primer tramo recto de la función está activo)

$yy2_{i,g,t}$ = variable binaria (1 si el segundo tramo recto de la función está activo)

2.10 Referencias

Benedetti, P. E.; Morales. C. D. C. (2018). Tucumán cuenta con 273.737 ha cultivadas con caña de azúcar. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)*. <https://inta.gob.ar/noticias/tucuman-cuenta-con-273737-ha-cultivadas-con-cana-de-azucar/> (consultado en diciembre de 2021).

Bowling, I. M., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M. (2011). Facility location and supply chain optimization for a biorefinery. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(10), 6276–6286. <https://doi.org/10.1021/ie101921y>

CAA (2022). Centro Azucarero Argentino. <http://centrozucarero.com.ar> (consultado en diciembre de 2022).

Casen, S., Romero, E., Leggio, F., Torres Bugeau, A., Pérez, D., Paredes, V. (2014). Manejo de los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar: disponibilidad potencial y alternativas de enfardado. *Avance Agorindustrial*, 36(4), 20–26.

Costa, C. B. B., Potrich, E., Cruz, A. J. G. (2016). Multiobjective optimization of a sugarcane biorefinery involving process and environmental aspects. *Renewable Energy*, 96, 1142–1152. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.043>

De Matos, M., Santos, F., Eichler, P. (2019). Sugarcane world scenario. En *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00001-9>

Dujovne, N., Galiani, S., Tappatá, M., Zabala Suárez, J. E., Anauati, M. V., Lotitto, E., Anino, P. (2018). Informes de cadenas de valor - Azucarera. ISSN 2525-0221, 31. https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/sspmicro_cadenas_de_valor_azucar.pdf (consultado en diciembre de 2022).

Eksioglu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1342–1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>

Espinoza Pérez, A. T., Camargo, M., Narváez Rincón, P. C., Alfaro Marchant, M. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69 (octubre 2016), 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084>

FAOSTAT. (2023). División de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/es/#data> (consultado en abril de 2023).

Galanopoulos, C., Giuliano, A., Barletta, D., Zondervan, E. (2020). An integrated methodology for the economic and environmental assessment of a biorefinery supply chain. *Chemical Engineering Research and Design*, 160, 199–215. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.05.016>

Ganeshan, R., Boone, T., Stenger, A. J. (2001). The impact of inventory and flow planning parameters on supply chain performance: An exploratory study. *International Journal of Production Economics*, 71(1–3), 111–118. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00109-2)

Gilani, H., Sahebi, H. (2021). A multi-objective robust optimization model to design sustainable sugarcane-to-biofuel supply network: the case of study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(6), 2521–2542. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00639-8>

Gubicza, K., Nieves, I. U., Sagues, W. J., Barta, Z., Shanmugam, K. T., Ingram, L. O. (2016). Techno-economic analysis of ethanol production from sugarcane bagasse using a liquefaction plus simultaneous saccharification and co-fermentation process. *Bioresource Technology*, 208, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.093>

Jaldo Alvaro, D. M.; Ortiz, J. M., Biaggi, M. C. (2016) La trayectoria socio-técnica de la mecanización de cosecha de caña de azúcar en Tucumán. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://inta.gob.ar/documentos/la-trayectoria-socio-tecnica-de-la-mecanizacion-de-cosecha-de-cana-de-azucar-en-tucuman/> (consultado en diciembre de 2021).

Khawiwada, D., Leduc, S., Silveira, S., McCallum, I. (2016). Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable Energy*, 85, 371–386. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>

Kim, J., Sen, S. M., Maravelias, C. T. (2013). An optimization-based assessment framework for biomass-to-fuel conversion strategies. *Energy & Environmental Science*, 6(4), 1093–1104. <https://doi.org/10.1039/C3EE24243A>.

Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., Jiménez, L. (2012). Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(3), 359–376. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.07.013>

Kostin, A., Macowski, D. H., Pietrobelli, J. M. T. A., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., Ravagnani, M. A. S. S. (2018). Optimization-based approach for maximizing profitability of bioethanol supply chain in Brazil. *Computers and Chemical Engineering*, 115, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.001>

Macowski, D. H., Bonfim-Rocha, L., Orgeda, R., Camilo, R., Ravagnani, M. A. S. S. (2020). Multi-objective optimization of the Brazilian industrial sugarcane scenario: a profitable and ecological approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(3), 591–611. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01802-0>

Manfredi, A. P. (2018). Desarrollo de estrategias para la producción de bioetanol utilizando hidrolizados de recursos lignocelulósicos. Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán.

Mansoornejad, B., Chambost, V., Stuart, P. (2010). Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Computers and Chemical Engineering*, 34(9), 1497–1506. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.02.004>

Mariano, A. P., Dias, M. O. S., Junqueira, T. L., Cunha, M. P., Bonomi, A., Filho, R. M. (2013). Utilization of pentoses from sugarcane biomass: Techno-economics of biogas vs. butanol production. *Bioresource Technology*, 142, 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.052>

Martínez-Guido, S. I., Betzabe González-Campos, J., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., El-Halwagi, M. M. (2016). Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(2), 553–562. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1039-1>

Marvin, W. A., Schmidt, L. D., Daoutidis, P. (2013). Biorefinery location and technology selection through supply chain optimization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(9), 3192–3208. <https://doi.org/10.1021/ie3010463>

Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L. (2011). Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A Case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina. *Ind. Eng. Chem. Res*, 50, 4939–4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>

Melo RA, Zarruk D. (2022). Distance and travel time between two points from Google maps. Versión 4. <https://cran.r-project.org/web/packages/gmapsdistance/index.html>. (consultado en abril de 2022).

MH. (2018). Ministerio de Hacienda de la República Argentina. Informe de Cadenas de Valor: Caña de Azúcar. ISSN 2525-0221. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadenas_de_valor_azucar.pdf (consultado en enero de 2023).

Moraes, B. S., Junqueira, T. L., Pavanello, L. G., Cavalett, O., Mantelatto, P. E., Bonomi, A., Zaiat, M. (2014). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental,

and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy*, 113, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.018>

Morales Chavez, M. M., Sarache, W., Costa, Y., Soto, J. (2020). Multiobjective stochastic scheduling of upstream operations in a sustainable sugarcane supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123305>

Munagala, M., Shastri, Y., Nalawade, K., Konde, K., Patil, S. (2021). Life cycle and economic assessment of sugarcane bagasse valorization to lactic acid. *Waste Management*, 126, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.052>

Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 502–515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>

O'Hara, I., Mundree, S. (Eds.). (2016). *Sugarcane-based biofuels and bioproducts*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118719862.ch1>.

Özüdoğru, H. R., Nieder-Heitmann, M., Haigh, K. F., Görgens, J. F. (2019). Techno-economic analysis of product biorefineries utilizing sugarcane lignocelluloses: Xylitol, citric acid and glutamic acid scenarios annexed to sugar mills with electricity co-production. *Industrial Crops and Products*, 133, 259–268.

Paredes, M. V., Pérez, D. R., Casen, S., Romero, R. E. (2016). Factibilidad técnica-económica de la recolección y enfiado del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) para su utilización con fines energéticos en Tucumán en la zafra 2015. Asociación Argentina de Economía Agraria.

Parsae, M., Kiani Deh Kiani, M., Karimi, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*, 122 (enero), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>

Pereira, L. G., Chagas, M. F., Dias, M. O. S., Cavalett, O., Bonomi, A. (2015). Life cycle assessment of butanol production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 96, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.059>

Pérez, D.; Paredes, V.; Rodríguez G.: Romero, E. R.; Giardina, J.; Sanchez Ducca, A.; Alonso, L. (2020a). El cultivo de caña de azúcar en Tucumán: gastos de producción y margen bruto en el período 2015/16 - 2018/19. Reporte Agroindustrial Estadísticas y Márgenes de Cultivos Tucumanos. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). <https://www.eeaoc.gob.ar/?articulo=el-cultivo-de-cana-de-azucar-en-tucuman-gastos-de-produccion-y-margen-bruto-en-el-periodo-2015-16-2018-19> (consultado en diciembre de 2021).

Pérez, G. A.; Sopena, R. A.; Felipe, A. (2020b). Evaluación económica del cultivo de caña de azúcar Campaña 2019/2020. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://inta.gob.ar/documentos/evaluacion-economica-del-cultivo-de-cana-de-azucar-campana-2019-2020> (consultado en diciembre de 2021).

Ríos de González, L.; Pérez, G. A.; Felipe, A. El mercado azucarero argentino y análisis económico de la zafra azucarera en Tucumán. Campaña 2016-2017. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://inta.gob.ar/documentos/el-mercado-azucarero-argentino-y-analisis-economico-de-la-zafra-azucarera-en-tucuman-campana-2016-2017> (consultado en diciembre de 2021).

Roni, M. S., Thompson, D. N., Hartley, D. S. (2019). Distributed biomass supply chain cost optimization to evaluate multiple feedstocks for a biorefinery. *Applied Energy*, 254 (marzo), 113660. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113660>

Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270–294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>

Santos, F., Eichler, P., Machado, G., de Mattia, J., de Souza, G. (2019). By-products of the sugarcane industry. *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00002-0>

Shapiro, J. F., Wagner, S. N. (2009). Strategic inventory optimization. *Journal of Business Logistics*, 30(2), 161-173. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2009.tb00117.x>.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (1999). *Designing and Managing the Supply Chain. Concepts, Strategies, and Case Studies*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, MA.

Ubando, A. T., Felix, C. B., Chen, W. H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299 (noviembre 2019). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>

Ulonska, K., König, A., Klatt, M., Mitsos, A., Viell, J. (2018). Optimization of Multiproduct Biorefinery Processes under Consideration of Biomass Supply Chain Management and Market Developments. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 57(20), 6980–6991. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00245>

Yue, D., You, F., Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, 66, 36–56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>

CAPÍTULO 3

Resumen

En las últimas décadas, se ha avanzado en materia de desarrollo de indicadores para la evaluación de impactos ambientales de las actividades antrópicas, que representan una herramienta para orientar la toma de decisiones en el sector público y privado, y así conducir el desarrollo de la humanidad hacia la sustentabilidad. En este capítulo, se analiza la metodología más utilizada para el análisis ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), y sus particularidades para su implementación en el estudio del impacto ambiental de agroproductos y sus cadenas de suministros (CS), con especial atención en aquellos sistemas que luego se utilizan en los modelos de los capítulos siguientes. Se propone hacer el análisis por separado de cada etapa de la CS según se las ha modelado en el capítulo anterior para así poder diseñar libremente diversas CS mediante una combinación de sus elementos y calcular automáticamente las categorías de impacto que se deseen. Además, ante la ausencia de datos en la bibliografía, se presenta por primera vez en la Argentina un perfil ambiental de los productos que actualmente se obtienen a partir del limón. También se analizan las implicaciones ambientales de pasar del esquema de producción convencional a una biorrefinería que incluye estrategias de economía circular mediante el análisis ambiental de posibles escenarios.

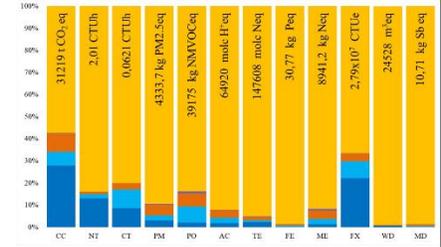
Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida; perfil ambiental; análisis de inventario; limón; caña de azúcar; optimización.

Resumen gráfico

Evaluación ambiental de cadenas de suministros de biorrefinerías regionales



Producto	Valor	Unidad
Caña de azúcar		1 ton
Recursos		
Ocupación, cultivables, no irrigados	0.01362843	ha a
Dióxido de carbono	849.732883	kg
Agua de lluvia	111.398823	m ³
Materiales y combustibles		
Agua de pozo	7.76820739	L
Transporte, pick-up transporte liviano	0.21982665	km
Urea	2.94374182	kg
Triple superfosfato	0.05451374	kg
Compuesto de azetamida	0.00488443	kg
Atrazina	0.04291321	kg
Compuesto de triazina	0.01008304	kg



Evaluación ambiental de cadenas de suministros de biorrefinerías regionales

3.1 Introducción

Uno de los principales desafíos actuales en materia ambiental es la estandarización de los cálculos referidos a la evaluación ambiental de sistemas y productos para orientar la toma de decisiones en el sector público y privado, y así conducir el desarrollo de la humanidad hacia la sustentabilidad. En las últimas décadas se ha avanzado en materia de desarrollo de indicadores para la evaluación de impactos ambientales de las actividades antrópicas, representando esto una condición cuasi necesaria para la introducción y competencia de productos y servicios en el mercado mundial. Además, bajo ciertas consideraciones, algunas metodologías permiten la comparación ambiental de sistemas para complementar la selección entre distintas alternativas junto con otros indicadores económicos, técnicos y sociales.

Las cadenas de suministros (CS⁴) pueden ser evaluadas ambientalmente analizando cada uno de sus eslabones a partir de la cuantificación de los insumos y emisiones al ambiente que involucran su existencia y funcionamiento. En el caso de las CS de biorrefinerías, la carga ambiental que trae la materia prima utilizada (biomasa) depende de las prácticas agrícolas que, a su vez, dependen de factores climáticos, suelo y especie analizada. Esto hace que el análisis ambiental de la biomasa y sus derivados deba realizarse para un alcance geográfico y temporal específicos.

En este capítulo se analiza la metodología más utilizada para el análisis ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, LCA), y sus particularidades para su implementación en el estudio del impacto ambiental de agroproductos y sus CS, con especial atención en aquellos sistemas que luego se utilizan en los modelos del capítulo siguiente. Luego se estudia la disponibilidad de datos e inventarios para el cálculo del

⁴ Abreviaturas: 1G: primera generación, 2G: segunda generación, A: caso base, AC: acidificación, B1: caso biorrefinería 1, B2: caso biorrefinería 2, B3: caso biorrefinería 3, CC: cambio climático, CS: cadena de suministros, CT: toxicidad humana efectos carcinogénicos, FE: eutrofización de agua dulce, FX: ecotoxicidad del agua dulce, HA: huella de agua, HH: huella hídrica, HTL: nivel tecnológico alto, ISO: Organización Internacional de Normalización, LCA: análisis de ciclo de vida, LTL: nivel tecnológico bajo, LU: uso del suelo, MD: agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables, ME: eutrofización marina, MTL: nivel tecnológico medio, NT: toxicidad humana efectos no carcinogénicos, OD: agotamiento del ozono, PM: formación de material particulado, PO: formación fotoquímica de ozono, RAC: residuos agrícolas de cosecha, RE: radiación ionizante-ecosistemas, RH: radiación ionizante-salud humana, RPL: residuos de poda de limón, TE: eutrofización terrestre, WD: agotamiento de los recursos hídricos.

impacto ambiental de las principales fuentes de biomasa de la región (caña de azúcar y limón), adaptando los existentes y elaborando los faltantes. Finalmente, se presenta un caso de estudio donde se utilizan los inventarios generados para el cálculo de huellas ambientales de productos derivados de limón y, además, se evalúan ambientalmente alternativas operativas de una biorrefinería de limón.

3.2 El Análisis de Ciclo de Vida

El LCA es una metodología bien establecida para el análisis ambiental de sistemas y productos que sigue las normas de la serie ISO 14040 (2006)⁵. Un estudio de ciclo de vida involucra la recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema (producto o servicio) en todo su ciclo de vida (ISO 14044, 2012). El LCA permite la identificación de oportunidades para comprender y mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida, el estudio y la selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes para un dado sistema, contribuciones en materia de *marketing* y el aporte de información ambiental a los tomadores de decisiones (Hellweg y Milà i Canals 2014).

Un estudio de LCA debe realizarse siguiendo cuatro fases:

- Fase 1. Definición de los Objetivos y el Alcance
- Fase 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida
- Fase 3. Evaluación de Impacto Ambiental de Ciclo de Vida
- Fase 4. Interpretación

En la Fase 1, se define el objetivo del estudio y, como consecuencia, los límites del sistema y el nivel de detalle dependiendo del tema y del uso previsto del estudio y sus resultados. El Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (Fase 2) lleva a la elaboración de un inventario de los datos de entrada/salida del sistema definido en la Fase 1. En esta fase se recopilan los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio. La Fase 3, de evaluación del impacto, convierte la información de los inventarios en potenciales impactos ambientales para poder interpretar sus implicancias. En la fase de interpretación (Fase 4), se discuten los resultados de las fases previas para la elaboración de conclusiones, recomendaciones

⁵ <https://www.iso.org/home.html>

y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos en la Fase 1 (ISO 14044, 2012).

El LCA es una técnica ampliamente utilizada para la evaluación ambiental aplicada a productos. En el ámbito de la Ingeniería de Procesos ha demostrado tender un gran potencial como herramienta en el análisis y diseño de procesos desde sus inicios hasta el presente (Azapagic 1999, Kleinekorte *et al.* 2020) y particularmente en la gestión de CS (Grossmann y Guillén Gosálbez 2010, You *et al.* 2012, Yue *et al.* 2016). Además, se usa en optimización multiobjetivo de procesos para obtener el inventario e incluir los resultados ambientales en el modelo de optimización (Jacquemin *et al.* 2012) y así satisfacer criterios económicos y ambientales para lograr un enfoque más sustentable incluyendo todo el ciclo de vida (Azapagic y Clift 1999).

Un estudio de LCA adopta necesariamente un enfoque de ciclo de vida completo, es decir, tiene como objetivo cubrir desde la adquisición de la materia prima, producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta las etapas de disposición final de los residuos. Este enfoque se llama “de la cuna a la tumba” (*cradle-to-grave*). Sin embargo, en función del objetivo y alcance definidos en la Fase 1, se admiten en la práctica otros enfoques. Si se toma “de la cuna a la puerta” (*cradle-to-gate*), se incluye el ciclo de vida llevando el límite del sistema hasta la salida de la fábrica donde se produce el producto estudiado (Hauschild 2018). La mayoría de los estudios de LCA realizados sobre análisis de procesos consideran los procesos unitarios como cajas negras utilizando un enfoque “de la puerta a la puerta” (*gate-to-gate*) y construyen el inventario del sistema combinando los diferentes procesos bajo ciertas condiciones operativas (Jacquemin *et al.* 2012, Wheeler *et al.* 2018). Con respecto a los estudios de planificación a nivel estratégico de CS, se puede estudiar cada etapa de la CS con un enfoque “de la puerta a la puerta” de modo tal que al adicionar el LCA de cada etapa, se pueda construir un estudio con un enfoque “de la cuna a la puerta” para toda la CS, aprovechando una de las características del LCA: la modularidad.

En la Fase 3, se realiza el cálculo de impactos ambientales potenciales para diferentes categorías de impacto siguiendo metodologías que establecen los factores de caracterización para transformar la información del inventario del ciclo de vida (Fase 2) en una o más categorías de impacto. Algunos ejemplos de metodologías para el cálculo de categorías de impacto son: ReCiPe (Huijbregts *et al.* 2020), USETox (Fantke *et al.* 2021), IMPACT World+ (Bulle *et al.* 2019) e ILCD (EC-JRC 2012), entre otros.

Las categorías de impacto se clasifican en dos tipos según el nivel del mecanismo ambiental en el que se establezca el cálculo. Por un lado, los indicadores de impacto de punto medio (*midpoint*) se calculan en una instancia temprana en el mecanismo ambiental, dando un resultado más medible, pero con menos relevancia ambiental y más alejado de las preocupaciones directamente observables en el medio ambiente (por ejemplo: eutrofización, acidificación). Por otro lado, los indicadores de impacto de punto final (*endpoint*) se calculan en una última etapa en el mecanismo ambiental, brindando información más relevante pero menos verificable (por ejemplo: ecosistemas degradados, salud humana afectada) (Hauschild 2018).

Dentro de los impactos ambientales relevantes para productos agroindustriales destacan aquellos relacionados con los recursos hídricos (SOLAW 2021). La cuantificación de la Huella Hídrica (HH) a través de la metodología impulsada por la Water Footprint Network⁶ y de la Huella de Agua (HA) desarrollada por ISO (ISO 14046, 2014) es una práctica relativamente reciente y en crecimiento, particularmente en Latinoamérica (Martínez *et al.* 2016).

La HA es un conjunto de métricas basadas en un LCA con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua (ISO 14046, 2014), mientras que la HH tiene como objetivo cuantificar el volumen de agua requerido por un consumidor, un producto, una empresa o una región geográfica clasificado en componentes azul, verde y gris. Ambas metodologías buscan conocer por diferentes vías el consumo de agua asociado a diversas unidades de análisis y sus consecuencias ambientales relacionadas con la disponibilidad del recurso y su degradación.

3.3 Cadenas de suministros de biorrefinerías regionales

En este capítulo se busca caracterizar desde un punto de vista ambiental a las CS de interés para este estudio. Para ello se propone hacer el análisis por separado de cada etapa de la CS según se las ha modelado en el capítulo anterior para así poder diseñar libremente diversas CS mediante una combinación de sus elementos y calcular automáticamente las categorías de impacto que se deseen. Las etapas principales serán: producción de biomasa, procesamiento de la biomasa, almacenamiento y transporte entre cada una de ellas y hacia los centros de demanda (Fig. 3.1). Para cada etapa se define una

⁶ <https://www.waterfootprint.org/>

unidad funcional y un flujo de referencia convenientes para que sean compatibles con los resultados del modelo de optimización. Persiguiendo esta aplicación del LCA en el modelado de CS, se elaboran los inventarios del ciclo de vida con un enfoque “de la puerta a la puerta” como es común en la bibliografía (Guillén Gosálbez *et al.* 2010, Esteves *et al.* 2021). Es común en este tipo de estudios suponer despreciable el impacto de la etapa de almacenamiento de productos finales (Mele *et al.* 2011) ya que no implica procesos altamente intensivos en materiales ni energía (por ejemplo, no se necesita refrigeración).



Figura 3.1. Concepto de modularidad del LCA aplicado a una CS como suma del LCA de cada una de las etapas de la cadena.

Los dos principales cultivos de la provincia de Tucumán (*id est*, caña de azúcar y limón) se consideran como materias primas representativas de la producción de biomasa de la región con uso potencial en biorrefinerías.

3.4 Producción de biomasa

La producción de biomasa tiene como alcance geográfico la provincia de Tucumán donde se llevan a cabo las actividades de cultivo, cosecha e industrialización de caña de azúcar y limón. Tucumán es la provincia más pequeña de la Argentina (22.524 km²) y se ubica en la región Noroeste del país. La provincia presenta dos áreas geográficas principales: la sierra occidental y la llanura oriental, esta última con una altitud promedio de 400 m sobre el nivel del mar. Los cultivos de interés para esta Tesis se desarrollan en la llanura, dentro de la cuenca del río Salí-Dulce, donde el clima es subtropical con estación seca en invierno. En esta zona las precipitaciones ascienden a 1000 mm anuales y el suelo es predominantemente franco-limoso o limoso en la superficie y franco-arcillo-limoso en las capas más profundas (Romero *et al.* 2009). La región es particularmente húmeda rodeada de áreas semiáridas y no sufre específicamente de escasez de agua, pero el régimen de lluvias es muy irregular. En general, las lluvias son suficientes para satisfacer durante todo el año los requerimientos de agua del cultivo de caña mientras que, para el cultivo de limón solo pueden satisfacerlos desde finales de octubre hasta mayo. En invierno (de junio a septiembre) hay una estación seca marcada que coincide con la cosecha. Por las

características agroecológicas de algunas zonas de la región, las necesidades hídricas de las plantaciones de limón se satisfacen en su mayor parte con las lluvias y solo se necesita riego en ciertas zonas más secas (aproximadamente un 35% de la superficie cultivada). Esta situación posiciona a la región por sobre otras zonas productoras de limón en el país y en el mundo que se caracterizan por bajos niveles de precipitación y fuerte necesidad de riego. Si bien existen estudios publicados con enfoque de ciclo de vida de estos cultivos, las características particulares de la región hacen que las prácticas agrícolas sean específicas y que deban realizarse estudios de LCA regionales. De aquí que, en los últimos años, la aplicación del LCA a agroproductos argentinos sea creciente, por ejemplo, para biodiésel de soja (Panichelli *et al.* 2009, Piastrellini *et al.* 2017, Araujo *et al.* 2019) y bioetanol de caña de azúcar (Amores *et al.* 2013, Nishihara *et al.* 2017), de maíz (Pieragostini *et al.* 2014) y de sorgo dulce (Garolera De Nucci *et al.* 2023), para mencionar algunas.

3.5 Producción de caña de azúcar

A nivel global, se han presentado estudios de LCA de producción e industrialización de caña de azúcar en diversas regiones productoras tales como Australia (Renouf *et al.* 2010, 2011), Cuba (Pérez Gil *et al.* 2013), Brasil (Ometto *et al.* 2009, Seabra *et al.* 2011, Lopes Silva *et al.* 2014), India (Tsiropoulos *et al.* 2014) y Sudáfrica (Mashoko *et al.* 2013), entre otros.

Para el caso de la caña de azúcar cultivada en la Argentina, solo se han encontrado dos trabajos que abordan el estudio de LCA de su producción primaria e industrialización: Amores *et al.* (2013) y Nishihara Hun *et al.* (2017). El primero desarrolla un LCA del bioetanol de caña de azúcar en Tucumán enfocándose en la identificación de puntos críticos (*hotspots*). Para realizar el estudio los autores reportan datos reales de los subsistemas de la actividad azucarera argentina incluyendo la producción de caña de azúcar, la molienda y la producción de azúcar y de etanol a partir de melaza. Además, presentan el LCA de la producción de etanol a partir de mieles o directamente a partir del jugo de la caña de azúcar. Los autores encuentran que las actividades agrícolas son las que presentan el mayor impacto en casi todas las categorías de impacto seleccionadas debido principalmente al consumo de combustibles fósiles. Nishihara Hun *et al.* (2017) realizan también un LCA de la industria de la caña de azúcar en Tucumán, pero distinguiendo diferentes niveles tecnológicos en la etapa agrícola: alto (HTL), medio (MTL) y bajo (LTL). Dividen el sistema global en tres subsistemas: agricultura, ingenio y destilería. Los datos utilizados para el inventario son datos primarios y provienen principalmente de expertos locales, productores de caña de azúcar y empresas. Los

niveles tecnológicos difieren en el rendimiento cultural, el mecanismo de cosecha, la intensidad del uso de agroquímicos y el porcentaje de quema de residuos. Se encuentra que en la mayoría de las categorías de impacto la principal contribución deriva del uso de agroquímicos sintéticos. Además, si se implementan prácticas asociadas al HTL, se puede esperar una reducción del impacto ambiental en la mayoría de las categorías. Si bien estos dos trabajos mencionados representan de manera satisfactoria el sistema y región bajo estudio (producción primaria de caña de azúcar en Tucumán), es necesario revisar y adecuar los inventarios de ciclo de vida para poder aplicarlos en conjunto con el modelado y la optimización matemática en el capítulo siguiente.

Las materias primas derivadas del cultivo de caña de azúcar que considera el modelo propuesto en el Capítulo 2 son la caña de azúcar y los residuos agrícolas de cosecha (RAC). Estos últimos se producen a razón de 151 kg de RAC por tonelada de caña de azúcar cosechada (Capítulo 2). Como ambos productos tienen la posibilidad de ser aprovechados en el contexto de una biorrefinería, se considera un factor de asignación másico para la adecuación de los inventarios. De esta manera, resulta una distribución de los impactos de 86,88% para la caña y 13,12% para los RAC. Por otro lado, en los últimos años las prácticas agrícolas se han orientado al HTL (EEAOC 2020) según se define en el trabajo de Nishihara *et al.* (2017) y que se caracteriza por un sistema de cosecha mecanizada, uso intensivo de agroquímicos y escasa a nula quema de residuos en comparación con los otros niveles tecnológicos. La Fig. 3.2 presenta un esquema simplificado de la producción primaria de biomasa derivada de caña de azúcar y sus principales entradas y salidas, mientras que la Tabla 3.1 resume los consumos y emisiones del sistema agrícola para la producción de una tonelada de caña de azúcar (flujo de referencia). Los procesos de la tecnósfera son seleccionados de la base de datos Ecoinvent® v3.8 (Wernet *et al.* 2016). Los inventarios resultantes sirven como entradas al programa de *software* gestor de estudios de LCA Brightway (Mutel 2017) para su uso posterior en la Fase 2 del LCA.

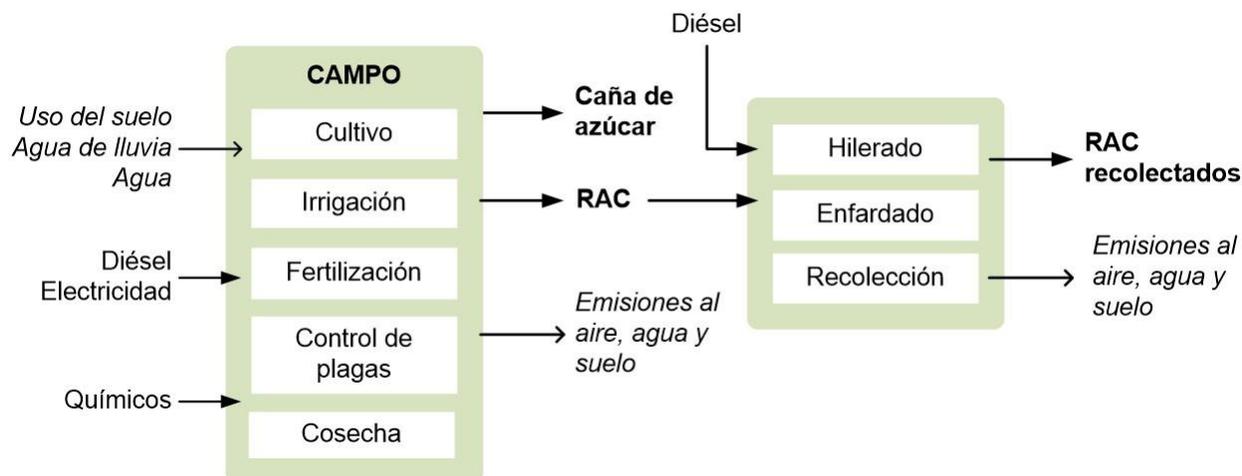


Figura 3.2. Esquema simplificado de la producción de caña de azúcar y residuos agrícolas de cosecha (RAC).

Tabla 3.1. Tabla de entradas y salidas para la etapa de producción agrícola de caña de azúcar. Flujo de referencia: 1 tonelada de caña de azúcar cosechada. Factor de asignación másico: 86,88%.

Producto	Valor	Unidad
Caña de azúcar		1 t
Recursos	Valor	Unidad
Área ocupada, cultivable, no irrigada	0,01362843	ha a
Dióxido de carbono	849,732883	kg
Agua de lluvia	111,398823	m ³
Materiales y combustibles	Valor	Unidad
Agua de pozo	7,76820759	L
Transporte, pick-up transporte liviano	0,21982665	km
Urea	2,94374182	kg
Triple superfosfato	0,05451374	kg
Compuestos de acetamida	0,00488443	kg
Atrazina	0,04291321	kg
Compuestos de triazina	0,01008504	kg
Metolaclor	0,01098997	kg
Compuestos de biperidilo	0,00294374	kg
Herbicidas	0,01008068	kg
Fenoxi-compuestos	0,01027039	kg
Diésel	1,50350655	kg

Tabla 3.1 (cont.). Tabla de entradas y salidas para la etapa de producción agrícola de caña de azúcar. Flujo de referencia: 1 tonelada de caña de azúcar cosechada. Factor de asignación másico: 86,88%.

Emisiones al aire	Valor	Unidad
Compuestos orgánicos volátiles, VOC	0,00091963	kg
Óxidos de nitrógeno	0,080532	kg
Monóxido de carbono fósil	0,00174189	kg
Dióxido de carbono	0,01107586	kg
Dióxido de carbono fósil	2,63154405	kg
Dióxido de azufre	0,00015363	kg
Metano fósil	0,000019637	kg
Benceno	0,000001109	kg
Partículas, < 2,5 µm	0,00030672	kg
Cadmio	1,5201·10 ⁻⁹	kg
Cromo	7,6276·10 ⁻⁹	kg
Cobre	2,5858·10 ⁻⁷	kg
Monóxido de dinitrógeno	0,09074441	kg
Níquel	1,0657·10 ⁻⁸	kg
Zinc	1,5201·10 ⁻⁷	kg
Benzo[a]pireno	4,5657·10 ⁻⁹	kg
Hidrocarburos aromáticos policíclicos, PAH	5,0093·10 ⁻⁷	kg
Amoníaco	0,44156432	kg
Selenio	1,5201·10 ⁻⁹	kg
Emisiones al agua	Valor	Unidad
Nitrato	0,08801788	kg
Atrazina	0,00064353	kg
Ametrina	0,00015128	kg
Metolaclor	0,00016485	kg
Paraquat	0,000044156	kg
Metil arseniato monosódico (MSMA)	0,00015122	kg
2,4-D	0,00015406	kg
Pentóxido de fósforo	0,00313999	kg
2-cloro-N,N-dialilacetamida	0,000073266	kg
Emisiones al suelo	Valor	Unidad
Zinc	0,00005626	kg
Plomo	9,8455·10 ⁻⁸	kg
Cadmio	2,1693·10 ⁻⁸	kg

Este inventario procura incluir gran parte de los recursos de la naturaleza, procesos de la tecnósfera y emisiones al aire, agua y suelo de todas las actividades involucradas en la producción de caña de azúcar, tales como la siembra, el cultivo y la cosecha. Para el cultivo de la caña, el consumo de agua debido al riego artificial no es significativo (Romero *et al.* 2009). Dado que el flujo de referencia es una tonelada de caña de azúcar, todas las etapas posteriores arrojan resultados específicos (por unidad de masa) y es sencillo, a la hora de construir el modelo matemático que use estos datos, hacerlos extensivos para los resultados que arroje la optimización. Esto mismo se plantea con el inventario de los RAC, el flujo de referencia es una tonelada de RAC en el campo.

