



Evaluación técnico-económica de la producción a escala piloto de urea verde en Chile

Sistemas Fotovoltaicos

Andres Mercado Opazo

Tutores: Frederik Schönberger y Cristóbal Venegas

ÍNDICE

- Contexto
- Estudio de mercado
- Estudio técnico
- Estudio financiero
- Conclusiones y recomendaciones

INTRODUCCIÓN

- La producción de alimentos depende de fertilizantes nitrogenados como la **urea**.
- La urea se produce a partir de amoníaco, donde el **96%** ⁽¹⁾ es de origen fósil.
- El amoníaco es responsable del **1,8%** ⁽¹⁾ de las emisiones de CO₂ a nivel mundial.

- Numerosos países se han comprometido con la **neutralidad de carbono** para 2050.
- La urea convencional pasó de **350 USD/t** a **950 USD/t** ⁽²⁾ por un período.
- El uso de amoníaco verde y captura de CO₂ podrían llegar a reducir el **85%** ⁽³⁾ de emisiones generados en la producción de urea.

Proceso Bosch-Meiser Urea verde



CO₂ capturado
Biogénico - DAC -
Fuente inevitable



Amoníaco verde
H₂ desde
electrólisis del agua

(1) Ojelade et al., (2023). <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118348>; (2) Index Mundi. (2025). https://www.indexmundi.com/es/precios-demercado/?mercancia=urea&meses=120#google_vignette

(3) P. Jiang et al., (2025). <https://doi.org/10.1002/aic.18743>

CONTEXTO

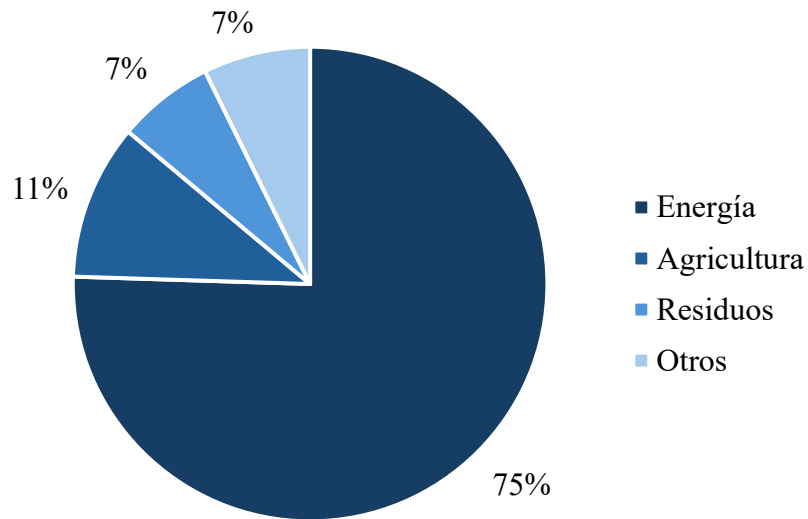


Figura 1: Fuentes de emisiones en Chile ⁽⁴⁾.

- Por la subida de precio de la urea las importaciones en Chile bajaron un **33% en 2022** ⁽⁵⁾.
- Chile posee factores de planta de **35%** en el norte y **55%** en el sur ⁽⁶⁾.
- Estrategia Nacional de Hidrógeno en Chile.
- En 2025 se contabilizaban **77 proyectos H₂V** anunciados en Chile ⁽⁷⁾.

- Un **H₂V de costo competitivo** permitiría proyectar la producción local de urea baja en carbono.
- **Se reduciría la dependencia de los mercados internacionales, se mitigaría la volatilidad de precios y se disminuirían las emisiones.**

(4) Ministerio de Medio Ambiente (2022). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2020: Resumen de Puntos clave; (5) FAO. (2025). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFB>; (6) Ministerio de Energía (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde: Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones; (7) H2Chile (2025). <https://h2chile.cl/mapa-de-proyectos/>

ESTADO DEL ARTE

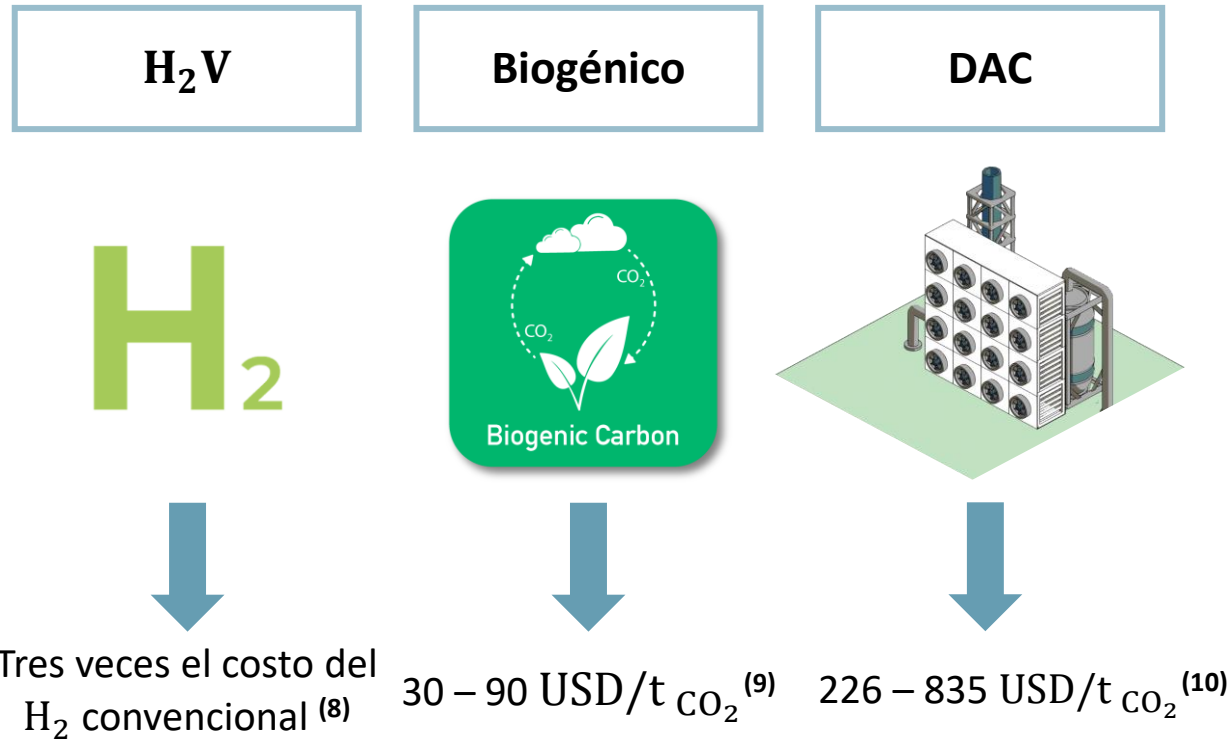


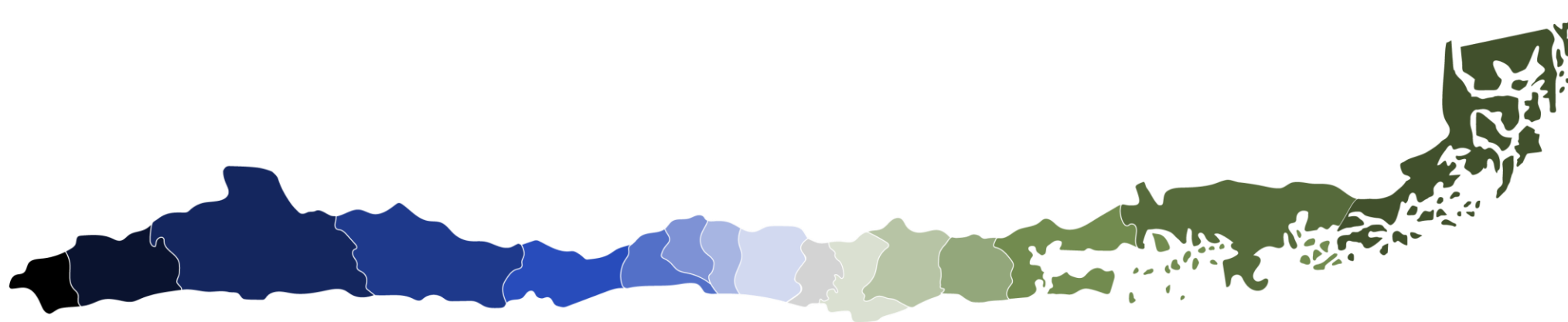
Tabla 1: Valores de LCOU reportados en la literatura ⁽¹¹⁾.

Producción de H ₂	Fuente de CO ₂	Producción, t/h	LCOU, USD/t	
ALK	DAC	49,8	989	Soroodan et al.
ALK	Biogénico	27,5	805	Gyanwali et al.
SOEC	Biogénico	19,8	464	Zhang et al.
ALK	Cementera	28,16	571	Devkota et al.
ALK	Termoeléctrica	1,48	2320	Fernando et al.

⁽⁸⁾ Curcio, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.013>; ⁽⁹⁾ Sanchez et al., (2018). <https://doi.org/10.1073/pnas.1719695115>; ⁽¹⁰⁾ Sievert et al., (2024). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.02.005>

⁽¹¹⁾ Soroodan et al. (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101015>

HUBS DE HIDRÓGENO



- Proyecciones de LCOH de **1,1 USD/kg** ⁽⁶⁾.
- Actualmente, **33 proyectos** anunciados ⁽⁷⁾.

- Proyecciones de LCOH de **1,5 USD/kg** ⁽⁶⁾.
- Se emite **7,4 millones** de toneladas de CO₂ biogénico al año ⁽¹²⁾.

- Proyecciones de LCOH de **1,2 USD/kg** ⁽⁶⁾.
- Se estima una producción de **3,3 millones** ⁽¹³⁾ de toneladas para 2050.

(6) Ministério de Energia (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde: Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones; (7) H2Chile (2025). <https://h2chile.cl/mapa-de-proyectos/>

(12) CDRP (2024) Hoja de ruta 2024 - 2050: H2V Biobío, programa estratégico regional hidrogeno verde Biobío ; (13) GIZ (2024). Encadenamientos productivos de la industria del hidrógeno verde y derivados en Magallanes y la Antártica chilena: Perspectivas, desafíos y oportunidades

OBJETIVOS

Objetivo General

- **Determinar** la viabilidad técnico-económica y las condiciones de mercado requeridas para la producción competitiva de urea verde en Chile, analizando el efecto de su localización geográfica en el LCOU, y definiendo los umbrales de incentivos o de sobreprecio de mercado necesarios para alcanzar la paridad con su análogo fósil.

