

Integrated urea production in sugarcane biorefineries: a process simulation study

Gastón P. E. Arredondo¹, Ana M. Cuezco^{1,2}, Paula Z. Araujo¹ & Fernando D. Mele^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, T4002 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, T4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

arredondogastonpe@gmail.com

acuezco@herrera.unt.edu.ar

paraujo@herrera.unt.edu.ar

fmele@herrera.unt.edu.ar

Abstract. The defossilization of the chemical industry is essential to mitigate global warming and advance toward production systems compatible with carbon neutrality targets. Urea, one of the most important nitrogen fertilizers worldwide, is produced from ammonia and carbon dioxide (CO₂) through energy-intensive processes that are highly dependent on fossil fuels. Consequently, both its production and its use in the agro-industrial sector generate significant greenhouse gas emissions, reinforcing the need for more sustainable alternatives. This work evaluates the integration of a green urea production plant with a sugarcane biorefinery located in Northwestern Argentina. The proposed system utilizes biogenic CO₂ from flue gases and employs hydrogen generated via water electrolysis, using renewable electricity derived from bagasse. The study includes process design and modeling, as well as an assessment of its technical and energy performance using representative indicators. The system is modeled in UniSim® Design v500 (Honeywell), considering carbon capture, air separation, water electrolysis, ammonia synthesis, and urea production units. A global conversion of biogenic CO₂ above 78% is achieved in the urea production unit, indicating efficient utilization of the captured carbon. The results highlight the potential of process integration and the use of renewable energy as a strategy to reduce dependence on fossil-based inputs and to advance the decarbonization of the fertilizer sector.

Keywords: Carbon Capture and Utilization; process integration; CO₂ emission reduction; green hydrogen; sustainable agriculture.

Producción de urea integrada a biorrefinerías sucroalcoholeras: estudio de simulación de procesos

Gastón P. E. Arredondo¹, Ana M. Cuezco^{1,2}, Paula Z. Araujo¹ y Fernando D. Mele^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, T4002 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, T4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

arredondogastonpe@gmail.com

acuezco@herrera.unt.edu.ar

paraujo@herrera.unt.edu.ar

fmele@herrera.unt.edu.ar

Resumen. La descarbonización de la industria química es clave para mitigar el calentamiento global y avanzar hacia sistemas productivos compatibles con los objetivos de neutralidad de carbono. La urea, uno de los fertilizantes nitrogenados más importantes a nivel mundial, se produce a partir de amoníaco y dióxido de carbono (CO₂) mediante procesos intensivos en energía y altamente dependientes de combustibles fósiles. En consecuencia, tanto su producción como su uso en el sector agroindustrial generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero, lo que refuerza la necesidad de alternativas más sostenibles. Este trabajo evalúa la integración de una planta de producción de urea verde con una biorrefinería sucroalcoholera del Noroeste Argentino. El sistema propuesto aprovecha CO₂ biogénico de los gases de combustión y emplea hidrógeno generado mediante electrólisis del agua, utilizando electricidad renovable a partir de bagazo. El estudio incluye el diseño y modelado del proceso, así como la evaluación de su desempeño técnico y energético mediante indicadores representativos. El sistema se modela en UniSim® Design v500 (Honeywell), considerando unidades de captura de carbono, separación del aire, electrólisis del agua, síntesis de amoníaco y producción de urea. Se obtiene una conversión global de CO₂ biogénico superior al 78% en la unidad de producción de urea, mostrando un aprovechamiento eficiente del carbono capturado. Los resultados destacan el potencial de la integración de procesos y el uso de energías renovables como estrategia para reducir la dependencia de insumos fósiles y avanzar en la descarbonización del sector de fertilizantes.

Palabras clave: Captura y Utilización de Carbono; integración de procesos; reducción de emisiones de CO₂; hidrógeno verde; agricultura sostenible.

1 Introducción

En el marco de la Ingeniería de Procesos, la producción de fertilizantes no solo representa un desafío técnico, sino también un factor clave para la seguridad alimentaria global. Frente a una población mundial proyectada en 9.700 millones de personas hacia 2050 (ONU, 2019) y la disminución progresiva de la superficie cultivable debido a la urbanización y la degradación del suelo, la brecha entre la demanda de alimentos y la disponibilidad de recursos naturales se vuelve cada vez más crítica.

En este contexto, los fertilizantes desempeñan un rol central en la agricultura moderna, no solo por su contribución al aumento del rendimiento de los cultivos, sino también por su capacidad para optimizar el uso de recursos limitados, lo que resulta

fundamental para sostener la producción de alimentos a escala global (Penuelas *et al.*, 2023). Sin embargo, tanto su producción como su uso están asociados a importantes emisiones de gases de efecto invernadero, constituyendo una de las principales fuentes de impacto ambiental dentro del sector agrícola (Milani *et al.*, 2022).