Las prácticas de recolección, hilerado y enfardado de RAC no son habituales en la región por lo que las publicaciones antes mencionadas no contemplan los inventarios correspondientes. Así, se deben elaborar inventarios para los RAC que reflejen estas actividades. Para ello se toma como fuente el análisis técnico-económico de Paredes *et al.* (2016) donde se realiza la evaluación de factibilidad técnico-económica de la recolección y enfardado de los RAC calculando parámetros productivos, operativos y económicos. La maquinaria e infraestructura necesarias para la recolección de los RAC son: tractor 80 HP, hileradora, enfardadora, cobertizo y camioneta. Las emisiones directas de estas actividades son las debidas a la quema de diésel utilizado como combustible. La Tabla 3.2 presenta las entradas y salidas más significativas para este subsistema al que ingresan los RAC disponibles en el campo y salen los RAC recolectados. Como se menciona en capítulos previos, una porción de los RAC se deja en el campo con fines de protección y fuente de nutrientes (aproximadamente el 50% de los RAC totales). En este trabajo se decide no ponderar los impactos con esta fracción y que los RAC recolectados lleven consigo todos los impactos asociados (asignación de 100%).

Se debe destacar que para que este inventario represente un enfoque *gate-to-gate* se debería anular el ingreso de RAC para solo contabilizar las emisiones y consumos debidos exclusivamente a las tareas de recolección.

Tabla 3.2. Tabla de entradas y salidas para la etapa de recolección de residuos agrícolas de cosecha (RAC). Flujo de referencia: 1 tonelada de RAC recolectados. Factor de asignación másico: 100%.

Producto	Valor	Unidad
Residuos agrícolas de cosecha recolectados		1 t
Recursos	Valor	Unidad
Área ocupada, arable, no irrigada	0,000616	ha a
Materiales y combustibles	Valor	Unidad
Residuos agrícolas de cosecha (disponibles para recolección)		1 t
Diésel, en EESS	2,914	kg
Emisiones al aire	Valor	Unidad
Comp. org. volátiles no metánicos, NMVOC, origen inespecífico	0,003939509	kg
Óxidos de nitrógeno	0,037541207	kg
Monóxido de carbono fósil	0,007461894	kg
Dióxido de carbono	2,025371295	kg
Dióxido de carbono fósil	0,00065813	kg
Dióxido de azufre	0,0000841201	kg
Metano fósil	4,75·10 ⁻⁶	kg
Benceno	0.001313942	kg
Partículas, < 2,5 µm	6,51·10 ⁻⁹	kg
Cadmio	3,27·10 ⁻⁸	kg
Cromo	1,11·10 ⁻⁶	kg
Cobre	0,0000783267	kg
Monóxido de dinitrógeno	4,57·10 ⁻⁸	kg
Níquel	6,51·10 ⁻⁷	kg
Zinc	1,96·10 ⁻⁸	kg
Benzo[a]pireno	2,15·10 ⁻⁶	kg
Hidrocarburos aromáticos policíclicos, PAH	29,6621883	kg
Amoníaco	6,51·10 ⁻⁹	kg
Selenio	0,003939509	kg
Emisiones al suelo	Valor	Unidad
Zinc	0,000241005	kg
Plomo	4,22·10 ⁻⁷	kg
Cadmio	9,29·10 ⁻⁸	kg

3.6 Producción de limón

Existen importantes aportes a nivel global sobre LCA de cítricos de los cuales pocos se aplican al limón. Por ejemplo, Beccali *et al.* (2009) investigan los impactos de la producción de productos a base de limones y naranjas en Italia y Pergola *et al.* (2013) evalúan la sustentabilidad de plantaciones de naranjos y limoneros, usando agricultura orgánica y convencional en Sicilia. Por otro lado, hay trabajos más numerosos sobre LCA de naranjas. Entre otros, Ribal *et al.* (2017) analizan la producción de naranjas orgánicas y convencionales en España, y Lo Giudice *et al.* (2013) estudian la producción de naranjas en Italia. Más recientemente, Frankowska *et al.* (2019) presentan el LCA de las principales frutas consumidas en el Reino Unido, incluyendo al limón como fruta fresca. En la mayor parte de los estudios mencionados, el foco está en la etapa agrícola y muy pocos cubren productos procesados. Solo Beccali *et al.* (2009, 2010) analizan aceite esencial, jugo natural y jugo concentrado de naranjas y limones. Recientemente, Cabot *et al.* (2023) presentan el LCA de limones uruguayos con un enfoque “de la cuna a la puerta” utilizando datos primarios representativos de la región y de cuatro temporadas de cosecha (2016-2020).

Para los limones de la Argentina y sus productos industrializados no se han reportado estudios de LCA. Por lo tanto, como parte del trabajo de esta Tesis, se elabora el inventario de ciclo de vida para las etapas de producción primaria e industrialización del limón argentino, específicamente, el tucumano.

Como se explica en el Capítulo 1, en el proceso de industrialización del limón en los establecimientos citrícolas de la provincia de Tucumán, se obtienen jugos concentrados, aceite esencial, pulpa y cáscara deshidratada. Por los motivos allí expuestos y debido a la sólida posición en el mercado del aceite esencial y los jugos concentrados, se considera que las materias primas derivadas del cultivo de limón susceptibles de ser procesadas en una biorrefinería son aquellas que tienen un valor marginal como producto o que se consideran residuos, como la cáscara húmeda (previa al proceso de deshidratación) y los residuos de poda de limón (RPL).

El estudio de los procesos aguas arriba de una biorrefinería es de suma importancia en un enfoque de ciclo de vida para lograr el perfil ambiental correcto de los productos finales. Como se trata de productos de base agrícola, es necesario incluir el estudio de la etapa de agricultura en el análisis. A continuación, se describen las principales entradas y salidas del ciclo de vida para esta etapa. La Fig. 3.3 presenta un esquema simplificado

de la producción de limón y RPL. Se consideran las prácticas que se realizan en las plantaciones de limón como la siembra, el cultivo y la cosecha. La primera etapa de crecimiento de los limoneros se da en viveros desde donde luego se trasplantan a los campos productivos. El limón es un cultivo perenne (vida útil 20-25 años) con una cosecha estacional que, en Tucumán, abarca de abril a septiembre (ACNOA 2023). El control de malezas es tanto mecánico como químico, mientras que la fertilización y el control de plagas se realizan mediante la aplicación de agroquímicos. Los limones se cortan del árbol a mano y se colocan en contenedores que luego se recolectan en camiones para transportarlos a las siguientes etapas. No toda la fruta cosechada tiene como destino la industrialización, alrededor del 25% de la cantidad total se acondiciona y envasa para venderse como fruta fresca (Federcitrus 2021).

En la etapa agrícola se supone un rendimiento de cultivo equivalente al promedio de los últimos cinco años de 32,5 toneladas de limones por hectárea (EEAOC 2023, Federcitrus 2021). Además, según estudios regionales, se pueden generar aproximadamente 6,0 toneladas de RPL por hectárea por año. De estos se consideran disponibles para su recolección solo 4,3 toneladas por hectárea por año si se deja un 20% como fuente de materia orgánica y protección del suelo y un 10% de pérdidas (EEAOC 2017). Tanto el limón como los RPL tienen la posibilidad de ser aprovechados en el contexto de biorrefinería, luego se considera un factor de asignación másico para la adecuación del inventario. De esta manera resulta una distribución de 84,53% para el limón y 15,47% para los RPL.

La Tabla 3.3 muestra las entradas y salidas de la producción de limón tomando como flujo de referencia una tonelada de limón. Los datos primarios se recopilan a través de entrevistas a expertos locales: productores e industrializadores de limones. Los datos restantes son datos secundarios que se obtienen de informes técnicos de instituciones de investigación locales, por ejemplo, INTA (2023) y EEOAC (2023). Se utiliza una regla de corte del 1% y no se tiene en cuenta la infraestructura, por ejemplo, maquinaria, alambrados y galpones, tuberías y bombas para riego, etc. La confección de este inventario de LCA se presenta con mayor detalle en este documento ya que es la primera vez que se realiza y reporta para la producción de limón de la Argentina.

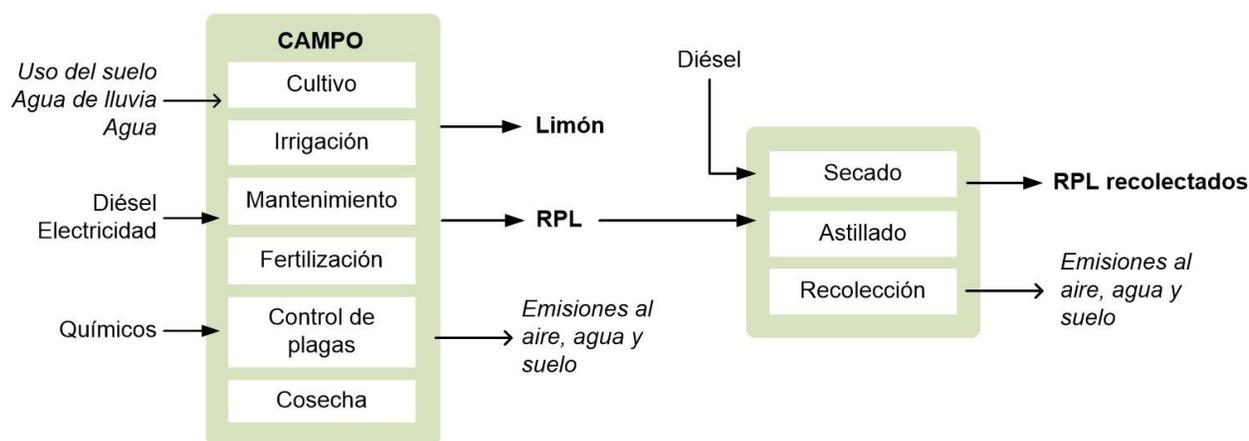


Figura 3.3. Esquema simplificado de la producción de limón que muestra el origen de los residuos de poda (RPL).

Tabla 3.3. Entradas y salidas para la etapa de producción agrícola del limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de limón cosechada. Factor de asignación másico: 84,53%. El valor de las entradas proviene de entrevistas personales con expertos. Las fuentes de datos secundarias se refieren a los conjuntos de datos de Ecoinvent®.

Producto	Valor	Unidad	Proceso Ecoinvent
Limón {AR}		1 t	
Recursos	Valor	Unidad	
Área ocupada, arable	257,8648788	m ² a	
Agua de lluvia	291,4156782	m ³	
Agua de pozo	85,84118463	m ³	
Materiales y combustibles	Valor	Unidad	
Electricidad	7,295771016	kWh	Electricity, low voltage {AR} market for electricity, low voltage APOS, U.
Diésel	4,413099536	kg	Adapted to Argentina from Diesel, at refinery/CH U + combustion emissions.
2,4-D	0,068953069	kg	Phenoxy-compound {GLO} market for APOS, U. HDPE bottles E and Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.

Tabla 3.3. (cont.) Entradas y salidas para la etapa de producción agrícola del limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de limón cosechada. Factor de asignación másico: 84,53%. El valor de las entradas proviene de entrevistas personales con expertos. Las fuentes de datos secundarias se refieren a los conjuntos de datos de Ecoinvent®.

Materiales y combustibles	Valor	Unidad	Proceso Ecoinvent
Abamectina	0,001294482	kg	Application mix, pesticides/kg/CH U. HDPE bottles E. Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Aceite mineral	3,621712223	kg	White mineral oil, at plant/RNA. Steel, unalloyed {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Cloruro de potasio	0,482723053	kg	Potassium chloride, as K2O {RoW} potassium chloride production APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Fosfato de amonio	0,294997421	kg	Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.

Tabla 3.3. (cont.) Entradas y salidas para la etapa de producción agrícola del limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de limón cosechada. Factor de asignación másico: 84,53%. El valor de las entradas proviene de entrevistas personales con expertos. Las fuentes de datos secundarias se refieren a los conjuntos de datos de Ecoinvent®.

Materiales y combustibles	Valor	Unidad	Proceso Ecoinvent
Glifosato	0,23696493	kg	Glyphosate {GLO} market for APOS, U. HDPE bottles E. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Nitrato de amonio	2,397369778	kg	Ammonium nitrate, as N {GLO} market for APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Óxido de cobre (I)	1,756356369	kg	Copper oxide {GLO} market for APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Pyraclostrobin	0,014092316	kg	Pesticide, unspecified {GLO} market for APOS, U. HDPE bottles E. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.
Urea-nitrato de amonio	0,557503868	kg	Nitrogen fertiliser, as N {RoW} urea ammonium nitrate production APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.

Tabla 3.3. (cont.) Entradas y salidas para la etapa de producción agrícola del limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de limón cosechada. Factor de asignación másico: 84,53%. El valor de las entradas proviene de entrevistas personales con expertos. Las fuentes de datos secundarias se refieren a los conjuntos de datos de Ecoinvent®.

Materiales y combustibles	Valor	Unidad	Proceso Ecoinvent
Urea	3,453842187	kg	Urea, as N {GLO} market for APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U.

Emisiones al aire	Valor	Unidad
Compuestos orgánicos volátiles no metánicos NMVOC, origen inespecífico	0,005965545	kg
Óxidos de nitrógeno	0,252383158	kg
Monóxido de carbono, fósil	0,011299444	kg
Dióxido de carbono, fósil	3,066991885	kg
Dióxido de azufre	0,000996597	kg
Metano, fósil	0,000127382	kg
Benceno	7,19375·10 ⁻⁶	kg
Partículas, < 2,5 µm	0,001989685	kg
Cadmio	9,86069·10 ⁻⁹	kg
Cromo	4,94789·10 ⁻⁸	kg
Cobre	1,67737·10 ⁻⁶	kg
Monóxido de dinitrógeno	0,274427248	kg
Níquel	6,91301·10 ⁻⁸	kg
Zinc	9,86069·10 ⁻⁷	kg
Benzo[a]pireno	2,96172·10 ⁻⁸	kg
Hidrocarburos aromáticos policíclicos PAH	3,24947·10 ⁻⁶	kg
Amoníaco	0,54496086	kg
Selenio	9,86069·10 ⁻⁹	kg

Tabla 3.3. (cont.) Entradas y salidas para la etapa de producción agrícola del limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de limón cosechada. Factor de asignación másico: 84,53%. El valor de las entradas proviene de entrevistas personales con expertos. Las fuentes de datos secundarias se refieren a los conjuntos de datos de Ecoinvent®.

Emisiones al agua	Valor	Unidad
2,4-D	0,001034296	kg
Plaguicidas, inespecífico	0,0000194172	kg
Fosfato	0,012183394	kg
Glifosato	0,003554474	kg
Nitrato	0,386126818	kg
Óxidos de cobre	0,026345346	kg
Fungicidas	0,000211385	kg
Emisiones al suelo	Valor	Unidad
Zinc	0,000364951	kg
Plomo	6,38664·10 ⁻⁷	kg
Cadmio	1,40717·10 ⁻⁷	kg
Plaguicidas, inespecíficos	0,0000194172	kg

El consumo directo de agua corresponde a agua de pozo, que incluye agua utilizada para riego y para dilución/aplicación de agroquímicos, sin embargo, el agua de riego (3000 m³/ha/año) supera en varios órdenes de magnitud a esta última. Los datos pluviométricos medios anuales se obtienen de las estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de la zona citrícola de la provincia de Tucumán (Agromet EEAOOC 2021). El consumo de energía eléctrica deriva principalmente del bombeo de agua para riego en época seca (283 kWh/ha/año). Las emisiones asociadas a la producción y al uso de energía eléctrica se toman según la matriz eléctrica argentina (disponible en Ecoinvent® v3.5 y posteriores). El consumo de diésel proviene del uso de combustible en todas las labores del cultivo incluyendo la poda y aplicación de agroquímicos. También se considera el mantenimiento de maquinarias y equipos: los principales insumos son el agua de lavado de máquinas y el aceite lubricante. La producción, los envases y el transporte de los principios activos de los agroquímicos están tomados de Ecoinvent® v3.8. Para estimar las emisiones —pérdidas por volatilización y escurrimiento de agroquímicos— se utilizan los trabajos de Nemecek y Kägi (2007) y Renouf *et al.* (2006). No se considera la etapa de vivero (18 meses desde la germinación hasta la ubicación final de los plantines en el campo) por encontrarse que su aporte es insignificante con respecto a las etapas agrícolas posteriores (Cerutti *et al.* 2014).

Las prácticas de recolección de RPL aún no se implementan en la región por lo que se debe elaborar un inventario para estas actividades potenciales. Díaz (2016) realiza una evaluación técnico-económica para el uso de RPL en gasificadores con un pre-acondicionamiento que incluye el secado natural y astillado. Las emisiones directas de estas actividades son las debidas a la quema de diésel utilizado como combustible. La Tabla 3.4 presenta el inventario para este subsistema.

Tabla 3.4. Entradas y salidas para la etapa de recolección de residuos de poda de limón (RPL). Flujo de referencia: 1 tonelada de RPL. Factor de asignación másico: 100%.

Producto	Valor	Unidad
Residuos de poda de limón		1 t
Materiales y combustibles	Valor	Unidad
Residuos de poda de limón (disponibles para recolección)		1 t
Diésel, en EESS	1,638	kg
Emisiones al aire	Valor	Unidad
Comp. org. volátiles excepto metano, NMVOC, origen inespecífico	0,002214218	kg
Óxidos de nitrógeno	0,021100191	kg
Monóxido de carbono, fósil	0,004193989	kg
Dióxido de carbono	1,138368321	kg
Dióxido de carbono, fósil	0,000369905	kg
Dióxido de azufre	0,0000472801	kg
Metano, fósil	2,67009·10 ⁻⁶	kg
Benceno	0,000738507	kg
Partículas, < 2,5 µm	3,66·10 ⁻⁹	kg
Cadmio	1,84·10 ⁻⁸	kg
Cromo	6,23·10 ⁻⁷	kg
Cobre	0,0000440239	kg
Monóxido de dinitrógeno	2,57·10 ⁻⁸	kg
Níquel	3,66·10 ⁻⁷	kg
Zinc	1,10·10 ⁻⁸	kg
Benzo(a)pireno	1,21·10 ⁻⁶	kg
Hidrocarburos aromáticos policíclicos, PAH	16,67175573	MJ
Amoníaco	3,66·10 ⁻⁹	kg
Selenio	0,002214218	kg
Emisiones al suelo	Valor	Unidad
Zinc	0,000135458	kg
Plomo	2,37·10 ⁻⁷	kg
Cadmio	5,22·10 ⁻⁸	kg

3.7 Tecnologías convencionales de procesamiento

En esta sección y la siguiente se detalla la confección o adaptación de los inventarios relacionados con las tecnologías de procesamiento del tipo de biomasa de interés para las biorrefinerías de este trabajo, tanto tecnologías convencionales como potenciales. Si bien algunas tecnologías convencionales no se tendrán en cuenta en el modelado por la baja probabilidad de que disminuya la demanda de sus productos asociados (por ejemplo: producción de aceite esencial y jugo de limón), es necesario realizar un estudio de LCA de todo el sistema. De esta manera se puede incluir y atribuir los impactos del ciclo de vida a los materiales que luego serán procesados en las biorrefinerías, y así poder elaborar perfiles ambientales de los productos principales de estas biorrefinerías con conocimiento del origen de sus impactos ambientales.

3.7.1 Industrialización de la caña de azúcar

Como se explica en el Capítulo 1, la industrialización convencional de la caña de azúcar en Tucumán lleva a la obtención de azúcar como producto principal y bioetanol como coproducto. Los inventarios de cada tecnología del proceso de industrialización convencional de caña de azúcar se construyen de forma congruente con la distinción de tecnologías del Capítulo 2 y en base a los inventarios reportados por Amores *et al.* (2013) y Nishihara *et al.* (2017), además de reportes regionales pertinentes y consultas a expertos. A continuación, se presenta una breve descripción de las tecnologías convencionales para el procesamiento de caña de azúcar. Los inventarios resultantes se presentan en el Anexo B.

Tecnología de molienda. Se toma como flujo de referencia una tonelada de caña de azúcar (Tabla B1, Anexo B). Al sistema ingresa caña de azúcar y egresan bagazo y jugo. Tanto el consumo de agua como de electricidad del sistema se toman de consultas a empresas y son comparables a los reportados por Amores *et al.* (2013).

Producción de azúcar. El flujo de referencia es una tonelada de azúcar blanco (Tabla B2, Anexo B). Al sistema ingresan el jugo de caña y egresan azúcar blanco y crudo y melazas. Las tablas de inventarios de Amores *et al.* 2013 se revisan y adaptan para el caso.

Producción de etanol 1G. Se toma como flujo de referencia una tonelada de etanol (Tabla B3, Anexo B). Al sistema ingresan las melazas y egresan etanol y vinazas. Para este caso,

se toman los datos de inventario de Amores *et al.* (2013) por la similitud entre las entradas y salidas de las tecnologías.

De los inventarios desarrollados, aquellos que se caracterizan por presentar múltiples salidas se afectan por un factor de asignación másica del 100% al producto de referencia utilizado para cada tecnología en el modelo del Capítulo 2. De esta forma, una vez seleccionada una tecnología y su tasa de producción, los impactos podrán ser calculados al multiplicar la tasa de producción de la tecnología (en términos del producto de referencia) por el valor de impacto expresado por unidad de producto de referencia. La información de entrada /salida de materiales de cada tecnología se carga en Brightway (Mutel, 2017) para luego completar la Fase 2 del LCA.

3.7.2 Industrialización del limón

Esta sección es más detallada que la anterior habida cuenta de que la confección de inventarios sobre la producción e industrialización de limón local no tiene antecedentes en la bibliografía, por lo que se considera una contribución de esta Tesis. Una vez en la planta de procesamiento, los limones se descargan y someten a un proceso de limpieza para eliminar el polvo, las impurezas y la fruta podrida. A continuación, un proceso de extracción mecánica recupera hasta el 90% del aceite de limón utilizando agua como medio receptor. La emulsión de aceite y agua resultante se concentra a través de tres etapas de centrifugación para obtener aceite puro. Los limones sin aceite se transfieren a una segunda etapa de extracción mecánica donde se separa el jugo de la cáscara, la pulpa y las semillas. La pulpa se recupera y se lava para obtener un jugo de baja concentración que se mezcla con la corriente principal. Más tarde, el jugo se concentra a la especificación deseada a través de evaporación al vacío. La mayor parte de la cáscara de limón (aproximadamente el 70%) se deshidrata (Bevilacqua 2018). Para ello, la cáscara se somete a una serie de operaciones sucesivas de lavado y prensado para eliminar los azúcares remanentes. La cáscara lavada (con aproximadamente 90% en peso de humedad) se transfiere a un secador rotatorio para deshidratación hasta un contenido de agua promedio de 10% en peso. El efluente —aguas de lavado— se envía a un digestor anaeróbico. Es importante señalar que los detalles del proceso reflejan la operación de las tres principales empresas cítricas procesadoras de limón en Tucumán y la Argentina.

La Fig. 3.4 ilustra de forma simplificada las actividades mencionadas y los flujos de materiales entre ellas. Allí se muestran todos los productos derivados de la actividad

citricola de Tucumán incluyendo los productos industrializados y la fruta fresca. El cálculo de indicadores de LCA y de HA (con un enfoque de LCA) se lleva a cabo en el marco de esta Tesis doctoral con el fin de obtener los perfiles ambientales de cada producto (impactos por unidad de producto) y los impactos ambientales de toda la actividad (impactos absolutos para la provincia). Más detalles se pueden consultar en Machin Ferrero *et al.* (2021) y Machin Ferrero *et al.* (2022a).

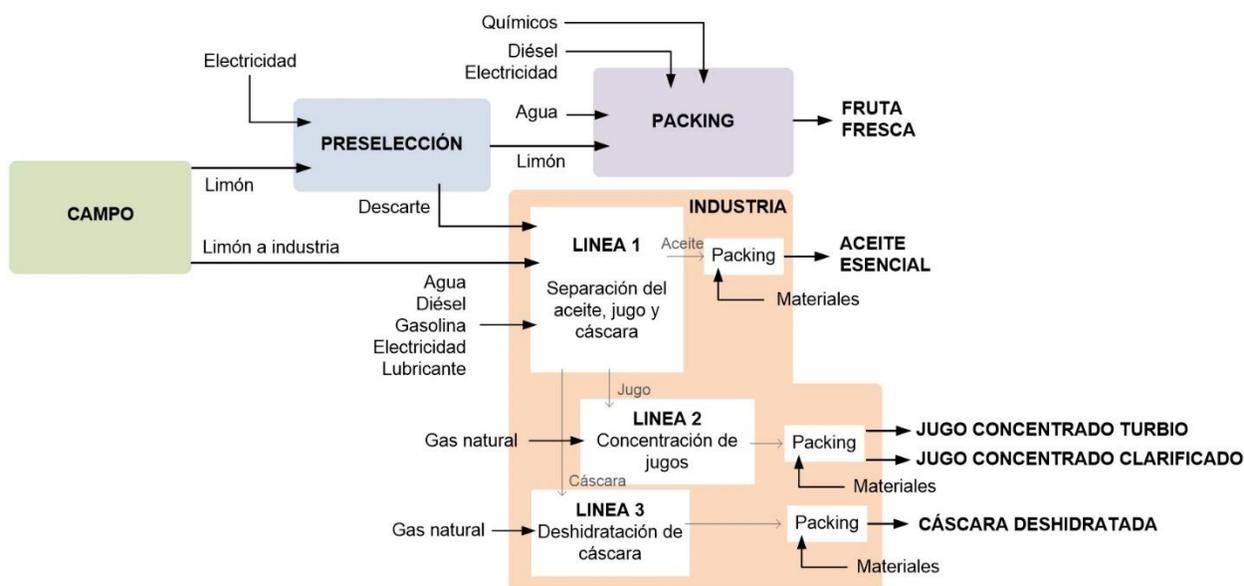


Figura 3.4. Esquema simplificado de la actividad citrícola de la provincia de Tucumán.

Tabla 3.5. Consumo de materiales y energía para la etapa de industrialización convencional de limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de aceite esencial de limón. Factor de asignación másico: 100%.

Producto	Valor	Unidad
Aceite esencial	1,00	t
Materiales y combustibles		
Limón	4,57	t
Electricidad	338,1	kWh
Agua de pozo	58,8	m ³
Diésel	0,86	kg
Nafta	0,52	kg
Aceite lubricante	0,20	kg
Acero (<i>packing</i>)	65,7	kg
Acero galvanizado (<i>packing</i>)	58,6	kg
Polipropileno granulado (<i>packing</i>)	0,042	kg

La Tabla 3.5 presenta el consumo de materiales y energía para la etapa de industrialización convencional del aceite esencial de limón. La distribución de productos finales en base másica respecto de la masa total de productos, es 2,1% de aceite esencial, 71,7% de jugo concentrado y 26,2% de cáscara deshidratada. Los cómputos del inventario se realizan para una asignación másica basada en estos porcentajes. El consumo eléctrico es el utilizado para el funcionamiento de toda la maquinaria eléctrica de la fábrica. El consumo de combustibles líquidos (diésel y nafta) corresponde a ciertas operaciones de maquinaria y transporte interno. El gas natural se consume para la producción de vapor (calderas) y para la deshidratación de la cáscara (secadores de llama directa). También se consideran los consumos de agua de pozo —para lavado de limones, generación de vapor, refrigeración, etc.— y aceite lubricante y agua para el mantenimiento de la maquinaria.

Si se excluye el sistema de secado de cáscara con el objeto de utilizar la cáscara húmeda de limón como materia prima en la biorrefinería, los rendimientos promedio con respecto a la masa total de productos correspondientes son 1,10% de aceite esencial, 37,37% de jugo concentrado y 61,53% de cáscara húmeda. Esto afecta a los valores de la tabla anterior modificando el factor de asignación de cada producto.

3.8 Nuevas tecnologías de procesamiento en biorrefinerías

3.8.1 Tecnologías de aprovechamiento de caña de azúcar

En esta sección se describen los inventarios de las tecnologías para el procesamiento de caña de azúcar que pueden complementar o reemplazar a las convencionales para integrar el tejido de tecnologías de una biorrefinería. La descripción general de estas tecnologías se encuentra en el Capítulo 2. El desarrollo de estos inventarios obedece a la necesidad de contar con información ambiental de las nuevas tecnologías de modo de poder aplicarlas en un marco general de evaluación de la sustentabilidad de una CS de biorrefinerías tal como el que se presentará en el Capítulo 4.

Producción de azúcar con coproducción de mieles. Se toma como flujo de referencia una tonelada de azúcar blanco. Al sistema ingresa jugo de caña y egresan azúcar blanco y mieles (Amores *et al.* 2013). Véase la Tabla B4 del Anexo B.

Producción de etanol a partir de jugo. Se toma como flujo de referencia una tonelada de etanol. Al sistema ingresa directamente el jugo de caña y egresan etanol y vinazas (Tabla B5 del Anexo B) (Amores *et al.* 2013).

Producción de etanol a partir de mieles. Se toma como flujo de referencia una tonelada de etanol. Al sistema ingresan mieles y egresan etanol y vinazas (Tabla B6 del Anexo B) (Amores *et al.* 2013), entre otros productos.

Producción de azúcares a partir de biomasa lignocelulósica. Los inventarios de las tecnologías de producción de azúcares simples (hexosas y pentosas) a partir de material lignocelulósico se toman de Kim *et al.* (2013). Los detalles pueden consultarse en las Tablas B7 (flujo de referencia: 1 t de hexosas) y B8 (flujo de referencia: 1 t de pentosas) del Anexo B. La cantidad de material lignocelulósico que se requiere en cada caso está fijada por el balance de materia y los coeficientes de dicho balance, presentados en el Capítulo 2.

Cogeneración. Se considera la producción de 1 kWh de electricidad a partir de material lignocelulósico. Se toma como base un *dataset* de la base de datos Ecoinvent® v3.8 (*Electricity at cogeneration*). La cantidad de material lignocelulósico que se requiere está fijada por el balance de masa y los coeficientes de balance de masa presentados en el Capítulo 2. Se asume que el calor generado por este sistema es utilizado para satisfacer necesidades energéticas de otros sistemas.

Producción de ácido cítrico. Para esta tecnología el flujo de referencia es de 1 t de ácido cítrico (Tabla B9 del Anexo B). Se toman los inventarios reportados en Heinzle *et al.* (2007) y la cantidad de azúcares que se requieren se modifican en base a la corriente de hexosas y está fijada por el balance de materia y los coeficientes de balance de materia presentados en el Capítulo 2.

Producción de etanol de segunda generación. En los estudios de LCA a menudo se considera que los microorganismos no traen impactos asociados a su ciclo de vida. Por este motivo, el inventario de las tecnologías de producción de etanol 2G a partir de monosacáridos es el mismo que el de etanol 1G ya que solo difieren en el tipo de microorganismos para el proceso de fermentación (Tabla B10 del Anexo B). Se considera como flujo de referencia una tonelada de etanol 2G y la fuente de datos es Gubicza *et al.* (2016).

Producción de metanol. Se toma un *data set* de la base de datos de Ecoinvent® v3.8 (*Methanol, from biomass*) el cual se refiere a la producción del alcohol por reformado de biomasa con producción intermedia de *syngas*. El flujo de referencia es una tonelada de

metanol. La cantidad de material lignocelulósico para la producción de *syngas* está fijada por el balance de masa y los coeficientes correspondientes se presentan en el Capítulo 2.

Producción de ácido láctico. Para esta tecnología el flujo de referencia es una tonelada de ácido láctico (Tabla B11 del Anexo B). Se toman los inventarios reportados en Munagala *et al.* (2021) corrigiendo las entradas relacionadas con la biomasa de acuerdo con el balance de masa (Capítulo 2).

3.8.2 Tecnologías de aprovechamiento de limón

En los últimos años, la investigación y el desarrollo de rutas alternativas para los derivados del limón han abierto el camino a una verdadera bioeconomía basada en este cítrico (Ciriminna *et al.* 2020). Para aprovechar esta oportunidad, los esquemas de biorrefinería de cítricos surgen como una alternativa prometedora para agregar valor a los subproductos y efluentes y así reducir el impacto ambiental de toda la actividad, manteniendo una producción rentable de productos más valiosos. Se han propuesto varios productos como derivados no convencionales de los cítricos. Li *et al.* (2010) producen ácido succínico a partir de cáscara de cítricos a escala de laboratorio. Kundu *et al.* (2021) estudian las condiciones óptimas para la producción de etanol a partir de residuos de limón utilizando *Saccharomyces cerevisiae*. Además, se estudian a escala de laboratorio las condiciones operativas del pretratamiento de explosión de vapor, un paso crítico en el procesamiento de residuos de cítricos (Boluda-Aguilar y López-Gómez 2013). Forgács *et al.* (2012) diseñan un pretratamiento por explosión de vapor seguido de digestión anaeróbica para mejorar la obtención de biogás a partir de residuos de cítricos. La pectina también resulta ser un producto interesante en las biorrefinerías de cítricos; Ciriminna *et al.* (2020) proponen estrategias alternativas de producción de pectina para reducir el uso de recursos, los costos de producción y el impacto ambiental. Los procesos de fermentación en estado sólido surgen como una alternativa productiva prometedora para producir enzimas celulolíticas (Farinas 2015) y proteína unicelular (Mamma y Christakopoulos 2014) a partir de residuos de cítricos. Desde el punto de vista de una biorrefinería integrada de residuos cítricos, algunos estudios determinan el potencial económico para la producción de etanol y metano utilizando resultados a escala de laboratorio (Lohrasbi *et al.* 2010, Patsalou *et al.* 2019), mientras que otros analizan opciones de conversión para producir biocombustibles alternativos (Taghizadeh-Alisaraei *et al.* 2017). González-Rivera *et al.* (2016) y Satari *et al.* (2017) integran procesos novedosos de extracción de pectina a una instalación de procesamiento de cítricos existente. También

la producción simultánea de aceites, biocombustibles y pectina se presenta en trabajos recientes para procesar desechos de naranja (Vaez *et al.* 2021).