OBJETIVOS

Objetivos Específicos

- **Caracterizar** el mercado internacional actual de la urea e identificar los segmentos agrícolas nacionales con mayor alineación hacia el uso de urea verde, en función de exigencias de sostenibilidad, políticas ambientales y certificaciones en los mercados de destino.
- **Dimensionar** una planta de producción de urea verde, mediante la simulación y modelamiento de procesos, para estimar sus indicadores clave y evaluar distintos escenarios LCOE en los principales polos de desarrollo de hidrógeno verde en Chile.
- **Evaluar** la viabilidad financiera de una planta de urea verde en Chile mediante análisis de sensibilidad, cuantificando los umbrales necesarios de subsidio, precio e impuesto al CO₂, y costo local de energía renovable, utilizando indicadores como el VAN, TIR, Payback y DSCR.

PROPUESTA DE TRABAJO

Estudio de Mercado

Mercado
Internacional



Demanda y
segmento nacional



Canales de
comercialización



Precio

Estudio Técnico

Validación y simulación
de planta de urea



Simulación de planta
energética



Obtención de LCOU de
las tres ubicaciones

Estudio Financiero

Escenario
base



Análisis de
sensibilidad



Mejor
escenario



Aplicación ley de
fomento H₂V



Estudio de mercado

ESTUDIO DE MERCADO: Internacional

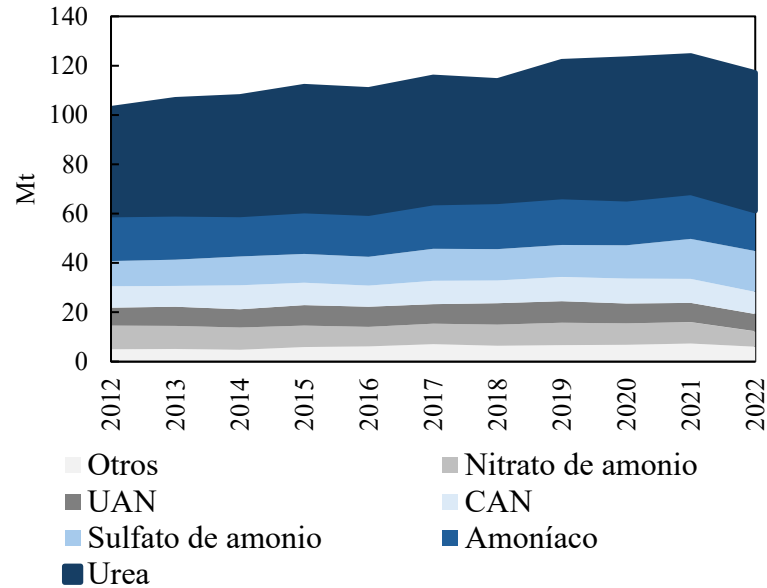


Figura 2: Importaciones de los últimos 10 años de fertilizantes nitrogenados (5).

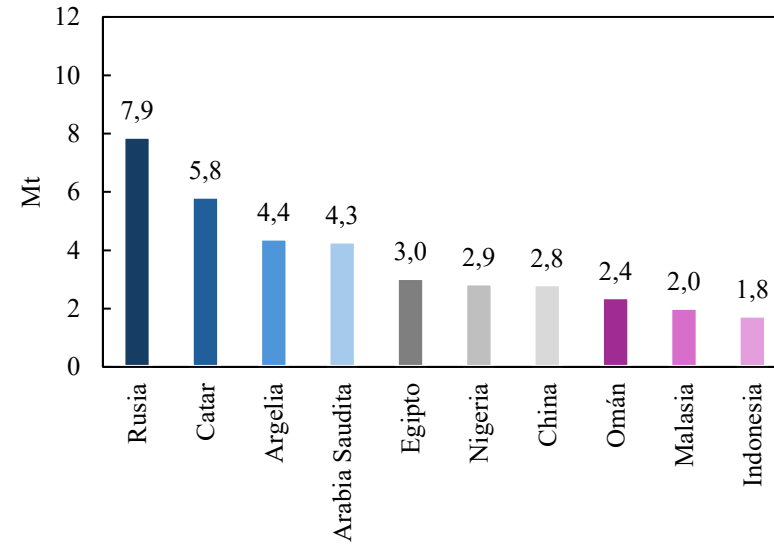


Figura 3: Principales exportadores de urea en 2022 (5).

- Los 5 principales exportadores representa el **50%** del mercado.
- Los **principales exportadores** de urea coinciden con los productores de **GN**.
- Rusia** destaca como el mayor exportador con un **15%** de ellas.

(5) FAO. (2025). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFB>

ESTUDIO DE MERCADO: Segmento Internacional

- Las importaciones se encuentran **distribuidas**.
- Gran parte de sus políticas se aplican de **manera conjunta**.
- Marco regulatorio y estrategias que **promueven la reducción de emisiones**.

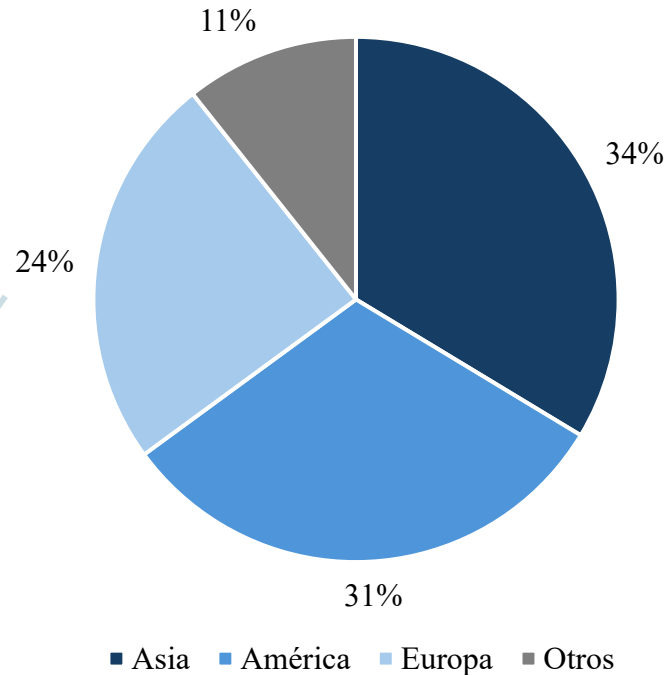


Figura 4: Importaciones de urea por continente ⁽⁵⁾.

- India concreta el **54% de las importaciones** del mercado asiático ⁽⁵⁾.
- India tiene en desarrollo el **National Green Hydrogen Mission**.

- Brasil y EE. UU concentran el **72% de las importaciones** del mercado americano ⁽⁵⁾.
- Políticas con **señales mixtas** hacia fertilizantes verdes.

(5) FAO. (2025). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFB>

ESTUDIO DE MERCADO: Nacional

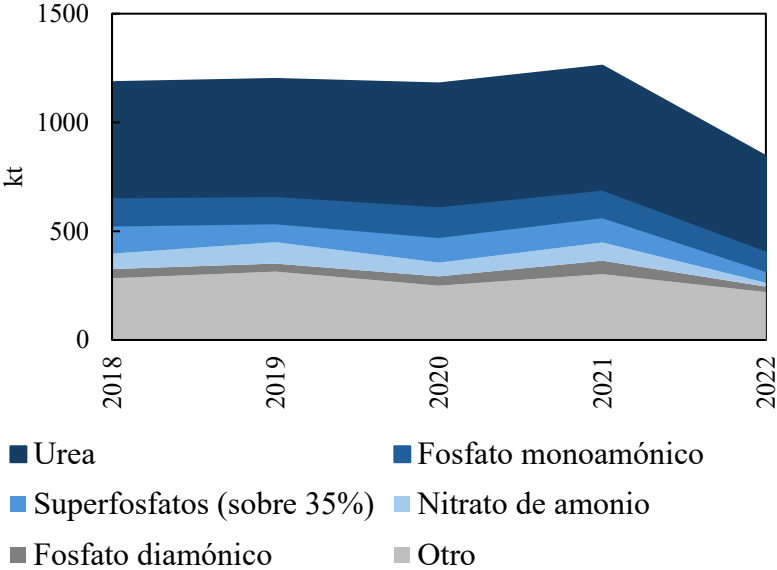


Figura 5: Importaciones de los últimos 5 años de fertilizantes en Chile (5).

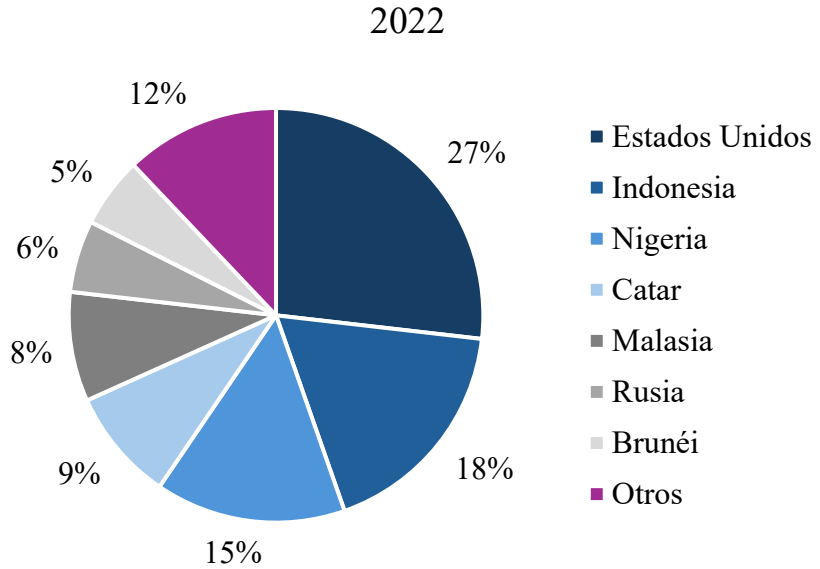


Figura 6: Origen de las Importaciones chilenas de Urea (14).

- Las importaciones dependían solo de **4 países**.
- La subida de precios permitió la entrada de **nuevos actores**.
- Agricultores se vieron en necesidad de **mitigar la volatilidad** del mercado.

(5) FAO. (2025). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFB>; (14) OEC (2025). <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/urea-including-aqueous-solution-in-packs-greater10-kg/reporter/chl?selector>



ESTUDIO DE MERCADO: Segmento nacional

- Se usan anualmente **245 kt** ⁽¹⁵⁾ de fertilizante para uso agrícola.
- Los 3 principales segmentos representan el **87%** ⁽¹⁵⁾ del consumo.
- El segmento de frutales representa una **oportunidad estratégica**.
- La planta piloto de **15 kt** de urea adoptaría el **35%** del mercado de frutales.