Entre ellos, la urea es el fertilizante nitrogenado de mayor relevancia global. Su producción se basa en la síntesis a partir de amoníaco (NH_3) y CO_2 , en procesos intensivos en energía y dependientes de combustibles fósiles. A su vez, constituye la principal ruta de utilización de CO_2 a escala industrial, con consumos del orden de 130 MtCO_2 anuales (IEA, 2021). No obstante, su aplicación agrícola genera emisiones significativas, en algunos casos superiores a las de otros fertilizantes nitrogenados debido a su elevada fracción de carbono (Galusnyak *et al.*, 2023). En la Argentina, su relevancia es particularmente alta, representando cerca del 40% del consumo total de fertilizantes en 2023 (Nunes *et al.*, 2023), con una creciente expansión de proyectos de producción nacional asociados a esquemas de integración entre los sectores energético y agroindustrial (Río Negro, 2026).

En este escenario, la huella de carbono de los sistemas agroindustriales está fuertemente asociada al uso de fertilizantes nitrogenados, en particular urea de origen fósil. En cultivos como la caña de azúcar, su aplicación constituye una fuente relevante de emisiones de gases de efecto invernadero, mostrando una relación directa entre dosis aplicada e impacto ambiental del sistema (Cuezzo *et al.*, 2023). Esto motiva el desarrollo de rutas alternativas de producción de urea basadas en CO_2 capturado e H_2 de origen renovable, capaces de reducir simultáneamente emisiones en la síntesis y en la cadena de valor agroindustrial.

Las tecnologías de captura y utilización de carbono (CCU) permiten valorizar corrientes concentradas de CO_2 , mientras que el hidrógeno (H_2) verde habilita la sustitución de materias primas fósiles en la síntesis de NH_3 (Varela *et al.*, 2024). En particular, la industria sucroalcoholera del Noroeste Argentino presenta condiciones favorables para su integración, debido a la disponibilidad de CO_2 biogénico en los gases de combustión y al potencial de generación de electricidad renovable a partir de bagazo, lo que habilita esquemas de simbiosis industrial.

En la literatura, la producción de urea ha sido ampliamente estudiada mediante la integración de tecnologías CCU y el uso de H_2 de origen renovable. Shirmohammadi *et al.* (2020) evaluaron la integración de un sistema de captura post-combustión con una planta de urea, demostrando mediante modelado de procesos y análisis de sensibilidad el potencial de valorización del CO_2 y su impacto en la reducción de emisiones. En una línea complementaria, Taipabu *et al.* (2023) desarrollaron el diseño y optimización de procesos verdes para la producción conjunta de H_2 y urea a partir de glicerol, destacando la viabilidad de esquemas integrados basados en materias primas renovables. Más recientemente, Lopes y Teles dos Santos (2026) analizaron la descarbonización del sector de fertilizantes mediante la producción de urea a partir de residuos agroindustriales, incorporando modelado de procesos y optimización de la cadena de suministro bajo criterios de sostenibilidad.

Estos estudios muestran un creciente interés por rutas alternativas de producción de urea de baja huella de carbono. Sin embargo, persiste una brecha en la literatura respecto a la evaluación del aprovechamiento de CO_2 biogénico en un esquema de simbiosis industrial, especialmente en contextos regionales.

El presente trabajo propone y evalúa el acoplamiento de una planta de producción de urea con una biorrefinería sucroalcoholera mediante modelado y simulación de procesos. De esta manera, se establece un modelo integral orientado a la representación realista de la síntesis de urea verde a escala industrial, contribuyendo al análisis de rutas sostenibles para su producción.

2 Metodología y escenario propuesto

El modelo de proceso comprende la captura de CO₂ de los gases de combustión del bagazo de caña de azúcar, la unidad de separación de aire, la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno, la síntesis de amoníaco y, la producción de urea. El diagrama de bloques del proceso se presenta en la Fig. 1.

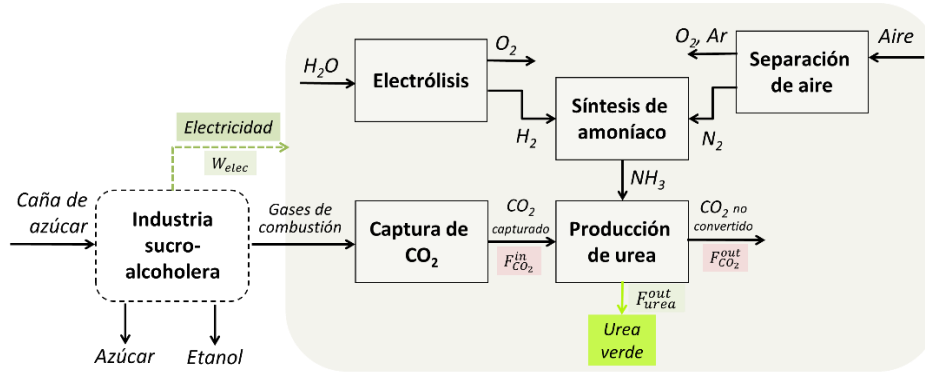


Fig. 1. Diagrama de bloques del proceso propuesto de producción de urea verde.

A partir de los balances de materia y energía obtenidos mediante simulación, se evaluó el desempeño técnico del proceso mediante un conjunto de indicadores representativos. En particular, se consideraron tres métricas clave: la conversión global de CO₂, el rendimiento de urea, y el consumo específico de energía. Estos indicadores permiten cuantificar la eficiencia del sistema, analizar el comportamiento del sistema reaccionante y evaluar los requerimientos energéticos del proceso. Las expresiones correspondientes se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores de desempeño técnico del proceso propuesto.