El número de publicaciones sobre el aprovechamiento integral de cítricos presenta un notable crecimiento en los últimos años. Sin embargo, solo unos pocos estudios realizan una evaluación ambiental de estas alternativas para cuantificar los potenciales beneficios o perjuicios ambientales. Uno de estos antecedentes es el LCA de los gases de efecto invernadero en una biorrefinería de naranjas que produce limoneno, etanol y metano (Pourbafrani *et al.* 2013). Recientemente, Joglekar *et al.* (2019) presentan un LCA de una biorrefinería de residuos de cítricos para producir compuestos fenólicos, aceites esenciales, etanol, gas de síntesis y metano.

En el esquema de biorrefinería considerado en esta Tesis, la cáscara de limón, que se lava y deshidrata en el proceso convencional, puede no deshidratarse y ser un intermediario para la fabricación de limoneno, etanol y biogás. Las condiciones de operación para la transformación de la cáscara de limón en limoneno, etanol y biogás, inicialmente tomadas de trabajos específicos publicados previamente, se adaptan al caso de Tucumán con el soporte de un simulador de procesos (Honeywell 2021). Así, la biorrefinería que se plantea añade cinco nuevos pasos al esquema convencional (Fig. 3.5): hidrólisis ácida, extracción de limoneno, fermentación alcohólica, destilación alcohólica y digestión anaeróbica final para obtener biogás. Los consumos de vapor y gas se calculan mediante balances energéticos y simulación de procesos. Como ya se mencionó, el mayor detalle de esta subsección y las secciones subsiguientes dedicadas al limón se debe a que la caracterización de las nuevas tecnologías a base de limón con potencial aplicación en las biorrefinerías, tanto en lo técnico como en lo ambiental, se desarrolló en el marco de la Tesis, a diferencia de las tecnologías relacionadas con la caña de azúcar que se adaptaron a partir de trabajos anteriores.

Hidrólisis ácida. Para la hidrólisis ácida de la cáscara de limón, las condiciones operativas se toman de Pourbafrani *et al.* (2010). Después de la extracción de aceite y jugo, la cáscara de limón se corta y mezcla con agua para obtener un producto con 15% en peso de materia seca. Esta suspensión se bombea a tanques donde se trata con ácido sulfúrico (0,5% vol.) y vapor (6 bar) para mantener 150 °C durante 6 minutos. Se supone que la conversión de celulosa y hemicelulosa en azúcares simples es del 49,2% y del 62,5%, respectivamente.

Extracción de limoneno. El limoneno se separa del hidrolizado por destilación *flash* a presión atmosférica. La fase vapor se condensa y se separa en un decantador para obtener el terpeno (Pourbafrani *et al.* 2010).

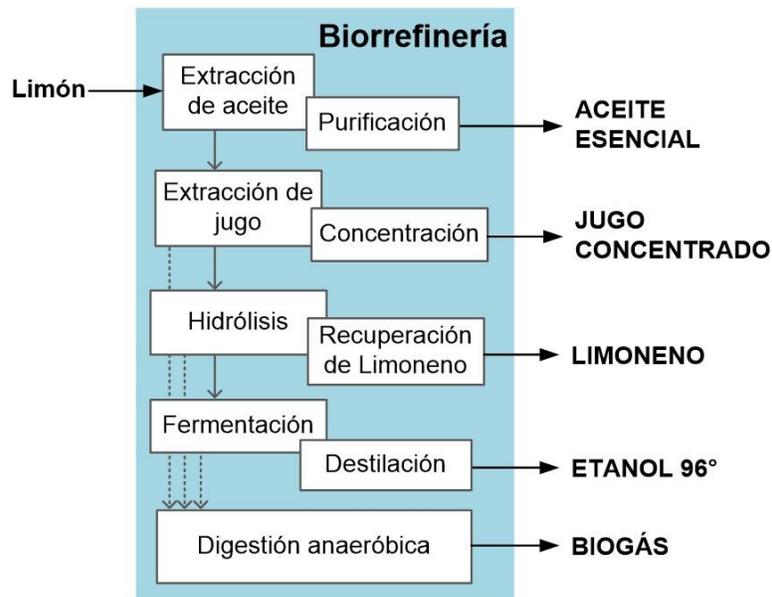


Figura 3.5. Diagrama de bloques simplificado del esquema propuesto para el procesamiento de limón.

Fermentación alcohólica. La fase pesada del hidrolizado se centrifuga para eliminar los residuos sólidos (que se envían al digestor) y se enfría a 30 °C. La producción de etanol utiliza *Saccharomyces cerevisiae* en un fermentador continuo a 30 °C y pH 5 (Purwadi *et al.* 2007). Se emplea un reactor tanque agitado refrigerado con tiempo de residencia de 20 h. El rendimiento de producción de etanol es de 0,43 kg/kg de azúcares fermentables (Lohrasbi *et al.* 2010; Pourbafrani *et al.* 2010). La mezcla fermentada se centrifuga para separar la levadura que se envía al digestor.

Destilación para obtener etanol. La fase líquida centrifugada se transfiere a un sistema de destilación de dos columnas. La primera columna tiene 22 platos mientras que la segunda, 24. Se obtiene un producto final al 96% vol. de etanol (recuperación del 99%). El producto de cola de la primera columna (vinazas), con un 0,01% en peso de etanol, se envía al digestor anaeróbico.

Digestión anaeróbica para la obtención de biogás. Los sólidos separados del hidrolizado, la levadura proveniente de la fermentación y las vinazas se mezclan para alimentar el biodigestor. Un consorcio microbiano anaeróbico es responsable de la

producción de biogás, cuyo rendimiento de producción es de 0,363 Nm³ CH₄/kg de sólidos volátiles con un tiempo de residencia de 20 días (Pourbafrani *et al.* 2010). Dado el alto contenido de agua y bajo contenido orgánico del efluente del digestor, este es neutralizado y dispuesto en los campos de cultivo cercanos a las instalaciones. Se adopta un consumo de electricidad de 42 kWh/t cáscara (Lohrasbi *et al.* 2010).

Los inventarios del ciclo de vida de estos nuevos procesos se presentan en la Sección 3.10 y se evalúa su utilidad práctica para identificar impactos mediante un caso de aplicación en el que se han definido diferentes escenarios posibles en una biorrefinería de limón.

3.9 Transporte

Para calcular las emisiones del transporte entre los distintos puntos de la CS, se toma como base el proceso de Ecoinvent® v3.8 *transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3*. El flujo de referencia de este proceso es 1 tkm. Se modifica el inventario para que refleje las entradas y salidas para 1 km recorrido (nuevo flujo de referencia del proceso) multiplicando los componentes del inventario por las capacidades máximas de los modos de transporte del Capítulo 2.

3.10 Aplicación del modelado ambiental a una biorrefinería de limón

En vista de lo descrito anteriormente, esta sección busca mostrar las implicaciones ambientales de la transición de industrias tradicionales a biorrefinerías utilizando los inventarios del ciclo de vida tanto de los procesos convencionales como de los nuevos procesos propuestos, que permitan un mayor aprovechamiento de la biomasa. Con este fin se comparan los desempeños ambientales de ciertos escenarios usando la Fase 3 de un estudio de LCA.

En el esquema de biorrefinería propuesto, la cáscara de limón, que usualmente se lava y deshidrata, es un intermediario para la fabricación de limoneno, etanol y biogás. No hay transporte de cáscara de limón ya que se asume que su procesamiento ocurre en las mismas instalaciones utilizadas para la extracción de jugo y aceite. También se supone que esta planta está ubicada en la provincia de Tucumán, y que la capacidad de procesamiento de limón de la biorrefinería es similar a las tres plantas industriales de limón más grandes de la Argentina, es decir, alrededor de 360.000 t/año de limones (Bevilacqua 2018).

Para comparar el desempeño ambiental del esquema convencional (Fig. 3.4) y del esquema propuesto de biorrefinería (Fig. 3.5), la unidad funcional es la producción de 1 t de cada producto en la puerta de una planta procesadora de limón ubicada en Tucumán.

Mediante la implementación de las tecnologías ya descritas, la industria regional del limón tiene la posibilidad de producir nuevos productos a partir de corrientes secundarias y aplicar estrategias de economía circular como la recuperación de energía a través de la producción *in situ* de biogás y electricidad (Kalmykova *et al.* 2018). Para organizar el estudio, se estudian los siguientes escenarios (Fig. 3.6):

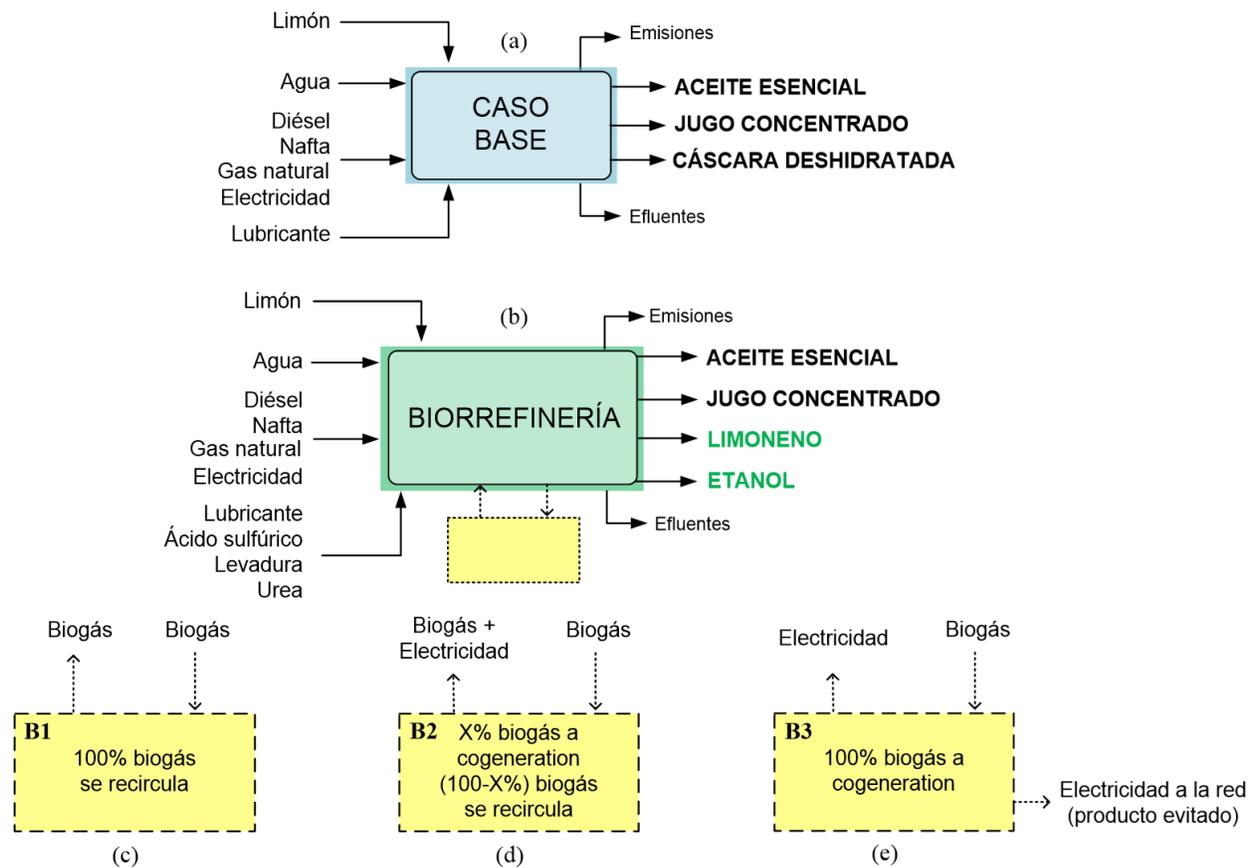


Figura 3.6. (a) Diagrama de flujo general para el caso base. (b) Diagrama de flujo general para los escenarios de biorrefinería. (c) B1: se recicla todo el biogás. (d) B2: parte del biogás se recicla como electricidad. (e) B3: todo el biogás se convierte en electricidad.

A. Caso base: vía actual de industrialización que incluye la producción de cáscara deshidratada.

B1. Biorrefinería 1: el biogás producido recircula a la planta para disminuir el consumo de gas natural externo.

B2. Biorrefinería 2: Parte del biogás se utiliza para producir electricidad y parte se recircula para reemplazar parte del gas natural externo. La cantidad de electricidad es la necesaria para cubrir los requerimientos eléctricos del proceso, por lo que el consumo de electricidad externa por parte de la biorrefinería es nulo.

B3. Biorrefinería 3: todo el biogás generado se envía a cogeneración para la producción de electricidad. Por lo tanto, se pueden cumplir los requisitos del proceso y exportar el exceso se exporta a la red. No hay compensación del uso de gas natural externo.

Tabla 3.6. Insumos energéticos y materiales referidos a 1 t de aceite esencial de limón para los cuatro escenarios considerados. Sólo se reporta el subsistema industria/biorrefinería.

	Caso base A	Biorrefinería B1	Biorrefinería B2	Biorrefinería B3	Unidades
Productos					
Aceite esencial	1,00	1,00	1,00	1,00	t
Jugos concentrados	34,02	34,02	34,02	34,02	t
Cáscara deshidratada	12,45	0,00	0,00	0,00	t
Etanol	-	2,15	2,15	2,15	t
Limoneno	-	0,12	0,12	0,12	t
Electricidad	-	-	-	11.631,83	kWh
Recursos					
Agua de pozo	904,04	329,99	329,99	329,99	m ³
Materiales y combustibles					
Limón	217,20	217,20	217,20	217,20	t
Diésel	40,72	40,72	40,72	40,72	kg
Nafta	24,42	24,42	24,42	24,42	kg
Gas natural	340.099,28	226.508,44	301.230,76	350.694,04	MJ
Electricidad	13.070,41	16.982,37	-	-	kWh
Aceite lubricante	9,29	9,29	9,29	9,29	kg
Ácido sulfúrico	-	1,54	1,54	1,54	t
Levaduras	-	36,31	36,31	36,31	kg
Urea	-	50,83	50,83	50,83	kg
Electricidad (cogen.)	-	-	16.982,37	28.614,19	kWh

El escenario A comprende tres productos: aceite esencial, jugo concentrado y cáscara deshidratada; mientras que los escenarios B1 a B3 obtienen cinco productos: aceite esencial, jugo concentrado, limoneno, etanol y biogás. La Tabla 3.6 muestra los insumos para este subsistema por tonelada de aceite esencial mientras que las Tablas 3.7 y 3.8

muestran las entradas y emisiones directas de los sistemas de producción de biogás y de electricidad, respectivamente.

Todos los escenarios analizados comparten los mismos subsistemas aguas arriba: campo y transporte. Sin duda, estos representan una constante intervención ambiental si se comparan los escenarios entre sí. Sin embargo, sí que deben ser considerados a la hora de generar el perfil ambiental específico de cada producto.

Tabla 3.7. Insumos de energía y materiales y emisiones directas de la producción de biogás en un digestor anaeróbico.

Productos	Valor	Unidad
Biogás (54,2 vol%CH ₄ , 45,8% CO ₂)	59,0981	m ³
Materiales/energía/combustibles		
Efluente a tratar	1	t
Electricidad	0,0528	MWh
Emisiones		
Metano (pérdidas)	1,0400	m ³
Dióxido de carbono biogénico (pérdidas)	0,8505	m ³
Efluente tratado	0,9490	t

Tabla 3.8. Insumos de energía y materiales y emisiones directas de la producción de electricidad por combustión de biogás.

Productos	Valor	Unidad
Electricidad	1	kWh
Materiales/combustibles		
Biogás	7,92	MJ
Unidad de cogeneración	4,6·10 ⁻⁹	p
Aceite lubricante	0,00013019	kg
Unidad de cogeneración	0,00000001	p
Emisiones a la atmósfera		
Óxidos de nitrógeno	0,00030377	kg
Monóxido de carbono	0,00069434	kg
Dióxido de carbono biogénico	0,24302	kg
Metano	0,00034717	kg
Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC)	4,3396·10 ⁻⁵	kg
Dióxido de azufre	2,3868·10 ⁻⁶	kg
Monóxido de dinitrógeno	2,1698·10 ⁻⁵	kg
Partículas, < 2,5 µm	6,5094·10 ⁻⁷	kg

Los escenarios B1 a B3 tienen en común sus insumos, pero difieren en el uso previsto para el biogás generado (Fig. 3.6). Además, junto con los nuevos bioproductos se producen aceites esenciales y jugos concentrados. Por lo tanto, los insumos energéticos y los materiales para producir aceite y jugo son los mismos en el caso base y en estos escenarios de biorrefinería. Los insumos correspondientes a las líneas de aceite esencial y jugo concentrado se calculan mediante la diferencia entre el consumo total de la planta (dato primario utilizado en el caso base) y los correspondientes a la línea de producción de cáscara deshidratada. La electricidad requerida para el procesamiento de la cáscara (utilizada para alimentar filtros y prensas en la etapa de lavado y para mover el secador rotatorio) es un dato primario. Con respecto al consumo de agua y gas natural, se hacen las siguientes suposiciones: (i) según los informes de las fábricas, el consumo de gas natural de la secadora representa aproximadamente un 60% del consumo global de la planta procesadora, y (ii) de la toma global de agua de pozo puede destinarse un 35% a la producción de aceites esenciales y jugos, y un 65% al lavado de cáscaras antes del secado. Dado que se propone la producción de nuevos productos en instalaciones anexas a la actual, se considera que el consumo de combustible líquido (diésel y nafta), aceite lubricante y agua para mantenimiento de maquinaria correspondiente a B1, B2 y B3 es el mismo que en el caso base.

En los tres escenarios de biorrefinería, la electricidad consumida de la red externa cambia con respecto al caso base. En B1, este valor es mayor para satisfacer la demanda de nuevos equipos puestos en operación. Sin embargo, en B2 y B3 el consumo eléctrico es nulo ya que al añadir un sistema de cogeneración se cubren internamente las necesidades eléctricas. En este último escenario, el exceso de energía eléctrica entregada a la red se considera un producto evitado (Tabla 3.6). El consumo de gas natural, al igual que el de electricidad, depende del escenario analizado. En B1, el consumo es el más bajo de los tres escenarios de biorrefinería ya que se recircula todo el biogás producido. En B2, el uso de gas natural es mayor porque parte del biogás se usa para producir electricidad a través de la cogeneración. B3 tiene el máximo consumo de gas natural porque no se destina biogás para disminuir este consumo (Fig. 3.6). En todos los casos de biorrefinería, se considera que el biogás producido se quema en calderas con un poder calorífico de 15 MJ/kg correspondiente a un biogás con un contenido de CH₄ del 54,2% vol. Con respecto a otros insumos, la urea y la levadura son los principales insumos para la etapa de fermentación y el ácido sulfúrico para la etapa de hidrólisis (Pourbafrani *et al.* 2010).

3.10.1 Modelo de caracterización y categorías de impacto ambiental

Dado que la mayor parte del limón argentino se exporta a Europa (Federcitrus 2021), se eligen los factores de caracterización del método ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) (EC-JRC 2012) para calcular los impactos ambientales potenciales. Este método europeo proporciona 16 categorías de impacto de punto medio cuyas definiciones y alcance se pueden encontrar en EC-JRC (2012).

Con el objetivo de reducir el número de categorías de impacto para considerar aquellas más relevantes en el análisis, primero se realiza el paso de caracterización de la Fase 3 del LCA (evaluación de impacto) y luego se someten estos resultados a una normalización para obtener un perfil de impacto del sistema con las categorías expresadas en la misma métrica (Hauschild 2018). A través de este procedimiento, se puede comprender mejor la magnitud relativa de las categorías de impacto en un contexto dado. Los factores de normalización ILCD utilizan como referencia el impacto asociado a un habitante europeo medio (Benini *et al.* 2014). La Fig. 3.7 presenta el perfil de impacto normalizado para un derivado de limón en el caso base. Observando que ciertos impactos no muestran un valor apreciable en la etapa de normalización, se decide no considerarlos: agotamiento del ozono e impactos de las radiaciones ionizantes. También se descarta el uso del suelo, decisión que se ve reforzada por el hecho de que el área ocupada por la actividad limonera no ha cambiado significativamente en los últimos 30 años, y los demás procesos que pueden influir en este impacto son de procesos de fondo (*background*). Aunque la eutrofización del agua dulce y el agotamiento de los combustibles fósiles parecen irrelevantes en el perfil de normalización, se decide no excluirlas. Entre las categorías de impacto destaca el agotamiento de los recursos hídricos, aspecto que ha sido objeto de otros trabajos del tesista (Machin Ferrero *et al.* 2021 y 2022b).

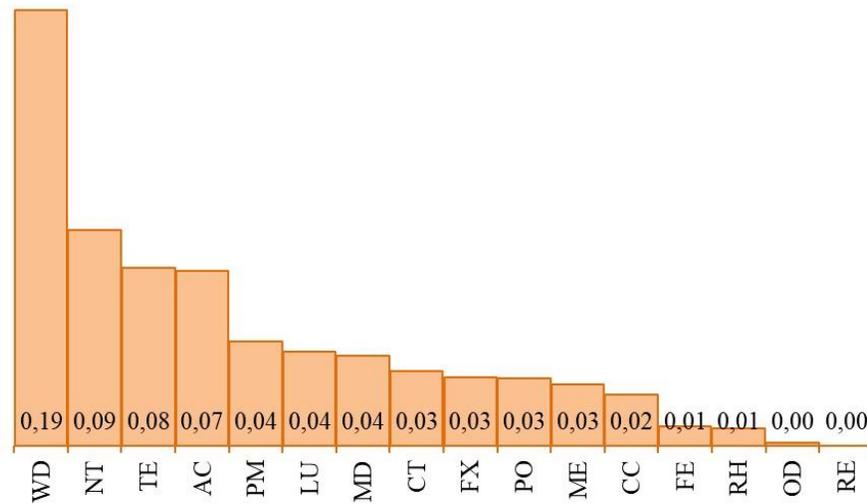


Figura. 3.7. Impactos ambientales normalizados para el aceite esencial. Agotamiento de los recursos hídricos (WD), Toxicidad humana efectos carcinogénicos y efectos no carcinogénicos (CT y NT), Eutrofización terrestre, de agua dulce y marina (TE, FE y ME), Acidificación (AC), Material particulado (PM), Uso del suelo (LU), Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables (MD), Ecotoxicidad del agua dulce (FX), Formación fotoquímica de ozono (PO), Cambio climático (CC), Radiación ionizante-salud humana (RH), Agotamiento del ozono (OD), Radiación ionizante-ecosistemas (RE). Factores ILCD (EC-JRC 2012).

A continuación, se presenta a guisa de resultado de este caso de aplicación el perfil ambiental del caso base y luego se describen las ventajas y desventajas de los tres escenarios alternativos analizados.

3.10.2 Resultados

La huella ambiental de los limones transportados a las plantas de procesamiento se muestra en la Fig. 3.8. La principal contribución al cambio climático (CC) proviene de los agroquímicos aplicados en el campo (84,7%). Entre ellos, destaca el uso de urea, 48,7% (42,5% debido a las emisiones posteriores a la aplicación y 6,2% debido a la producción), seguido por el uso de nitrato de amonio, 18,2% (6,2% luego de la aplicación y 12% por la producción). El aceite mineral, los compuestos de cobre y el nitrato de amonio-urea contribuyen en porcentajes cercanos al 5%, mientras que los agroquímicos restantes contribuyen con menos del 2%. La combustión y producción de diésel contribuye a esta categoría de impacto en un 11,3%. El transporte desde el campo hasta la fábrica y el riego

(debido al consumo de energía eléctrica) representan aproximadamente el 2% del valor total, cada uno.

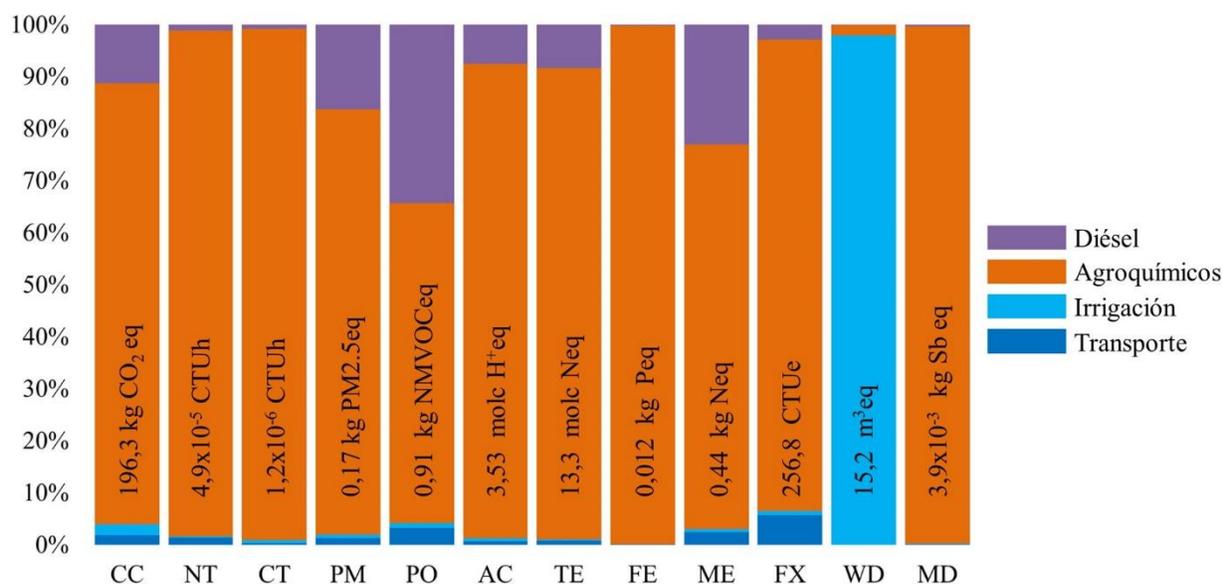


Figura 3.8. Huella ambiental de los limones cosechados y transportados en la puerta de entrada a las plantas de procesamiento, por tonelada de limón, expresada por contribución de cada proceso. Regla de corte: 1% del valor total del impacto. Las cifras de cada columna indican el valor absoluto del impacto para toda la actividad.

En las categorías relacionadas con toxicidad —ecotoxicidad en agua dulce (FX), toxicidad humana con y sin efectos cancerígenos (CT y NT)— Los agroquímicos participan con 90,6, 98,2 y 9,2%, respectivamente. La mayor contribución proviene de la producción de óxido de cobre (FX 39,8%; CT 78,3%; NT 91,0%), producción de abamectina (FX 25,7%), producción de aceite mineral (FX 5,8%; CT 12,2%; NT 2,1%), uso de urea (FX 6,4%; CT 2,3%) y nitrato de amonio (FX 4,2%). En FX, el transporte representa aproximadamente el 5,8%, mientras que la producción de diésel, el 2,7%.

En la categoría de material particulado (PM), los agroquímicos contribuyen de manera similar que en CC, 81,7% (13% y 25,5% de producción de urea y emisiones post-aplicación, 21,3% de producción de óxido de cobre y 18,2% de producción de nitrato de amonio, entre otros), y el uso de diésel, 16,3% (2,7% de producción y 13,6% de combustión). El transporte solo contribuye con el 1,3%.

Para la categoría de formación fotoquímica de ozono (PO), los agroquímicos y el diésel representan 61,3% y 34,2%, respectivamente. Las principales contribuciones dentro de

estos procesos son la combustión de diésel (28,2%), las emisiones de urea (25,3%), los compuestos de cobre (11,8%) y la producción de aceite mineral (6,9%). El transporte desde el campo hasta las fábricas representa alrededor del 3,3%.

En acidificación (AC), los agroquímicos suman el 91,2% del impacto total (principales contribuciones: 59,3% de uso de urea, 15,4% de producción de óxido de cobre y 8% de producción y emisiones de nitrato de amonio. El uso de diésel representa el 7,5%.

En la eutrofización terrestre (TE), la contribución al impacto es del 90,5% debido principalmente a los agroquímicos (70,9% de emisiones de urea) y la combustión de diésel.

En eutrofización de agua dulce (FE), los agroquímicos representan el 99,6%; de las cuales la producción de óxido de cobre (36,9%), las emisiones posteriores a la aplicación de fosfato de amonio (41,6%) y la producción de glifosato (18,7%) son las que más contribuyen.

En cuanto a la eutrofización marina (ME), la producción de agroquímicos aporta un 73,9% (48,6% urea, 9% nitrato de amonio y 7,3% óxido cuproso). La combustión y producción de diésel contribuye a ME con 20,2% y 2,8%, respectivamente, mientras que el transporte es 2,5%. Dado que Tucumán se encuentra en una cuenca endorreica, la eutrofización marina debido a las emisiones locales, como las emisiones posteriores a la aplicación, carece de sentido.

Con respecto al agotamiento de los recursos hídricos (WD), el uso del agua para el riego en el campo causa más del 97,9% del valor de esta categoría de impacto. El consumo de agua de proceso aguas arriba resulta ser insignificante en esta categoría de impacto, representando menos del 1% del valor total de WD.

Finalmente, la producción de óxido cuproso es el principal contribuyente (92,2%) al agotamiento de los recursos minerales (MD).

Para la producción de limón, y teniendo en cuenta el análisis anterior, se puede observar que, a excepción de WD, en todas las categorías de impacto la mayor contribución se produce por el uso de agroquímicos seguido por el uso de diésel.

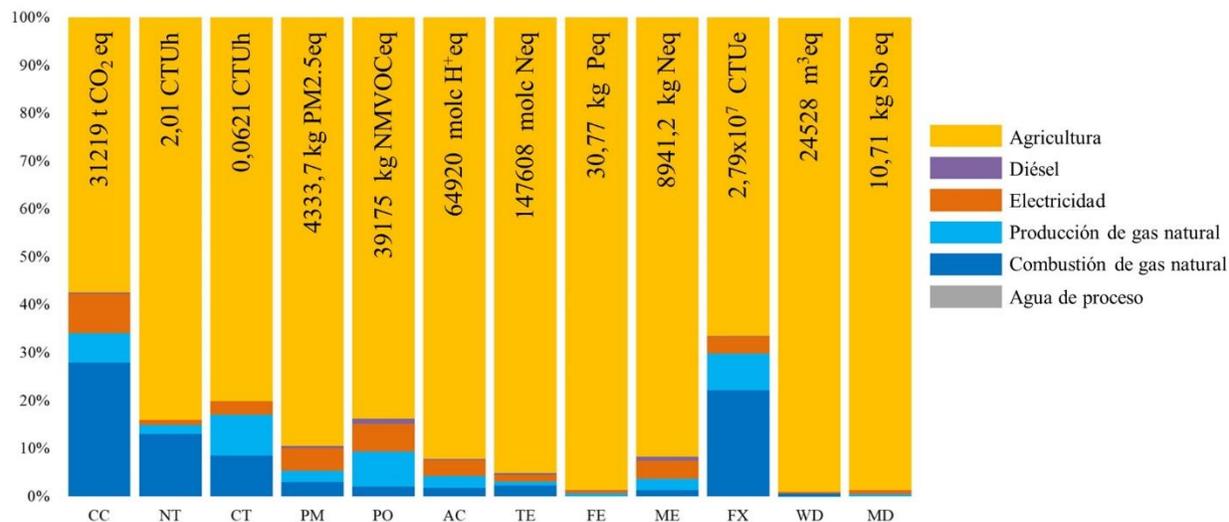


Figura 3.9. Porcentaje de perfil ambiental (nivel de caracterización) del aceite esencial de limón (asignación másica). Regla de corte: 1% del valor total. Los guarismos en cada columna indican el valor absoluto del impacto.

La Fig. 3.9 representa el perfil ambiental relativo de cualquiera de los productos derivados del limón. El valor absoluto de las puntuaciones de impacto difiere para cada producto y depende en gran medida del criterio de asignación utilizado; en este caso corresponden al aceite esencial de limón (asignación másica). Es decir, se ha obtenido la huella ambiental de los productos industrializados en la puerta de salida de la planta de procesamiento. Esta información puede interpretarse como una especie de “ecoetiqueta” de cada derivado del limón con el esquema de producción actual (escenario A) bajo los supuestos del estudio.

En la mayoría de las categorías de impacto, la producción primaria de limón (subsistema agrícola) representa más del 80% del total de los valores calculados, debido principalmente al uso de agroquímicos y diésel. En CC y FX, esta contribución es menor (CC 57,3% y FX 66,2%) ya que la producción/combustión natural de gas y la producción de electricidad para actividades industriales contribuyen apreciablemente (Fig. 3.9).

En CC, la contribución de la industria se debe a la combustión y producción de gas natural, y a la producción de electricidad: 27,8%, 6,1% y 8,3%, respectivamente. Para FX, las contribuciones son del 22% y el 7,6% debido a la combustión y producción de gas natural, y del 3,6% debido a la producción de energía eléctrica. El gas natural y la electricidad constituyen *hotspots* de la industria, lo que justifica la propuesta de estrategias de economía circular para reducir la influencia de estos insumos.

Beccali *et al.* (2009) presentan uno de los primeros estudios de LCA para productos cítricos con el fin de estimar el consumo de energía primaria, el agotamiento del agua y el calentamiento global de su sistema. El aceite esencial, el jugo natural y el jugo concentrado de naranjas y limones se evalúan bajo un enfoque “de la cuna a la puerta del mercado”, considerando tanto asignación másica como económica. La alta contribución de la producción y aplicación de agroquímicos encontrada en nuestro estudio está de acuerdo con este trabajo mencionado. Sin embargo, como utilizan un modelo de impacto diferente (CML2 baseline 2000), diferentes límites del sistema y características geográficas, no es apropiada una comparación numérica. Pergola *et al.* (2013) solo evalúan limones para consumo fresco en Sicilia (Italia) utilizando CML 2001 como método de evaluación de impacto ambiental para cinco categorías de impacto y extraen conclusiones muy similares.