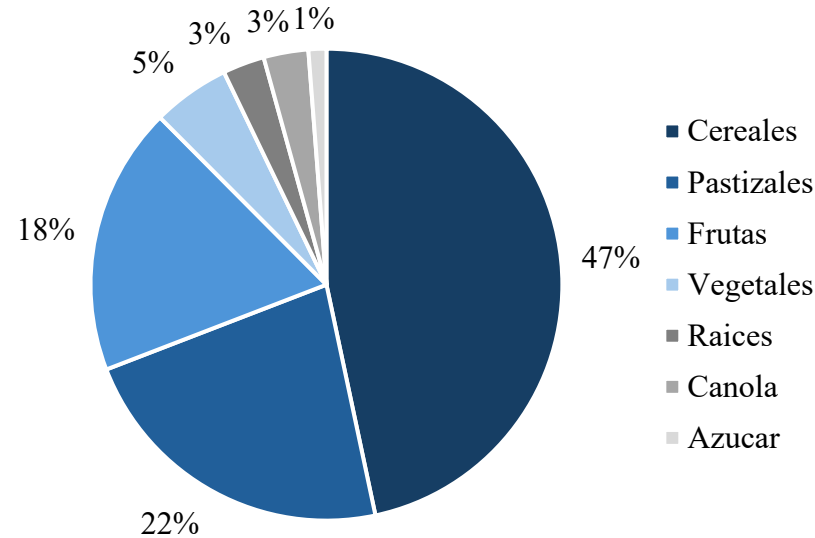


Figura 7: Distribución de consumo de fertilizantes nitrogenados por segmento agrícola ⁽¹⁵⁾.

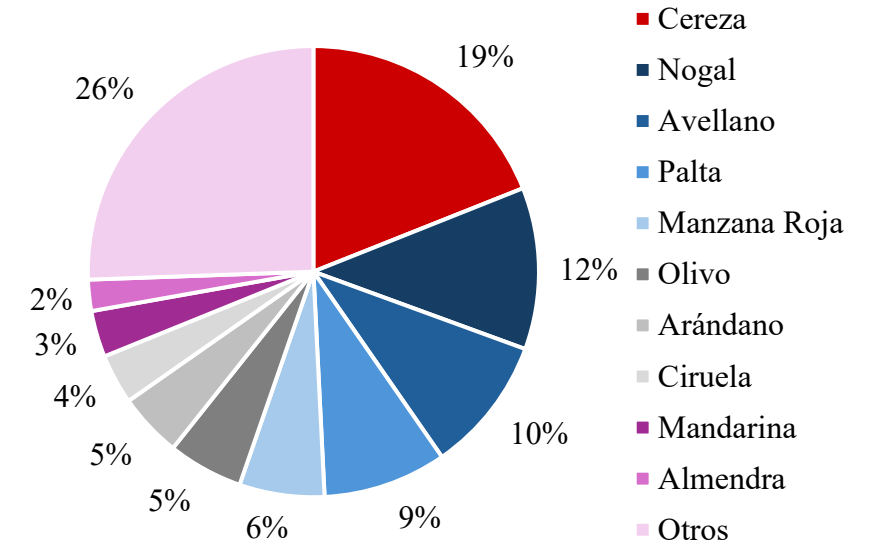
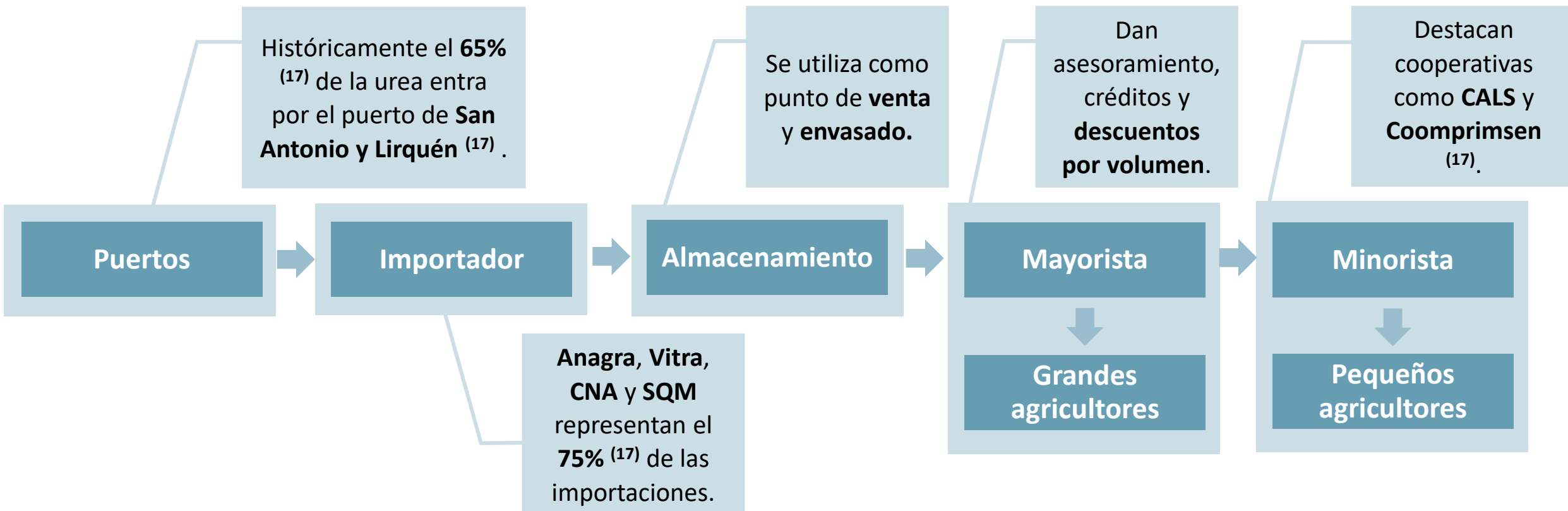


Figura 8: Uso de tierras agrícolas por las 10 frutas con mayor uso de tierra ⁽¹⁶⁾.

(15) IFA (2022). <https://www.ifastat.org/consumption/fertilizer-use-by-crop> ;(16) CIREN (2024) Catastro Frutícola 2024-Región de O'Higgins

ESTUDIO DE MERCADO: Canales de comercialización



(17) ICEX (2018). El mercado de Fertilizantes en Chile

ESTUDIO DE MERCADO: Precio

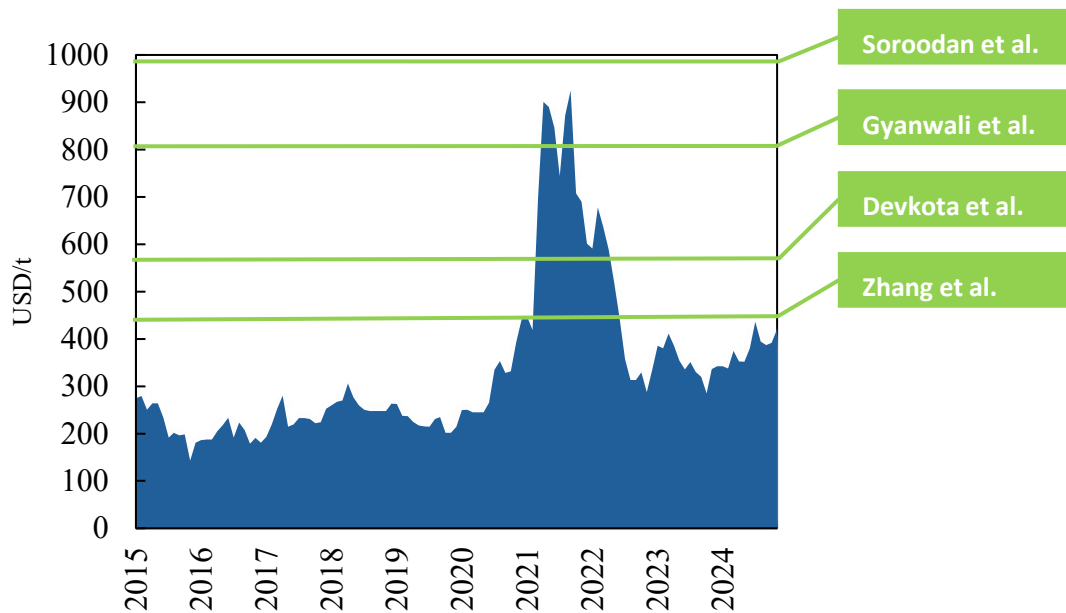


Figura 9: Precio de la urea en los últimos 10 años ⁽²⁾.

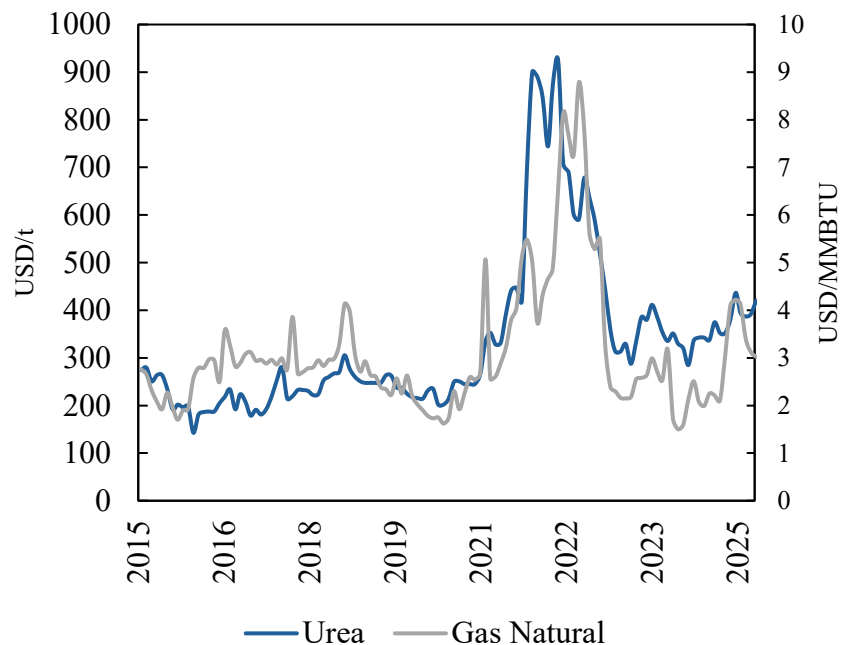


Figura 10: Precio de urea vs gas natural ⁽²⁾.

- Subida de precios por **COVID** y la guerra entre **Rusia y Ucrania**.
- El factor mas relevante en costo es el **precio GN** ⁽¹⁸⁾.
- Una subida del **10%** del GN se traduce en un aumento de **4,3%** en la urea ⁽¹⁸⁾.
- Precio por problemas de **oferta y restricciones comerciales**.

⁽²⁾ Index Mundi. (2025). https://www.indexmundi.com/es/precios-demercado/?mercancia=urea&meses=120#google_vignette

⁽¹⁸⁾ Vos et al (2024). <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102790>



Estudio técnico

ESTUDIO TÉCNICO: Validación electrólisis

Tabla 2: Parámetros para la simulación de la electrólisis ⁽¹⁹⁾.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de operación	75	°C
Presión de operación	7	bar
Solución KOH	35%	p/p

Tabla 3: Validación de simulación ⁽¹⁹⁾.