Indicador	Expresión	Definición de variables
Conversión global de CO ₂ (%)	$X_{CO_2} = \frac{F_{CO_2}^{in} - F_{CO_2}^{out}}{F_{CO_2}^{in}}$	$F_{CO_2}^{in}, F_{CO_2}^{out}$: caudales molares de CO ₂ a la entrada y salida de la unidad de producción de urea.
Rendimiento molar de urea (kmol urea/kmol CO ₂)	$Y_{urea} = \frac{F_{urea}^{out}}{F_{CO_2}^{in}}$	F_{urea}^{out} : caudal molar de urea en la corriente de producto.
Consumo total y específico de energía (GJ/t urea)	$E_s = \frac{Q + W_{elec}}{m_{urea}^{out}}$	Q : energía térmica; W_{elec} : energía eléctrica; m_{urea}^{out} : masa de urea producida.

3 Estudio y simulación del proceso propuesto

El proceso fue modelado a partir de la integración de cinco unidades que permiten la conversión de CO₂ de origen industrial en urea: unidad de captura de CO₂, unidad de separación de aire, unidad de electrólisis del agua, unidad de síntesis de NH₃ y, unidad de producción de urea. La Fig. 2 presenta el esquema completo del proceso de producción de urea verde.

A continuación, se describen las unidades consideradas:

3.1 Unidad de captura de CO₂

La captura de CO₂ se modela mediante un proceso de absorción química con una solución acuosa de monoetanolamina (MEA). El sistema incluye una columna de absorción, donde el CO₂ se separa de los gases de combustión, y una columna de regeneración para el reciclado del solvente. Este esquema permite obtener una corriente concentrada de CO₂ apta para su posterior valorización.

Los gases de combustión provenientes de la quema de bagazo en calderas del ingenio azucarero presentan una concentración media de 14,1% m/m de CO₂ (Golato *et al.*, 2008), lo que los convierte en una fuente adecuada de carbono biogénico para su aprovechamiento mediante estrategias CCU. Si bien la disponibilidad de esta fuente de CO₂ es de carácter estacional y se encuentra restringida al período de cosecha (zafra), en el presente estudio se asume una operación continua (8760 h/año) con el fin de obtener una base anual de producción representativa y facilitar la evaluación del sistema. En la práctica, sería necesario incorporar sistemas de almacenamiento de CO₂ que permitan desacoplar la disponibilidad estacional de la demanda continua del proceso.

La unidad fue modelada y simulada en UniSim®, siguiendo las condiciones operativas reportadas por Cuezco *et al.* (2021), empleando el paquete termodinámico *Amine Package* con el modelo de Kent-Eisenberg (Kent y Eisenberg, 1976).

Como resultado, se obtiene un corriente de CO₂ con una pureza de 99,3% m/m, mostrando una remoción efectiva de impurezas (principalmente O₂, N₂ y H₂O), tal y como se detalla en la Tabla 2. Se alcanza una recuperación del 86,5% del CO₂, lo que evidencia una eficiente separación del gas de interés. Así, esta unidad garantiza un suministro continuo y estable de CO₂ para la síntesis de urea, consolidando una estrategia CCU de carácter regional.

Tabla 2. Composiciones másicas y flujos de las corrientes de entrada y salida del proceso de captura de CO₂.

Componente	Entrada		Salida	
	%m/m	t/h	%m/m	t/h
CO ₂	14,1	31,0	99,3	26,8
O ₂	7,77	17,1	0,04	0,002
CO	0,02	0,04	-	-
N ₂	63,1	138,8	0,60	0,01
H ₂ O	15,0	33,1	0,06	0,2