En la publicación de Machin Ferrero *et al.* (2022a) se discuten los resultados al considerar otro tipo de asignación, la asignación másico-económica. En cuanto a las principales diferencias encontradas al utilizar diferentes criterios de asignación, el aceite esencial exhibe un aumento de un orden de magnitud en sus impactos potenciales si se utiliza la asignación económica con respecto a los valores obtenidos al utilizar la asignación de masa. Para la cáscara deshidratada, el comportamiento es algo opuesto: las puntuaciones de impacto disminuyen un tercio cuando se utiliza la asignación económica con respecto a los valores obtenidos cuando se asigna por masa. En cuanto al jugo concentrado, las cifras de impacto no varían significativamente en el uso de uno u otro criterio de asignación. Además, en Machin Ferrero *et al.* (2021), se incluyen etapas de transporte posteriores de los productos industriales. Esto implica agregar dos etapas más a los sistemas analizados anteriormente: transporte terrestre al puerto argentino (Buenos Aires) y transporte marítimo al puerto de Rotterdam (Países Bajos), ya que es la puerta de entrada a Europa, el principal mercado en el exterior para los limones argentinos. Se encuentra que la contribución de cada tipo de transporte varía considerablemente dependiendo de la categoría de impacto analizada.

Para facilitar la comparación de los diferentes escenarios (A, B1 a B3), se utiliza un enfoque de “de la puerta a la puerta”, es decir, el limón no se considera como una entrada del sistema. De esta manera, se evalúan aisladamente solo los impactos relacionados con las entradas y salidas asociadas con la etapa industrial y las particularidades de cada escenario (A, B1, B2 o B3).

Para calcular los factores de asignación por masa de los nuevos productos en los diferentes escenarios, se considera su tasa de producción anual. Esto no es necesario para el aceite esencial y el jugo concentrado, ya que todos los escenarios B mantienen la capacidad de producción típica de estos productos. El biogás no es considerado como un producto ya que no es una salida del sistema, sino que se recircula en todos los escenarios.

Se evalúan 14 indicadores ambientales de ILCD para comparar los diferentes escenarios. En estos escenarios, compite una disminución en algunos consumos debido a la recirculación de flujos y la sustitución del sistema de secado de cáscara, con la necesidad de incluir nuevos insumos (por ejemplo, ácido sulfúrico en hidrólisis ácida). En el valor final de cada categoría de impacto, quedará claro cuál de las dos partes prevalece. Como resultado se encuentra que, entre los escenarios analizados, no existe uno para el cual todos los indicadores presenten el menor valor. Dependiendo de la categoría de impacto analizada, será mejor un escenario diferente.

La Fig. 3.10 muestra los resultados obtenidos para cada categoría de impacto considerando la producción anual total. Los porcentajes resultan de multiplicar los valores de impacto específicos —utilizando la asignación de masa— por las respectivas tasas de producción de cada producto. El escenario con el valor de impacto más alto por categoría se asigna al 100% en el diagrama.

En cuanto al CC, el 65% del impacto proviene de la combustión de gas natural, el 19,3% de la producción de electricidad y el 14,3% de la producción de gas natural en el escenario A. En el escenario B1, CC tiene el valor más pequeño porque es el caso con el menor consumo de gas natural (100% de recirculación de biogás) a pesar de tener el mayor consumo de electricidad externa. El escenario B3 presenta la menor disminución en el indicador CC con respecto a A, esto se debe principalmente a que el uso de gas natural externo es mayor que en los otros esquemas de biorrefinería. A estas emisiones se suman las emisiones del sistema de cogeneración (26,0%), mientras que se restan las de la electricidad evitada (compensan solo el 19,2% de las emisiones de gases de GEI). En este escenario, aunque es posible reducir las emisiones por generación *in situ* de parte de la energía eléctrica requerida, no se compensa el alto consumo de gas natural y las emisiones del sistema de cogeneración.

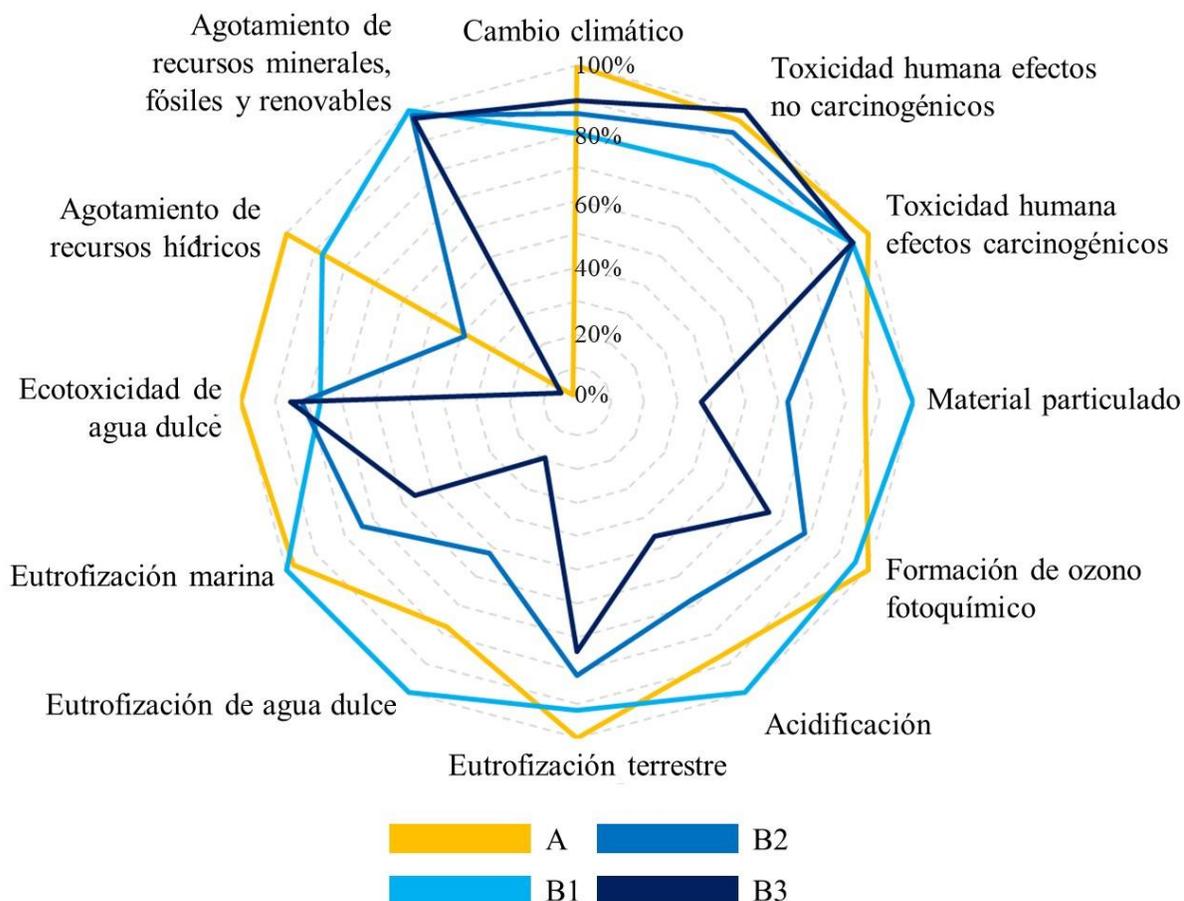


Figura 3.10. Categorías de impacto ambiental considerando la producción anual total de una biorrefinería (asignación másica). El escenario con el valor de impacto más alto por categoría se asigna al 100%.

Con respecto a la categoría PM, los escenarios se comportan de manera diferente. Para el escenario A, el 43,3% de PM proviene de la producción de electricidad, el 27,1% de la combustión de gas natural, el 22,1% de la producción de gas natural y el 4,9% del uso de diésel. B3 presenta el valor más bajo en PM debido al consumo nulo de electricidad externa y a la compensación por producto evitado, lo que tiene un efecto positivo a pesar de que este escenario presenta el consumo máximo de gas natural. La contribución a esta categoría por la producción de ácido sulfúrico, la producción de urea, el uso de diésel y el sistema de cogeneración es de 35,7%, 15,1%, 11,3% y 7,8%, respectivamente. B1 presenta el valor más alto ya que, aunque se consume y quema una menor cantidad de gas natural externo, el uso de productos químicos tiene un aporte considerable y se consume más energía eléctrica que en los otros casos.

En las categorías de eutrofización del agua (FE y ME), el proceso de producción de energía eléctrica es el de mayor impacto (FE 55% y ME 44,5%) en el escenario A, seguido del proceso de producción de gas natural (FE 41,9% y ME 25,9%). Luego, estas categorías de impacto se minimizan en el escenario B3, favorecido por la electricidad como producto evitado. La principal contribución a la TE se debe, en el escenario A, a la combustión de gas natural, la producción de energía eléctrica y la producción de gas natural (43,9%, 29,5% y 16,6%, respectivamente). En los esquemas de biorrefinería, el menor impacto es el escenario B3, donde el producto evitado logra cancelar el impacto de la cogeneración.

El análisis puede continuarse del mismo modo para las categorías restantes. Como se ve en la Fig. 3.10, no hay ningún escenario para el que todos los indicadores tengan el valor más bajo. Teniendo en cuenta que B3 es el escenario con menor impacto en ocho de las doce categorías y que nunca presenta el peor valor en las cuatro restantes, sería una opción muy prometedora. Además, este esquema está en línea con las políticas nacionales para el suministro de electricidad a partir de fuentes renovables (RenovAr 2021).

3.11 Conclusiones

Este capítulo muestra la contribución de la Tesis en el área de evaluación de indicadores ambientales, tanto sobre la industria de la caña de azúcar como la del limón, como insumo necesario para la aplicación del marco conceptual que se presenta luego en el Capítulo 4.

La evaluación se realiza utilizando el LCA. Los inventarios e impactos ambientales de la caña de azúcar resultan fundamentalmente de una adaptación de datos regionales tomados de publicaciones. En cambio, para el caso de la producción e industrialización del limón, se desarrolla por primera vez en la Argentina un perfil ambiental de los productos cítricos. En cuanto al perfil ambiental de estos productos, se observa un aporte dominante de las prácticas agrícolas: uso de fertilizantes y plaguicidas (por ejemplo, urea, abamectina, compuestos de cobre) y consumo de diésel. Para la producción de limón, los agroquímicos representan más del 60% en once de las doce categorías de impacto. Para los productos procesados, la agricultura contribuye con más del 50% en todas las categorías, seguida por el gas natural (27% de contribución en CC y 20% en FX) y el consumo de electricidad (alrededor del 10% en CC). Esto último mejoraría con la descarbonización del mix eléctrico argentino.

Por otro lado, también se analizan, a modo de ejemplo de uso de la información ambiental, las implicaciones ambientales de pasar del esquema de producción

convencional al de una biorrefinería que incluye estrategias de economía circular. Con la aplicación que se presenta (uso de los inventarios de las tecnologías de productos cítricos para comparar diferentes escenarios), se muestra la utilidad del LCA como herramienta para tomar decisiones, incluso cuando no se trata de un ambiente de optimización — como se presentará en el Capítulo 4— sino de discriminación dentro de un conjunto discreto de posibilidades. Se concluye que implementar estrategias de economía circular no asegura un mejor desempeño ambiental del sistema. El éxito del reciclado depende en gran medida de poder reducir los impactos en la agricultura. Cabe destacar que el escenario en el que todo el biogás se utiliza para producir electricidad (B3) es el de menor impacto en ocho de las doce categorías analizadas. Además, nunca presenta el peor valor en los cuatro impactos restantes, por lo que es una opción muy prometedora. Este escenario logra una reducción de CC, AC y FE del 10, 53 y 80%, respectivamente, del esquema actual.

3.12 Referencias

ACNOA (2023). Asociación Citrícola del Noroeste Argentino. <https://acnoa.com.ar/productos/limon/> (consultado en abril 2023).

Agromet EEAO. (2021). Sección Agrometeorología de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. <https://agromet.eeaoc.gob.ar/> (consultado en abril 2021).

Amores, M. J., Mele, F. D., Jiménez, L., Castells, F. (2013). Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(7), 1344–1357. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0584-2>

Araujo, P., Arena, A. P., Civit, B., Curadelli, S., Feldman, S., Jozami, E., Mele, F., Piastrellini, R., Silva Colomer, J. (2019). The water footprint in bioenergy—A comparison of four biomass sources to produce biofuels in Argentina. En *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2739-1_1

Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1–21. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(99\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X)

Azapagic, A., Clift, R. (1999). The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers and Chemical Engineering*, 23(10), 1509–1526. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)00308-7](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)00308-7)

Beccali, M., Cellura, M., Iudicello, M., Mistretta, M. (2009). Resource consumption and environmental impacts of the agrofood sector: Life cycle assessment of Italian citrus-based products. *Environmental Management*, 43(4), 707–724. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9251-y>

Beccali, M., Cellura, M., Iudicello, M., Mistretta, M. (2010). Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. *Journal of Environmental Management*, 91(7), 1415–1428.

Benini, L., Mancini, L., Sala, S., Manfredi, S., Schau, E. M., Pant, R. (2014). Normalisation method and data for Environmental Footprints. *Publications Office of the European Union: Luxemburgo*.

Bevilacqua, M. (2018). Ministerio de Hacienda. Informes de cadenas de valor, Limón. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadenas_de_valor_limon.pdf (consultado en abril 2023).

Boluda-Aguilar, M., López-Gómez, A. (2013). Production of bioethanol by fermentation of lemon (*Citrus limon* L.) peel wastes pretreated with steam explosion. *Industrial Crops and Products*, 41(1), 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.031>

Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A. M., Bourgault, G., De Bruille, V., ... Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 1653-1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>

Cabot, M. I., Lado, J., Sanjuán, N. (2023). Multi-season environmental life cycle assessment of lemons: A case study in south Uruguay. *Journal of Environmental Management*, 326 (noviembre 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116719>

Cerutti, A. K., Beccaro, G. L., Bruun, S., Bosco, S., Donno, D., Notarnicola, B., Bounous, G. (2014). Life cycle assessment application in the fruit sector: State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products. *Journal of Cleaner Production*, 73, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.017>

Ciriminna, R., Fidalgo, A., Scurria, A., Sciortino, M., Lino, C., Meneguzzo, F., Ilharco, L. M., Pagliaro, M. (2020). The Case for a Lemon Bioeconomy. *Advanced Sustainable Systems*, 4(4), 2016–2021. <https://doi.org/10.1002/adsu.202000006>

Díaz, G. F. (2016). Evaluación de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una cítrica de Tucumán. Tesis Maestría Binacional en Proyectos de Ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología y Hochschule Biberach.

EC-JRC (2012). European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2012. Technical notes for characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods, European Commission. <https://doi.org/10.2788/60825>

EEOC (2017). ¿Cuánta biomasa residual genera la poda de limoneros en Tucumán? Estimación preliminar. Avance Agroindustrial 41-1. Disponible en <https://www.eeoc.gov.ar/wp-content/uploads/2020/11/avance-41-1-16-19.pdf> (consultado en abril 2023).

EEOC (2020). Nueva encuesta sobre tecnologías adoptadas por el sector cañero tucumano. Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2019/2020 (Parte I) Reporte agroindustrial 195. ISSN 2346-9102.

EEOC (2023). Informes técnicos de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes <http://www.eeoc.org.ar/publicaciones/> (consultado abril 2021).

Esteves, E. M., Brigagão, G. V., Morgado, C. R. (2021). Multi-objective optimization of integrated crop-livestock system for biofuels production: A life-cycle approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111671. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111671>

Fantke, P., Chiu, W. A., Aylward, L., Judson, R., Huang, L., Jang, S., ..., Jolliet, O. (2021). Exposure and toxicity characterization of chemical emissions and chemicals in products: global recommendations and implementation in USEtox. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 899-915.

- Farinas, C. S. (2015). Developments in solid-state fermentation for the production of biomass-degrading enzymes for the bioenergy sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.092>
- Feder Citrus. (2021). Argentine Citrus Federation. The Argentine citrus industry. <https://www.feder citrus.org/statistics> (consultado abril 2021).
- Forgács, G., Pourbafrani, M., Niklasson, C., Taherzadeh, M. J., Hováth, I. S. (2012). Methane production from citrus wastes: Process development and cost estimation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 87(2), 250–255. <https://doi.org/10.1002/jctb.2707>
- Frankowska, A., Jeswani, H. K., Azapagic, A. (2019). Life cycle environmental impacts of fruits consumption in the UK. *Journal of Environmental Management*, 248 (abril), 109111. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.012>
- Garolera De Nucci, L. P., Tonatto, M. J., Mele, F. D. (2023). Environmental profile of sweet sorghum bioethanol in the province of Tucumán (Argentina). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(2), 172–185. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02120-2>
- González-Rivera, J., Spepi, A., Ferrari, C., Duce, C., Longo, I., Falconieri, D., Piras, A., Tiné, M. R. (2016). Novel configurations for a citrus waste based biorefinery: From solventless to simultaneous ultrasound and microwave assisted extraction. *Green Chemistry*, 18(24), 6482–6492. <https://doi.org/10.1039/c6gc02200f>
- Grossmann, I. E., Guillén-Gosálbez, G. (2010). Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers and Chemical Engineering*, 34(9), 1365–1376. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.012>
- Gubicza, K., Nieves, I. U., Sagues, W. J., Barta, Z., Shanmugam, K. T., Ingram, L. O. (2016). Techno-economic analysis of ethanol production from sugarcane bagasse using a liquefaction plus simultaneous saccharification and co-fermentation process. *Bioresource Technology*, 208, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.093>
- Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D., Grossmann, I. E. (2010). A bi-criterion optimization approach for the design and planning of hydrogen supply chains for vehicle use. *AIChE Journal*, 56(3), 650–667.
- Hauschild, M. Z. (2018). Introduction to LCA methodology. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_6
- Heinzle, E., Biwer, A. P., Cooney, C. L. (2007). Development of Sustainable Bioprocesses: Modeling and Assessment. En *Development of Sustainable Bioprocesses: Modeling and Assessment*. <https://doi.org/10.1002/9780470058916>
- Hellweg, S., Milà i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109–1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>
- Honeywell (2021). UniSim® Design Suite. User Guide, Honeywell International Inc.
- Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... , van Zelm, R. (2020). Correction to: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1635–1635. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01761-5>
- INTA (2023) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://www.argentina.gob.ar/inta> (consultado en abril 2023).

ISO 14040 (2006). Environmental management—life cycle assessment principles and framework. International Organization for Standardization, Switzerland, Geneva.

ISO 14044 (2006). Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Switzerland, Geneva.

ISO 14046 (2014). Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Switzerland, Geneva.

Jacquemin, L., Pontalier, P. Y., Sablayrolles, C. (2012). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: A review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1028–1041. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0432-9>

Joglekar, S. N., Pathak, P. D., Mandavgane, S. A., Kulkarni, B. D. (2019). Process of fruit peel waste biorefinery: a case study of citrus waste biorefinery, its environmental impacts and recommendations. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(34), 34713–34722. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04196-0>

Kalmykova, Y., Sadagopan, M., Rosado, L. (2018). Circular economy—From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, conservation and recycling*, 135, 190–201.

Kim, J., Sen, S. M., Maravelias, C. T. (2013). An optimization-based assessment framework for biomass-to-fuel conversion strategies. *Energy & Environmental Science*, 6(4), 1093–1104. <https://doi.org/10.1039/C3EE24243A>.

Kleinekorte, J., Fleitmann, L., Bachmann, M., Kätelhön, A., Barbosa-Póvoa, A., Von Der Assen, N., Bardow, A. (2020). Life Cycle Assessment for the design of chemical processes, products, and supply chains. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 11, 203–233. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-011520-075844>

Kundu, D., Banerjee, S., Karmakar, S., Banerjee, R. (2021). Valorization of citrus lemon wastes through biorefinery approach: An industrial symbiosis. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100717.

Li, Q., Siles, J. A., Thompson, I. P. (2010). Succinic acid production from orange peel and wheat straw by batch fermentations of *Fibrobacter succinogenes* S85. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88(3), 671–678. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2726-9>

Lo Giudice, A., Mbohwa, C., Clasadonte, M. T., Ingrao, C. (2013). Environmental assessment of the citrus fruit production in sicily using LCA. *Italian Journal of Food Science*, 25(2), 202–212.

Lohrasbi, M., Pourbafrani, M., Niklasson, C., Taherzadeh, M. J. (2010). Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresource Technology*, 101(19), 7382–7388. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.078>

Lopes Silva, D. A., Delai, I., Delgado Montes, M. L., Ometto, A. R. (2014). Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 532–547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>

Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Nishihara Hun, A. L., Valdeón, D. H., Mele, F. D. (2021). Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(7), 1505–1519.

Machin Ferrero, L. M., Wheeler, J., Mele, F. D. (2022a). Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 672–684.

Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Valdeón, D. H., Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D. (2022b). Water footprint of lemon production in Argentina. *Science of The Total Environment*, 816, 151614.

Mamma, D., Christakopoulos, P. (2014). Biotransformation of citrus by-products into value added products. *Waste and Biomass Valorization*, 5(4), 529–549. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9250-y>

Martinez, A., Chargoy, J. P., Puerto, M., Suppen, N., Rojas, D. (2016). Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina. Análisis y recomendaciones para una coherencia regional. *Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable CADIS, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo COSUDE, ISO 14046*, 90.

Mashoko, L., Mbohwa, C., Thomas, V. M. (2013). Life cycle inventory of electricity cogeneration from bagasse in the South African sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 39, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.034>

Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Jim Enez, L. (2011). Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 4939–4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>

Munagala, M., Shastri, Y., Nalawade, K., Konde, K., Patil, S. (2021). Life cycle and economic assessment of sugarcane bagasse valorization to lactic acid. *Waste Management*, 126, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.052>

Mutel, C. (2017). Brightway: an open source framework for life cycle assessment. *Journal of Open Source Software*, 2(12), 236. <https://doi:10.21105/joss.00236>

Nemecek, T., Kägi, T. (2007). Life cycle inventories of Agricultural Production Systems. Ecoinvent, 15, 1–360. http://www.upe.poli.br/~cardim/PEC/EcoinventLCA/ecoinventReports/15_Agriculture.pdf

Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 502–515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>

Ometto, R. A., Zwicky Hauschild, M., Nelson Lopes Roma, W. (2009). Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(3), 236–247. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0065-9>

Panichelli, L., Dauriat, A., Gnansounou, E. (2009). Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), 144–159. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0050-8>

Paredes, M. V., Pérez, D. R., Casen, S., Romero, R. E. (2016). Factibilidad técnica-económica de la recolección y enfiado del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) para su utilización con fines energéticos en Tucumán en la zafra 2015. Asociación Argentina de Economía Agraria.

Patsalou, M., Samanides, C. G., Protopapa, E., Stavrinou, S., Vyrides, I., Koutinas, M. (2019). A citrus peel waste biorefinery for ethanol and methane production. *Molecules*, 24(13). <https://doi.org/10.3390/molecules24132451>

Pérez Gil, M., Contreras Moya, A. M., Rosa Domínguez, E. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 41, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.006>

Pergola, M., D'Amico, M., Celano, G., Palese, A. M., Scuderi, A., Di Vita, G., Pappalardo, G., Inglese, P. (2013). Sustainability evaluation of Sicily's lemon and orange production: Anenergy, economic and

environmental analysis. *Journal of Environmental Management*, 128, 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.007>

Piastrellini, R., Arena, A. P., Civit, B. (2017). Energy life-cycle analysis of soybean biodiesel: Effects of tillage and water management. *Energy*, 126, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.028>

Pieragostini, C., Aguirre, P., Mussati, M. C. (2014). Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. *Science of the Total Environment*, 472, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.012>

Pourbafrani, M., Forgács, G., Horváth, I. S., Niklasson, C., Taherzadeh, M. J. (2010). Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource Technology*, 101(11), 4246–4250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.077>

Pourbafrani, M., McKechnie, J., Maclean, H. L., Saville, B. A. (2013). Life cycle greenhouse gas impacts of ethanol, biomethane and limonene production from citrus waste. *Environmental Research Letters*, 8(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015007>

Purwadi, R., Brandberg, T., Taherzadeh, M. J. (2007). A possible industrial solution to ferment lignocellulosic hydrolyzate to ethanol: Continuous cultivation with flocculating yeast. *International Journal of Molecular Sciences*, 8(9), 920–932. <https://doi.org/10.3390/i8090920>

Renouf, A. M., Pagan, R. J., Wegener, M. K. (2011). Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(2), 125–137. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0233-y>

Renouf, M. A. (2006). LCA of Queensland Cane Sugar Lessons for the Application of LCA to Cropping Systems in Australia. *5th Australian Conference on Life Cycle Assessment: Achieving Business Benefits from Managing Life Cycle Impacts*, November, 1–15.

Renouf, M. A., Wegener, M. K., Pagan, R. J. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 927–937. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0226-x>

RenovAr 2021. Electricity supply program from renewable sources. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/renovar> (consultado en julio de 2021)

Ribal, J., Ramírez-Sanz, C., Estruch, V., Clemente, G., Sanjuán, N. (2017). Organic versus conventional citrus. Impact assessment and variability analysis in the Comunitat Valenciana (Spain). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 571–586. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1048-2>

Romero, E. R., Digonzelli, P. A. (2009). Manual del cañero. Las Talitas: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.

Satari, B., Palhed, J., Karimi, K., Lundin, M., Taherzadeh, M. J., Zamani, A. (2017). Process optimization for citrus waste biorefinery via simultaneous pectin extraction and pretreatment. *BioResources*, 12(1), 1706–1722. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.1706-1722>

Seabra, J. E., Macedo, I. C., Chum, H. L., Faroni, C. E., Sarto, C. A. (2011). Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(5), 519–532.

SOLAW. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). ISBN: 978-92-5-135327-1. <https://www.fao.org/land-water/solaw2021/en/>. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

Taghizadeh-Alisaraei, A., Hosseini, S. H., Ghobadian, B., Motevali, A. (2017). Biofuel production from citrus wastes: A feasibility study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69 (septiembre 2015), 1100–1112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.102>

Tsiropoulos, I., Faaij, A. P. C., Seabra, J. E. A., Lundquist, L., Schenker, U., Briois, J. F., Patel, M. K. (2014). Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(5), 1049–1067. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0714-5>

Vaez, S., Karimi, K., Mirmohamadsadeghi, S., Jeihanipour, A. (2021). An optimal biorefinery development for pectin and biofuels production from orange wastes without enzyme consumption. *Process Safety and Environmental Protection*, 152, 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.013>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218-1230.

Wheeler, J., Páez, M. A., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D. (2018). Combining multi-attribute decision-making methods with multi-objective optimization in the design of biomass supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 113, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.02.010>

You, F., Tao, L., Graziano, D. J., Snyder, S. W. (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE Journal*, 58(4), 1157-1180.

Yue, D., Pandya, S., You, F. (2016). Integrating hybrid life cycle assessment with multiobjective optimization: a modeling framework. *Environmental Science and Technology*, 50(3), 1501–1509. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04279>

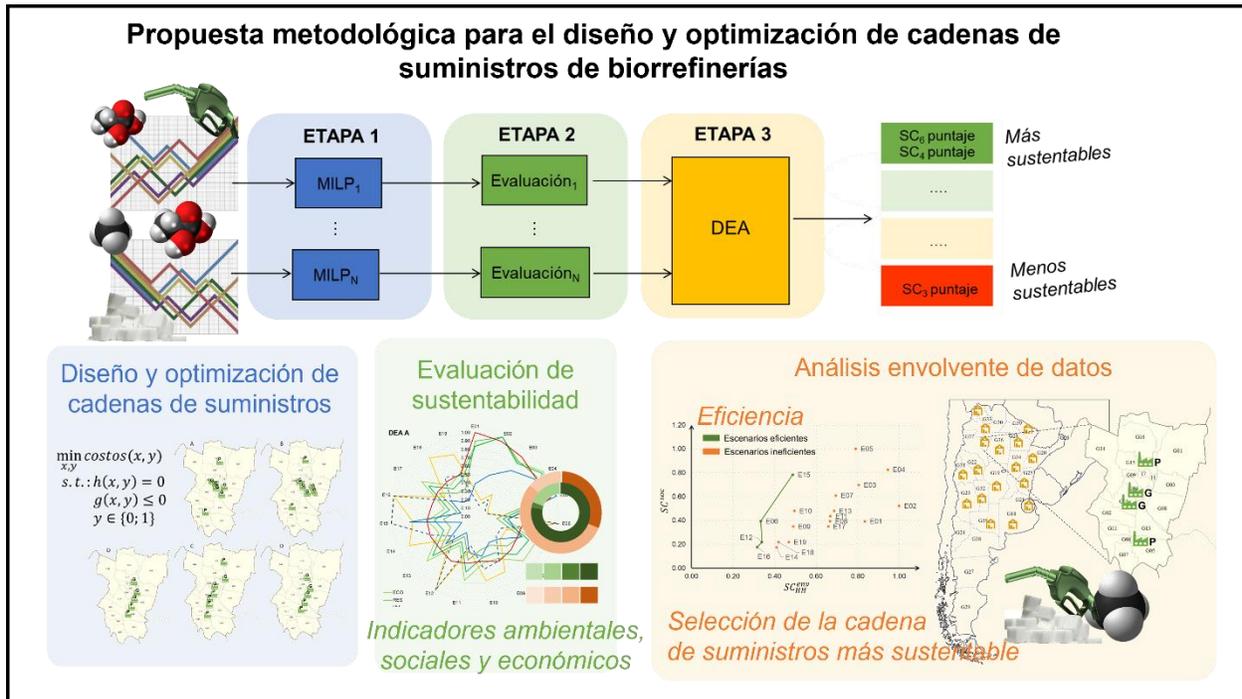
CAPÍTULO 4

Resumen

El uso integral de la biomasa como materia prima para producir alimentos, energía y productos es crucial para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El concepto de biorrefinería permite que regiones con abundantes recursos naturales aprovechen al máximo su disponibilidad de biomasa, consiguiendo una progresiva independencia de los recursos fósiles. Este capítulo presenta un marco multicriterio para el diseño de cadenas de suministros (CS) de biorrefinerías bajo consideraciones de sustentabilidad, utilizando el conocimiento generado en los Capítulos 1, 2 y 3. Se realiza una etapa de optimización de diferentes escenarios seguida de una clasificación basada en el modelo de Análisis Envolverte de Datos para evaluar la eficiencia de cada escenario de acuerdo con diferentes indicadores económicos, ambientales y sociales. Las capacidades de este enfoque se ilustran a través de un caso de estudio de una CS de biomasa localizada en el Noroeste de la Argentina.

Palabras clave: programación lineal mixta entera; análisis envolvente de datos; análisis de ciclo de vida; indicador social; eficiencia.

Resumen gráfico



Diseño y optimización de cadenas de suministros de biorrefinerías sustentablemente eficientes

4.1 Introducción

Los problemas globales relacionados con el cambio climático, el aumento de la población mundial y el agotamiento de los recursos no renovables impulsan la implementación de políticas que aseguren la sustentabilidad de los sistemas productivos convencionales (WEF 2022). En consecuencia, se están planificando y realizando acciones en el sector agroindustrial de los países para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS⁷), como los relacionados con el consumo y la producción responsable (ODS 12) y la acción por el clima (ODS 13) (United Nations SDGs 2023).

El paradigma de biorrefinería conduce a un uso más integral de la biomasa como materia prima para producir alimentos, energía y productos, lo cual supone una importante contribución a los objetivos perseguidos. Las biorrefinerías permiten que regiones con abundantes recursos naturales aprovechen al máximo la biomasa disponible, consiguiendo una progresiva independencia de los recursos fósiles (Cherubini 2010).

Las decisiones sobre las materias primas a utilizar, el diseño de la cartera de bioproductos, la planificación de la producción y las tareas de distribución deben abordarse y evaluarse en conjunto para garantizar una gestión sustentable de las cadenas de suministros (CS) en las que las biorrefinerías se insertan (Ekşioğlu *et al.* 2009, Sharma *et al.* 2013). Por lo tanto, el foco debe estar puesto en los diferentes escalones de las CS, durante las etapas de diseño y planificación, con criterios de sustentabilidad bien definidos, que involucren indicadores económicos, ambientales y sociales. Además, es necesario contar con una medida de la sustentabilidad global de la CS expresada por

⁷ Abreviaturas: 1G: primera generación, 2G: segunda generación, C5: pentosas, C6: hexosas, CL: cáscara de limón, CLD: cáscara de limón deshidratada, CS: cadena de suministros, DEA: Análisis Envolvente de Datos, DMU: unidad de toma de decisión, E: escenario, ECO: daño a los ecosistemas, ECOTOX: ecotoxicidad, GWP: potencial de calentamiento global, HH: daño a la salud humana, HTOX-c: toxicidad humana con efectos cancerígenos, HTOX-nc: toxicidad humana con efectos no cancerígenos, LCA: Análisis de Ciclo de Vida, LCIA: Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida, MCDM: métodos de toma de decisiones multicriterio, MILP: programación lineal mixta entera, NOA: Noroeste Argentino, ODS: objetivo del desarrollo sostenible, PP: patrón de producción, RAC: residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar, RES: daño a la disponibilidad de recursos, RPL: residuos de poda de limón, S1: etapa 1, S2: etapa 2, S3: etapa 3, SBM: medidas basadas en holguras.

indicadores adecuados, que proporcione a los interesados una herramienta útil durante la toma de decisiones sobre la CS (Halog 2009).