Parámetro	Sánchez	Simulación	% Error
Pureza H ₂	78,64%	77,58%	1%
Consumo	57,80 kWh/kg	57,80 kWh/kg	0%

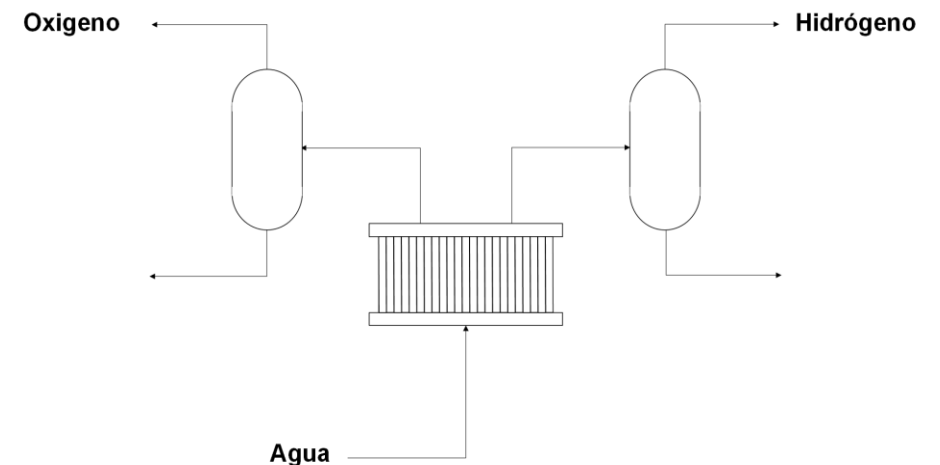
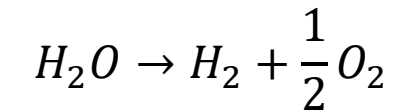


Figura 11: Diagrama simplificado de producción de hidrógeno verde.

(19) Sánchez et al., (2020) <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.027>

ESTUDIO TÉCNICO: Validación Haber-Bosch

$$r_{NH_3} = K \left[K_a^2 \cdot f_{N_2} \cdot \left(\frac{f_{H_2}^3}{f_{NH_3}^2} \right)^\alpha - \left(\frac{f_{NH_3}^2}{f_{H_2}^3} \right)^{1-\alpha} \right] \quad (1) \quad (20)$$

$$\log_{10}(K_a) = \beta_1 \cdot \log_{10}(T) - \beta_2 \cdot T + \beta_3 \cdot T^2 + \frac{\beta_4}{T} + \beta_5 \quad (2) \quad (21)$$

Tabla 4: Parámetros para la simulación.

Parámetro	Valor	Unidad
α	0,55	-
ρ	2,8	g/cc
ε	0,35	—

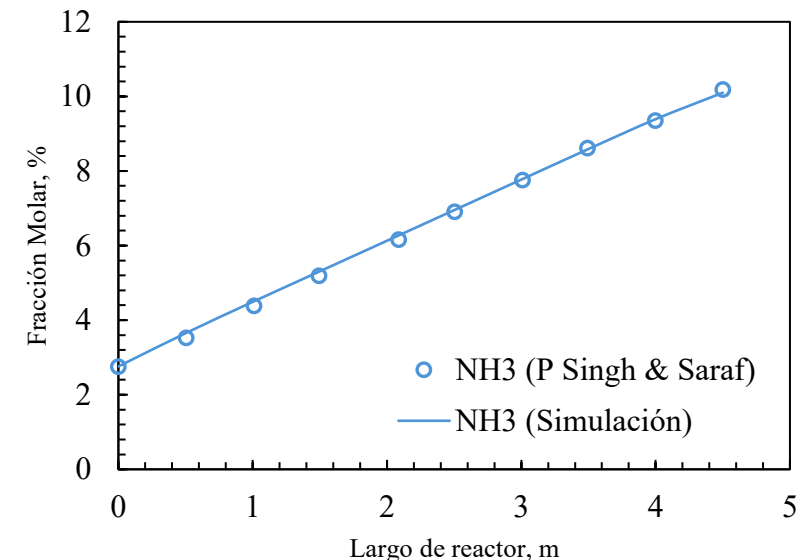
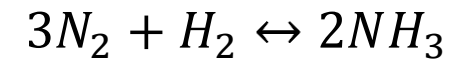


Figura 12: Validación del modelo cinético (20).

ESTUDIO TÉCNICO: Validación Bosch-Meiser

$$r_{CARB} = k_1 \left[X_{NH_3}^2 \cdot X_{CO_2} - \frac{X_{CARB}}{K_1} \right] \quad (3) \quad (22)$$

$$r_{UREA} = k_2 \left[X_{CARB} - \frac{X_{UREA} \cdot X_{H_2O}}{K_2} \right] \quad (4) \quad (22)$$

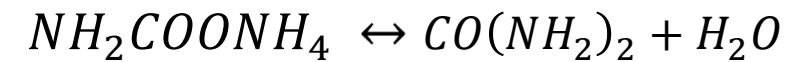
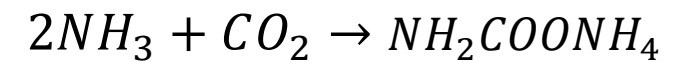


Tabla 5: Parámetros para validación ⁽²³⁾.

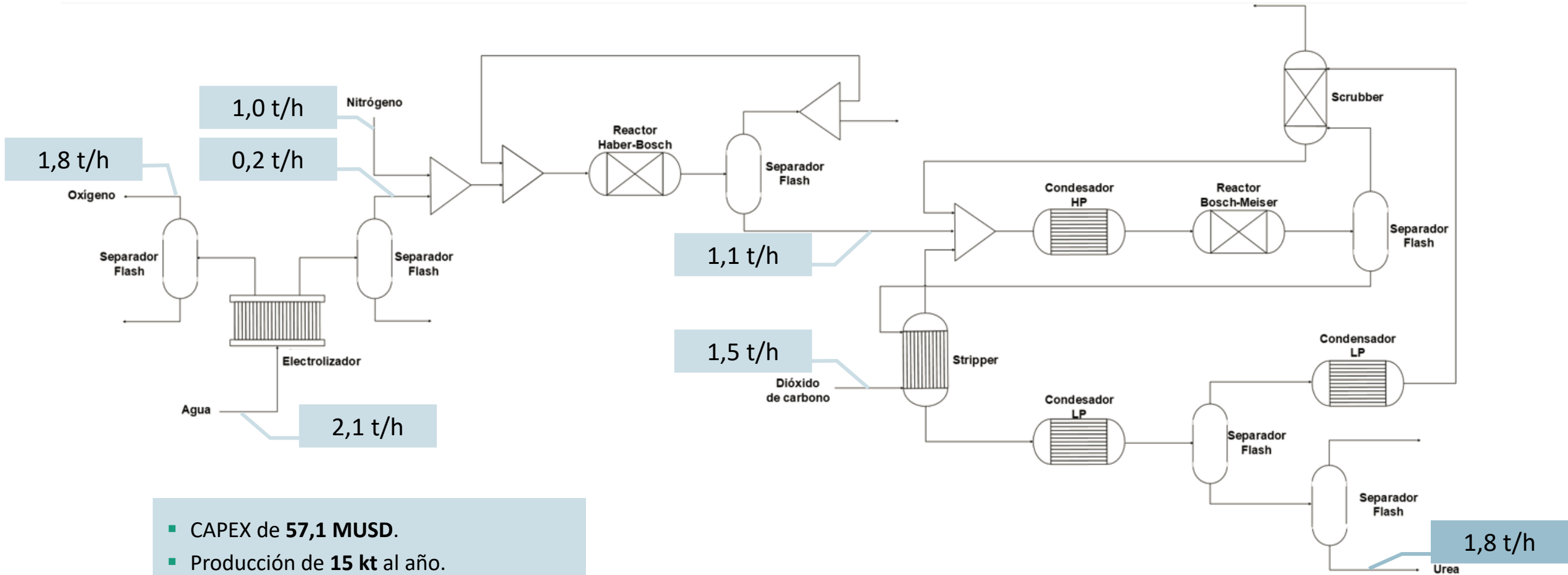
Parámetro	Industria	Zhang	Simulación
Entrada NH ₃ /CO ₂	2,0	2,0	2,0
Temperatura HP	179 °C	167 °C	167 °C
Temperatura salida del reactor	185 °C	183,0 °C	185,9 °C
Conversión CO ₂	51,3%	52,3%	51,0%
Salida de urea wt%	72,0%	77,0%	77,3%

Tabla 6: Comparación de errores de la publicación y la simulación.

Parámetro	% Error Zhang	% Error Simulación
Entrada NH ₃ /CO ₂	0%	0%
Temperatura HP	7%	7%
Temperatura salida del reactor	1%	0%
Conversión CO ₂	2%	1%
Salida de urea wt%	7%	7%

(22) Apen Plus (2008) Aspen Plus Urea Synthesis Loop Model; (23) Zhang et al., (2021) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116401>

ESTUDIO TÉCNICO: Simulación



- CAPEX de **57,1 MUSD**.
- Producción de **15 kt** al año.
- Disponibilidad del **95%**.
- Demanda energética de **115 GW/año**.

ESTUDIO TÉCNICO: Tarifa final

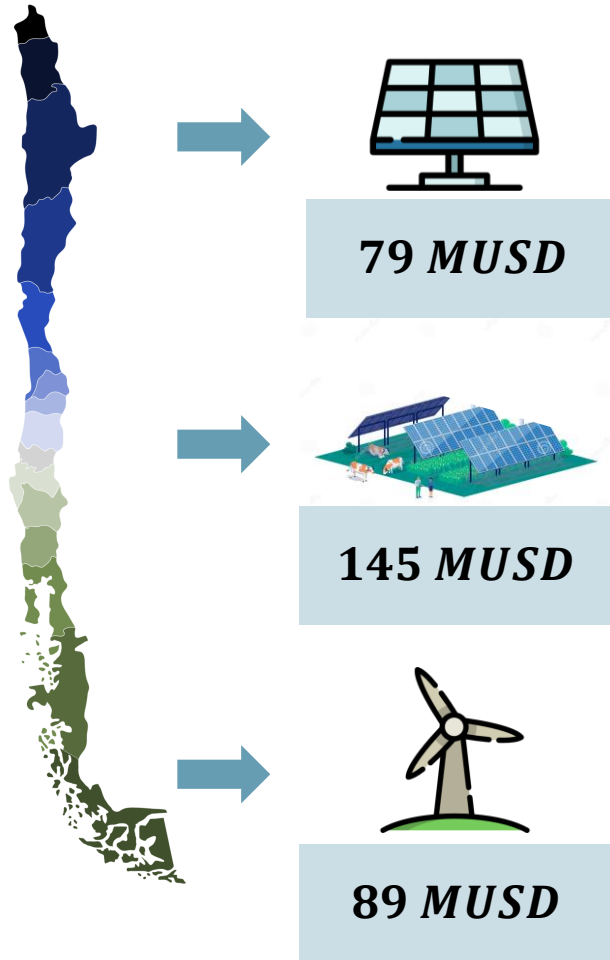


Tabla 7: Costo asociados al PPA ⁽²⁴⁾.