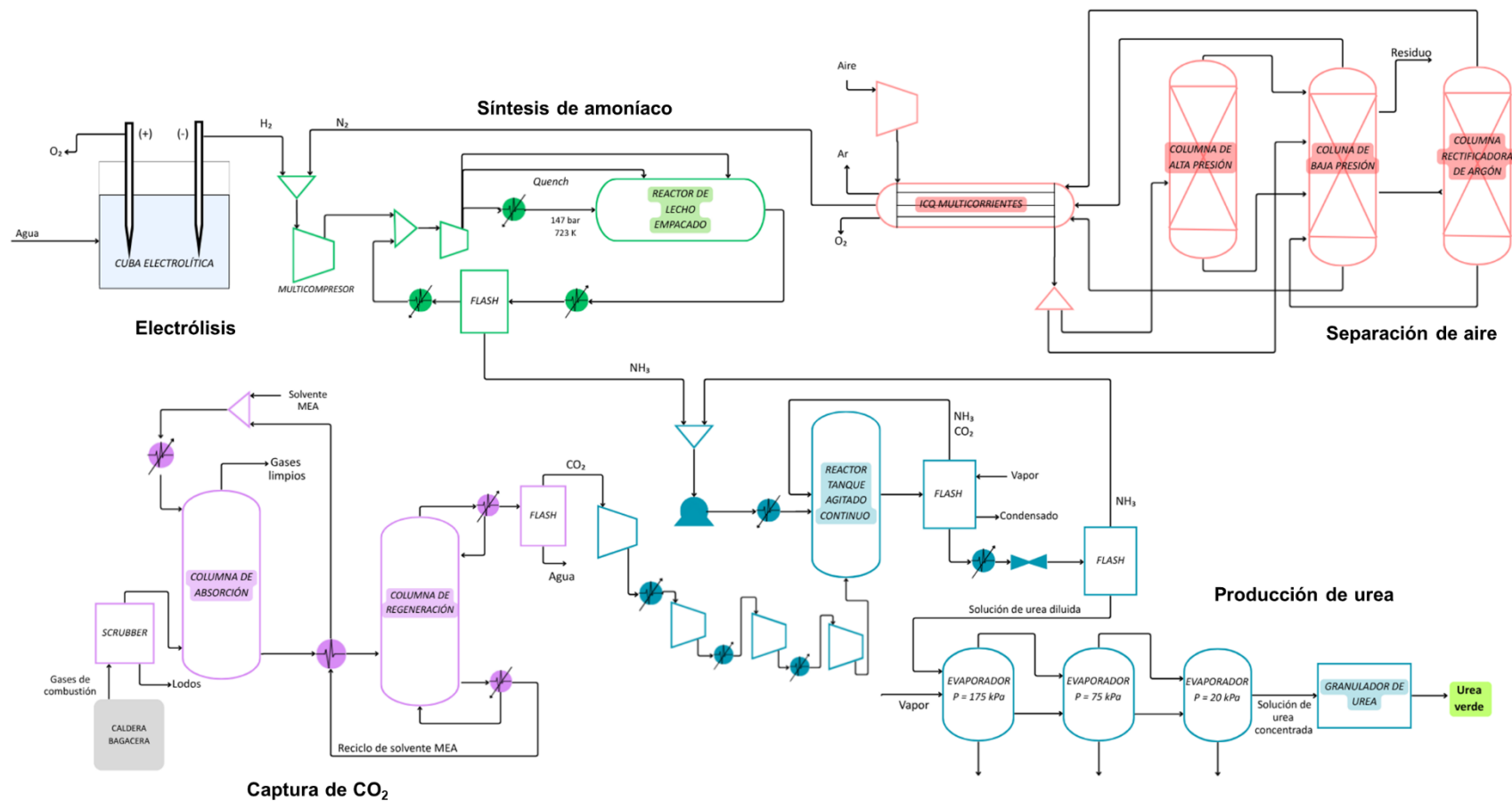


Fig. 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de urea verde.

3.2 Unidad de separación de aire

La unidad de separación de aire se incluye con el fin de obtener N₂ a partir del aire atmosférico. La separación se realiza mediante destilación criogénica y se asume que el aire de alimentación está compuesto por 78% mol/mol de N₂, 21% mol/mol de O₂ y, el resto de Ar. Se emplea el paquete termodinámico Peng–Robinson–Stryjek–Vera, adecuado para las condiciones del proceso (Vila *et al.*, 2001).

El esquema incluye una etapa de pretratamiento que comprende filtrado, compresión y enfriamiento hasta aproximadamente 100 K, seguida de un tren de tres columnas: alta presión, baja presión y rectificadora de argón (Devkota *et al.*, 2024).

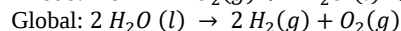
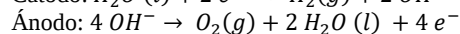
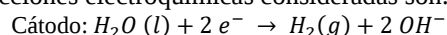
La corriente rica en N₂ se alimenta a la unidad de síntesis de NH₃, mientras que el O₂ y el Ar se recuperan como subproductos.

3.3 Unidad de electrólisis del agua

En esta unidad se produce H₂ mediante electrólisis del agua, considerando el consumo de energía eléctrica como una variable clave del modelo. El H₂ generado se destina a la síntesis de NH₃, mientras que el O₂ se obtiene como subproducto de interés comercial.

Se propone que el excedente de energía eléctrica de los ingenios azucareros se destine a la producción de H₂ verde, seleccionándose la electrólisis alcalina por su madurez tecnológica y menores costos relativos de inversión y operación (Buttler y Spliethoff, 2018). Se asume un consumo específico de 50 kWh/kgH₂, en concordancia con la literatura (Battaglia *et al.*, 2021).

Las reacciones electroquímicas consideradas son:



La unidad se discretiza en el simulador mediante la integración de un módulo de reacción química (reactor de conversión) acoplado a un separador tipo *flash* para la separación de los gases. El rigor del modelo se sustenta en la selección de métodos termodinámicos específicos para cada fase. Para la fase líquida se emplea el modelo Non-Random Two-Liquid (Renon y Prausnitz, 1968), mientras que para la fase vapor se utiliza la ecuación de estado de Peng-Robinson, permitiendo representar adecuadamente el comportamiento a alta presión ($P > 1500$ kPa).

La producción de H₂ renovable constituye un factor crítico en la viabilidad del proceso global de urea verde, siendo esta unidad la de mayor demanda energética del sistema (≈ 271 MW).