El uso de la programación matemática está bien establecido como herramienta para la gestión de CS. Sin embargo, el problema se torna cada vez más complejo al incorporar múltiples criterios de sustentabilidad, múltiples materias primas (biomasa) a procesar y una extensa cartera de bioproductos (Eskandarpour *et al.* 2015). En estos casos, los métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) surgen como otra herramienta adecuada y deben implementarse tanto para poder conseguir un indicador global de sustentabilidad como para permitir la participación de las partes interesadas clave (Wheeler *et al.* 2017, 2018). En relación con esto, un método ampliamente utilizado para la toma de decisiones multicriterio complejas es el Análisis Envolvente de Datos (DEA, por sus siglas en inglés), una herramienta cuantitativa-analítica para medir y evaluar el desempeño de un conjunto de entidades llamadas “unidades de toma de decisiones” (DMU, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por convertir múltiples entradas de información en múltiples salidas (Cooper *et al.* 2011). Una clara ventaja del DEA sobre otros métodos de MCDM es que no se necesitan ponderaciones previas sobre los criterios de decisión, una tarea crítica que puede conducir a inconsistencias o resultados sin sentido (Fernández *et al.* 2018). Las ventajas de su uso se demuestran ampliamente a través de los diversos casos de aplicación y el continuo crecimiento de su uso académico desde la última década (Laso *et al.* 2022, Lee 2017).

Los modelos de DEA se han aplicado para la selección de CS de biomasa mediante la evaluación de la eficiencia de estas CS con respecto a diferentes aspectos de la sustentabilidad (Halog 2009, Rentizelas *et al.* 2019). Además, se han utilizado modelos de DEA combinados con Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para la selección de tecnologías (Galán-Martín *et al.* 2016, Guo *et al.* 2020) y la evaluación de rutas de producción (Cabrera-Jiménez *et al.* 2022). El uso de DEA como herramienta complementaria de otros problemas de optimización, en el diseño de CS de biomasa sustentables, ha ganado importancia en los últimos años. Muchos trabajos utilizan DEA como primera etapa para seleccionar o clasificar proveedores (Dotoli *et al.* 2016) o ubicar eficientemente instalaciones (Mohtashami *et al.* 2021, Arabi *et al.* 2019), seguidos de optimización para completar el diseño de la CS. Otros enfoques evalúan el diseño estratégico de CS integrando la programación matemática con DEA (Grigoroudis *et al.* 2014, Babazadeh *et al.* 2017). Sin embargo, el tema es tan amplio —con innumerables aspectos que requieren tratamiento y profundización—, que la investigación al respecto está lejos de agotarse

(Soheilrad *et al.* 2017). Nuevas metodologías y casos de estudio pueden dar lugar a importantes contribuciones en el área.

El objetivo principal de este capítulo es desarrollar una herramienta de soporte a la toma de decisiones para el diseño de CS que incluyen biorrefinerías como unidades productivas (producción-almacenamiento-mercado), considerando las tres dimensiones de la sustentabilidad: económica, ambiental y social. Se trata de un enfoque multicriterio que combina la optimización, a través de la programación lineal mixta entera (MILP), para encontrar las configuraciones de CS más económicas y DEA para clasificar y encontrar aquellas que son más sustentables, incorporando su desempeño ambiental y social. A continuación, se presenta el enfoque propuesto y luego se exponen sus capacidades a través de un caso de estudio que aborda el diseño de una CS de biorrefinerías en el Noroeste Argentino (NOA).

4.2 Enfoque propuesto

Dado el gran número de bioproductos que podrían fabricarse siguiendo diferentes patrones de producción (PP) en una biorregión determinada, procesando biomasa regional y mediante un esquema de biorrefinería, este enfoque propone clasificar las CS económicamente óptimas de acuerdo con una puntuación de eficiencia. La eficiencia calculada considera aspectos tecno-económicos, sociales y ambientales. Los encargados de toma las decisiones podrían utilizar esta lista ordenada para seleccionar las opciones económicamente óptimas y más eficientes desde un punto de vista de la sustentabilidad, además de revelar los cuellos de botella de las opciones menos eficientes a fin de mejorar su sustentabilidad.

En esta Tesis se desarrolla una estrategia de optimización-clasificación de CS en tres etapas (Fig. 4.1) para seleccionar los PP a producir y la topología de la CS más conveniente basada en aspectos de sustentabilidad:

Etapas 1 (S1): resolución de un modelo MILP que minimiza los costos totales de la CS para satisfacer ciertos PP de productos (cartera de productos a lo largo del horizonte de tiempo). En esta etapa se diseña una CS para cada PP propuesto.

Etapas 2 (S2): evaluación de indicadores ambientales y sociales de las CS.

Etapas 3 (S3): aplicación de DEA para evaluar las CS obtenidas en S1 considerando los indicadores económicos, ambientales y sociales calculados en S2.

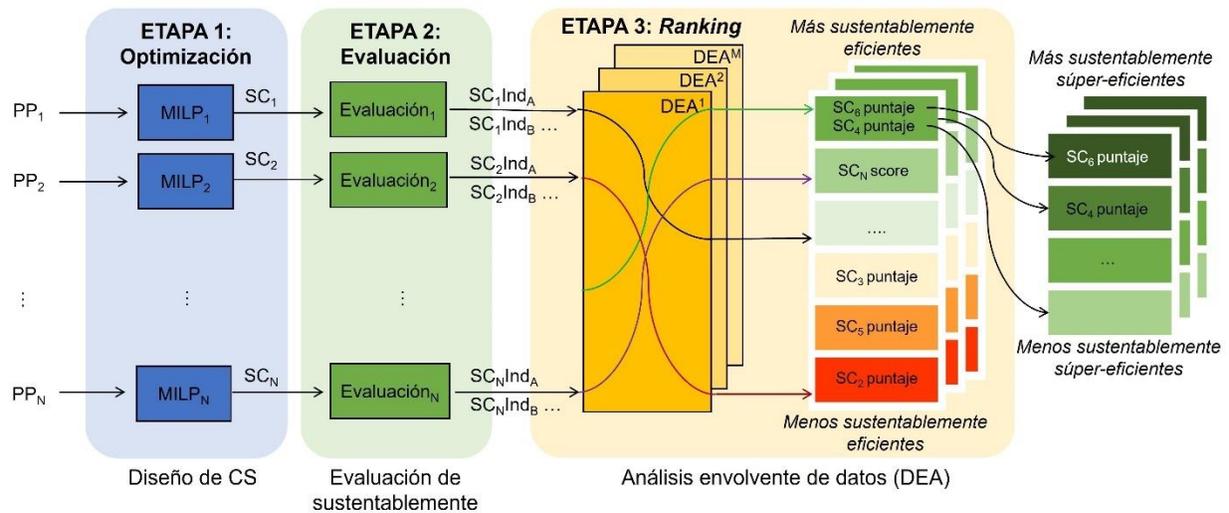


Figura 4.1. Enfoque de tres etapas para evaluar la eficiencia de un conjunto de CS de biorrefinerías. PP: patrón de producción, MILP: programación lineal mixta entera, CS: cadena de suministros, Ind: indicador.

La estructura de la CS incluye los puntos de aprovisionamiento de biomasa (materias primas), sitios de las instalaciones fabriles y de almacenamiento y puntos de venta o destino de los productos. Se puede seleccionar diferentes tipos de biomasa y, en la fabricación, se puede seleccionar diferentes tecnologías para producir alimentos, biocombustibles y bioenergía. Se consideran varios medios de transporte entre nodos (para el transporte de biomasa, productos sólidos y productos líquidos).

Las decisiones que se toman en la etapa S1 incluyen el tipo (tecnologías), el número, la ubicación, la capacidad y la tasa de producción de las biorrefinerías; el tipo, número y capacidad de los almacenes que se establezcan en diferentes regiones; las rutas y formas de transporte en toda la red, y el flujo de productos entregados a los mercados. Estas decisiones son tales que aseguren que los costos totales sean mínimos para un PP determinado. En la etapa S2, una vez confeccionados los inventarios del ciclo de vida de los nodos de cada CS y obtenidos los datos socioeconómicos de las regiones, se calculan indicadores ambientales y sociales para cada una de las CS ya optimizadas desde el punto de vista económico en la etapa S1. Finalmente, en la etapa S3, se aplica el DEA para clasificar las configuraciones de CS obtenidas en función de los indicadores seleccionados para evaluar la sustentabilidad.

Es importante remarcar que el enfoque propuesto intenta trasuntar la forma en que quienes toman decisiones en una CS abordan usualmente este tipo de problema en la

región y en el país contexto del estudio. Primero se centra la atención en asegurar que una CS que responde a un determinado PP sea la mejor (óptima) desde el punto de vista económico, y luego, a partir de este conjunto de soluciones óptimas se puede escoger aquellas que resulten más sustentables (eficientes desde el punto de vista del DEA). Luego, no se trata de un enfoque de optimización multiobjetivo sino de un enfoque de selección secuencial de alternativas económicamente óptimas.

4.3 Metodología propuesta

La formulación matemática y la metodología para cada paso del enfoque propuesto se presentan en esta sección describiendo las ecuaciones más relevantes.

4.3.1 Etapa 1 (S1): optimización económica

Se utiliza como base el modelo MILP descrito en el Capítulo 2, que puede expresarse en forma compacta como M1:

$$\begin{aligned} & \min_{x,Y,N} FO(x, Y, N) \\ & \text{sujeto a las restricciones del Capítulo 2 (Ec. 1 – 35)} \\ & x \in \mathbb{R}, Y \in \{0, 1\}, N \in \mathbb{Z}^+ \end{aligned} \tag{M1}$$

donde FO es una función objetivo económica que debe minimizarse y que depende de varias variables continuas (x), binarias (Y) y enteras (N).

Se trata de una formulación multiperíodo, multi-materia-prima y multiproducto. La función objetivo son los costos totales actualizados (SC_{costs}) asociados a la CS. Estos incluyen costos relacionados con la producción de biomasa (TMC_t), instalación de biorrefinerías y sus niveles de producción (TBC_t), consumo de energía de biorrefinerías relacionadas con gas natural (TGC_t) y electricidad (TEC_t), instalación de almacenes y sus niveles de inventario promedio (TSC_t), y establecimiento de enlaces de transporte de materias primas y productos (TTC_t) a lo largo de la CS (Ec. 4.1 y 4.2). Una lista resumida de los índices, conjuntos, parámetros y variables puede consultarse hacia el final del capítulo en la Sección Notación.

$$SC_{costs} = TC_{t=1} + \sum_{t \geq 1} \frac{TC_t}{(1+\alpha)^{t-1}} \tag{4.1}$$

$$TC_t = TMC_t + TBC_t + TEC_t + TGC_t + TSC_t + TTC_t \quad \forall t \quad (4.2)$$

Dado un conjunto de parámetros específicos tales como la disponibilidad de biomasa, el PP, rendimientos y costos unitarios, el modelo M1 se puede resolver para encontrar la CS óptima para cada PP que se quiera considerar como posible proyección futura. Luego, cada CS encontrada será considerada como un escenario (E) en pasos posteriores para ser caracterizada (en S2) y clasificada (en S3).

4.3.2 Etapa 2 (S2): evaluación ambiental y social

Evaluación de impacto ambiental. El desempeño ambiental de las CS se cuantifica siguiendo las tres primeras fases del LCA (ISO 14044, 2006): definición de objetivos y alcance, análisis de inventario y evaluación de impacto. El objetivo principal aquí es la estimación de los impactos potenciales de cada una de las CS resultantes de S1. El alcance de esta evaluación ambiental abarca los escalones agrícolas, industriales y de transporte de la CS a través de un enfoque “de la cuna al mercado”. Los límites del sistema incluyen procesos tanto de primer plano como de segundo plano que involucran la producción y el transporte de todos los materiales y la energía.

En esta etapa, el cálculo de los indicadores ambientales parte de los resultados obtenidos en la etapa anterior (es decir, de la optimización de las CS en S1). Para ello, se propone el siguiente esquema de cálculo. El impacto ambiental total de una determinada CS referido a la categoría de impacto e (SC_e^{env}) de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (LCIA), en todo el horizonte temporal, se calcula utilizando la Ec. 4.3. Este valor acumula los impactos asociados a cada actividad de la CS: $I_{e,t}^M$ es el impacto asociado a la producción y recolección de materias primas, $I_{e,t}^B$ es el asociado a la instalación y operación de biorrefinerías, $I_{e,t}^T$ es el generado por las distintas instancias de transporte a lo largo de la CS, $I_{e,t}^S$ es el relacionado con las tareas de almacenamiento, e $I_{e,t}^E$ e $I_{e,t}^G$ son los impactos asociados a la producción y uso de energía externa, electricidad y gas natural, respectivamente.

$$SC_e^{env} = \sum_t [I_{e,t}^M + I_{e,t}^B + I_{e,t}^T + I_{e,t}^S + I_{e,t}^E + I_{e,t}^G] \quad \forall e \quad (4.3)$$

$I_{e,t}^M$ se calcula como el impacto de las materias primas $i \in IR(i)$ producidas y utilizadas en las mismas regiones $g \in GB(g) \cap GH(g)$ (representado por la variable $H_{i,g,t}$) y producido en la región $g \in GH(g)$ pero transportado y utilizado en otras regiones $g' \in GB(g)$

(representado por la variable $Q_{i,l,g,g',t}$) (Ec. 4.4). $ImpCat_{i,e}^M$ es el impacto asociado a la producción de una tonelada de materia prima $i \in IR(i)$ referido a la categoría de impacto e .

$$I_{e,t}^M = \sum_{g \in GH} \sum_{i \in IR} ImpCat_{i,e}^M (H_{i,g,t} + \sum_{g',g' \in GB,g' \neq g} \sum_{i,l \in IL} Q_{i,l,g,g',t}) \quad \forall e, t \quad (4.4)$$

En cuanto al impacto ambiental de las biorrefinerías (Ec. 4.5), este depende de las tecnologías seleccionadas y sus niveles de producción $X_{k,b,g,t}$. $ImpCat_{k,e}^B$ es el impacto por cantidad de flujo de referencia de la tecnología k , referido a la categoría de impacto e .

$$I_{e,t}^B = \sum_{g \in GB} \sum_b \sum_k ImpCat_{k,e}^B X_{k,b,g,t} \quad \forall e, t \quad (4.5)$$

Para los impactos del transporte, $I_{e,t}^T$, se consideran los impactos generados por el transporte de materias primas $i \in IR(i)$ desde las regiones productoras de biomasa $g \in GH(g)$ hacia las regiones procesadoras de biomasa $g \in GB(g)$, las correspondientes al transporte de los productos $i \in IM(i)$ desde las biorrefinerías a las regiones con almacenes $g \in GS(g)$, y al transporte de los productos $i \in IM(i)$ desde los almacenes a los puntos de demanda $g \in GD(g)$. La Ec. 4.6 muestra el cálculo para el primer tramo de transporte mencionado anteriormente, donde $NL_{i,l,g,g',t}$ es el número de viajes requeridos para el transporte del material i por medio del modo de transporte l de la región g a la región g' en el período de tiempo t y $d_{g,g'}$ es la distancia entre las regiones g y g' . $ImpCat_{l,e}^{TF}$ e $ImpCat_{l,e}^{TE}$ son los impactos generados por kilómetro recorrido por el modo de transporte l lleno o vacío, respectivamente.

$$I_{e,t}^T = \sum_l \sum_{g \in GH} \sum_{g' \in GB,g' \neq g} \sum_{i \in IR} NL_{i,l,g,g',t} (ImpCat_{l,e}^{TF} d_{g,g'} + ImpCat_{l,e}^{TE} d_{g',g}) \quad \forall e, t \quad (4.6)$$

Considerando la posibilidad de aplicar estrategias relacionadas con la economía circular, el modelo M1 puede decidir instalar tecnologías para producir energía tales como biogás a partir de desechos líquidos o electricidad a partir de materiales lignocelulósicos. Con esto se pretende reducir el consumo de energía externa. Esta decisión se refleja en el cálculo del impacto ambiental de la CS a través de las Ec. 4.7-4.9. En la Ec. 4.7, el impacto relacionado con la electricidad externa ($I_{e,t}^{EP}$) se calcula considerando el saldo entre la electricidad comprada a la red ($EP_{g,t}$) y la electricidad inyectada o exportada a la red ($EX_{g,t}$). En este caso, $ImpCat_e^E$ es el impacto e de consumir electricidad de la red externa,

por kWh. El impacto relacionado con la electricidad producida *in situ* por la biorrefinería ($I_{e,t}^{EC}$) se calcula a partir de la cantidad de electricidad generada por la tecnología k en la biorrefinería b , región g y período de tiempo t ($X_{k,b,g,t}$) y su impacto ambiental específico ($ImpCat_{k,e}^E$) por kWh producido (Ec. 4.8).

$$I_{e,t}^{EP} = \sum_{g \in GB} ImpCat_e^E (EP_{g,t} - EX_{g,t}) \quad \forall e, t \quad (4.7)$$

$$I_{e,t}^{EC} = \sum_{g \in GB} \sum_b \sum_{k=Cogen.} ImpCat_{k,e}^B X_{k,b,g,t} \quad \forall e, t \quad (4.8)$$

$$I_{e,t}^E = I_{e,t}^{EP} + I_{e,t}^{EC} \quad \forall e, t \quad (4.9)$$

Finalmente, se suman los impactos de consumir electricidad de la red y los de producirla internamente (Ec. 4.9). El cálculo del impacto del biogás y del gas natural es similar al de la electricidad. Los impactos asociados con las instalaciones de almacenamiento de productos intermedios y finales se desprecian con respecto a los otros impactos de la CS (producción de materia prima, fabricación y transporte).

La selección y cálculo de los indicadores ambientales de LCIA (Fase 3 del LCA) dependen de su relevancia en el contexto del caso de estudio tal como se analizó en el caso de estudio del Capítulo 3 y se definirán en el caso de estudio de este capítulo.

Evaluación de impacto social. En la búsqueda de un indicador social que represente el desempeño de la instalación y operación de biorrefinerías, manteniendo la importancia de las características regionales, se selecciona el indicador desarrollado por Meyer *et al.* (2019). Este indicador considera datos socioeconómicos de las regiones donde están instaladas las biorrefinerías y la cantidad de empleo directo generado por cada tecnología de cada biorrefinería instalada.

Los parámetros socioeconómicos necesarios para calcular el indicador social son: la población económicamente activa de cada región g (EAP_g , como porcentaje de personas con empleo o que lo buscan), la tasa de desempleo abierto de cada región g (OUR_g , como porcentaje de desocupados en relación con EAP_g) y el número de habitantes en cada región g (Hab_g). Estos parámetros serán diferentes para cada región analizada y de fácil acceso a través de los informes de censos nacionales.

A partir de la cantidad y tipo de tecnologías y biorrefinerías que se decida instalar en la etapa S1 para diferentes PP, se puede calcular la cantidad de empleos generados (Ec. 4.10). $LE_{g,t}$ es el número de puestos de trabajo locales generados en cada región $g \in GB(g)$

cuando se instala una planta (es decir, cuando la variable binaria $z_{k,b,c,g,t}$ del modelo en S1, toma el valor de 1). N_k^{OL} es el requerimiento de mano de obra operativa (número de puestos de trabajo generados) asociado a la tecnología k (Ec. 4.10).

$$LE_{g,t} = \sum_b \sum_k \sum_{ck} z_{k,b,ck,g,t} N_k^{OL} \quad \forall g \in GB(g), t \quad (4.10)$$

$$SI_{g,t} = \frac{\gamma_g LE_{g,t}}{Hab_g EAP_g - \lambda_g Hab_g EAP_g OUR_g} \quad \forall g \in GB(g), t \quad (4.11)$$

$$SC^{soc} = \sum_{g \in GB} \sum_t SI_{g,t} \quad (4.12)$$

La Ec. 4.11 es la expresión utilizada para calcular el índice social para la región g en el período t , siendo γ_g y λ_g factores que permiten ponderar a los empleados y desempleados locales, respectivamente (Meyer *et al.* 2019). Finalmente, en la Ec. 4.12, se calcula el índice social de toda la CS (SC^{soc}) en el horizonte temporal completo. Cabe destacar que el indicador es siempre positivo. Cuanto mayor sea su valor, mayor será el número de puestos de trabajo generados en las regiones con mayor tasa de desempleo. Como hipótesis se plantea que, para cada región g , la cantidad de empleos generados puede ser absorbida por los habitantes de dicha región.

Así como se eligieron indicadores ambientales relacionados con cierto modelo de evaluación de impacto y un determinado indicador social, el marco planteado es suficientemente flexible como para que en esta etapa (S2) se puedan definir y evaluar otros indicadores —de naturaleza económica, ambiental o social— para su uso en la etapa siguiente.

4.3.3 Etapa 3 (S3): Análisis Envoltente de Datos

Luego de obtener las configuraciones óptimas de CS para diferentes PP planteados (etapa S1) y caracterizar cada una de ellas en términos ambientales y sociales (etapa S2), en esta etapa se genera un ordenamiento (*ranking*) de las CS en base a su comportamiento desde el punto de vista de la sustentabilidad. Las herramientas de toma de decisiones multicriterio han resultado efectivas para hacer frente a este propósito, por ejemplo, el Proceso Analítico Jerárquico y la Teoría de la Utilidad Multiatributo (Wheeler *et al.* 2018). El DEA, una herramienta ampliamente utilizada para la clasificación de sistemas con múltiples atributos, tiene la ventaja de combinar múltiples indicadores en un solo puntaje, sin necesidad de definir pesos entre los indicadores evitando la subjetividad. El DEA evalúa la eficiencia relativa de un conjunto de n entidades similares llamadas DMU,

que convierten múltiples entradas en múltiples salidas. Las entradas y salidas pueden ser indicadores de rendimiento cualesquiera. De acuerdo con la metodología, las entradas y salidas son cantidades por minimizar y maximizar, respectivamente (Cooper *et al.* 2011). Dependiendo de la formulación, existen salidas “no deseadas”, que son aquellas salidas del proceso de producción que uno desearía reducir (Fig. 4.2). Para cada DMU, se calcula un puntaje de desempeño o “eficiencia” que toma valores entre 0 y 1. Las DMU con puntaje igual a 1, son eficientes y pasan a formar parte de una frontera eficiente. Por otro lado, las DMU con puntuaciones inferiores a 1 se consideran ineficientes y fuera de esta frontera. La formulación permite la identificación de distancias entre las DMU ineficientes y la frontera de eficiencia permitiendo identificar aspectos de mejora en las que las DMU ineficientes deben enfocarse para volverse eficientes.

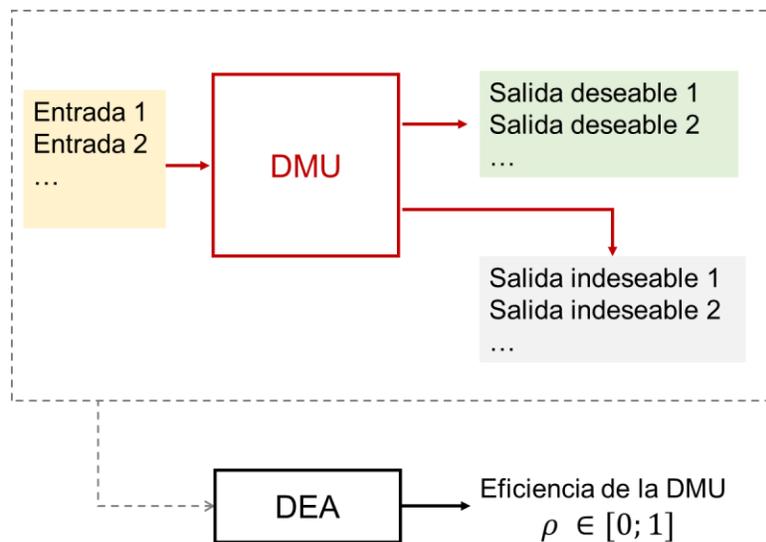


Figura 4.2. Esquema conceptual de la aplicación del DEA usada en esta propuesta.

En este trabajo, se utiliza la variante basada en holgura (SBM) no radial propuesta por Tone (2001) donde las salidas no deseadas se consideran entradas al momento de evaluar la eficiencia de las DMU. Esta formulación no lineal se linealiza utilizando la transformación de Charnes-Cooper (Cabrera-Jiménez *et al.* 2022) como se muestra en M2.

En este modelo, ρ^* es la eficiencia del DEA-SBM, X_{ij} es el valor de la entrada i de la DMU j , Y_{rj} es el valor de la salida r de la DMU j , x_{i0} y y_{r0} son los valores de la entrada i y la salida r , respectivamente, de la DMU en evaluación, S_i^- y S_r^+ son las holguras de entrada y salida (es decir, la distancia desde la DMU evaluada hasta la frontera eficiente). Si el modelo SBM da más de un escenario eficiente, se implementa un modelo súper-SBM para

clasificar las DMU en la frontera eficiente y así obtener una puntuación de “súper-eficiencia” para cada una de ellas (Tone 2002). Se trata también de una formulación no lineal que se ha linealizado (Cooper *et al.* 2007, 2011) y que solo evalúa aquellos DMU eficientes ($\rho^* = 1, S^- = 0$ y $S^+ = 0$).

$$\begin{aligned}
 \rho^* &= \min \mathcal{T} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}} \\
 \text{sujeto a: } & 1 = \mathcal{T} + \frac{1}{k} \sum_{r=1}^k \frac{S_r^+}{y_{r0}} \\
 & \sum_{j=1}^n \Lambda_j X_{ij} + S_i^- = x_{i0} \mathcal{T} \quad \forall i \\
 & \sum_{j=1}^n \Lambda_j Y_{rj} - S_r^+ = y_{r0} \mathcal{T} \quad \forall r \\
 & S_i^- > 0 \quad \forall i, S_r^+ > 0 \quad \forall r, \Lambda_j > 0 \quad \forall j \\
 & \mathcal{T} > 0
 \end{aligned} \tag{M2}$$

4.4 Caso de estudio

La metodología presentada en la sección anterior se aplica al diseño y clasificación de CS de la agroindustria del NOA, considerando la posibilidad de establecer biorrefinerías en la provincia de Tucumán (Fig. 2.2). Con esto se tiene en cuenta el hecho de que esta provincia es la mayor productora de azúcar, bioetanol (a partir de la caña de azúcar) y limones y derivados del país (MH 2018a, 2018b). Se proponen numerosos escenarios con situaciones de potencial interés para el uso de la biomasa derivada de la caña de azúcar y del limón para el país y la región.

4.4.1 Etapa 1 (S1)

A continuación, se presentan los valores de los parámetros y las consideraciones que se tienen en cuenta para aplicar el modelo M1 a este caso de estudio.

Ámbito geográfico. Este caso de estudio considera las 23 provincias de la Argentina (siendo una de ellas la Ciudad Autónoma de Buenos Aires) y los 17 departamentos de la provincia de Tucumán (es decir, un total de 40 regiones geográficas) (Fig. 2.2.). Las regiones productoras de biomasa, $GH(g)$, y las regiones de ubicación potencial de biorrefinerías, $GB(g)$, son G01 a G17 (dentro de Tucumán). Asimismo, la ubicación potencial de los almacenes, $GS(g)$, son G18 a G40 (las regiones fuera de la provincia de Tucumán), mientras que las regiones con demanda de producto, $GD(g)$, dependen del producto final considerado.

Disponibilidad de biomasa. La Tabla 4.1 muestra el tipo de biomasa considerado y la cantidad disponible en cada región $g \in GH(g)$: caña de azúcar, residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC), cáscara de limón (CL) y residuos de poda de limón (RPL). En los capítulos previos se explican las suposiciones y cálculos realizados para obtener estos valores a partir de estudios e informes regionales que reportan datos técnicos y económicos para la producción de caña de azúcar, limón y la generación de los residuos de cosecha.

Tabla 4.1. Distribución de la biomasa disponible como materia prima por región, en toneladas por año. RAC: residuos de cosecha de caña de azúcar, RPL: residuos de poda de limón, CL: cáscara de limón.

Región	RAC	Caña	RPL	CL
G01	$1,59 \cdot 10^5$	$4,51 \cdot 10^5$	$7,35 \cdot 10^4$	$4,36 \cdot 10^5$
G02	$8,55 \cdot 10^4$	$2,11 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^5$
G03	$2,40 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^6$	$9,64 \cdot 10^3$	$5,72 \cdot 10^4$
G04	$5,09 \cdot 10^4$	$3,18 \cdot 10^6$	$2,24 \cdot 10^4$	$1,33 \cdot 10^5$
G05	$3,28 \cdot 10^4$	$6,74 \cdot 10^5$	0	0
G06	$3,41 \cdot 10^4$	$4,35 \cdot 10^5$	$9,40 \cdot 10^3$	$5,58 \cdot 10^4$
G07	$5,40 \cdot 10^4$	$7,15 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^4$	$9,04 \cdot 10^4$
G08	$2,73 \cdot 10^5$	$3,62E+06$	0	0
G09	$4,58 \cdot 10^4$	$6,06 \cdot 10^5$	$1,21 \cdot 10^4$	$7,19 \cdot 10^4$
G10	$1,20 \cdot 10^5$	$1,58 \cdot 10^6$	$1,96 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^5$
G11	$7,72 \cdot 10^4$	$1,02 \cdot 10^6$	$7,16 \cdot 10^3$	$4,25 \cdot 10^4$
G12	$2,75 \cdot 10^2$	$3,64 \cdot 10^3$	0	0
G13	$2,00 \cdot 10^5$	$2,64 \cdot 10^6$	0	0
G14	0	0	0	0
G15	$1,79 \cdot 10^3$	$2,37 \cdot 10^4$	$2,27 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^5$
G16	0	0	0	0
G17	$5,50 \cdot 10^2$	$7,28 \cdot 10^3$	$6,86 \cdot 10^3$	$4,07 \cdot 10^4$

Procesamiento de biomasa. Al modelo se le da la posibilidad de instalar biorrefinerías de diferentes capacidades totales: pequeñas (270 kt/año), medianas (840 kt/año) y grandes (2273 kt/año) considerando las capacidades actuales de las instalaciones en la Argentina. Las tecnologías pueden procesar 17 materias primas y flujos intermedios. Los productos finales considerados son: azúcar blanco y crudo, etanol de primera (1G) y segunda generación (2G), ácido cítrico, ácido láctico, metanol, biogás y electricidad. Los parámetros técnicos y económicos son idénticos a los del Capítulo 2 para la caña de azúcar, y a los del Capítulo 3 y Pourbafrani *et al.* (2013) para el procesamiento del limón

(Tablas C2 y C3 del Anexo C). La Fig. 4.3 resume la superestructura con las posibles entradas y salidas para cada tecnología k , mientras que la Tabla C1 del Anexo C establece los rendimientos utilizados para los balances de masa en esta superestructura.

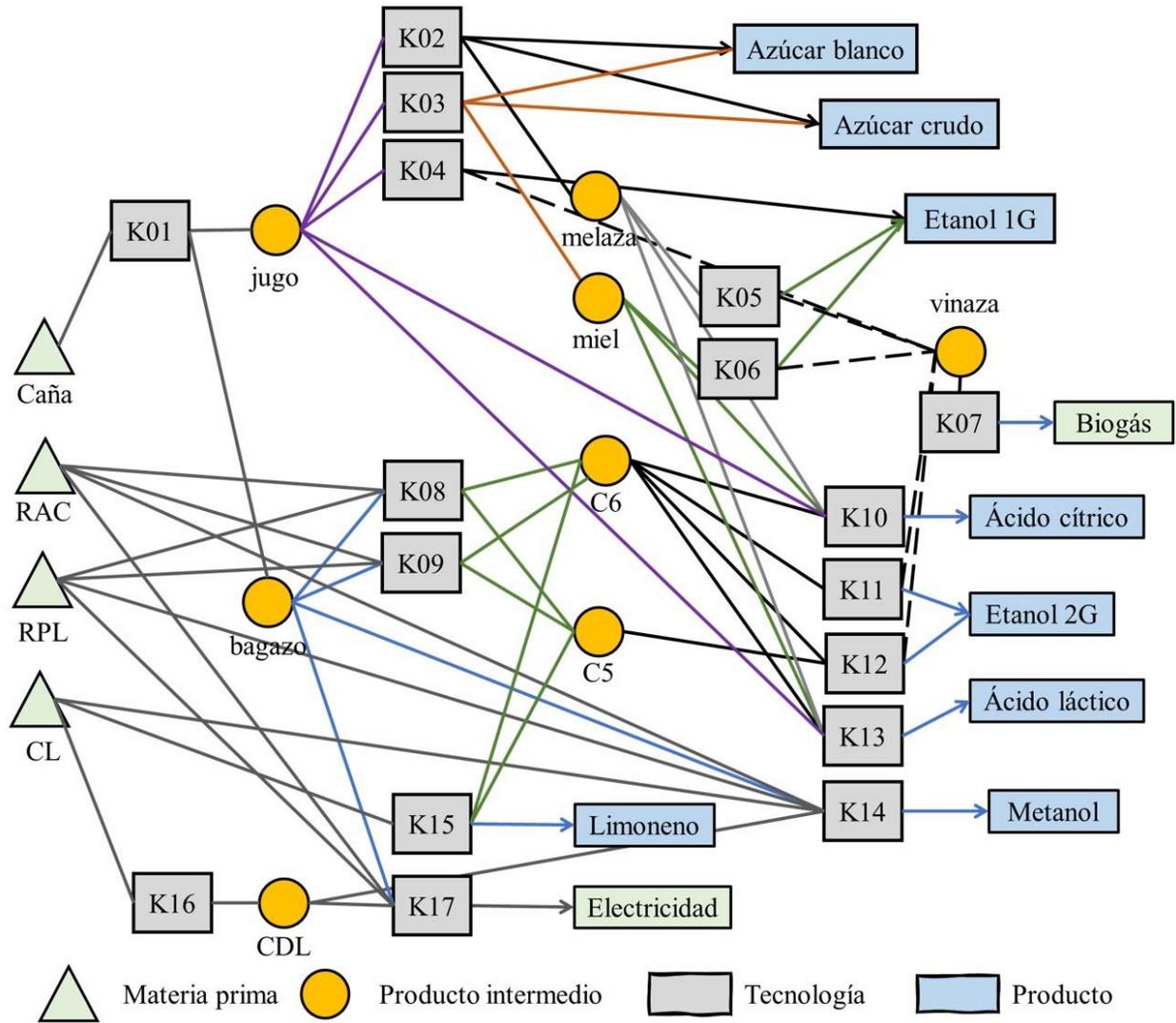


Figura 4.3. Entradas y salidas para cada tecnología k . RAC: residuos de cosecha de caña de azúcar, RPL: residuos de poda de limón, CL: cáscara de limón, CLD: cáscara de limón deshidratada, C5: pentosas, C6: hexosas, 1G: primera generación, 2G: segunda generación.