Tipo	ANT	BIO	MAG	Unidad
Potencia	17,0	17,0	17,0	USD/MWh
Transmisión	24,1	23,1	18,5	USD/MWh
Otros	10,0	10,0	10,0	USD/MWh

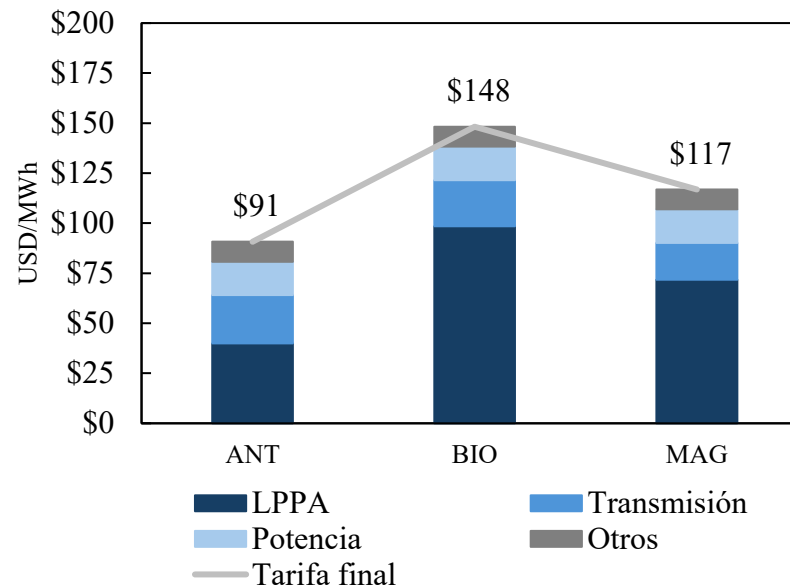


Figura 13: Tarifa con sistema PPA primer año.

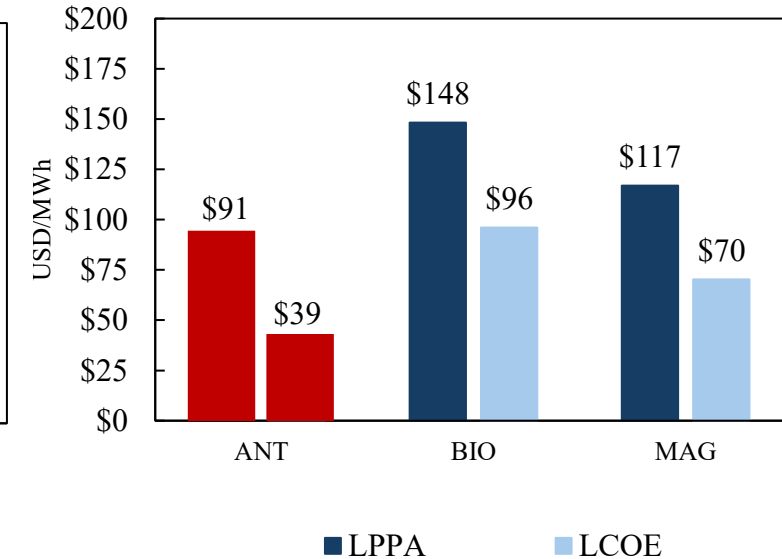


Figura 14: Comparación entre LPPA y LCOE.

(24) GIZ (2024) <https://h2news.cl/2024/07/25/estudio-h2uppp-revela-potencial-de-e-fuels-en-chile/>

ESTUDIO TÉCNICO: CAPEX

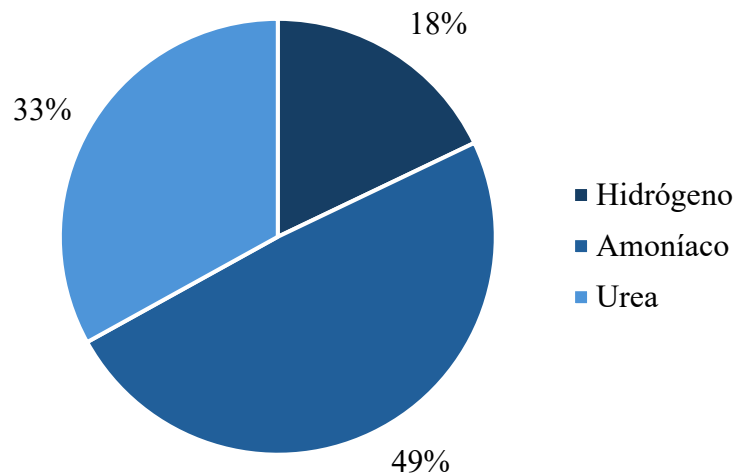


Figura 13: CAPEX por etapa del proceso.

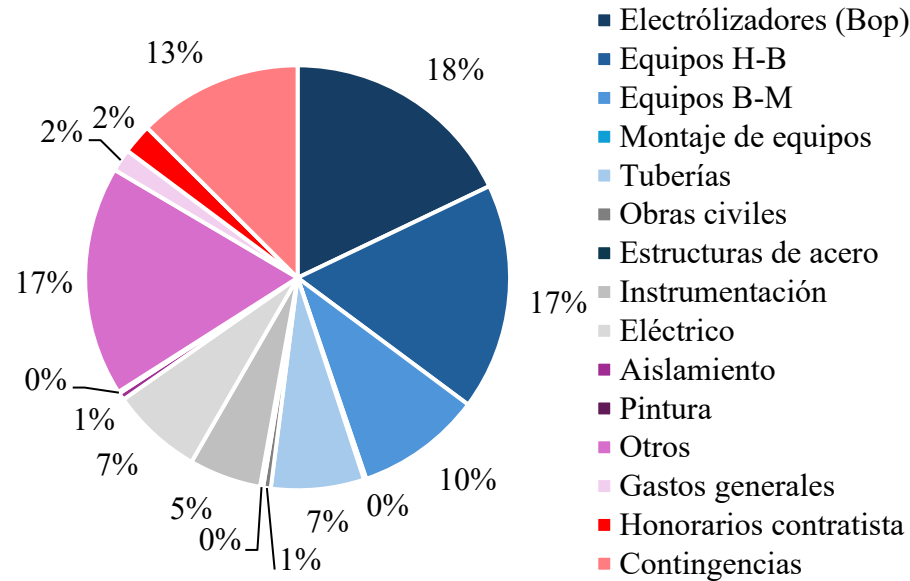


Figura 14: CAPEX por categoría de costos.

- El CAPEX total es de **57,1 MUSD**.
- Los equipos representan el **45%** del CAPEX total.
- El sistema de electrolisis tiene un CAPEX de **10,1 MUSD**.
- Los equipos de la síntesis de amoniaco significa una inversión de **9,8 MUSD** y la de urea de **5,1 MUSD**.
- La mayor parte está asociada a **compresores, intercambiadores de calor y reactores**.

ESTUDIO TÉCNICO: OPEX

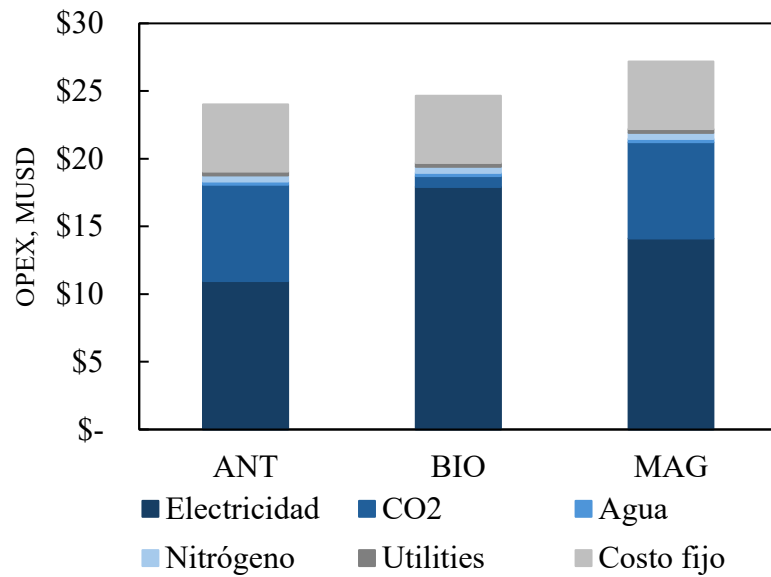


Figura 15: OPEX con estrategia PPA.

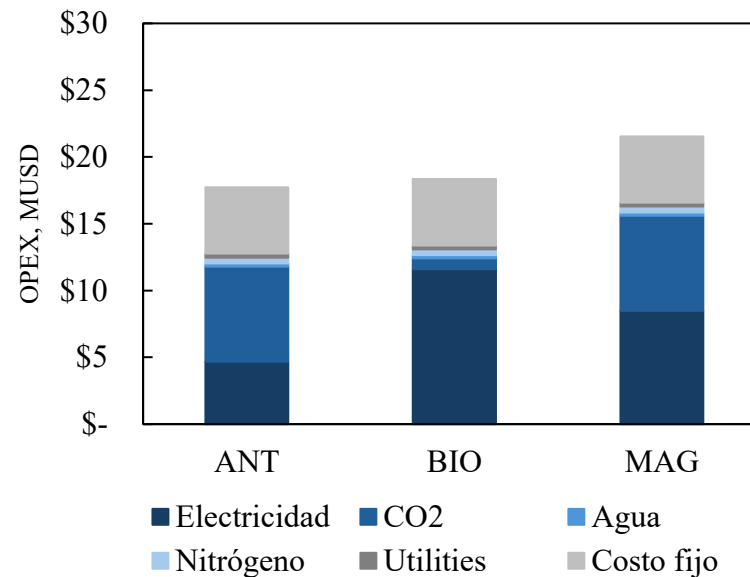


Figura 16: OPEX con autogeneración.

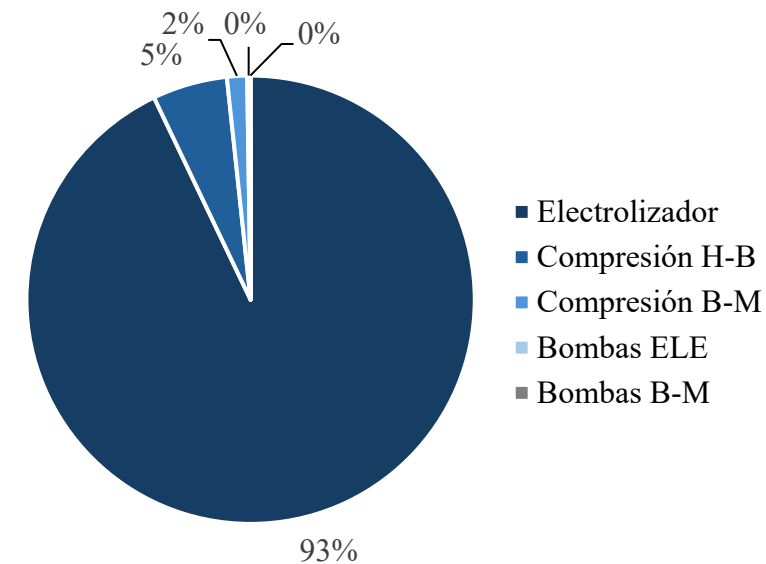


Figura 17: Consumo eléctrico.