En la Tabla 3 se presentan los resultados de simulación. Se observa que la conversión de agua permite obtener un flujo de H₂ acorde a los requerimientos de la síntesis de NH₃, acompañado por una corriente significativa de O₂ como subproducto.

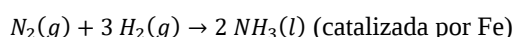
Tabla 3. Resultados de la simulación de la unidad de electrólisis de agua.

Corriente	Caudal (t/h)	Temperatura (K)	Presión (kPa)
H ₂ O	48,8	298	100
H ₂	5,4	453	3000
O ₂	43,4	298	100

Asimismo, las condiciones de operación del H₂ (alta presión y temperatura moderada) resultan adecuadas para su integración directa en etapas posteriores, minimizando requerimientos adicionales de compresión. En conjunto, los resultados muestran un desempeño consistente del modelo, aunque confirman que el elevado consumo energético de la electrólisis representa el principal desafío para la viabilidad del proceso.

3.4 Unidad de síntesis de amoníaco

Esta unidad convierte N₂ e H₂ en NH₃ mediante el proceso Haber-Bosch (Appl, 1999), en un reactor catalítico que opera a alta presión y temperatura. La reacción global involucrada es:



La alimentación, con una relación molar N₂/H₂ de 1:3, es comprimida en múltiples etapas con interenfriamiento y, posteriormente precalentada mediante integración energética. El reactor considerado corresponde a un lecho empacado con múltiples lechos de catalizador de hierro. Dado el carácter exotérmico de la reacción, se emplea la inyección de gas de síntesis frío entre lechos para controlar la temperatura y favorecer la conversión, de acuerdo con el principio de Le Chatelier.

Las condiciones de operación en la entrada del reactor son aproximadamente 147 bar y 723 K. La conversión por paso es del orden del 24%, en concordancia con lo reportado por Khan *et al.* (2024), por lo que la corriente de salida es enfriada hasta 228 K para condensar y separar el NH₃ producido. Los gases no reaccionados son reciclados al reactor, incrementando la eficiencia global del proceso.

El NH₃ obtenido presenta una pureza superior a 99% y se produce un caudal de 30,8 t/h el cual se alimenta a la unidad de síntesis de urea.

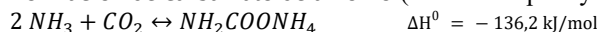
La síntesis de NH₃ se encuentra fuertemente limitada por el equilibrio termodinámico, lo que explica las bajas conversiones por paso y la necesidad de operar a alta presión, así como de implementar recirculación de reactivos no convertidos. La estrategia de enfriamiento intermedio resulta clave para controlar la temperatura en un sistema altamente exotérmico y evitar la desactivación del catalizador. Asimismo, la etapa de separación por condensación permite obtener un producto de alta pureza y minimizar pérdidas de reactivos, aunque implica requerimientos energéticos adicionales asociados al enfriamiento.

En el contexto del proceso global, esta unidad presenta un comportamiento maduro y bien establecido, pero su desempeño depende fuertemente de la disponibilidad de H₂ renovable, lo que vincula directamente su viabilidad con la eficiencia de la etapa de electrólisis y por lo tanto, con la disponibilidad energética. Si bien la producción actual de NH₃ verde es aún limitada (Fuster *et al.*, 2022), se prevé un crecimiento significativo en los próximos años debido al desarrollo de tecnologías orientadas a su producción a escala industrial.

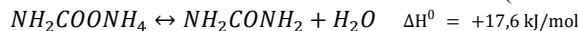
3.5 Unidad de producción de urea

Esta unidad modela el proceso de obtención de una solución concentrada de urea modelada a partir de CO₂ capturado y NH₃ de origen renovable. La síntesis se desarrolla considerando dos etapas principales:

- (a) Formación de carbamato de amonio (reacción rápida y exotérmica):

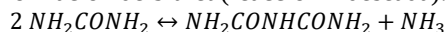


(b) Deshidratación de carbamato de amonio a urea (reacción lenta y endotérmica):



Asimismo, se contempla la reacción secundaria de formación de biuret a altas temperaturas ($\approx 200^\circ\text{C}$), compuesto indeseable por su impacto negativo en la calidad del fertilizante.

(c) Formación de biuret (reacción indeseada):



Se asume que las reacciones ocurren en fase líquida, modelando el sistema como homogéneo y en régimen continuo.

El proceso opera a alta presión y temperatura, e incluye etapas de separación y reciclo de reactivos no convertidos, obteniendo como productos finales urea y una corriente de agua. El esquema adoptado se basa en la tecnología Stamicarbon (Stamicarbon, 1968). Para modelar las propiedades termodinámicas, se emplea el modelo de coeficientes de actividad UNIQUAC para la fase líquida y la ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong, adecuada para las condiciones de alta presión, para la fase vapor.