La caña de azúcar puede entrar en el proceso de molienda (K01) para producir jugo y bagazo. El jugo de caña de azúcar puede ser procesado por diferentes tecnologías como K02, K03 y K04. K02 y K03 usan el jugo de caña de azúcar para producir azúcar blanco y azúcar crudo como coproducto, K02 genera además melaza, mientras que K03, miel secundaria (estos subproductos difieren principalmente en su contenido de sacarosa). El

bioetanol se puede producir por fermentación de melaza (K05), miel (K06) o jugo de caña de azúcar (K04). Los residuos líquidos de la producción de etanol son las vinazas, cuyas propiedades dependen de la materia prima utilizada en el proceso y pueden procesarse para obtener biogás mediante digestión anaeróbica (K07). Se consideran dos tecnologías para producir flujos de monosacáridos (C5 y C6) a partir de los materiales lignocelulósicos disponibles: K08 y K09. K08 produce principalmente un licor de hexosas (C6) a través de un pretratamiento ácido, mientras que K09 produce un licor de pentosas (C5) a través de sacarificación enzimática. Además, los flujos de azúcar C5 y C6 pueden coproducirse a partir de la cáscara de limón con la separación posterior de limoneno (K15). Las salidas de las tecnologías K01, K02, K03, K08, K09 o K15 pueden procesarse para obtener ácido cítrico (K10), etanol 2G a partir de azúcares C6 (K11), etanol 2G a partir de azúcares C5 y C6 (K12), ácido láctico (K13) y metanol (K14). La electricidad puede obtenerse a partir de material lignocelulósico mediante la tecnología K17. En cuanto a la cáscara de limón, es necesario secarla en K16 antes de la cogeneración. En este caso de estudio se considera que los jugos, melaza y mieles de K01, K02 y K03, respectivamente, pueden utilizarse para la producción de azúcar y etanol como es habitual y tradicional en la industria sucroalcoholera a través de tecnologías que ya han alcanzado un alto grado de madurez y eficiencia. Luego, los productos finales restantes se pueden obtener de salidas de K08, K09 o K15, abriendo paso a una sección lignocelulósica de la biorrefinería.

Los parámetros de transporte y almacenamiento son idénticos a los del caso de estudio descrito en el Capítulo 2. Se asume que la tasa de interés para el cálculo de actualización de los costos totales actuales (SC^{costs}) es 0,1 para este caso de estudio.

Escenarios. Se proponen 19 escenarios (denominados E1 a E19) que se caracterizan por poseer diferentes PP, es decir, diferentes productos a ofrecer con diferentes progresiones en el horizonte temporal. La Fig. 4.4 muestra los PP de bioproductos para cada escenario, mientras que en la Tabla 4.2, se muestran las regiones $g \in GD(g)$ y sus demandas actuales de bioproductos. La demanda anual de productos convencionales (azúcar y etanol) se toma de informes nacionales (MH 2018a). Las demandas de nuevos bioproductos a producir (ácido cítrico, ácido láctico y metanol), se estiman con el objetivo de sustituir las importaciones nacionales de estos productos (INDEC 2022) y satisfacer su demanda con productos nacionales producidos a partir de biomasa regional. Cada escenario se describe en la Fig. 4.4: se proponen demandas crecientes, decrecientes y constantes de

bioproductos según el escenario analizado. Se considera un horizonte temporal de diez años (T01 – T10).

La ubicación de los puntos de demanda para cada producto es la siguiente. En el caso del azúcar blanco, la demanda actual se distribuye en un 40% para el consumo interno de la población y un 60% para el consumo industrial (principalmente para la producción de bebidas azucaradas, golosinas y confituras). El azúcar para consumo interno debe ser envasado, luego las plantas empacadoras se consideran puntos de demanda (30% Buenos Aires G18, y 70% Tucumán G01-G17). El azúcar para fines industriales se destina a la ubicación de las principales industrias del país (50% Buenos Aires G18, 40% Córdoba G19 y 10% Tucumán G01-G17). Para el bioetanol, los puntos de demanda son los de los centros de mezcla reportados en la Argentina (Chidiak *et al.* 2014). En la Argentina se reportan siete puntos de mezcla, por lo que la producción de bioetanol se distribuye en 29% Buenos Aires G18, 29% Santa Fe G34, 14% Córdoba G19, 14% Mendoza G23 y 14% Chaco G28. El destino de cada bioproducto se selecciona en función de su hipotético uso como insumo en otras industrias del país. Para el ácido cítrico, utilizado principalmente en la industria alimentaria, las regiones Buenos Aires G18, Córdoba G19 y San Luis G32 son consideradas como centros de demanda del país. El metanol puede satisfacer la demanda de la industria del biodiésel, distribuyéndose principalmente en Santa Fe G34, Buenos Aires G18, La Pampa G35, Entre Ríos G25, San Luis G32 y Santiago del Estero G36 (Tabla 4.2).

4.4.1 Etapa 2 (S2)

En esta sección se calculan los indicadores relacionados con la sustentabilidad de las 19 CS diseñadas en el paso anterior (una por cada escenario). Para cubrir los diversos aspectos de la sustentabilidad, se propone calcular indicadores sociales y ambientales (según S2, Sección 4.3.2) y además económicos y técnicos (a partir de los resultados de S1) para caracterizar cada CS.

Evaluación ambiental. Para la cuantificación de indicadores ambientales descripta en la Sección 4.3.2, los inventarios de cada etapa de cada CS se construyen a través de un enfoque “de la puerta a la puerta” siguiendo las directrices del LCA (Capítulo 3). Para una categoría de impacto determinada e , los impactos se calculan para cada etapa de la CS, pero se suman para formar el indicador de evaluación ambiental (SC_e^{env}) concluyendo en un enfoque “de la cuna a la puerta del mercado” (Ec. 4.3).

Escenario	Azúcar blanco	Etanol	Bioproductos
E1	100	100	
E2	100	150(+5%)	
E3	100(-5%)	150(+5%)	
E4	100(-5%)	200(+10%)	
E5	100(-5%)	150(+5%)	100
E6		100	100
E7		200	100
E8		200	200
E9		200(+10%)	200
E10		200(+10%)	100(+10%)
E11		200	150(+5%)
E12		100	200(+10%)
E13		200	200(+10%)
E14		150(+5%)	150(+5%)
E15		200(+10%)	200(+10%)
E16		100	
E17		200	
E18		150(+5%)	
E19		200(+10%)	

Figura 4.4. Patrón de producción para cada escenario. □: demanda constante, ▽: demanda decreciente y ▲: demanda creciente. Para la demanda constante, el número indica el valor de demanda que se mantendrá constante en el horizonte temporal como porcentaje de la demanda actual. Para la demanda decreciente, el número indica el porcentaje de demanda actual con el que inicia el perfil y el número entre paréntesis, es la disminución porcentual anual. Para la demanda creciente, el número indica el porcentaje de demanda actual con el que inicia el perfil y el número entre paréntesis, es el crecimiento porcentual anual.

Tabla 4.2. Demanda actual de bioproductos para cada región (tonelada/año).

Región		Azúcar blanco	Etanol	Ácido cítrico	Ácido láctico	Metanol
Tucumán	G01-17	411.400	124.662	-	-	-
Buenos Aires	G18	508.200	62.331	12.745	894	826
Córdoba	G19	290.400	-	12.745	671	-
Corrientes	G20	-	-	-	-	-
La Plata	G21	-	-	-	671	-
La Rioja	G22	-	-	-	-	-
Mendoza	G23	-	62.331	-	-	-
Neuquén	G24	-	-	-	-	-
Entre Ríos	G25	-	-	-	-	112
Misiones	G26	-	-	-	-	-
Chubut	G27	-	-	-	-	-
Chaco	G28	-	62.331	-	-	-
Santa Cruz	G29	-	-	-	-	-
Salta	G30	-	-	-	-	-
San Juan	G31	-	-	-	-	-
San Luis	G32	-	-	6372	-	86
Jujuy	G33	-	-	-	-	-
Santa Fe	G34	-	124.662	-	-	3792
La Pampa (General Pico)	G35	-	-	-	-	204
Santiago del Estero	G36	-	-	-	-	76
Catamarca	G37	-	-	-	-	-
Río Negro (General Roca)	G38	-	-	-	-	-
Formosa	G39	-	-	-	-	-
Tierra del Fuego	G40	-	-	-	-	-

Los inventarios de las tecnologías de producción caña de azúcar y RAC, tecnologías de procesamiento de caña de azúcar, producción de limón y RPL se toman del Capítulo 3. Debido a que en este caso de estudio solo se consideran el secado de cáscara (K16) y la producción de azúcares C5-C6 y limoneno (K15) como tecnologías de procesamiento de la cáscara húmeda de limón, se reelaboran los inventarios del Capítulo 3 resultando las Tablas B12 y B13 del Anexo B. Los inventarios para el transporte y para la producción y utilización de gas natural externo y electricidad están adaptados de la versión 3.8 de Ecoinvent® (Wernet *et al.* 2016).

A la hora de aplicar la Fase 3 del LCA (LCIA) se escogen siete categorías de impacto: daño a la salud humana (HH), daño a los ecosistemas (ECO), daño a la disponibilidad de recursos (RES), potencial de calentamiento global (GWP), ecotoxicidad (ECOTOX) y toxicidad humana con efectos cancerígenos y no cancerígenos (HTOX-c y HTOX-nc). Los tres primeros son indicadores de punto final de la metodología ReCiPe 2016 (Huijbregts *et al.* 2020), los dos siguientes, indicadores de punto medio de ReCiPe 2016, y los dos últimos, indicadores de punto medio de la metodología USEtox (Fantke *et al.* 2021).

Tabla 4.3. Número de empleos directos generados por las tecnologías que se instalan.

Tecnología	N_k^{OL}
K01	2,64
K02	2,97
K03	2,93
K04-K06	2,77
K07	2,60
K08-K09	2,69
K10-K12	2,77
K13	2,81
K14	3,30
K15	2,73
K16-K17	2,69

Evaluación social. Para el cálculo del índice social (Sección 4.3.2), los empleos directos generados por las tecnologías, N_k^{OL} , se estiman mediante el método propuesto por Turton *et al.* (2018) basado en una correlación que depende del número de procesos y operaciones unitarias (reactores, columnas, calentadores, intercambiadores, etc.) involucradas en cada tecnología (Tabla 4.3). Para el cómputo se consideran tres turnos por día como es habitual en las actividades industriales. Los otros parámetros socioeconómicos, es decir, Hab_g ,

EAP_g y OUR_g , para cada región donde se podrían instalar biorrefinerías, $GB(g)$, se toman del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC 2010) (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Parámetros socioeconómicos.

Departamento de Tucumán		Hab_g (hab)	EAP_g (%)	OUR_g (%)
Burruyacú	G01	36951	50,7	8,3
Chicligasta	G02	179708	55,9	9,1
Cruz Alta	G03	80609	58,2	6,6
Famaillá	G04	34542	56,0	5,6
Graneros	G05	13551	44,3	6,9
Juan Bautista Alberdi	G06	30237	51,7	5,3
La Cocha	G07	19002	52,8	6,0
Leales	G08	54949	47,2	8,3
Lules	G09	68474	58,4	7,2
Monteros	G10	63641	54,1	6,3
Río Chico	G11	56847	53,5	7,0
San Miguel de Tucumán	G12	549604	63,2	8,5
Simoca	G13	30876	43,9	7,3
Tafí del Valle	G14	14933	57,3	4,3
Tafí Viejo	G15	121513	61,0	9,0
Trancas	G16	17371	55,5	5,7
Yerba Buena	G17	75078	66,6	6,2

Directamente, a partir de las variables calculadas en cada escenario en S1, también se pueden calcular indicadores de desempeño técnico y económico. En este caso, y para ser utilizado posteriormente en S3, se propone el cálculo de dos indicadores para cada escenario E01 a E19. El propósito de una biorrefinería es obtener la mayor cantidad de bioproductos a partir de una determinada cantidad de biomasa intentándose promover su máximo aprovechamiento. Por un lado, una estimación del grado de utilización de la materia prima utilizada (η^{SC}) puede calcularse dividiendo la cantidad de producto producido sobre la materia prima utilizada (Ec. 4.13). Por otro lado, todas las actividades de producción buscan maximizar sus beneficios minimizando los costos para un objetivo comercial determinado, las biorrefinerías no serían una excepción. Dada la gran incertidumbre que presenta la estimación de los precios de bioproductos en un mercado potencial, se decide calcular una función de costos $f(costs)$ como indicador económico, representado por un número suficientemente grande (U) del que se restan los costos totales asociados a la CS (SC^{costs} , Ec. 4.14). Esta función matemática se plantea así con el

único fin de que la $f(costs)$ sea un *output* deseado del modelo en la etapa S3 del marco de análisis.

$$\eta^{sc} = \frac{\sum_t \sum_{g \in GD(g)} \sum_{i \in IM(i)} J_{i,g,t}}{\sum_t \sum_{g \in GH} \sum_{i \in IR} (H_{i,g,t} + \sum_{g', g' \in GB, g' \neq g} \sum_{i, l \in IL} Q_{i,l,g,g',t})} \quad (4.13)$$

$$f(costs) = U - SC^{costs} \quad (4.14)$$

4.4.2 Etapa 3 (S3)

Las 19 CS óptimas resultantes de la etapa S1 se consideran DMU del modelo DEA descrito anteriormente. Para este caso de estudio, los indicadores calculados en S2 a partir de los resultados óptimos se utilizan como entradas o salidas para la clasificación del DEA. De acuerdo con los indicadores ambientales seleccionados, se consideran tres subcasos de DEA (denominados DEA A, DEA B y DEA C) en la etapa S3, mientras que, en todos los casos los parámetros η^{sc} , $f(costs)$ y SC^{soc} se consideran indicadores técnicos, económicos y sociales, respectivamente. DEA A toma SC_{ECO}^{env} , SC_{RES}^{env} y SC_{HH}^{env} , como indicadores ambientales de punto final; DEA B, SC_{GWP}^{env} como indicador ambiental de punto medio; y DEA C, SC_{HTOX-c}^{env} , $SC_{HTOX-nc}^{env}$ y SC_{ECOTOX}^{env} , como indicadores ambientales humanos y ecotoxicológicos.

Entre los criterios encontrados en la bibliografía, algunos autores como Dyson *et al.* (2001) recomiendan que el número de DMU, n , sea mayor a un mínimo. Se debe cumplir con la siguiente restricción: $n > 2(m \cdot k)$, donde $m \cdot k$ es el producto del número de entradas m multiplicado por el número de salidas k . En este estudio se consideran tres entradas y tres salidas —las entradas son métricas que se desea minimizar, mientras que las salidas son métricas que se desea maximizar Cooper *et al.* (2011)— y 19 escenarios de CS (DMU) que satisfacen la restricción ($19 > 2 \times (3 \times 3)$). Otros criterios encontrados en la bibliografía son menos estrictos y dan como resultado un menor número requerido de DMU.

4.5 Resultados

Las etapas S1 y S2 se resuelven juntas, implementadas en GAMS®, utilizando el *solver* MILP CPLEX 11.0 en una PC DELL DESKTOP-OMKAB82 con un procesador Intel(R) Core™ i5-9500, 3.00 GHz y 8 Gb de RAM. El modelo resultante contiene en promedio para todos los escenarios de 129.699 ecuaciones, 181.313 variables continuas y 5760

variables discretas. El tiempo de CPU dedicado a encontrar las soluciones óptimas es del orden de 10^3 segundos con un *gap* de optimización menor al 5%. El modelo DEA (S3) también se implementa en GAMS® y se resuelve como un problema lineal con estadísticas despreciables con respecto al anterior (menos de un segundo por DMU/CS analizada). El cálculo de los indicadores ambientales de la Fase 3 del LCA se realiza con el soporte del *software* libre Brightway (Mutel 2017).

Las capacidades y resultados del modelo de optimización en S1 y su análisis se presentaron en el Capítulo 2; por lo tanto, este capítulo se enfoca más bien en los resultados de las etapas S2 y S3.

Para su incorporación al modelo de DEA, cada conjunto de parámetros se normaliza con respecto al valor máximo. Las Fig. 4.4 a 4.6 muestran los valores numéricos de los parámetros y según la intensidad del color se pueden comparar visualmente los valores relativos para cada indicador. Los *outputs* deseados se representan en verde, mientras que los *inputs/outputs* no deseados, en rojo. Los mejores escenarios se caracterizarían por colores verde intenso y rojo débil.

DEA A							
Escenarios	η_{sc}	SCsoc	f(costs)	HH	ECO	RES	Eficiencia
1	1,00	0,39	0,31	0,83	0,84	0,90	0,24
2	0,95	0,52	0,21	1,00	1,00	1,00	0,16
3	0,90	0,70	0,34	0,81	0,82	0,84	0,29
4	0,85	0,83	0,19	0,95	0,97	0,87	0,16
5	0,92	1,00	0,15	0,79	0,82	0,76	0,22
6	0,58	0,39	0,98	0,33	0,39	0,26	1,00
7	0,56	0,61	0,40	0,70	0,78	0,59	0,34
8	0,58	0,39	0,40	0,67	0,78	0,52	0,34
9	0,60	0,35	0,75	0,49	0,57	0,38	0,60
10	0,54	0,48	0,77	0,50	0,56	0,40	0,63
11	0,56	0,43	0,41	0,67	0,77	0,52	0,34
12	0,60	0,22	0,97	0,34	0,39	0,27	1,00
13	0,57	0,48	0,40	0,69	0,78	0,57	0,34
14	0,58	0,17	0,86	0,41	0,48	0,32	0,55
15	0,58	0,78	0,74	0,49	0,57	0,38	1,00
16	0,53	0,17	1,00	0,32	0,38	0,22	1,00
17	0,53	0,35	0,43	0,66	0,76	0,51	0,34
18	0,53	0,22	0,88	0,42	0,47	0,35	0,59
19	0,53	0,22	0,78	0,47	0,55	0,35	0,52

Figura 4.4. Resultados de las entradas y salidas normalizadas consideradas en el modelo DEA A y puntuación de eficiencia para 19 escenarios analizados. Los *outputs* deseados, en verde, los *inputs/outputs* no deseados, en rojo.

DEA B					
Escenarios	η_{sc}	SCsoc	f(costs)	GWP	Eficiencia
1	1,00	0,39	0,31	0,88	0,21
2	0,95	0,52	0,21	1,00	0,14
3	0,90	0,70	0,34	0,83	0,25
4	0,85	0,83	0,19	0,92	0,14
5	0,92	1,00	0,15	0,81	0,14
6	0,58	0,39	0,98	0,29	1,00
7	0,56	0,61	0,40	0,61	0,34
8	0,58	0,39	0,40	0,58	0,34
9	0,60	0,35	0,75	0,42	0,60
10	0,54	0,48	0,77	0,43	0,63
11	0,56	0,43	0,41	0,58	0,34
12	0,60	0,22	0,97	0,29	1,00
13	0,57	0,48	0,40	0,60	0,34
14	0,58	0,17	0,86	0,35	0,55
15	0,58	0,78	0,74	0,42	1,00
16	0,53	0,17	1,00	0,27	1,00
17	0,53	0,35	0,43	0,57	0,34
18	0,53	0,22	0,88	0,37	0,59
19	0,53	0,22	0,78	0,40	0,52

Figura 4.5. Resultados de las entradas y salidas normalizadas consideradas en el modelo DEA B y puntuación de eficiencia para 19 escenarios analizados. Los *outputs* deseados, en verde, los *inputs/outputs* no deseados, en rojo.

La Fig. 4.7 muestra en gráficos de radar los valores de los parámetros normalizados utilizados en cada caso de DEA, también muestra el valor resultante de la eficiencia para cada caso. Se puede observar que los indicadores muestran ciertas relaciones de compromiso dependiendo de la naturaleza de los parámetros que se analizan. Por ejemplo, se verifica que aquellos escenarios que presentan el mayor valor del indicador social son también los que presentan los mayores costos e impactos ambientales.

Como resultado principal, los tres casos de DEA muestran los escenarios E06, E12, E15 y E16 como eficientes ($\rho = 1$) independientemente de los indicadores ambientales seleccionados, clasificando a los demás como ineficientes. La Fig. 4.8 (izquierda) presenta los valores de eficiencia arrojados por cada DEA (A, B y C) para cada escenario. Ante esta situación, se calcula la súper-eficiencia para discriminar entre escenarios eficientes, resultando los valores que se muestran en la Fig. 4.8 (derecha).

DEA C							
Escenarios	η_{sc}	SCsoc	f(costs)	ECOTOX	Htox c	Htox non	Eficiencia
1	1,00	0,39	0,31	0,90	0,74	0,62	0,26
2	0,95	0,52	0,21	1,00	1,00	1,00	0,15
3	0,90	0,70	0,34	0,89	0,69	0,61	0,31
4	0,85	0,83	0,19	0,97	0,90	0,93	0,15
5	0,92	1,00	0,15	0,86	0,70	0,62	0,22
6	0,58	0,39	0,98	0,40	0,26	0,29	1,00
7	0,56	0,61	0,40	0,83	0,53	0,58	0,35
8	0,58	0,39	0,40	0,80	0,53	0,57	0,33
9	0,60	0,35	0,75	0,59	0,40	0,44	0,58
10	0,54	0,48	0,77	0,59	0,36	0,40	0,67
11	0,56	0,43	0,41	0,81	0,51	0,55	0,35
12	0,60	0,22	0,97	0,41	0,28	0,31	1,00
13	0,57	0,48	0,40	0,82	0,53	0,58	0,34
14	0,58	0,17	0,86	0,49	0,32	0,35	0,55
15	0,58	0,78	0,74	0,59	0,39	0,41	1,00
16	0,53	0,17	1,00	0,39	0,21	0,23	1,00
17	0,53	0,35	0,43	0,80	0,46	0,49	0,37
18	0,53	0,22	0,88	0,50	0,30	0,33	0,64
19	0,53	0,22	0,78	0,57	0,32	0,34	0,57

Figura 4.6. Resultados de las entradas y salidas normalizadas consideradas en el modelo DEA C y puntuación de eficiencia para 19 escenarios analizados. Los *outputs*, deseados en verde, los *inputs/outputs* no deseados, en rojo.

Se encuentra que de los cuatro escenarios clasificados como eficientes, E06 presenta el valor más alto de súper-eficiencia para DEA A y DEA B, mientras que E16 lo hace para DEA C. Sin embargo, no hay grandes diferencias en el valor absoluto de las eficiencias calculadas entre ellos.

El escenario E06 se caracteriza por tener demanda constante de bioetanol y bioproductos en todo el horizonte de tiempo e igual a la demanda actual. Para este escenario, la optimización (S1) arroja como óptima la instalación de cuatro biorrefinerías, dos de gran capacidad y dos de pequeña capacidad. Las dos primeras ubicadas en el centro de la provincia de Tucumán y las pequeñas en el norte y sur (ver mapa en Fig. 4.9). Como materia prima solo se utiliza caña de azúcar y los bioproductos lignocelulósicos se fabrican a partir de bagazo. En todas las biorrefinerías se instalan tecnologías de molienda (K01) y de producción de etanol a partir del jugo de caña (K04). Además, en G04, G05 y G10 se produce metanol (K14); en G15 se produce ácido láctico (K13) y en G10 se produce ácido cítrico.

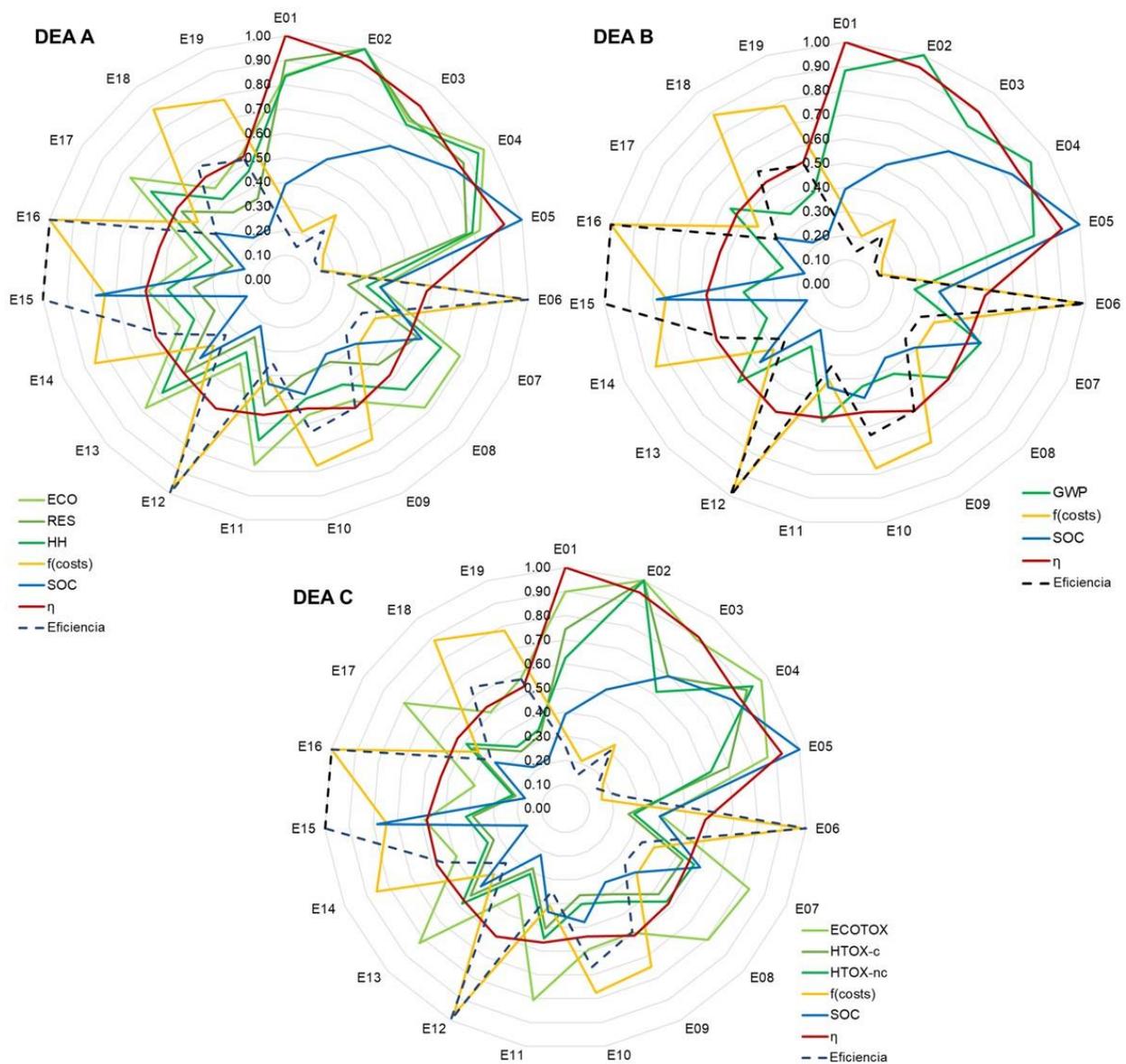


Figura 4.7. Resultados en términos de indicadores normalizados considerados como parámetros en el modelo DEA y puntuación de eficiencia para cada escenario considerado.

En la Fig. 4.9 (derecha), se observa un desglose (*breakdown*) de los costos e impactos. Respecto a los impactos ambientales (HH), se pueden identificar como cuellos de botella la producción de caña de azúcar y el impacto debido al transporte, por lo que las acciones deberían orientarse a estas actividades para mejorar aún más la sustentabilidad de la CS.

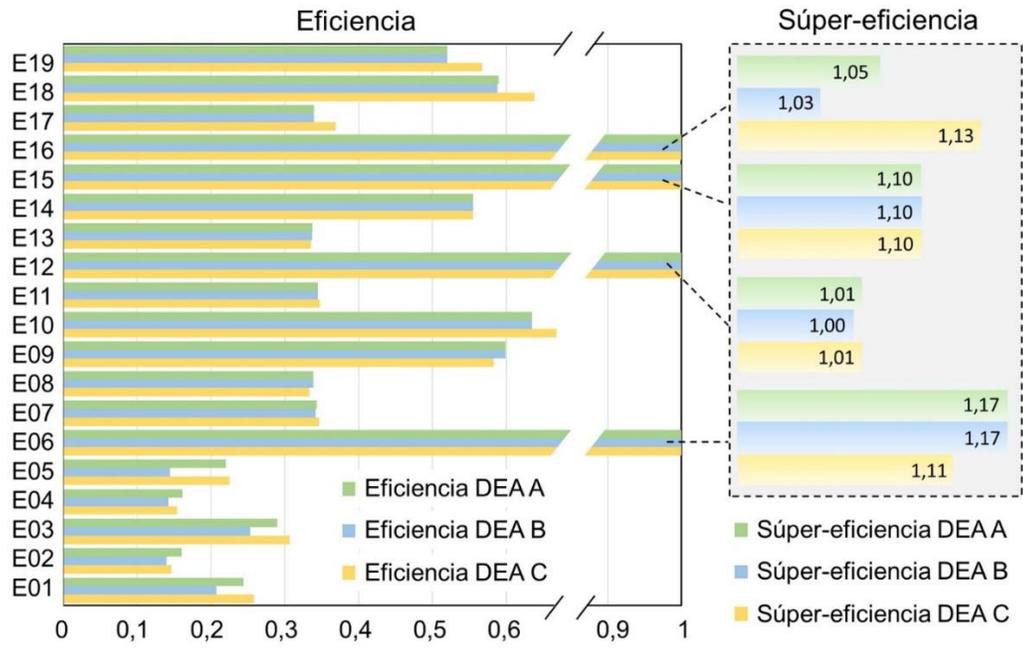


Figura 4.8. Resultados en términos de puntajes de eficiencia y súper-eficiencia para cada escenario del caso de estudio.

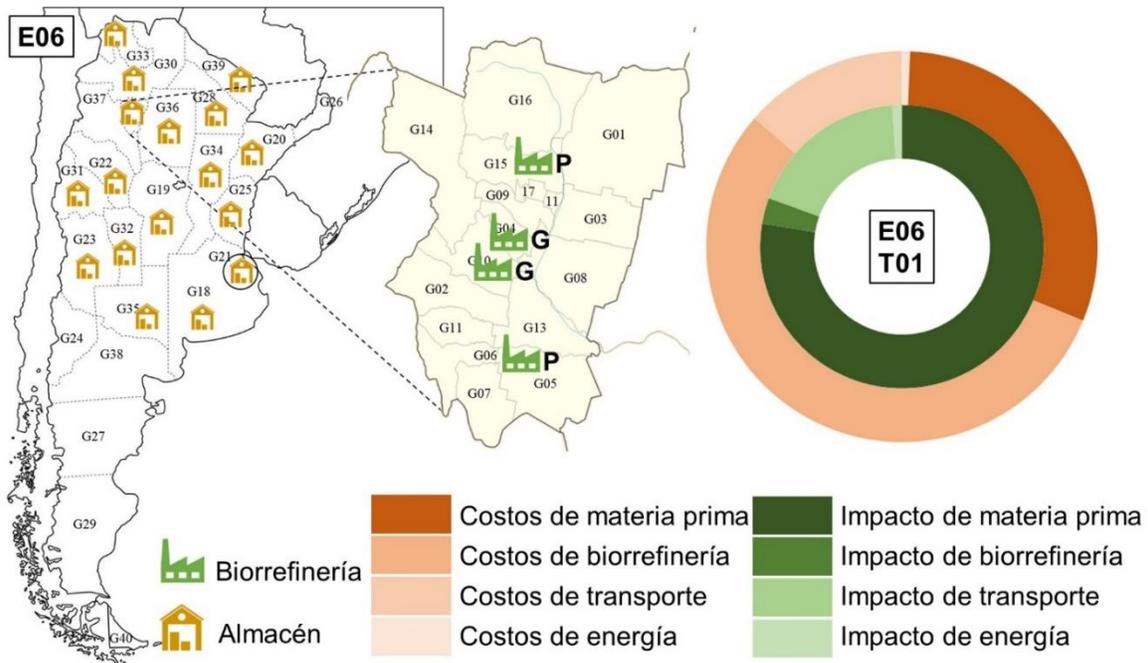


Figura 4.9. Topología de la CS de costo mínimo para el caso E06 de mayor súper-eficiencia (izquierda) y su desglose de costos operativos (naranja) y el impacto de los daños a la salud humana (verde) para el primer período (T01) (derecha). Los impactos y costos no mostrados pueden considerarse insignificantes. Abreviaturas: P: pequeña; G: grande.

La Fig. 4.10 muestra el indicador social y uno de los ambientales normalizados (HH) de cada escenario como pares ordenados. Aquí se puede ver la frontera de eficiencia definida por los escenarios eficientes (puntos verdes) mientras que los escenarios ineficientes (naranja) no forman parte de ella. Se puede observar que aquellos escenarios que presentan elevados valores del indicador social, también lo hacen en impacto ambiental (E01-E05), motivo que los aleja de la frontera. Algunos escenarios cercanos a la frontera, como E18 podrían volverse eficientes (es decir, acercarse a la frontera) disminuyendo su impacto ambiental, aumentando su indicador social o bien ambas acciones simultáneamente.