ESTUDIO TÉCNICO: LCOU

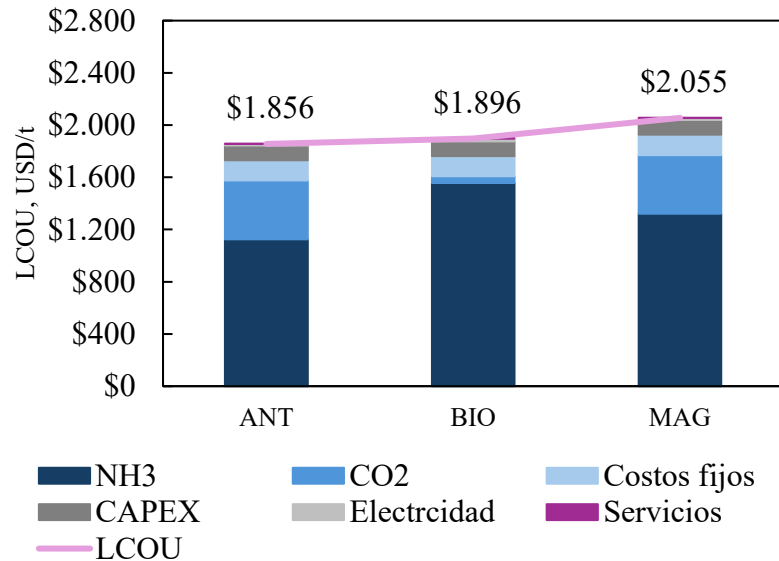


Figura 18: LCOU con esquema PPA.

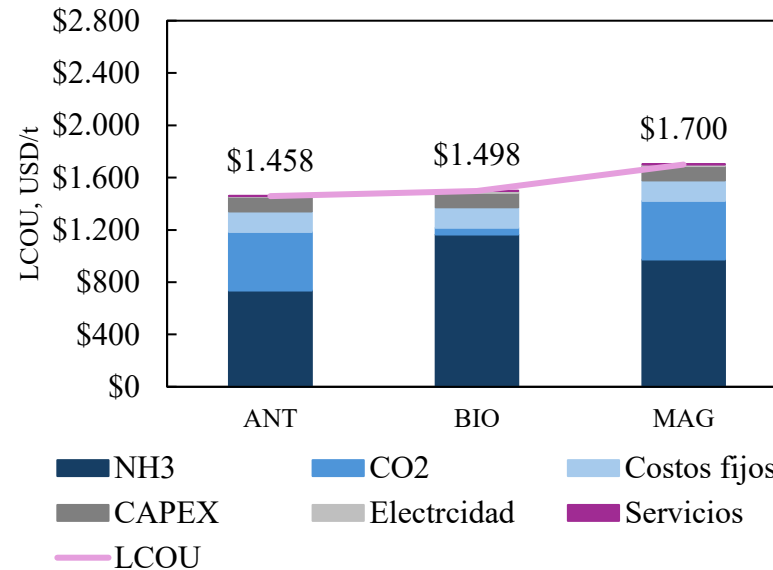


Figura 19: LCOU con esquema autogeneración.

- El amoníaco es el **principal factor** en el LCOU.
- La fuente de CO₂ biogénica permite **bajar considerablemente** el LCOU.
- El sistema FV en Antofagasta es el **más competitivo**.
- El costo para una escala piloto estaba reportado en **2320 USD/t⁽¹¹⁾**.

(11) Soroodan et al. (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101015>



Estudio financiero

ESTUDIO FINANCIERO: Escenario base

Tabla 8: Variables del flujo de caja.

Parámetro	Valor
Período	25 años
Inflación	3%
Tasa de descuento	8%
Depreciación	Lineal 25 años
Financiamiento	60%

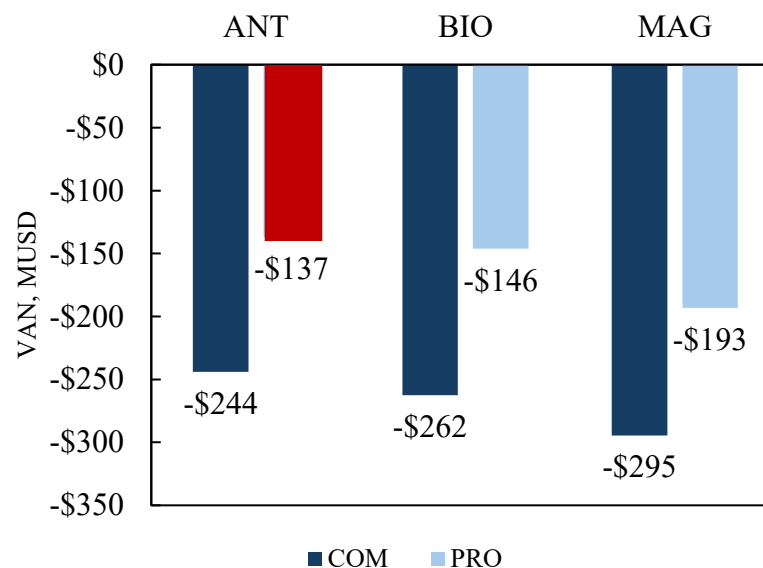


Figura 20: VAN para el Caso Base.

- Todos los escenarios tienen **utilidad negativa**.
- La autogeneración permite **menos gastos**, pero no rentabilidad.
- El proyecto se vería obligado a **vender a sobreprecio** para que los proyectos sean viables.

ESTUDIO FINANCIERO: Análisis de elasticidad

- La energía es la **variable más sensible** al precio de venta urea.
- Una variación de **1 USD/MWh** en el costo de energía se traduce en un cambio de **9,5 USD/t**.
- Una variación del **1%** en la ayuda fiscal al CAPEX se traduce en un cambio de **3,2 USD/t**.

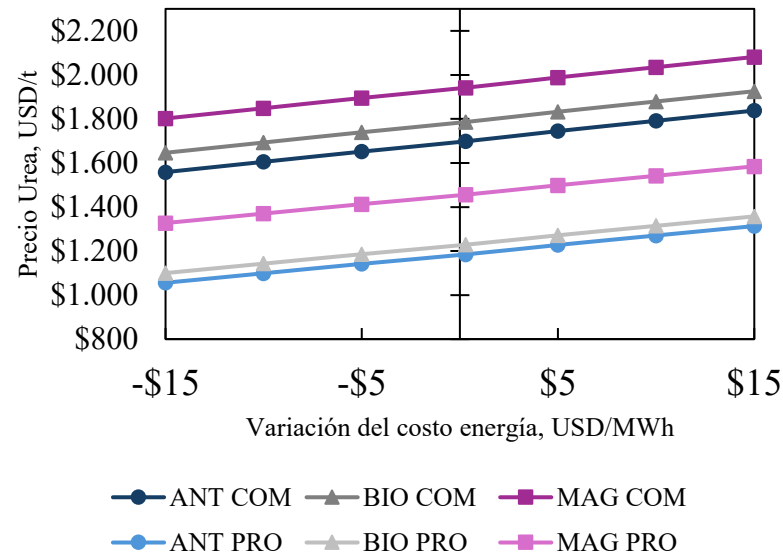


Figura 21: Análisis de sensibilidad al costo de energía.

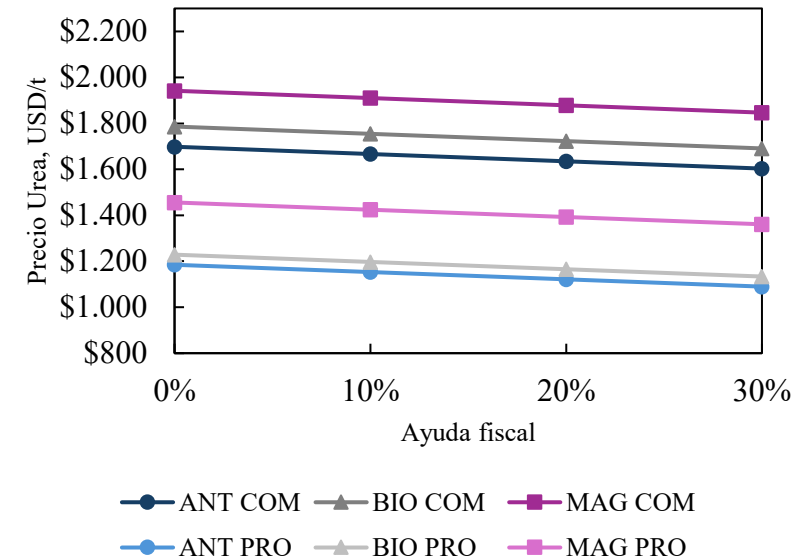


Figura 22: Análisis de sensibilidad al Ayuda fiscal.

ESTUDIO FINANCIERO: Análisis de elasticidad

- Una variación de **1 USD/t** en los bonos se traduce e un cambio **1,5 USD/t**.
- Una variación de **1 USD/t** en costo de CO₂ se traduce en un cambio de **1 USD/t**.
- El costo de CO₂ tiene el **mayor rango** de variación para el **DAC**.
- La **fuentes biogénica** permite costos inferiores, pero **bajo rango**.

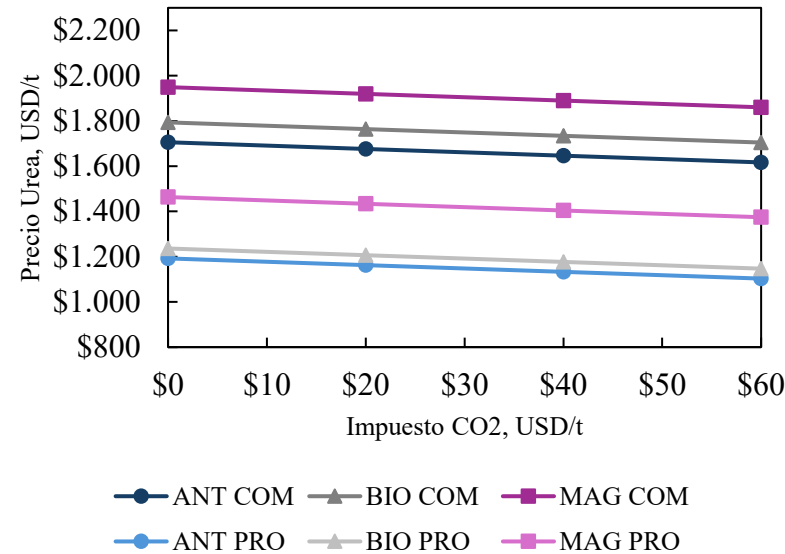


Figura 23: Análisis de sensibilidad al costo de energía.