El modelado del proceso se realizó de manera acoplada entre UniSim® Design y PolyMath 6.0. Las etapas de acondicionamiento de corrientes, compresión, separación y reciclo fueron simuladas en UniSim®, mientras que el reactor de síntesis de urea se resolvió externamente en PolyMath mediante un sistema de ecuaciones basado en balances de materia y energía junto con expresiones cinéticas para la formación de carbamato de amonio, urea y biuret. Las condiciones de alimentación al reactor (caudales, composición, temperatura y presión) fueron obtenidas desde UniSim® y utilizadas como datos de entrada del modelo cinético. Posteriormente, las composiciones y conversiones calculadas en PolyMath fueron incorporadas al esquema global de simulación para el diseño y evaluación de las etapas de separación y reciclado. Este enfoque permitió representar mejor el comportamiento reactivo del sistema, superando las limitaciones del simulador para el tratamiento de componentes iónicos y la formación de sólidos.

Antes de su ingreso al reactor, el CO_2 capturado se comprime en cuatro etapas con interenfriamiento (eficiencia isentrópica del 75%) hasta alcanzar 141,5 bar, mientras que el NH_3 líquido se presuriza mediante bombas hasta la misma presión. Se trabaja con una relación de alimentación NH_3/CO_2 de 3:1, favoreciendo altas conversiones de CO_2 y minimizando la formación de subproductos (Tessa-Giménez, 2023).

El reactor propuesto es un tanque agitado continuo con platos que promueven la mezcla y el contacto entre fases, en concordancia con configuraciones industriales reportadas en la literatura (Hamidipour *et al.*, 2005; Devkota *et al.*, 2024). Asimismo, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar su desempeño bajo condiciones isotérmicas y adiabáticas, así como la influencia del volumen y la temperatura de reacción sobre el rendimiento global.

Los resultados indican que la operación adiabática no resulta viable debido al carácter fuertemente exotérmico de la formación de carbamato, lo que genera picos de temperatura que afectan negativamente al proceso. En particular, se observa: (i) desplazamiento del equilibrio hacia los reactivos, reduciendo la conversión; (ii) incremento de la corrosión por carbamato; (iii) mayor formación de biuret; y (iv) aumento de la presión parcial de los componentes, comprometiendo la seguridad operativa. En consecuencia, se selecciona un reactor operando en condiciones

isotérmicas con remoción de calor. Esta configuración permite controlar la temperatura, mejorar el rendimiento hacia urea y aprovechar el calor liberado en la formación de carbamato para favorecer la etapa endotérmica de deshidratación, favoreciendo una operación estable y eficiente.

Luego, a partir de los perfiles obtenidos de volumen del reactor en función del rendimiento, se determinó que un volumen de 45 m³ maximiza la productividad del sistema bajo las condiciones operativas establecidas. Para este volumen, el tiempo de residencia calculado es de 0,5 h, valor consistente con rangos industriales típicos que permiten una adecuada deshidratación del carbamato de amonio sin favorecer la formación de subproductos indeseables.

Por otro lado, se analizó la evolución de las selectividades del sistema reaccionante en función de la temperatura de reacción. Los perfiles obtenidos permiten identificar una ventana operativa óptima, en la que se maximiza la formación de urea y se minimizan las reacciones secundarias. El rango óptimo de operación se identifica entre 530–540 K, ligeramente superior a valores típicos reportados, lo cual se atribuye a las condiciones específicas del modelo. El incremento de la temperatura favorece la cinética de reacción, pero también promueve la descomposición térmica de la urea. En particular, a temperaturas elevadas se observa un aumento en la selectividad hacia la formación de biuret, lo que impacta negativamente en la pureza del producto y en el rendimiento global del proceso.

Una vez definido el reactor, se procedió al diseño y simulación del sistema de separación, cuyo objetivo es recuperar y reciclar las materias primas no convertidas, así como concentrar la solución de urea para su posterior granulación. El sistema de separación está compuesto por dos etapas de destilación instantánea (*flash*) seguidas de un sistema de evaporación de triple efecto. El primer *flash* opera a alta presión (14,2 MPa) y permite descomponer el carbamato de amonio en CO₂ y NH₃, facilitando su recirculación directa al reactor. El segundo *flash* opera a menor presión (350 kPa) y temperatura controlada, evitando la descomposición de la urea y permitiendo la separación del NH₃ remanente, el cual se recicla a la alimentación.

Para la etapa de concentración, se modeló un sistema de evaporadores de triple efecto, representando cada efecto mediante una válvula y un separador *flash*. Dado el riesgo de descomposición térmica de la urea, se seleccionó operación al vacío, con una temperatura mínima de 10 °C. La configuración de tres efectos permite mejorar la eficiencia energética mediante el aprovechamiento del vapor generado en cada etapa. Se obtuvo una economía de vapor de 1,54, con un consumo de 4,4 t/h de vapor vivo.

Los resultados (Tabla 4) muestran un incremento progresivo en la concentración de urea a lo largo de los efectos, alcanzando una composición de 98,9% m/m en la corriente final, valor adecuado para su posterior granulación. Esta concentración se ubica en el rango superior de los valores industriales reportados, lo cual resulta consistente con la operación bajo vacío y el empleo de un sistema de evaporación de múltiples efectos. Asimismo, las condiciones de operación muestran un adecuado control de la temperatura y la presión en cada etapa, permitiendo evitar la degradación térmica del producto.

Como resultado global de la unidad, se obtiene una producción de 28,5 t/h ($\approx$ 250 kt/año) de urea bajo las condiciones seleccionadas de operación.