Esta forma de representar los resultados es más o menos compleja según el número y naturaleza de indicadores que se tengan en cuenta. Pero cuando sea posible graficarlos de esta manera, los *stakeholders* dispondrán de herramientas e indicadores de fácil interpretación para la toma de decisiones pudiendo advertir claramente cuáles son los escenarios eficientes y, además, la “distancia” que aleja a aquellos no eficientes de la frontera de eficiencia. Así, se pueden proponer mejoras sobre los indicadores que efectivamente permitan al escenario bajo estudio acercarse a la frontera. Complementando esto con *breakdowns* de costos e impactos ambientales (Fig. 4.9, derecha), se pueden elaborar propuestas de mejora.

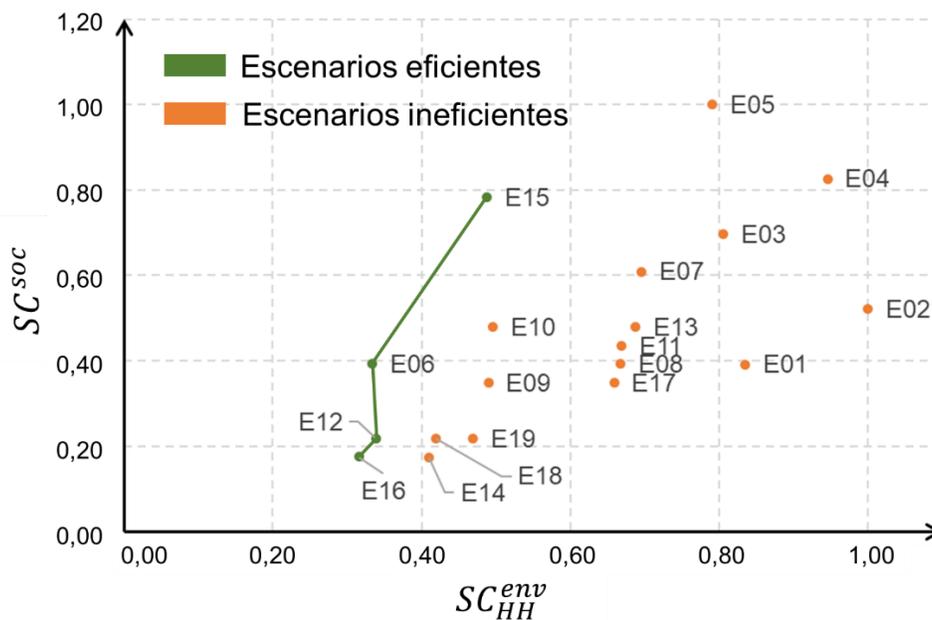


Figura 4.10. Representación de los escenarios (E) del caso de estudio en un plano ambiental-social.

También puede utilizarse esta metodología para comparar escenarios futuros con los actuales, incluyendo en el conjunto de escenarios a analizar los escenarios actuales para poder evaluarlos y caracterizar su eficiencia. En caso de no ser eficientes, se dispondrá de elementos para inferir los motivos y elaborar propuestas de mejora sobre sistemas ya en operación.

4.6 Conclusiones

Este capítulo final de Tesis presenta la metodología propuesta para el diseño multicriterio –bajo consideraciones de sustentabilidad– de CS que incluyen biorrefinerías como instalaciones productivas. Se hace una optimización de un problema MILP asociado a diferentes carteras de productos (escenarios) seguida de una clasificación basada en el modelo DEA para evaluar la eficiencia de las soluciones óptimas de acuerdo con diferentes indicadores tecno-económicos, ambientales y sociales. Las posibilidades de este enfoque se exponen a través de un caso de estudio de dimensiones reales de una CS con centros de procesamiento de biomasa localizados en el NOA, con distribución a todo el país, considerando varios escenarios diferentes de producción de bioproductos. Es importante destacar la utilidad de estos enfoques, que constituyen procedimientos sistemáticos, para resolver problemas complejos de planificación estratégica de CS en las que intervienen numerosas materias primas, múltiples productos y una variedad de criterios a optimizar a menudo contrapuestos. Los resultados obtenidos dan una idea clara de la información que podrían obtener quienes estén encargados de tomar decisiones de alto nivel sobre las cadenas de valor, tanto del sector privado como público. Asimismo, debe remarcarse la importancia que este enfoque le otorga al cálculo de indicadores que aseguran soluciones del problema más sustentables. Esto adhiere a una tendencia mundial cada vez más acentuada a la hora de planificar la producción.

4.7 Notación

4.7.1 Índices

b = biorrefinerías

cb, ck, cs = capacidades para biorrefinerías, tecnologías e instalaciones de almacenamiento

g = regiones

i = materiales

k = tecnologías

l = modos de transporte

t = períodos de tiempo

4.7.2 Conjuntos

$GB(g)$ = regiones donde se pueden instalar biorrefinerías

$GD(g)$ = regiones que tienen demanda de productos

$GH(g)$ = regiones que pueden producir materias primas

$GS(g)$ = regiones donde se pueden instalar almacenes de productos

$II(i)$ = materiales intermedios (producidos y consumidos en la biorrefinería)

$IM(i)$ = materiales que son productos finales

$IR(i)$ = materiales que son materias primas

$IL(i, l)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan los materiales i con los modos de transporte l

$K^-(k, i)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan tecnologías k que consumen materiales i

$K^+(k, i)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan tecnologías k que producen materiales i

4.7.3 Parámetros

α = tasa de interés

γ_g = factor de ponderación para los empleados locales en la región g

λ_g = factor de ponderación para los desempleados locales de la región g

$d_{g,g'}$ = distancia entre las regiones g y g' [km]

EAP_g = población económicamente activa de la región g [%]

Hab_g = número de habitantes en región g [hab]

$ImpCat_{k,e}^B$ = impacto unitario de la tecnología k referido a la categoría de impacto e
[unidades de la cat. de imp./ flujo de referencia]

$ImpCat_e^E$ = impacto unitario de la electricidad de la red referido a la categoría de impacto e
[unidades de la cat. de imp./kWh]

$ImpCat_{i,e}^M$ = impacto unitario de la materia prima i de la red referido a la categoría de
impacto e [unidades de la cat. de imp./flujo de referencia]

$ImpCat_{l,e}^{TE}$ = impacto unitario del modo de transporte l vacío referido a la categoría de
impacto e [unidades de la cat. de imp./km]

$ImpCat_{l,e}^{TF}$ = impacto unitario del modo de transporte l con carga referido a la categoría
de impacto e [unidades de la cat. de imp./km]

N_k^{OL} = requerimiento de mano de obra de la tecnología k [número de empleos/tecnología].

OUR_g = tasa de desempleo en la región g [%]

4.7.4 Variables

η^{sc} = porcentaje de utilización de materia prima por la CS

$EP_{g,t}$ = electricidad comprada en región g en el período de tiempo t [kWh/ período]

$EX_{g,t}$ = electricidad exportada a la red por la región g en el período de tiempo t [kWh/
período]

$H_{i,g,t}$ = material i disponible en la región g para el consumo dentro de la misma región en
el período de tiempo t [t/ período]

$I_{e,t}^M$ = impacto ambiental total de los materiales referido a la categoría de impacto e en
período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$I_{e,t}^B$ = impacto ambiental total de las biorrefinerías referido a la categoría de impacto e en
el período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./período]

$I_{e,t}^T$ = impacto ambiental total del transporte referido a la categoría de impacto e en el
período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$I_{e,t}^S$ = impacto ambiental total del almacenamiento referido a la categoría de impacto e en
el período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$I_{e,t}^E$ = impacto ambiental total de la electricidad referido a la categoría de impacto e en el período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$I_{e,t}^G$ = impacto ambiental total del uso de gas natural referido a la categoría de impacto e en el período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$I_{e,t}^{EP}$ = impacto ambiental total de la electricidad externa referido a la categoría de impacto e en el período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$I_{e,t}^{EC}$ = impacto ambiental total de la electricidad generada *in situ* referido a la categoría de impacto e en el período de tiempo t [unidades de la cat. de imp./ período]

$LE_{g,t}$ = número de empleos locales generados en la región $g \in GB(g)$ en el período de tiempo t

$NL_{i,l,g,g',t}$ = número de viajes referidos para transportar el material i mediante el modo de transporte l desde la región g a la región g' en el período de tiempo t

$Q_{i,l,g,g',t}$ = cantidad de material i transportado mediante el modo de transporte l desde la región g a la región g' en el período de tiempo t [t/ período]

SC^{costs} = costos totales actualizados asociados a la CS a lo largo del horizonte temporal [US\$]

SC^{soc} = índice social de la CS a lo largo del horizonte temporal

SC_e^{env} = impacto ambiental total de la CS referido a la categoría de impacto e a lo largo del horizonte temporal [unidades de la cat. de imp.]

$SI_{g,t}$ = índice social para la región g y el período t

TBC_t = costos totales de las biorrefinerías en el período de tiempo t [US\$/ período]

TC_t = costos totales de la CS en el período de tiempo t [US\$/ período]

TEC_t = costos totales de electricidad en el período de tiempo t [US\$/ período]

TGC_t = costos totales del uso de gas en el período de tiempo t [US\$/ período]

TMC_t = costos totales de adquisición de materiales en el período de tiempo t [US\$/ período]

TSC_t = costos totales de almacenamiento en el período de tiempo t [US\$/ período]

TTC_t = costos totales de transporte en el período de tiempo t [US\$/ período]

$X_{k,b,g,t}$ = nivel de producción de la tecnología k en biorrefinería b , región g y tiempo t [t/ período]

$Z_{k,b,ck,g,t}$ = variable binaria (1 si se instala una tecnología k de capacidad ck en la biorrefinería b , región g y período de tiempo t)

4.8 Referencias

Arabi, M., Yaghoubi, S., Tajik, J. (2019). Algal biofuel supply chain network design with variable demand under alternative fuel price uncertainty: A case study. *Computers and Chemical Engineering*, 130, 106528.

Babazadeh, R., Razmi, J., Rabbani, M., Pishvaei, M. S. (2017). An integrated data envelopment analysis–mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*, 147, 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.038>

Cabrera-Jiménez, R., Mateo-Sanz, J. M., Gavaldà, J., Jiménez, L., Pozo, C. (2022). Comparing biofuels through the lens of sustainability: A data envelopment analysis approach. *Applied Energy*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118201>

Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>

Chidiak, M., Panichelli, L., Rabinovich, G., Buyatti, A., Filipello, C., Rozenwurcel, G., Fuchs, M., Rozemberg, R. (2014). Estudio piloto. Indicadores GBEP de sustentabilidad de la bioenergía en Argentina. Universidad Nacional de San Martín (UNSAM). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23407.64163>

Cooper, W. W., Seiford, L. M., Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software* (Vol. 2, p. 489). New York: Springer.

Cooper, W. W., Seiford, L. M., Zhu, J. (Eds.). (2011). *Handbook on data envelopment analysis*.

Dotoli, M., Epicoco, N., Falagario, M. (2017). A fuzzy technique for supply chain network design with quantity discounts. *International Journal of Production Research*, 55(7), 1862–1884. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1178408>

Dyson, R. G., Allen, R., Camanho, A. S., Podinovski, V. V., Sarrico, C. S., Shale, E. A. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. *European Journal of Operational Research*, 132(2), 245–259. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00149-1)

Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1342–1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega* (Reino Unido), 54, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>

Fantke, P., Chiu, W. A., Aylward, L., Judson, R., Huang, L., Jang, S., ..., Jolliet, O. (2021). Exposure and toxicity characterization of chemical emissions and chemicals in products: global recommendations and implementation in USEtox. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 899-915.

Fernández, D., Pozo, C., Folgado, R., Jiménez, L., Guillén-Gosálbez, G. (2018). Productivity and energy efficiency assessment of existing industrial gases facilities via data envelopment analysis and the Malmquist index. *Applied Energy*, 212 (septiembre 2017), 1563-1577. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.008>

Galán-Martín, Á., Guillén-Gosálbez, G., Stamford, L., Azapagic, A. (2016). Enhanced data envelopment analysis for sustainability assessment: A novel methodology and application to electricity technologies. *Computers & Chemical Engineering*, 90, 188-200.

Grigoroudis, E., Petridis, K., Arabatzis, G. (2014). RDEA: A recursive DEA based algorithm for the optimal design of biomass supply chain networks. *Renewable Energy*, 71, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.001>

Guo, Y., Yu, Y., Ren, H., Xu, L. (2020). Scenario-based DEA assessment of energy-saving technological combinations in aluminum industry. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121010>

Halog, A. (2009). Models for evaluating energy, environmental and sustainability performance of biofuels value chain. *International Journal of Global Energy Issues*, 32(1-2), 83-101. <https://doi.org/10.1504/ijgei.2009.027975>

Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... , van Zelm, R. (2020). Correction to: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1635-1635. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01761-5>

INDEC. (2010). Instituto Nacional de Estadística y Censos de Argentina. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Argentina. <https://www.indec.gob.ar> (consultado en abril de 2023)

INDEC. (2022). Instituto Nacional de Estadística y Censos de Argentina. Consultas del Comercio Exterior de Bienes. <https://comex.indec.gob.ar>, consultado 2023/04/28

ISO 14044 (2006). Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Suiza, Ginebra.

Laso, J., Cristóbal, J., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I. (2022). The combined use of life cycle assessment and data envelopment analysis to analyse the environmental efficiency of multi-unit systems. *Assessing Progress Towards Sustainability: Frameworks, Tools and Case Studies*, 137-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85851-9.00008-0>

Lee, D. H. (2017). Econometric assessment of bioenergy development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27701-27717. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.055>

Meyer, R., Campanella, S., Corsano, G., Montagna, J. M. (2019). Optimal design of a forest supply chain in Argentina considering economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 231, 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.090>

MH (2018a). Informe de Cadenas de Valor: Azúcar 2018. Ministerio de Hacienda. <https://www.economia.gob.ar> (consultado en abril de 2023)

MH (2018b). Informe de Cadenas de Valor: Limón 2018. Ministerio de Hacienda. <https://www.economia.gob.ar> (consultado en abril de 2023)

Mohtashami, Z., Bozorgi-Amiri, A., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2021). A two-stage multi-objective second generation biodiesel supply chain design considering social sustainability: A case study. *Energy*, 233, 121020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121020>

Mutel, C. (2017). Brightway: an open source framework for life cycle assessment. *Journal of Open Source Software*, 2(12), 236. <https://doi.org/10.21105/joss.00236>

Pourbafrani, M., McKechnie, J., Maclean, H. L., Saville, B. A. (2013). Life cycle greenhouse gas impacts of ethanol, biomethane and limonene production from citrus waste. *Environmental Research Letters*, 8(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015007>

Rentizelas, A., Melo, I. C., Alves Junior, P. N., Campoli, J. S., Rebelatto, D. A. N. (2019). Multi-criteria efficiency assessment of international biomass supply chain pathways using Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117690>

Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049>

Soheilrad, S., Govindan, K., Mardani, A., Zavadskas, E. K., Nilashi, M., Zakuan, N. (2018). Application of data envelopment analysis models in supply chain management: a systematic review and meta-analysis. *Annals of Operations Research*, 271(2), 915–969. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2605-1>

Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498-509.

Tone, K. (2002). A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 143, 32–41

Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D., Whiting, W. B. (2018). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes*. 5^{ta} ed., Pearson Education.

United Nations SDGs. (2023). The 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/es/goals> (consultado en abril 2023).

WEF. (2022). World Economic Forum. The Global Risks Report 2022. 17th Edition. <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022> (consultado en abril 2023).

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218-1230.

Wheeler, J., Caballero, J. A., Ruiz-Femenia, R., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D. (2017). MINLP-based Analytic Hierarchy Process to simplify multi-objective problems: Application to the design of biofuels supply chains using on field surveys. *Computers and Chemical Engineering*, 102, 64–80. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.10.014>

Wheeler, J., Páez, M. A., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D. (2018). Combining multi-attribute decision-making methods with multi-objective optimization in the design of biomass supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 113, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.02.010>

CAPÍTULO 5

Conclusiones y proyecciones

En la última década, la bioeconomía aparece como un paradigma tecno-productivo en formación, pero con importantes avances. Para la Argentina puede representar una vía hacia el desarrollo del país, aunque requiere nuevos proyectos e iniciativas promovidos por autoridades públicas regionales y locales, por grupos y empresas privadas, o por universidades, centros de investigación o proveedores de servicios de tecnología e innovación para su despliegue a nivel biorregional. El desarrollo de biorrefinerías es clave para participar en un entorno de bioeconomía, permitiendo producir productos de mayor valor agregado, biocombustibles y bioenergía en simultáneo. En este contexto, la provincia de Tucumán presenta un futuro prometedor a partir de sus agroindustrias más representativas: de la caña de azúcar y del limón. Para que la transición hacia cadenas de suministros (CS⁸) de biorrefinerías sea eficiente, es preciso identificar *a priori*, mediante una planificación estratégica, la inversión necesaria para implementar las tecnologías de procesamiento adecuadas y la distribución de los flujos de materiales y energía a lo largo de toda la CS en propuestas que resulten sustentables —de óptimo desempeño económico, ambiental y social—.

A lo largo del Capítulo 2, la Tesis aborda el diseño y planificación óptimos de CS asociadas a un entramado de biorrefinerías considerando aspectos técnicos y económicos. La tarea de diseño se realiza a través de un modelo de programación lineal mixta entera (MILP) que busca minimizar el costo total de la CS. Las capacidades del modelo propuesto se ilustran a través de cuatro casos de estudio basados en escenarios a escala real de la cadena de valor de la caña de azúcar en la Argentina. Las soluciones brindan información valiosa sobre el problema de diseño y sugieren diferentes topologías de la CS según el valor de los parámetros del modelo. Los resultados no solo muestran la configuración óptima de CS (mínimos costos), sino también las tecnologías que operan dentro de las biorrefinerías y la posibilidad de agregar valor a los efluentes y recircular recursos. Esta herramienta está diseñada para ayudar a las autoridades en el análisis de políticas estratégicas en el campo de la agroindustria y la energía (Machin Ferrero y Mele 2022).

⁸Abreviaturas: CS: cadena de suministros, DEA: Análisis Envolvente de Datos, LCA: análisis de ciclo de vida, MILP: programación lineal mixta entera.

En el Capítulo 3, se presenta por primera vez un perfil ambiental de los productos que actualmente se obtienen a partir del limón argentino mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA). También se analizan las implicaciones ambientales de pasar del esquema de producción convencional a una biorrefinería que incluye estrategias de economía circular (Machin Ferrero *et al.* 2022). Lateralmente a la línea central de la Tesis, este estudio puede considerarse como un primer paso hacia la identificación de oportunidades de reducción de impactos en el sector del limón argentino. En cuanto al perfil ambiental de los derivados del limón, se observa un aporte dominante de las prácticas agrícolas: uso de fertilizantes y plaguicidas (verbigracia, urea, abamectina, compuestos de cobre) y consumo de diésel. Un hallazgo clave es que la producción de productos innovadores a partir de flujos de proceso existentes no implica una expansión del área de cultivo y, al mismo tiempo, mejora la utilización de la biomasa. Además, los puntos críticos identificados y las opciones de asignación aparecen como temas importantes en los que centrarse, hacia la definición de reglas de categoría de productos para productos a base de limón. En cuanto a la comparación de la situación actual con los esquemas de biorrefinería, queda claro que implementar estrategias de economía circular no asegura un mejor desempeño ambiental del sistema. El éxito de la recirculación depende en gran medida de poder reducir los impactos en la agricultura, impactos que diluyen el efecto beneficioso que los esquemas circulares pueden tener en la etapa industrial. Además, el reciclaje puede no tener efecto si el consumo de combustibles fósiles sigue siendo alto y si las recirculaciones demandan insumos altamente contaminantes.

Finalmente, esta Tesis propone en el Capítulo 4 una metodología para el diseño multicriterio —bajo consideraciones de sustentabilidad— de CS que incluyen biorrefinerías como instalaciones productivas. Se hace una optimización de un problema MILP asociado a diferentes carteras de productos seguida de una clasificación basada en el modelo de Análisis Envoltante de Datos (DEA) para evaluar la eficiencia de las soluciones óptimas de acuerdo con diferentes indicadores tecno-económicos, ambientales y sociales. Las posibilidades de este enfoque se exponen a través de un caso de estudio de dimensiones reales de una CS con centros de procesamiento de biomasa localizados en el NOA, con distribución a todo el país, considerando varios escenarios diferentes de producción de bioproductos (Machin Ferrero *et al.* 2023). Es importante resaltar la utilidad de estos enfoques, que constituyen procedimientos sistemáticos, para resolver problemas complejos de planificación estratégica de CS en las que intervienen numerosas

materias primas, múltiples productos y una variedad de criterios a optimizar a menudo contrapuestos. Los resultados obtenidos dan una idea clara de la información que podrían obtener quienes estén encargados de tomar decisiones de alto nivel sobre las cadenas de valor, tanto del sector privado como público. Asimismo, debe remarcar la importancia que este enfoque le otorga al cálculo de indicadores que aseguran soluciones del problema más sustentables. Esto adhiere a una tendencia mundial cada vez más acentuada a la hora de planificar la producción.

Con las aplicaciones que se presentan, se muestra la utilidad de la información de LCA como herramienta para tomar decisiones, tanto cuando se trata de un ambiente de optimización como el que se presenta en el Capítulo 4, como cuando se discrimina entre unas cuantas posibilidades como se presenta en el Capítulo 3.

Esta propuesta contribuye a los Objetivos del Desarrollo Sostenible 12 y 13⁹ al realizar aportes en el diseño de CS óptimas de biorrefinerías con criterios de sustentabilidad teniendo en cuenta las circunstancias regionales. Las proyecciones de trabajo futuro incluyen agregar nuevos escenarios e indicadores y sistematizar la propuesta de mejoras en los escenarios ineficientes. Con respecto al análisis ambiental, se planea estudiar las CS en términos absolutos e incluir estudios prospectivos de LCA.

5.1 Referencias

Machin Ferrero, L. M., Mele, F. D. (2022). Optimal design of sugar-cane-based biorefinery networks in Argentina. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(24), 7916-7928. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00921>

Machin Ferrero, L. M., Wheeler, J., Mele, F. D. (2022). Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 672-684. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.014>

Machin Ferrero, L.M., Cabrera Jiménez, R., Wheeler, J., Pozo Fernández, C., Mele, F. (2023). Diseño óptimo de cadenas de suministros de biorrefinerías sustentablemente eficientes. *Electronic Journal of SADIO (EJS)*, 22(1), 168-185. <https://publicaciones.sadio.org.ar/index.php/EJS/article/view/462>

⁹ Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

ANEXO A

Distancia y tiempo de viaje entre regiones

En esta sección se presentan las matrices de distancia (Tabla A1) y tiempo de viaje (Tablas A2) entre regiones utilizadas en los casos de estudio del Capítulo 2.

Tabla A1. Matriz de distancia de viaje entre regiones, en kilómetros.

$d(g,g')$	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20
G01	0	148	82	97	185	165	185	107	85	112	158	67	121	166	78	135	75	1234	625	788
G02	141	0	116	40	54	35	56	67	57	26	27	86	41	88	98	154	71	1206	524	810
G03	73	128	0	77	155	145	165	75	65	93	139	50	102	146	62	118	57	1208	599	761
G04	97	40	77	0	89	73	93	29	17	17	67	38	26	71	53	110	32	1217	535	777
G05	183	57	163	93	0	22	39	96	106	77	37	128	65	141	140	196	121	1167	485	771
G06	165	35	145	75	22	0	24	95	88	59	17	110	64	122	121	178	102	1188	506	792
G07	185	56	165	95	39	24	0	115	108	79	38	130	84	143	141	198	123	1169	487	809
G08	107	72	75	29	96	95	115	0	41	44	89	50	33	98	63	120	56	1224	542	764
G09	86	56	66	18	105	87	107	43	0	33	80	21	42	87	27	98	16	1233	551	780
G10	112	25	92	17	76	58	78	44	33	0	51	57	20	62	69	125	48	1212	530	791
G11	158	27	138	68	37	17	38	89	81	52	0	103	58	116	115	171	96	1203	521	807
G12	67	80	50	41	129	109	129	50	21	57	103	0	66	110	11	70	10	1257	575	787
G13	116	41	96	26	65	64	84	33	42	20	58	56	0	84	73	129	57	1193	511	780
G14	166	88	146	71	140	121	142	98	87	61	115	111	83	0	123	179	102	1275	593	845
G15	79	92	62	54	141	121	141	64	27	69	115	11	78	123	0	68	15	1269	587	799
G16	135	161	118	110	197	178	198	120	98	125	171	70	134	179	68	0	80	1325	643	855
G17	75	72	55	33	121	103	123	59	16	49	96	10	58	102	15	80	0	1249	567	792
G18	1211	1206	1184	1217	1168	1188	1169	1224	1233	1213	1203	1248	1193	1276	1264	1320	1248	0	696	917
G19	617	517	591	528	478	499	480	535	544	523	514	558	504	587	575	631	559	695	0	914
G20	787	809	761	776	771	791	808	763	780	791	806	787	780	845	798	828	794	917	898	0

G21	1273	1273	1250	1283	1233	1254	1235	1289	1299	1278	1267	1313	1256	1340	1328	1384	1312	64	759	980
G22	442	316	422	353	296	281	257	373	365	337	296	387	342	400	399	455	380	1156	439	1013
G23	1014	888	994	924	868	853	829	944	937	908	867	959	913	971	970	1027	952	1050	609	1478
G24	1726	1599	1706	1636	1579	1564	1541	1650	1649	1620	1579	1671	1619	1684	1683	1738	1663	1139	1108	1952
G25	999	1021	973	988	982	1003	1032	975	991	1003	1018	998	991	1057	1010	1066	1005	322	596	650
G26	1291	1313	1265	1279	1274	1295	1312	1266	1283	1294	1310	1290	1283	1348	1302	1331	1297	1142	1277	503
G27	2443	2343	2417	2354	2304	2325	2306	2361	2370	2350	2340	2384	2330	2413	2401	2457	2385	1736	1819	2638
G28	773	795	747	762	757	778	794	749	766	777	792	773	766	831	784	814	780	936	879	20
G29	3032	2932	3006	2943	2893	2914	2895	2950	2959	2939	2929	2973	2919	3002	2990	3046	2974	2325	2407	3218
G30	282	398	355	347	433	415	435	357	335	362	408	307	371	314	305	244	317	1490	880	836
G31	887	761	867	798	741	726	702	818	810	782	741	832	787	845	844	900	825	1113	576	1352
G32	957	831	937	826	777	796	772	833	880	851	811	902	802	915	914	970	895	794	431	1212
G33	314	431	388	380	466	447	467	390	367	395	441	340	404	449	338	276	349	1522	918	869
G34	994	894	968	905	855	876	857	912	921	900	891	935	880	964	952	1008	936	410	383	922
G35	1155	1055	1129	1066	1017	1038	1018	1073	1082	1062	1052	1097	1042	1125	1113	1170	1097	589	531	1210
G36	185	185	159	154	147	168	183	141	168	169	182	162	157	223	176	232	168	1123	441	637
G37	289	162	269	199	142	127	104	219	211	183	142	234	188	246	245	301	226	1131	449	859
G38	1723	1623	1696	1634	1584	1605	1586	1640	1650	1629	1619	1664	1609	1693	1681	1737	1665	1098	1099	1909
G39	935	957	909	923	918	939	956	910	927	938	954	934	927	992	946	975	941	1104	1046	189
G40	3694	3594	3668	3605	3555	3576	3557	3612	3621	3601	3591	3635	3581	3664	3652	3708	3636	2987	3070	3881

Tabla A1 (cont.). Matriz de distancia de viaje entre regiones, en kilómetros.

$d(g,g')$	G21	G22	G23	G24	G25	G26	G27	G28	G29	G30	G31	G32	G33	G34	G35	G36	G37	G38	G39	G40
G01	1295	442	1014	1725	1001	1291	2443	773	3032	282	888	957	320	995	1155	185	288	1723	935	3693
G02	1267	313	885	1599	1023	1314	2341	795	2931	391	759	828	429	894	1054	187	159	1622	957	3592
G03	1269	422	994	1706	975	1265	2416	747	3006	355	868	937	393	969	1129	160	269	1697	908	3669
G04	1278	350	922	1633	990	1280	2352	762	2942	347	796	826	385	905	1065	153	197	1633	924	3603
G05	1228	296	868	1579	985	1275	2303	756	2892	433	742	811	471	855	1015	148	142	1583	918	3553
G06	1249	281	853	1564	1005	1296	2323	777	2913	415	727	796	453	876	1036	169	127	1604	939	3574

G07	1230	257	829	1540	1070	1312	2304	794	2894	435	703	772	473	857	1017	184	103	1585	956	3555
G08	1284	372	945	1601	977	1267	2359	749	2949	357	818	833	395	911	1071	140	219	1639	911	3610
G09	1294	364	936	1654	994	1284	2368	765	2958	336	810	842	373	921	1081	157	211	1649	927	3619
G10	1273	335	907	1618	1004	1295	2347	776	2937	362	781	850	400	899	1060	168	181	1627	938	3598
G11	1263	295	868	1579	1020	1310	2338	792	2928	408	741	810	446	890	1050	183	142	1618	954	3589
G12	1317	386	958	1678	1000	1290	2392	772	2982	308	832	866	346	944	1104	161	233	1672	934	3643
G13	1254	341	914	1570	993	1283	2328	765	2918	366	787	802	404	881	1041	156	188	1609	927	3579
G14	1336	399	971	1682	1058	1349	2411	830	3001	314	844	914	454	963	1123	222	245	1691	992	3661
G15	1330	398	971	1690	1012	1302	2404	784	2994	306	844	878	344	956	1117	175	245	1684	946	3655
G16	1386	455	1027	1738	1068	1332	2461	840	3050	244	901	970	282	1013	1173	232	301	1741	1002	3711
G17	1309	380	952	1670	1006	1296	2384	777	2974	318	826	858	355	936	1096	172	226	1664	939	3635
G18	61	1129	1050	1142	321	1141	1736	935	2325	1466	1113	794	1504	410	589	1074	1128	1099	1103	2988
G19	756	438	656	1109	596	1280	1817	879	2407	872	578	402	910	383	530	434	439	1098	1046	3068
G20	978	1010	1456	1954	650	503	2631	20	3221	836	1351	1199	874	920	1209	636	857	1911	188	3804
G21	0	1193	1105	1164	380	1200	1727	994	2317	1525	1168	849	1567	469	666	1182	1195	1121	1166	2979
G22	1217	0	575	1286	1057	1516	2184	998	2774	693	449	518	730	844	897	387	158	1326	1160	3435
G23	1106	575	0	788	1067	1838	1726	1453	2409	1264	169	258	1302	691	698	892	730	827	1625	3196
G24	1163	1293	793	0	1356	2176	951	1857	1634	1982	960	774	2013	979	668	1581	1447	46	2024	2361
G25	383	1029	1073	1358	0	917	2036	668	2625	1255	1136	808	1292	394	683	838	990	1316	836	3287
G26	1203	1514	1827	2178	917	0	2855	524	3445	1339	1854	1571	1377	1236	1593	1140	1360	2136	691	4107
G27	1728	2184	1736	950	2042	2862	0	2534	888	2698	2032	1713	2736	1656	1345	2259	2265	1067	2702	1773
G28	997	996	1436	1856	668	524	2533	0	3123	822	1337	1179	860	900	1189	623	843	1813	174	3785
G29	2318	2774	2419	1633	2623	3443	888	3124	0	3288	2621	2303	3325	2245	1934	2848	2854	1656	3291	943
G30	1551	692	1264	1975	1256	1340	2698	821	3288	0	1138	1207	93	1250	1410	440	538	1978	983	3948
G31	1169	449	169	953	1130	1855	2032	1337	2622	1138	0	324	1175	754	744	765	603	993	1498	3283
G32	851	518	257	770	807	1578	1713	1193	2303	1207	324	0	1245	436	426	790	673	810	1359	2964
G33	1583	724	1297	2013	1289	1372	2730	854	3320	93	1170	1239	0	1288	1448	471	571	2011	938	3980
G34	466	816	691	979	394	1236	1656	902	2246	1249	754	435	1287	0	312	811	815	936	1069	2908
G35	645	897	698	668	683	1594	1345	1190	1935	1411	745	426	1448	312	0	972	977	626	1357	2597
G36	1184	386	891	1580	840	1140	2257	625	2847	440	766	789	478	811	976	0	233	1538	765	3509
G37	1192	158	730	1442	1032	1363	2266	844	2856	539	604	673	576	819	979	233	0	1547	1006	3517

G38	1121	1327	827	46	1313	2133	1066	1814	1656	1978	994	808	2016	936	625	1539	1481	0	1981	2318
G39	1165	1158	1625	2023	836	692	2700	174	3290	983	1498	1347	938	1067	1356	765	1004	1981	0	3952
G40	2979	3436	3196	2362	3286	4105	1774	3786	944	3949	3285	2965	3987	2908	2597	3511	3516	2319	3954	0

Tabla A2. Matriz de tiempo de viaje entre regiones, en horas.