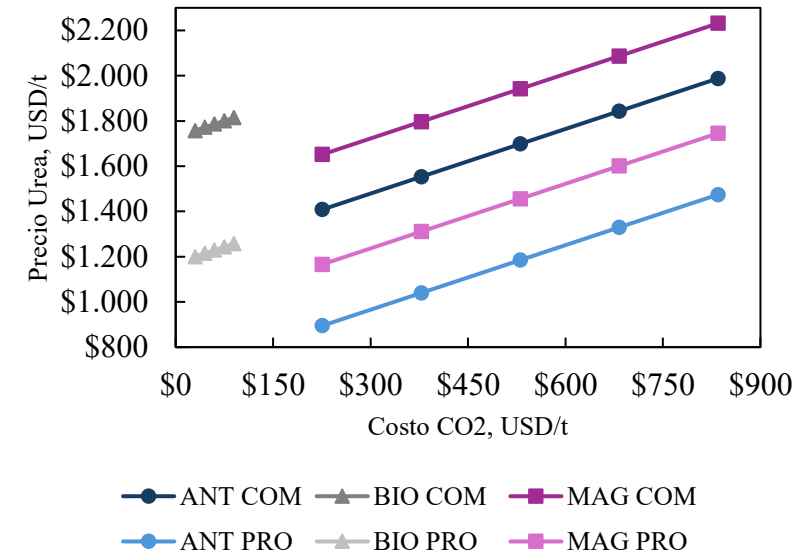


Figura 24: Análisis de sensibilidad al Ayuda fiscal.

ESTUDIO FINANCIERO: Análisis de sensibilidad

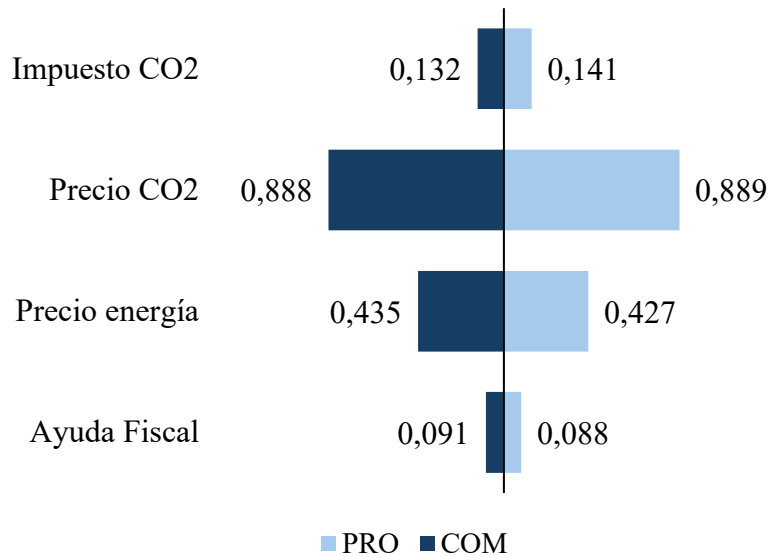


Figura 25: Análisis Monte Carlo en Antofagasta.

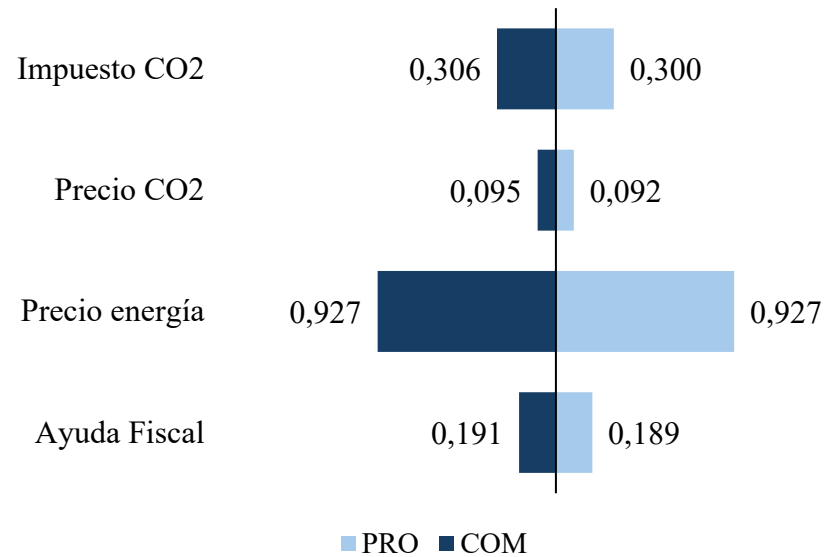


Figura 26: Análisis Monte Carlo en Biobío.

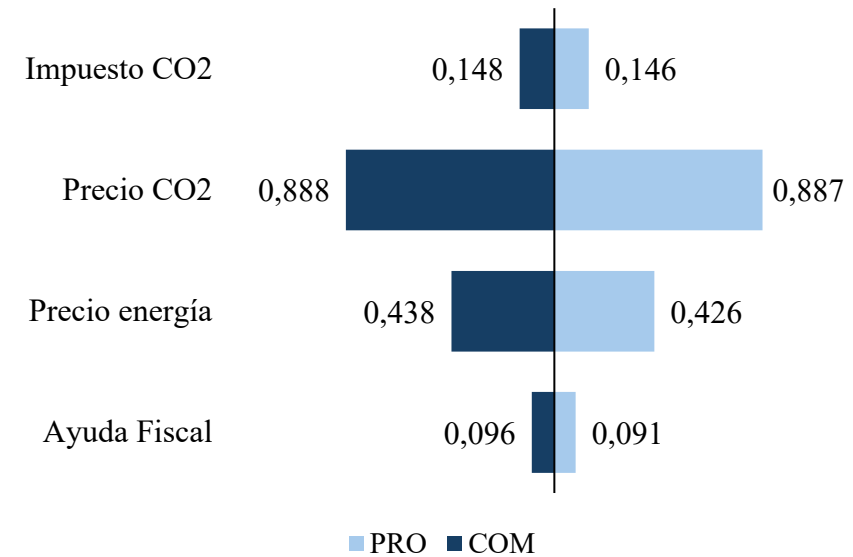


Figura 27: Análisis Monte Carlo en Magallanes.

ESTUDIO FINANCIERO: Mejor escenario

- A pesar de usar el caso más optimista **ningún caso** tiene VAN positivo.
- El caso de **Antofagasta** para ambas configuraciones es el **más rentable**.
- Para ser viables económicamente se requiere un **sobreprecio**.
- El más bajo es Antofagasta con **607 USD/t**, lo que se traduce en un **48%** de sobreprecio.

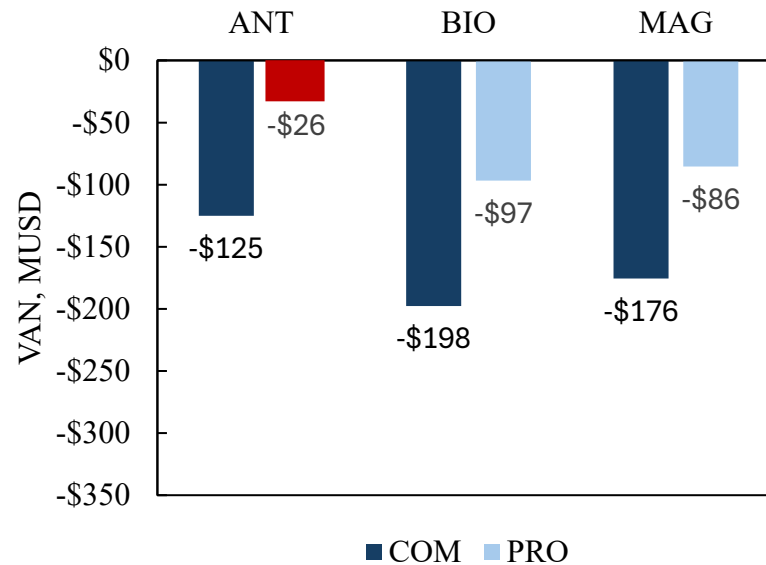


Figura 20: VAN para mejor escenario.

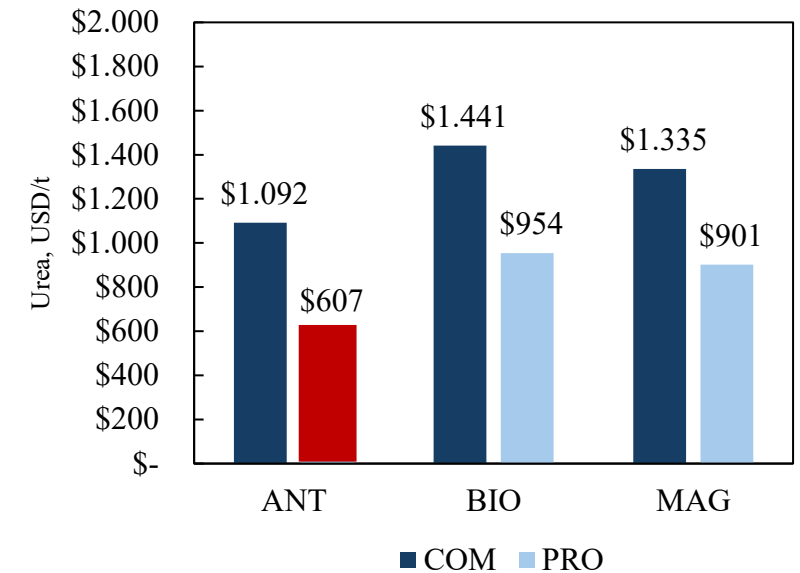


Figura 21: Precio de venta para VAN igual a cero.

ESTUDIO FINANCIERO: Aplicación Ley de fomento H₂V

- La ley N° 17.777-05 otorga un beneficio de **2 USD** por kilogramo de hidrógeno verde por **10 años**.
- Para **Magallanes y Antártica** además permite la **excepción de impuestos de primera clase por 10 años**.
- Antofagasta con autogeneración** llega a ser la **opción más competitiva**.