Tabla 4. Resultados de la simulación del sistema de separación.

Corriente	Fracción másica de urea (%)	Vapor generado (t/h)	Temperatura (K)	Presión (kPa)
Flash 1	-	-	469	14150
Flash 2	-	-	337	350
Efecto 1	86,9	2,91	383	175
Efecto 2	95,7	2,98	365	75
Efecto 3	98,9	0,94	333	20

3.6 Resultados de la simulación

En la Tabla 5 se presentan los indicadores de desempeño del proceso propuesto. Los resultados destacan una alta conversión global de CO₂ (78,1%), indicando un aprovechamiento casi completo del carbono alimentado. Asimismo, la conversión de carbamato a urea en el reactor alcanza valores cercanos al 79%, lo que refleja una elevada eficiencia en la etapa de síntesis del producto final. El rendimiento global de urea (1,06 kg urea/kg CO₂) confirma la efectividad del esquema de proceso en la transformación del carbono capturado. En términos energéticos, el consumo eléctrico resulta significativo, lo que sugiere la necesidad de optimizar la integración energética del sistema para mejorar su viabilidad global.

Tabla 5. Resultados de los indicadores de desempeño técnico.

Indicador	Valor	Unidad	Objetivo técnico
Conversión global de CO ₂	78,1	%	Eficiencia de fijación de carbono
Rendimiento molar de urea	0,78	kmolurea/ kmol CO ₂	Eficiencia global de transformación
Consumo total y específico de energía	39,1	GJ/t urea	Eficiencia energética y viabilidad del proceso

Los indicadores obtenidos muestran un desempeño consistente con los valores reportados para procesos modernos de producción de urea basados en captura de carbono e H₂ renovable. En particular, la conversión global de CO₂ alcanzada (78,1 %) evidencia un aprovechamiento eficiente del carbono capturado y confirma la viabilidad técnica de su integración en esquemas de producción de fertilizantes de baja huella de carbono. Asimismo, la capacidad de producción obtenida (≈250 kt/año) se encuentra dentro del rango de plantas industriales de escala media reportadas en la literatura (Devkota et al., 2024), y representa aproximadamente una cuarta parte de la capacidad de las unidades de gran escala.

Cabe destacar que las secciones de síntesis de NH₃ y urea de este trabajo mantienen configuraciones tecnológicas similares a las utilizadas en procesos convencionales, siendo la principal diferencia el origen de las materias primas. Mientras que en la ruta tradicional el H₂ y el CO₂ provienen del reformado con vapor de gas natural, en el esquema propuesto se emplea H₂ generado mediante electrólisis alimentada con energía renovable y CO₂ biogénico capturado de gases de combustión. En este sentido, el diseño propuesto resulta representativo de una instalación industrial para la producción

de urea con fuentes de CO₂ de origen biogénico. En consecuencia, el mayor desafío de los procesos de urea verde no radica en la síntesis química propiamente dicha, sino en la elevada demanda energética asociada a la producción de H₂ renovable, aspecto identificado de manera consistente en estudios recientes sobre descarbonización del sector de fertilizantes (Khan *et al.*, 2024; Mao *et al.*, 2024).

4 Conclusiones

La producción de fertilizantes nitrogenados es un proceso químico intensivo en energía, responsable de significativas emisiones de gases de efecto invernadero y fuertemente dependiente de combustibles fósiles. En este trabajo se desarrolló y evaluó un esquema de producción de urea a partir de CO₂ residual de una biorrefinería sucroalcoholera mediante modelado y simulación de procesos.

Los resultados destacan la factibilidad técnica del sistema, alcanzando elevados niveles de conversión de CO₂ y rendimiento de urea. Desde el punto de vista energético, el proceso presenta una elevada demanda eléctrica. Este resultado pone de manifiesto que, en esquemas de valorización de CO₂, la disponibilidad de energía renovable se convierte en un factor determinante para su implementación a escala industrial.

Como líneas futuras de investigación, se prevé complementar el análisis técnico mediante una evaluación tecnoeconómica integral, incorporando la estimación de costos de inversión y operación, así como indicadores de rentabilidad asociados a la integración propuesta. Asimismo, se contempla evaluar el impacto ambiental mediante un Análisis de Ciclo de Vida comparativo, que permita cuantificar con precisión la reducción de la huella de carbono respecto a la producción convencional de urea basada en reformado de metano. Estos estudios permitirán valorar de manera integral la viabilidad técnica, económica y ambiental del esquema propuesto para su eventual implementación a escala industrial.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Tucumán (proyectos PIUNT E704/2023 y E733/2023), a la Agencia I+D+i por el proyecto PICT-2021-GRF-TI-00826, al Consejo Interuniversitario Nacional por la beca estudiantil EVC-CIN-2024 de G.P.E.A y, a CONICET por el proyecto PIP-1007 y la beca doctoral de A.M.C.