$t(g,g')$	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20
G01	0,00	1,94	1,50	1,29	2,33	2,01	2,24	1,56	1,20	1,53	2,06	1,09	1,63	2,57	1,22	1,80	1,42	13,68	7,55	9,39
G02	1,91	0,00	1,92	0,71	0,89	0,66	0,90	1,07	1,01	0,50	0,60	1,29	0,68	1,68	1,39	1,97	1,32	13,10	6,40	10,03
G03	1,46	1,98	0,00	1,33	2,34	2,05	2,28	1,41	1,24	1,57	2,09	1,18	1,67	2,61	1,28	1,86	1,48	13,62	7,50	9,34
G04	1,32	0,72	1,29	0,00	1,12	0,89	1,11	0,45	0,35	0,32	0,93	0,77	0,41	1,36	0,80	1,38	0,66	13,11	6,40	9,56
G05	2,24	0,84	2,21	1,11	0,00	0,35	0,51	1,23	1,31	0,98	0,58	1,61	0,83	2,15	1,72	2,30	1,61	12,48	5,78	9,41
G06	2,02	0,65	1,99	0,89	0,34	0,00	0,35	1,20	1,09	0,76	0,34	1,40	0,80	1,93	1,50	2,08	1,39	12,78	6,08	9,71
G07	2,23	0,89	2,20	1,11	0,49	0,34	0,00	1,42	1,31	0,98	0,57	1,61	1,02	2,15	1,72	2,30	1,61	12,70	6,00	9,86
G08	1,57	1,09	1,40	0,44	1,21	1,21	1,43	0,00	0,64	0,69	1,25	0,95	0,50	1,73	1,05	1,64	0,94	13,19	6,49	9,38
G09	1,21	0,99	1,18	0,35	1,39	1,07	1,30	0,65	0,00	0,59	1,12	0,54	0,69	1,63	0,65	1,28	0,36	13,38	6,67	9,59
G10	1,54	0,49	1,51	0,30	0,95	0,74	0,96	0,66	0,61	0,00	0,78	0,92	0,35	1,27	1,02	1,60	0,91	13,08	6,38	9,78
G11	2,06	0,60	2,03	0,93	0,57	0,34	0,58	1,24	1,13	0,80	0,00	1,44	0,84	1,97	1,54	2,12	1,43	13,01	6,30	9,94
G12	1,12	1,32	1,16	0,67	1,72	1,40	1,62	0,95	0,55	0,91	1,44	0,00	1,01	1,95	0,32	0,99	0,41	13,70	6,99	9,76
G13	1,64	0,69	1,61	0,41	0,83	0,80	1,03	0,50	0,71	0,36	0,85	1,06	0,00	1,54	1,12	1,70	1,01	12,81	6,11	9,61
G14	2,58	1,66	2,55	1,34	2,11	1,90	2,13	1,70	1,65	1,22	1,94	1,96	1,51	0,00	2,06	2,64	1,95	14,24	7,54	10,82
G15	1,23	1,41	1,24	0,76	1,81	1,49	1,71	1,03	0,64	1,00	1,53	0,29	1,10	2,04	0,00	1,00	0,43	13,79	7,09	9,83
G16	1,83	2,02	1,84	1,36	2,41	2,09	2,31	1,64	1,27	1,61	2,13	0,99	1,70	2,65	1,00	0,00	1,30	14,39	7,69	10,43
G17	1,43	1,29	1,40	0,64	1,69	1,37	1,60	0,94	0,35	0,88	1,41	0,39	0,98	1,93	0,44	1,31	0,00	13,67	6,97	9,98
G18	13,63	13,21	13,57	13,23	12,60	12,90	12,80	13,32	13,53	13,22	13,13	13,88	12,91	14,39	13,94	14,52	13,83	0,00	7,26	10,29
G19	7,53	6,43	7,49	6,44	5,80	6,10	6,00	6,53	6,74	6,44	6,34	7,10	6,13	7,61	7,15	7,74	7,03	7,20	0,00	11,35
G20	9,26	9,93	9,21	9,48	9,31	9,61	9,78	9,31	9,53	9,73	9,84	9,63	9,54	10,77	9,73	9,85	9,93	10,29	11,18	0,00
G21	15,12	14,55	14,90	14,55	13,92	14,25	14,13	14,64	14,85	14,55	14,32	15,21	14,10	15,58	15,13	15,71	15,02	1,25	8,45	11,48
G22	5,33	3,94	5,30	4,21	3,59	3,44	3,10	4,52	4,41	4,08	3,67	4,71	4,12	5,25	4,82	5,40	4,71	12,36	5,61	12,45
G23	12,33	10,93	12,30	11,20	10,59	10,44	10,09	11,51	11,40	11,07	10,67	11,71	11,11	12,24	11,81	12,39	11,70	11,95	8,21	18,27

G24	19,76	18,36	19,72	18,62	18,01	17,86	17,52	18,90	18,82	18,50	18,09	19,14	18,50	19,67	19,24	19,82	19,13	12,95	12,73	21,97
G25	12,24	12,91	12,19	12,46	12,29	12,59	12,73	12,29	12,51	12,70	12,82	12,60	12,52	13,74	12,70	13,28	12,90	4,27	7,13	8,59
G26	15,27	15,94	15,22	15,49	15,32	15,62	15,79	15,32	15,54	15,73	15,85	15,63	15,55	16,77	15,73	15,86	15,93	13,02	15,70	6,10
G27	27,23	26,11	27,17	26,12	25,49	25,79	25,70	26,21	26,42	26,12	26,02	26,78	25,81	27,29	26,84	27,42	26,72	19,74	20,05	28,94
G28	9,09	9,76	9,03	9,31	9,14	9,44	9,61	9,14	9,35	9,55	9,67	9,45	9,37	10,59	9,55	9,68	9,75	10,73	10,84	0,60
G29	36,17	35,05	36,11	35,06	34,43	34,73	34,64	35,15	35,36	35,06	34,96	35,72	34,75	36,23	35,78	36,36	35,66	28,68	28,91	37,93
G30	3,55	4,76	4,59	4,11	5,05	4,84	5,06	4,38	4,02	4,35	4,88	3,73	4,45	5,34	3,75	2,94	4,04	16,52	10,44	10,10
G31	10,62	9,22	10,59	9,49	8,88	8,73	8,38	9,80	9,69	9,36	8,96	9,99	9,40	10,53	10,10	10,68	9,99	12,89	7,66	16,56
G32	10,95	9,55	10,92	10,04	9,41	9,06	8,71	10,13	10,02	9,69	9,29	10,33	9,73	10,86	10,43	11,01	10,32	9,15	5,16	15,58
G33	4,21	5,43	5,26	4,78	5,71	5,50	5,73	5,05	4,69	5,02	5,54	4,40	5,12	6,06	4,42	3,61	4,71	17,19	11,08	10,77
G34	11,28	10,16	11,23	10,18	9,55	9,85	9,75	10,27	10,48	10,17	10,08	10,83	9,86	11,34	10,89	11,47	10,78	4,93	4,21	11,70
G35	13,34	12,23	13,29	12,24	11,61	11,91	11,81	12,33	12,54	12,23	12,14	12,90	11,93	13,40	12,95	13,53	12,84	6,77	6,16	14,90
G36	2,37	2,58	2,34	2,13	1,93	2,24	2,42	1,93	2,35	2,38	2,46	2,41	2,18	3,33	2,51	3,09	2,61	12,19	5,30	7,90
G37	3,66	2,27	3,63	2,53	1,92	1,77	1,43	2,85	2,73	2,40	2,00	3,04	2,45	3,58	3,14	3,72	3,04	12,01	5,30	10,78
G38	19,42	18,30	19,36	18,31	17,68	17,98	17,89	18,40	18,61	18,31	18,21	18,97	18,00	19,48	19,03	19,61	18,91	12,33	12,24	21,18
G39	11,20	11,87	11,15	11,42	11,25	11,55	11,72	11,25	11,47	11,66	11,78	11,56	11,48	12,70	11,66	11,79	11,86	12,96	13,12	2,83
G40	43,55	42,38	43,52	42,38	41,74	42,04	41,94	42,48	42,68	42,39	42,26	43,03	42,06	43,47	43,09	43,67	42,99	36,01	36,31	45,15

Tabla A2 (cont.). Matriz de tiempo de viaje entre regiones, en horas.

$t(g,g')$	G21	G22	G23	G24	G25	G26	G27	G28	G29	G30	G31	G32	G33	G34	G35	G36	G37	G38	G39	G40
G01	14,66	5,32	12,31	19,90	12,23	15,45	27,36	9,14	36,38	3,59	10,66	10,88	4,22	11,21	13,30	2,36	3,65	19,47	11,27	43,86
G02	14,09	3,99	10,98	18,51	12,87	16,09	26,21	9,77	35,23	4,72	9,33	9,55	5,35	10,06	12,15	2,56	2,32	18,32	11,91	42,69
G03	14,61	5,36	12,35	19,94	12,18	15,40	27,31	9,08	36,33	4,62	10,70	10,92	5,24	11,16	13,25	2,32	3,69	19,42	11,21	43,83
G04	14,09	4,20	11,19	18,77	12,39	15,62	26,22	9,30	35,23	4,13	9,54	9,95	4,76	10,06	12,16	2,13	2,53	18,33	11,43	42,67
G05	13,46	3,60	10,59	18,17	12,24	15,47	25,59	9,15	34,61	5,05	8,94	9,16	5,68	9,44	11,53	1,91	1,93	17,70	11,28	42,05
G06	13,76	3,44	10,43	18,01	12,54	15,76	25,89	9,45	34,91	4,84	8,78	9,00	5,46	9,74	11,83	2,21	1,77	18,00	11,58	42,34
G07	13,69	3,09	10,08	17,66	12,59	15,92	25,81	9,60	34,83	5,05	8,42	8,65	5,67	9,66	11,75	2,42	1,41	17,92	11,73	42,24
G08	14,18	4,52	11,51	19,05	12,22	15,44	26,30	9,13	35,32	4,39	9,86	10,04	5,01	10,15	12,24	1,93	2,84	18,41	11,26	42,78
G09	14,36	4,39	11,38	19,40	12,43	15,65	26,49	9,33	35,50	4,03	9,72	10,22	4,65	10,33	12,43	2,17	2,71	18,60	11,46	42,96

G10	14,06	4,05	11,04	18,62	12,61	15,83	26,19	9,52	35,20	4,36	9,39	9,61	4,98	10,03	12,13	2,36	2,38	18,30	11,65	42,66
G11	13,99	3,67	10,66	18,24	12,77	15,99	26,12	9,68	35,13	4,88	9,01	9,23	5,50	9,96	12,06	2,43	2,00	18,23	11,81	42,56
G12	14,68	4,71	11,70	19,71	12,58	15,81	26,80	9,50	35,83	3,75	10,05	10,53	4,38	10,66	12,75	2,40	3,03	18,91	11,60	43,26
G13	13,79	4,12	11,11	18,67	12,44	15,67	25,92	9,35	34,94	4,46	9,45	9,65	5,08	9,77	11,86	2,17	2,44	18,03	11,48	42,38
G14	15,22	5,21	12,20	19,79	13,65	16,87	27,35	10,56	36,37	5,37	10,55	10,77	6,02	11,20	13,29	3,33	3,54	19,46	12,69	43,77
G15	14,78	4,80	11,79	19,82	12,66	15,88	26,90	9,57	35,92	3,75	10,14	10,63	4,38	10,75	12,84	2,48	3,13	19,01	11,70	43,37
G16	15,38	5,40	12,39	19,97	13,26	16,06	27,50	10,17	36,52	2,95	10,74	10,96	3,57	11,35	13,44	3,08	3,73	19,61	12,30	43,96
G17	14,66	4,68	11,67	19,70	12,82	16,04	26,78	9,73	35,80	4,06	10,02	10,52	4,69	10,63	12,72	2,48	3,01	18,89	11,86	43,26
G18	1,01	12,38	12,00	13,19	4,23	13,03	19,73	10,70	28,74	16,52	13,04	9,20	17,14	4,97	6,85	12,30	12,13	12,36	12,91	36,12
G19	8,18	5,60	8,15	12,92	7,08	15,68	20,20	10,90	29,22	10,44	7,75	5,35	11,06	4,16	6,14	5,37	5,35	12,31	13,21	36,67
G20	11,27	12,38	18,31	22,13	8,55	6,18	29,19	0,53	38,21	9,95	16,52	15,38	10,58	11,47	14,71	7,80	10,70	21,30	2,75	45,81
G21	0,00	13,58	12,76	13,60	5,23	14,02	19,88	11,69	28,90	17,51	13,80	9,96	18,42	6,01	7,85	13,32	13,37	12,81	14,20	36,28
G22	13,34	0,00	7,12	14,70	12,24	18,51	24,06	12,19	33,07	8,15	5,46	5,69	8,77	9,31	10,00	4,82	1,92	15,30	14,32	40,55
G23	12,67	7,13	0,00	9,35	13,14	22,35	20,74	17,97	29,85	15,14	2,34	3,04	15,77	7,82	7,74	11,49	8,91	9,94	20,14	38,07
G24	13,47	14,62	9,17	0,00	15,91	24,70	11,69	21,98	20,80	22,63	11,35	9,04	23,19	11,25	7,66	18,21	16,41	0,95	24,29	28,77
G25	5,25	12,26	13,16	16,11	0,00	11,61	23,17	9,00	32,19	15,13	14,07	10,33	15,75	5,68	8,92	10,51	12,06	15,28	11,21	39,23
G26	14,00	18,38	22,49	24,86	11,68	0,00	31,92	6,54	40,93	15,96	22,53	19,56	16,58	15,45	18,23	13,80	16,71	24,03	8,76	48,29
G27	19,80	23,91	20,29	11,43	22,88	31,67	0,00	29,00	12,62	30,12	22,53	18,70	30,74	18,27	14,68	25,42	25,03	11,95	31,30	22,03
G28	11,71	12,20	17,97	22,03	8,99	6,65	29,08	0,00	38,10	9,78	16,35	15,04	10,40	11,13	14,37	7,63	10,53	21,19	2,58	45,45
G29	28,74	32,85	29,41	20,55	31,87	40,66	12,60	37,94	0,00	39,06	31,47	27,64	39,68	27,21	23,62	34,53	33,97	20,89	40,24	13,39
G30	17,50	8,15	15,14	22,72	15,07	16,15	30,22	9,84	39,22	0,00	13,49	13,71	2,14	14,10	16,19	5,26	6,48	22,32	11,97	46,77
G31	13,61	5,42	2,31	11,45	14,07	22,62	22,60	16,30	31,61	13,43	0,00	3,90	14,06	8,75	8,54	9,86	7,20	12,05	18,43	39,17
G32	9,87	5,75	2,98	9,20	10,30	19,51	18,86	15,13	27,87	13,76	4,01	0,00	14,39	5,01	4,80	9,65	7,53	9,79	17,47	35,31
G33	18,17	8,81	15,80	23,36	15,74	16,82	30,88	10,51	39,90	2,12	14,15	14,37	0,00	14,74	16,83	5,90	7,14	22,99	11,42	47,40
G34	5,65	9,33	7,88	11,43	5,73	15,45	18,48	11,27	27,50	14,17	8,91	5,08	14,80	0,00	3,77	9,13	9,08	10,59	13,57	34,78
G35	7,49	10,03	7,73	7,79	8,93	18,16	14,85	14,47	23,86	16,23	8,65	4,81	16,86	3,74	0,00	11,72	11,14	6,96	16,77	31,15
G36	13,17	4,83	11,38	18,28	10,70	13,96	25,48	7,66	34,84	5,29	9,72	9,48	5,95	9,04	11,22	0,00	3,18	17,59	9,65	41,57
G37	12,99	1,95	8,94	16,52	11,89	16,84	25,12	10,52	34,13	6,48	7,29	7,51	7,10	8,96	11,06	3,17	0,00	17,22	12,65	41,57
G38	12,68	15,20	9,75	0,99	15,12	23,91	11,97	21,19	20,98	22,31	11,93	9,62	22,93	10,46	6,87	17,56	16,98	0,00	23,49	28,04
G39	13,95	14,31	20,11	24,30	11,23	8,88	31,36	2,57	40,37	11,89	18,46	17,32	11,44	13,41	16,65	9,58	12,64	23,47	0,00	47,65
G40	36,05	40,25	37,73	28,55	38,80	47,89	21,94	45,18	13,44	46,47	38,95	34,99	47,13	34,37	30,78	41,28	41,31	27,79	47,42	0,00

Parámetros de transporte

En esta sección se presentan los parámetros referidos a la etapa de transporte, utilizados en los casos de estudio del Capítulo 2.

Tabla A3. Parámetros relacionados con el transporte.

Parámetro	Camión de carga pesada	Camión de carga media	Camión tanque
FP_l - Precio del combustible (US\$ L ⁻¹)	0,92	0,92	0,92
FC_l - Consumo de combustible (L km ⁻¹)	0,67	0,40	0,33
GE_l - Gastos generales (\$ viaje ⁻¹)	8,22	8,22	8,22
DW_l - Salario (US\$ h ⁻¹)	5	5	5
ME_l - Gastos de mantenimiento (\$ km ⁻¹)	0,0976	0,0976	0,0976
LUT_l - Tiempo de carga/descarga del producto (h viaje ⁻¹)	6	6	6
$Lcapmax_l$ - Máxima capacidad (t viaje ⁻¹)	45	25	20

Tecnologías de producción

En esta sección se presentan los parámetros referidos a los coeficientes de balance de masa de las tecnologías consideradas en los casos de estudio del Capítulo 2 (Tabla A4), sus máximos niveles de producción (Tabla A5) y los costos asociados a su instalación y operación (Tabla A5).

Tabla A4. Parámetro de conversión, $\rho_{i,k}$ en tonelada de producto i por tonelada del producto principal para la tecnología k .

Producto (i)	Tecnología (k)															
	K00	K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07	K08	K09	K10	K11	K12	K13	K14*	K15**
Bagazo	0,30	2,66	4,20	-	-	2,17	-	-	-	-	-	-	-	-	$2,86 \cdot 10^{-3}$	-
Pentosas	-	-	1,00	-	2,94	-	-	-	-	-	-	-	1,11	-	-	-
Hexosas	-	1,00	0,01	1,11	-	-	-	-	-	-	-	1,11	1,05	1,89	-	-
Jugo de caña	1,00	-	-	-	-	-	8,30	10,0	-	-	17,12	-	-	-	-	-
RAC	-	3,50	5,00	-	-	2,17	-	-	-	-	-	-	-	-	$2,86 \cdot 10^{-3}$	-
Caña de azúcar	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ácido cítrico	-	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Butanol	-	-	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metanol	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Azúcar blanco	-	-	-	-	-	-	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Azúcar crudo	-	-	-	-	-	-	0,18	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-
Melaza	-	-	-	-	-	-	0,41	-	4,00	-	-	-	-	-	-	-
Miel	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	3,35	-	-	-	-	-	-
Etanol 1G	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-
Etanol 2G	-	-	-	-	0,03	-	-	-	-	-	-	1,00	1,00	-	-	-
Acetona	-	-	-	-	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ácido láctico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-
Electricidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-
Vinaza 1	-	-	-	-	-	-	-	-	14,13	-	-	-	-	-	-	$1,83 \cdot 10^{-3}$

Vinaza 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,13	-	-	-	-	-	1,83·10 ⁻³
Vinaza 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,85	-	-	-	-	1,83·10 ⁻³
Biogás	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00

*en kWh (electricidad)

**en MJ (biogás)

Tabla A5. Máximo nivel de producción por tecnología ($Kcapmax_{k,ck}$) según la capacidad ck en toneladas de producto por año.

Tecnología	Capacidad (ck)		
	<i>pequeña</i>	<i>mediana</i>	<i>grande</i>
K00	$2,67 \cdot 10^5$	$8,38 \cdot 10^5$	$2,27 \cdot 10^6$
K01	$1,72 \cdot 10^4$	$1,72 \cdot 10^5$	$1,72 \cdot 10^6$
K02	$1,67 \cdot 10^4$	$1,67 \cdot 10^5$	$1,67 \cdot 10^6$
K03	$6,01 \cdot 10^2$	$6,01 \cdot 10^3$	$6,01 \cdot 10^4$
K04	$1,50 \cdot 10^2$	$1,50 \cdot 10^3$	$1,50 \cdot 10^4$
K05	$1,74 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^4$	$1,74 \cdot 10^5$
K06	$3,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K07	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K08	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K09	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K10	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K11	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K12	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K13	$1,88 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^3$	$1,88 \cdot 10^4$
K14	$3,40 \cdot 10^4$	$3,40 \cdot 10^4$	$3,40 \cdot 10^5$
K15	$1,11 \cdot 10^7$	$1,11 \cdot 10^8$	$3,33 \cdot 10^8$

Tabla A6. Parámetros de costo de la tecnología, $\theta_{k,ck}^{F1}$ en US\$ y θ_k^{V1} en US\$ por tonelada de producto.

Tecnología	$\theta_{k,ck}^{F1}$			θ_k^{V1}
	<i>Pequeña</i>	<i>Mediana</i>	<i>Grande</i>	
K00	4,28 · 10 ⁶	8,50 · 10 ⁶	1,55 · 10 ⁷	117*
K01	4,00 · 10 ⁶	1,61 · 10 ⁷	6,40 · 10 ⁷	15
K02	7,00 · 10 ⁶	2,80 · 10 ⁷	1,12 · 10 ⁸	10
K03	2,41 · 10 ⁶	9,61 · 10 ⁶	3,83 · 10 ⁷	400
K04	1,26 · 10 ⁶	5,00 · 10 ⁶	2,00 · 10 ⁷	300
K05	4,66 · 10 ⁶	1,86 · 10 ⁷	7,39 · 10 ⁷	122
K06	4,28 · 10 ⁶	8,50 · 10 ⁶	1,55 · 10 ⁷	300
K07	3,42 · 10 ⁶	6,80 · 10 ⁶	1,24 · 10 ⁷	300
K08	1,00 · 10 ⁶	3,99 · 10 ⁶	7,71 · 10 ⁶	265
K09	1,00 · 10 ⁶	3,99 · 10 ⁶	7,71 · 10 ⁶	265
K10	1,18 · 10 ⁶	4,69 · 10 ⁶	9,07 · 10 ⁶	265
K11	8,40 · 10 ⁶	1,27 · 10 ⁷	2,20 · 10 ⁷	265
K12	8,40 · 10 ⁶	1,27 · 10 ⁷	2,20 · 10 ⁷	265
K13	4,41 · 10 ⁶	1,75 · 10 ⁷	6,99 · 10 ⁷	400
K14	1,23 · 10 ⁷	4,90 · 10 ⁷	1,95 · 10 ⁸	45*
K15	-	-	-	1,25 · 10 ^{-3**}

*por tonelada de biomasa procesada

**por MJ producido

ANEXO B

En este anexo se presentan las Tablas B1 a B13 que contienen los insumos de energía y materiales considerados para las tecnologías de procesamiento de biomasa que pueden ser elegidas por la optimización para formar parte de las biorrefinerías diseñadas en el Capítulo 4.

Tabla B1. Tecnología de molienda. Flujo de referencia: 1 t de caña de azúcar.

	Valor	Unidad
Productos		
Jugo	1000	kg
Bagazo	350	kg
Materiales/combustibles		
Caña de azúcar	1000	kg
Agua	350	kg
Electricidad	2,555	kWh

Tabla B2. Tecnología de producción de azúcar con coproducción de melazas. Flujo de referencia: 1 t de azúcar blanco.

	Valor	Unidad
Productos		
Azúcar	1000	kg
Melazas	1522,07002	kg
Materiales/combustibles		
Jugo de caña de azúcar	6286,14916	kg
Vapor	3105,02283	kg
Cal	14,1856925	kg
Azufre	2,13089802	kg
Oxígeno	3,83561644	kg
Floculante	0,00085084	kg
NaOH	1,19025875	kg
HCl	2,29832572	kg
Emisiones agua-aire	0,85083714	kg

Tabla B3. Tecnología de producción de etanol con coproducción de vinazas. Flujo de referencia: 1 t de etanol.

	Valor	Unidad
Productos		
Etanol	1000	kg
Etanol LG	111	kg
Fuseloil	1,51	kg
Vinazas	12500	kg
Materiales/combustibles		
Vapor	3850	kg
Melaza	4000	kg
Urea	4,26	kg
H ₃ PO ₄	0,355	kg
Agua	1,63	kg
H ₂ SO ₄	11,5	kg
Emisiones agua-aire	0,888	kg

Tabla B4. Tecnología de producción de azúcar con coproducción de mieles. Flujo de referencia: 1 t de azúcar blanco.

	Valor	Unidad
Productos		
Azúcar	1000	kg
Mieles	1841,62063	kg
Materiales/combustibles		
Jugo	7605,89319	kg
Vapor	3149,17127	kg
Cal	16,9429098	kg
Azufre	2,54143646	kg
Oxígeno	4,56721915	kg
Floculante	0,00101657	kg
NaOH	1,35543278	kg
HCl	2,70718232	kg
Emisiones	0,84714549	kg

Tabla B5. Producción de etanol a partir de jugo. Flujo de referencia: 1 t de etanol.

	Valor	Unidad
Productos		
Etanol	1000	kg
Etanol LG	111	kg
Fuseloil	1,51	kg
Vinaza	11400,00	kg
Vapor (exceso)	-1690,00	kg
Materiales/combustibles		
Vapor	4990,00	kg
Jugo	11900,00	kg
Urea	4,26	kg
H ₃ PO ₄	0,36	kg
Water	1,63	kg
H ₂ SO ₄	0,01	kg
Emisiones agua-aire	0,89	kg

* *low grade* o mal gusto

Tabla B6. Producción de etanol a partir de mieles. Flujo de referencia: 1 t de etanol.

	Valor	Unidad
Productos		
Etanol	1000	kg
Etanol LG*	111	kg
Fusel oil	1,51	kg
Vinaza	12500,00	kg
Materiales/combustibles		
Vapor	2970,00	kg
Mieles	3350,00	kg
Urea	4,26	kg
H ₃ PO ₄	0,36	kg
Agua	1,63	kg
H ₂ SO ₄	0,01	kg
Emisiones agua-aire	0,89	kg

* *low grade* o mal gusto

Tabla B7. Producción de hexosas. Flujo de referencia: 1 t de hexosas.

	Valor	Unidad
Productos		
Hexosas	1000	kg
Materiales/combustibles		
Enzimas	3473	kg
Electricidad	108,34	kWh
Vapor de baja presión	220	kg

Tabla B8. Producción de pentosas. Flujo de referencia: 1 t de pentosas.

	Valor	Unidad
Productos		
Pentosas	1000	kg
Materiales/combustibles		
Agua	1749	kg
H ₂ SO ₄	232,8	kg
Cal	383,8	kg
Sulfato de calcio	868,2	kg
Electricidad	309,33	kWh
Vapor de baja presión	226	kg
Vapor de alta presión	2378	kg

Tabla B9. Producción de ácido cítrico. Flujo de referencia: 1 t de ácido.

	Valor	Unidad
Productos		
Ácido cítrico	1000	kg
Materiales/combustibles		
Nitrato de amonio	20	kg
H ₂ SO ₄	232,8	kg
HCl	10	kg
NaOH	10	kg
KH ₂ PO ₄	10	kg
MgSO ₄	10	kg
Electricidad	2650	kWh
Vapor	15000	kg
Emisiones directas		
Cl ⁻	10	kg
Ácido cítrico	70	kg
Grasas	10	kg
Glucosa	10	kg
Sodio (disuelto)	10	kg
Magnesio (disuelto)	10	kg
Potasio (disuelto)	10	kg
Sulfato (disuelto)	10	kg
Agua	15,12	m ³
Biomasa	160	kg
CO ₂ biogénico	410	kg

Tabla B10. Producción de etanol 2G. Flujo de referencia: 1 t de etanol.

	Valor	Unidad
Productos		
Ethanol 2G	1000	kg
Materiales/combustibles		
Urea	69,12	kg
P ₂ O ₅	2,88	kg
Agua	113,9	m ³
Electricidad	107830	kWh
Emisiones		
Gases de fermentación	970	kg

Tabla B11. Producción de ácido láctico. Flujo de referencia: 1 t de ácido.

	Valor	Unidad
Productos		
Ácido láctico	1000	kg
Materiales/combustibles		
CO ₂	240	kg
Sulfato de calcio	760	kg
Extracto de levaduras	140	kg
Inóculo	1450	L
CaCO ₃	870	kg
H ₂ SO ₄	500	kg
Etanol	4,381	kg
Emisiones (efluente)		
Etil-lactato	8,99	kg
Agua	320	kg
Etanol	0,23	kg
Ácido láctico	48	kg
Dilactato	5,07	kg

Tabla B12. Secado de cáscara de limón. Flujo de referencia: 293,3 t de cáscara seca.

	Valor	Unidad
Productos		
Cáscara seca	293330	kg
Efluentes	2716800	kg
Materiales/combustibles		
Electricidad	12246	kWh
Agua	2460	m ³
Gas natural	2581234	MJ
Cáscara húmeda	1320000	kg
Vapor de agua	1097000	kg

Tabla B13. Producción de azúcares fermentables y limoneno. Flujo de referencia: 1356,7 t de mezcla de azúcares.

	Valor	Unidad
Productos		
Mezcla soluble	1356,680745	t
Sólidos	128,4103317	t
Limoneno	1367,28	kg
Materiales/combustibles		
H ₂ SO ₄	16,91573658	t
Agua	440	t
Vapor (6 bar)	428,0096221	t
Gas	39291,28331	m ³

ANEXO C

Tecnologías de producción

En esta sección se presentan los parámetros referidos a los coeficientes de balance de masa de las tecnologías consideradas en el caso de estudio del Capítulo 4 (Tabla C1), sus máximos niveles de producción (Tabla C2) y los costos asociados a la instalación y operación de las mismas (Tabla C3).

Tabla C1. Parámetro de conversión, $\rho_{i,k}$ en tonelada de producto i por tonelada del producto principal en tecnología k .

Producto (i)	Tecnología (k)																
	K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07*	K08	K09	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17**
Bagazo	0,30	-	-	-	-	-	-	3,33	5,24	-	-	-	-	2,17	-	-	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Pentosas	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-	1,11	-	-	0,0101	-	-
Hexosas	-	-	-	-	-	-	-	1,00	0,017	1,11	1,11	1,05	1,89	-	0,0227	-	-
Jugo de caña	1,00	8,30	10,0	17,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RAC	-	-	-	-	-	-	-	3,89	5,61	-	-	-	-	2,17	-	-	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Caña de azúcar	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ácido cítrico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-
Metanol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-
Azúcar banco	-	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Azúcar crudo	-	0,18	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Melazas	-	0,41	-	-	4,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mieles	-	-	0,75	-	-	3,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Etanol 1G	-	-	-	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Etanol 2G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	1,00	-	-	-	-	-
Ácido láctico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	-
Electricidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
Vinazas 1	-	-	-	-	14,13	-	$1,83 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Vinazas 2	-	-	-	-	-	14,13	$1,83 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vinazas 3	-	-	-	12,85	-	-	$1,83 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vinazas 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,85	-	-	-	-	-	-
Vinazas 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,85	-	-	-	-	-
Biogás	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RPL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,17	-	-	-	$2,71 \cdot 10^{-3}$
CL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	1,00	-	-
CDL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,17	-	0,1039	-	$2,72 \cdot 10^{-3}$
Limoneno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	-	-	-

*en MJ (biogas)

**en kWh (electricidad)

Tabla C2. Máximo nivel de producción por tecnología ($Kcapmax_{k,ck}$) según la capacidad ck en toneladas de producto por año.

Tecnología	Capacidad (ck)		
	<i>pequeña</i>	<i>mediana</i>	<i>grande</i>
K01	$2,67 \cdot 10^5$	$8,38 \cdot 10^5$	$2,27 \cdot 10^6$
K02	$3,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K03	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K04	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K05	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K06	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K07	$1,11 \cdot 10^7$	$1,11 \cdot 10^8$	$3,33 \cdot 10^8$
K08	$9,02 \cdot 10^3$	$9,02 \cdot 10^4$	$9,02 \cdot 10^5$
K09	$5,72 \cdot 10^3$	$5,72 \cdot 10^4$	$5,72 \cdot 10^5$
K10	$6,01 \cdot 10^2$	$6,01 \cdot 10^3$	$6,01 \cdot 10^4$
K11	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K12	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$
K13	$1,88 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^3$	$1,88 \cdot 10^4$
K14	$1,74 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^4$	$1,74 \cdot 10^5$
K15	$1,72 \cdot 10^4$	$1,72 \cdot 10^5$	$1,72 \cdot 10^6$
K16	$1,18 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^5$	$1,18 \cdot 10^6$
K17	$1,20 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^7$	$1,19 \cdot 10^8$

Tabla C3. Parámetros de coste de la tecnología. $\theta_{k,ck}^{F1}$ en US\$ y θ_k^{V1} en US\$ por tonelada de producto.

Tecnología	$\theta_{k,ck}^{F1}$			θ_k^{V1}
	<i>pequeña</i>	<i>mediana</i>	<i>grande</i>	
K01	4,28·10 ⁶	8,50·10 ⁶	1,55·10 ⁷	117*
K02	4,28·10 ⁶	8,50·10 ⁶	1,55·10 ⁷	300
K03	3,42·10 ⁶	6,80·10 ⁶	1,24·10 ⁷	300
K04	1,18·10 ⁶	4,69·10 ⁶	9,07·10 ⁶	265
K05	1,00·10 ⁶	3,99·10 ⁶	7,71·10 ⁶	265
K06	1,00·10 ⁶	3,99·10 ⁶	7,71·10 ⁶	265
K07	-	-	-	1,25·10 ^{-3*}
K08	4,04·10 ⁶	1,61·10 ⁷	6,41·10 ⁷	204,3
K09	1,62·10 ⁷	6,44·10 ⁷	2,56·10 ⁸	190,8
K10	2,41·10 ⁶	9,61·10 ⁶	3,83·10 ⁷	400
K11	8,40·10 ⁶	1,27·10 ⁷	2,20·10 ⁷	265
K12	8,40·10 ⁶	1,27·10 ⁷	2,20·10 ⁷	265
K13	4,41·10 ⁶	1,75·10 ⁷	6,99·10 ⁷	400
K14	4,66·10 ⁶	1,86·10 ⁷	7,39·10 ⁷	122
K15	1,62·10 ⁷	6,44·10 ⁷	2,56·10 ⁸	10
K16	1,02·10 ⁷	4,05·10 ⁷	1,61·10 ⁸	49
K17	2,88·10 ⁷	1,14·10 ⁸	4,53·10 ⁸	0,12**

*por MJ

**por kWh