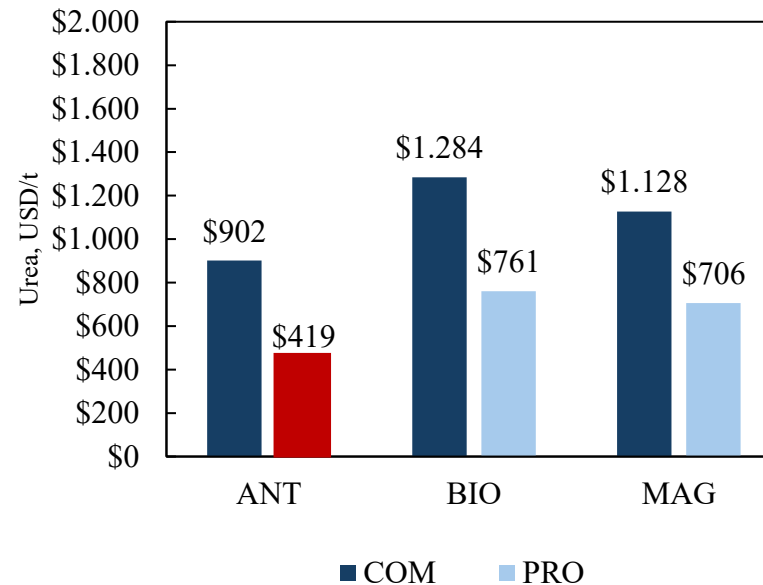


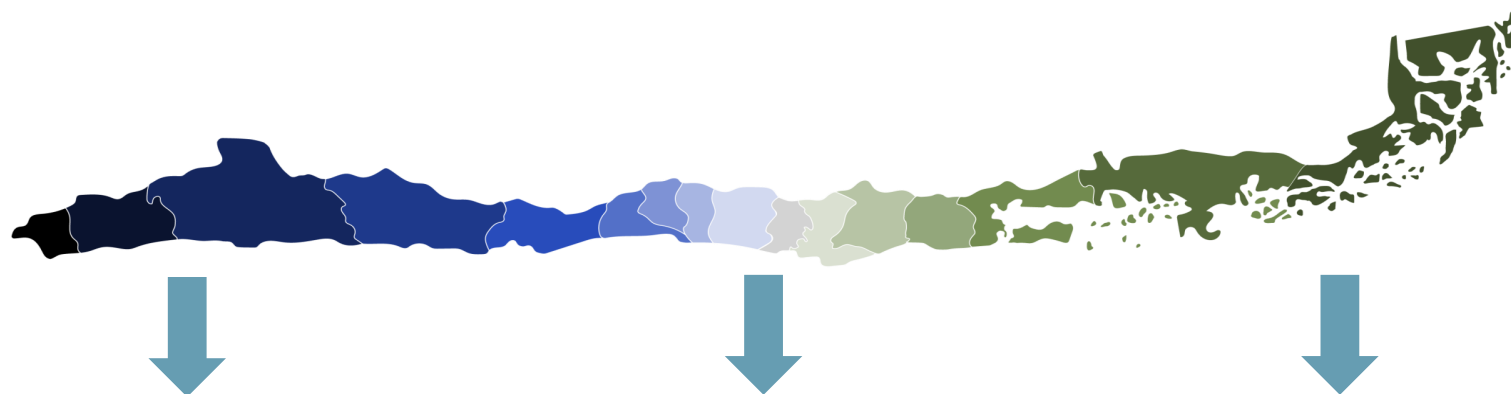
Figura 22: Precio de venta para VAN igual a cero con Ley de fomento H₂V.

Tabla 8: Sobrepeso necesario para llegar a un VAN 0.

Lugar	COM	PRO
ANT	100%	2%
BIO	161%	78%
MAG	148%	69%

ESTUDIO FINANCIERO: Casos económicamente atractivos

- Para que un proyecto sea atractivo financieramente se estableció:
- VAN mayor o iguala 0.
- Un TIR mayor a la tasa de descuento.
- UN DSCR mayor o igual a 1,2.
- Un Payback inferior a la vida del proyecto.



Parámetro	Valor
VAN	8,1 MUSD
TIR	12%
DSCR	1,2
Payback	8 años
Precio	468 USD/t

Parámetro	Valor
VAN	1,3 MUSD
TIR	10%
DSCR	1,2
Payback	20
Precio	771 USD/t

Parámetro	Valor
VAN	6,0 MUSD
TIR	13%
DSCR	1,2
Payback	8 años
Precio	738 USD/t

CONCLUSIONES: Estudio de mercado

- Europa se posiciona como mercado “first mover” para la urea de baja huella de carbono, ya que combina presión regulatoria, metas de descarbonización y cadenas agroalimentarias con exigencias de trazabilidad, acelerando la creación de demanda por fertilizantes con atributo verde.
- La urea verde presenta una oportunidad estratégica en Chile no por volumen, sino por su potencial de inserción en segmentos agrícolas exportadores como los frutales.
- La total dependencia de importaciones expone al mercado nacional a alta volatilidad de precios, lo que refuerza el valor estratégico de una producción local desacoplada del gas natural.

CONCLUSIONES: Estudio técnico

- La autogeneración renovable reduce el costo nivelado de la urea al acceder a electricidad a menor costo, pero exige una mayor inversión inicial en infraestructura de generación elevando el CAPEX del proyecto.
- La energía es el factor más influyente en el costo de la urea, donde la demanda eléctrica del proceso está fuertemente concentrada en la electrólisis, que representa aproximadamente el 93% del consumo total de electricidad de la planta, haciendo que cualquier diferencia de costo energético por localización se traduzca directamente en variaciones significativas del costo de producción.
- El CO₂ biogénico permite acceder a costos de captura significativamente más bajos que el DAC, reduciendo el costo de producción, sin embargo, su disponibilidad está condicionada por la ubicación y cercanía a fuentes emisoras.

CONCLUSIONES: Estudio financiero

- A escala piloto, la producción de urea verde no es viable bajo condiciones de mercado convencionales, evidenciando una brecha estructural frente a la urea fósil.
- La electricidad es la variable más elástica para la rentabilidad del proyecto, ya que pequeñas variaciones en su precio generan cambios significativos en el VAN, sin embargo, el factor que domina el riesgo económico depende de la ubicación. En Biobío predomina la incertidumbre del costo eléctrico, mientras que en Antofagasta y Magallanes la mayor influencia proviene del costo del CO₂ asociado a DAC.
- La viabilidad económica emerge únicamente bajo esquemas combinados de reducción del costo eléctrico, valorización del CO₂ e instrumentos de fomento al hidrógeno verde, más que por sobrepuestos al fertilizante.

RECOMENDACIONES

- **Sistema híbrido en Biobío:** Desarrollar un modelo de suministro eléctrico, dimensionando el sistema híbrido solar-eólico para la Región del Biobío, para minimizar el LCOE y aprovechar los costos del CO₂ biogénico.
- **Modelado de la granulometría de la urea:** Integrar el costo y la energía asociada a la granulación de la urea en el TEA para reflejar el impacto de la especificación final del producto en el costo total.
- **Análisis técnico-económico a escala industrial:** Realizar un análisis técnico-económico a escala industrial, enfocando la evaluación en las nuevas economías de escala que surgen al pasar de la planta piloto a la comercial.



Evaluación técnico-económica de la producción a escala piloto de urea verde en Chile

Sistemas Fotovoltaicos

Andres Mercado Opazo

Tutores: Frederik Schönberger y Cristóbal Venegas

REFERENCIAS

- [1] Ojelade, O. A., Zaman, S. F., and Ni, B.-J. (2023). Green ammonia production technologies: A review of practical progress. *Journal of Environmental Management*, 342:118348.
- [2] Index Mundi (2025). Precios de mercado: Urea - Precio Mensual (Dólares americanos por tonelada métrica).
- [3] Jiang, P., Wang, C., Li, L., Ji, T., Mu, L., Lu, X., and Zhu, J. (2025). Green impacts of transforming green electricity into microwave for ammonia and urea production. *AIChE Journal*, 71(5):e18743.
- [4] Ministerio del Medio Ambiente (2022). Inventario nacional de gases de efecto invernadero, 1990-2020:Resumen de puntos clave. Technical report, Ministerio de Medio Ambiente.
- [5] FAO (2025a). FAOSTAT - Base de Datos Estadística.
- [6] Ministerio de Energía (2020). Estrategia nacional de hidrogeno verde: Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones. Technical report, Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- [7] H2 Chile (2025). Mapa de proyectos.
- [8] Curcio, E. (2025). Techno-economic analysis of hydrogen production: Costs, policies, and scalability in the transition to net-zero. *International Journal of Hydrogen Energy*, 128:473–487.
- [9] Sanchez, D. L., Johnson, N., McCoy, S. T., Turner, P. A., and Mach, K. J. (2018). Near-term deployment of carbon capture and sequestration from biorefineries in the united states. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(19):4875–4880.
- [10] Sievert, K., Schmidt, T., and Steffen, B. (2024). Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture. *Joule*, 8.
- [11] Soroodan, E., Huang, S., Milani, D., Kiani, A., and Feron, P. (2025). Techno-economic assessment of green urea production integrated with direct air capture. *Energy Conversion and Management*:X, 26:101015.
- [12] CDPR (2024). Hoja de ruta 2024 - 2050: H2v Biobío, programa estratégico regional hidrogeno verde Biobío. Technical report, Gobierno de Chile.



REFERENCIAS

- [13] GIZ (2024a). Encadenamientos productivos de la industria del hidrogeno verde y derivados en magallanes y la antártica chilena: Perspectivas, desafíos y oportunidades. Technical report, Gobierno de Chile.
- [14] OEC (2025). Urea, incluida la solución acuosa en paquetes 10 kg en Chile.
- [15] IFA (2022). Fertilizer use by crop.
- [16] CIREN (2024). Catastro frutícola 2024: Principales resultados, región de O'Higgins. Technicalreport, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile
- [17] ICEX (2018). El mercado de fertilizantes en Chile.
- [18] Vos, R., Glauber, J., Hebebrand, C., and Rice, B. (2025). Global shocks to fertilizer markets:Impacts on prices, demand and farm profitability. Food Policy, 133:102790.
- [19] Sánchez, M., Amores, E., Abad, D., Rodríguez, L., and Clemente-Jul, C. (2020). Aspen plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy, 45(7):3916–3929.
- [20] Singh, C. P. P. and Saraf, D. N. (1979). Simulation of ammonia synthesis reactors. Industrial &Engineering Chemistry Process Design and Development, 18(3):364–370.
- [21] D. C. Dyson and J. M. Simon (1968) Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals 7 (4), 605-610
- [22] Aspen Technology (2008). Aspen Plus Urea Synthesis Loop Model.
- [23] Zhang, H., Wang, L., Van herle, J., Maréchal, F., and Desideri, U. (2021). Techno-Economic comparison of 100% green urea Applied Energy, 284:116401.
- [24] GIZ (2024b). Project lighthouse e-fuel in Chile: Front-end engineering design (feed) for the realization of a power-to-liquid (ptl) plant. Technical report, GIZ.
- [25] Cámara de Diputadas y Diputados de Chile. Proyecto de ley: Establece incentivos tributarios a la producción de hidrogeno verde y sus derivados, 2025.