Referencias

- Appl, M. (1999). *Ammonia: Principles and Industrial Practice*. Wiley-VCH.
- Battaglia, P., Buffo, G., Ferrero, D., Santarelli, M., & Lanzini, A. (2021). Methanol synthesis through CO₂ capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment. *Journal of CO₂ Utilization*, 44, 101407. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101407>
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
- Cuezco, A. M., Araujo, P. Z., & Mele, F. D. (2021). Simulación de un proceso de fabricación de metanol a partir de fuentes renovables. In *IV Simposio Argentino de Informática Industrial e*

- Cuezso, A. M., Araujo, P. Z., Wheeler, J., & Mele, F. D. (2023). Modeling and environmental implications of methanol production from biogenic CO₂ in the sugarcane industry. *Journal of CO₂ Utilization*, 67, 102301. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102301>
- Devkota, S., Karmacharya, P., Maharjan, S., Khatiwada, D., & Upreti, B. (2024). Decarbonizing urea: Techno-economic and environmental analysis of a model hydroelectricity and carbon capture-based green urea production. *Applied Energy*, 372, 123789. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123789>
- Fuster Justiniano, J., Arteaga Guaquín, Y., & Farías Hermosilla, R. (2022). Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización. Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH y Ministerio de Energía de Chile.
- Galusnyak, S. C., Petrescu, L., Sandu, V. C., & Cormos, C. C. (2023). Environmental impact assessment of green ammonia coupled with urea and ammonium nitrate production. *Journal of Environmental Management*, 343, 118215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118215>
- Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Aso, G., Correa, C. A., & Paz, D. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 85(2), 17–31.
- Hamidipour, M., Mostoufi, N., & Sotudeh-Gharebagh, R. (2005). Modeling the synthesis section of an industrial urea plant. *Chemical Engineering Journal*, 106(3), 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.020>
- International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. <https://doi.org/10.1787/c8328405-en>
- Khan, A., Abbas, A., & Dickson, R. (2024). Towards a low-carbon future: exploring green urea synthesis for sustainable agriculture. *Green Chemistry*, 26(3), 1551–1565. <https://doi.org/10.1039/D3GC03228K>
- Kent, R. L., & Eisenberg, B. (1976). Better data for amine treating. *Hydrocarbon Processing*, 55, 87–90.
- Lopes, D., & Teles dos Santos, M. (2026). Decarbonizing the fertilizer sector: Evaluation of renewable urea production from agro-industrial wastes through process modeling and supply chain optimization. *Chemical Engineering Research and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2026.01.020>
- Mao, C., Byun, J., MacLeod, H. W., Maravelias, C. T., & Ozin, G. A. (2024). Green urea production for sustainable agriculture. *Joule*, 8(5), 1224–1238.
- Milani, D., Kiani, A., Haque, N., Giddey, S., & Feron, P. (2022). Green pathways for urea synthesis: A review from Australia's perspective. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 1, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2022.100008>
- Nunes, R. S. G., de Mello Deloss, A., Martinazzo, R., Bamberg, A. L., Silveira, C. A. P., Bayer, C., ... Vieira, F. C. B. (2023). Mitigation of ammonia and greenhouse gases emissions from urea coated with oil shale residues in a silvopastoral system. *Journal of Environmental Management*, 326, 116779. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116779>
- Penuelas, J., Coello, F., & Sardans, J. (2023). A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture & Food Security*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
- Renon, H., & Prausnitz, J. M. (1968). Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures. *AIChE journal*, 14(1), 135–144. <https://doi.org/10.1002/aic.690140124>
- Río Negro (2026). *De la energía al campo: Pampa Energía busca USD 1.500 millones para construir una planta de urea en Bahía Blanca*. Río Negro. Disponible en: <https://www.rionegro.com.ar/energia/de-la-energia-al-campo-pampa-energia-busca-usd-1->

- 500-millones-para-construir-una-planta-de-urea-en-bahia-blanca-4524552/ (acceso: 16 de abril de 2026).
- Shirmohammadi, R., Aslani, A., Ghasempour, R., & Romeo, L. M. (2020). CO₂ utilization via integration of an industrial post-combustion capture process with a urea plant: Process modelling and sensitivity analysis. *Processes*, 8(9), 1144. <https://doi.org/10.3390/pr8091144>
- Stamicarbon B.V. (1968). *Process for the preparation of urea*. US Patent 3,366,682.
- Taipabu, M. I., Viswanathan, K., & Wu, W. (2023). Process design and optimization of green processes for the production of hydrogen and urea from glycerol. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(63), 24212–24241. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.163>
- Tessa-Gimenez, L. (2023). *Process design for green urea production from renewable resources* (Master's thesis, Lappeenranta–Lahti University of Technology).
- Unisim Design Suite®. *Software for process design and simulation*. Honeywell International Inc.. <https://www.honeywellprocess.com>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World Population Prospects 2019: Highlights*. United Nations. <https://population.un.org/wpp/>
- Varela, C., Zea, F., Correa, O., & Camarda, K. V. (2024). A simulation-based integration of carbon capture and utilization in a urea production process. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 53, 2065–2070. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28824-1.50345-8>
- Vila, P. L. C., Serrano, M. Á. L., & Sánchez, A. H. (2001, julio). *Modelización y simulación de plantas criogénicas de separación de aire con HYSYS*. En *I Encuentro Universitario sobre Simulación de Procesos*. Universidad de Zaragoza, Valencia, España.