

Análisis de competitividad para la producción de amoníaco verde en México

As a federally owned enterprise, GIZ supports the German Government in achieving its objectives in the field of international cooperation for sustainable development.

Published by:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Registered offices

Bonn and Eschborn, Germany

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn, Deutschland
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de
I www.giz.de

Revisado por

Javier Arturo Salas Gordillo, GIZ
Lorena Espinosa Flores, GIZ

Autores

Juan Antonio Gutiérrez Rodríguez, NTT Data
Juan Gerardo Juárez Hermosillo, NTT Data
Gisela Ivette Martínez Rodríguez, NTT Data

Layout

peppermint werbung berlin GmbH, Berlin

The International Hydrogen Ramp-up Programme (H2Uppp) of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) promotes projects and market development for green hydrogen in selected developing and emerging countries as part of the National Hydrogen Strategy.

Bonn, April 2024

Tablas	5
Figuras	5
Abreviaturas, siglas y términos	7
Resumen ejecutivo.....	9
1 Mercados nacionales e internacionales de amoníaco	11
1.1 Mercado internacional del NH ₃	12
1.1.1 Demanda global del NH ₃	12
1.1.2 Prospectiva del mercado global del NH ₃	19
1.2 Mercado del NH ₃ en México	26
1.2.1 Cadena de valor del NH ₃ en México.....	26
1.2.2 Caracterización de la demanda histórica y proyectada en México	27
1.2.3 Capacidad productiva actual y proyectada en México	33
2 Costos nivelados de producción y transporte del amoníaco verde	36
2.1 Consideraciones generales sobre la producción, manejo, y exportación de NH ₃	36
2.1.1 Producción	36
2.1.2 Manejo.....	36
2.2 Premisas para la estimación de los costos nivelados de producción y transporte	37
2.2.1 Costo nivelado para la electricidad (LCOE) para México	37
2.2.2 Costo nivelado del hidrógeno (LCOH) para México	38
2.2.3 Costo nivelado del amoníaco (LCOA) para México.....	38
2.2.4 Levelized Cost of Overseas Hydrogen and Carriers Transport.....	39
2.3 Costo nivelado de producción de amoníaco en México	39
2.3.1 Puertos de exportación	39
2.3.2 Costos de producción del amoníaco verde.....	40
2.4 Identificación de mercados de destino.....	44
2.5 Exportación de amoníaco verde desde México.....	47
2.5.1 Costo del transporte hacia los mercados destino	47
2.5.2 Costo de exportación del amoníaco mexicano en 2025	47
2.5.3 Costo de exportación del amoníaco mexicano en 2030	49
2.5.4 Costo de exportación del amoníaco mexicano en 2040	50
2.5.5 Coatzacoalcos: caso de producción en Salina Cruz y transporte mediante amoniaducto a Veracruz	51
2.5.6 Análisis de costos para la competitividad de la exportación del NH ₃ mexicano.....	53
3 Rentabilidad de la producción de amoníaco verde y potenciales mercados para su distribución	54
3.1 Determinantes del precio de mercado	54
3.1.1 Costo de las emisiones de CO _{2e}	55
3.1.2 Demanda internacional en mercados clave.....	60
3.2 Panorama de rentabilidad en México	63
3.2.1 Rentabilidad internacional del amoníaco verde mexicano	63
3.2.2 Rentabilidad del amoníaco verde en México	64
3.3 Panorama competitivo internacional	67

3.3.1	Efecto del costo de capital en el costo nivelado	69
4	Análisis de sensibilidad	70
4.1	VARIABLES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	70
4.2	Economías de escala de los proyectos	71
4.2.1	Relevancia de las economías de escala	71
4.2.2	Acciones para el control de la variable	71
4.2.3	Resultados.....	71
4.3	CAPEX de la electrólisis	73
4.3.1	Relevancia del CAPEX de la electrólisis	73
4.3.2	Acciones para el control de la variable	73
4.3.3	Resultados.....	73
4.4	Instrumentos regulatorios en bajo carbono.....	75
4.4.1	Relevancia de los instrumentos en bajo carbono.....	75
4.4.2	Acciones para el control de la variable	75
4.4.3	Resultados.....	75
4.5	Factor de planta de los proyectos renovables	77
4.5.1	Relevancia del factor de planta de los proyectos renovables.....	77
4.5.2	Acciones para el control de la variable	77
4.5.3	Results	77
4.6	Costo de la energía eléctrica renovable	79
4.6.1	Relevancia del costo de la energía eléctrica renovable.....	79
4.6.2	Acciones para el control de la variable	79
4.6.3	Resultados de México.....	79
5	Oportunidades de financiamiento	81
6	Conclusiones.....	84
7	Referencias bibliográficas.....	86
8	Anexos	88
8.1	Anexo 1: Libro de consideraciones para el cálculo de costos nivelados del estudio	88
8.2	Anexo 2: Listado de actores entrevistados	92

Tablas

Tabla 1. Consumo aparente de NH ₃ en México (kt, 2000–2022)	27
Tabla 2. Aspectos clave de las instalaciones de producción de NH ₃ y productos seleccionados en México (2023).....	34
Tabla 3. Parámetros clave de los principales países con potencial de recibir amoníaco verde de México	45
Tabla 4. Análisis de indicadores financieros para el amoníaco verde mexicano	66
Tabla 5. Resumen de las variables estudiadas en el análisis de sensibilidad del proyecto	70
Tabla 6. Supuestos para el Cálculo del Costo Nivelado de Electricidad	88
Table 7. Supuestos para el cálculo del Costo Nivelado de Hidrógeno	89
Table 8. Supuestos para el cálculo del Costo Nivelado del Amoníaco	90

Figuras

Figura 1. Cadena de valor del amoníaco	11
Figura 2. Usos actuales de la demanda global de amoníaco (183 Mton)	12
Figura 3. Aplicación de fertilizantes nitrogenados por productos (2020) y demanda mundial usos del amoníaco (2000–2020)..	13
Figura 4. Mapa y evolución del consumo aparente de países fuera de ALC (2021)	14
Figura 5. Top países importadores, exportadores y productores de amoníaco	15
Figura 6. Mapa países importadores y exportadores de amoníaco	16
Figura 7. Mapa y evolución del consumo aparente de países de ALC (2021)	17
Figura 8. Referencias de precios regionales del NH ₃ (arriba) y del gas gas natural (2011– 2022).....	18
Figura 9. Regulaciones y acciones de promoción al amoníaco verde del top países importadores y exportadores	19
Figura 10. Usos prospectivos del NH ₃ verde.....	20
Figura 11. Proyección de la demanda mundial de amoníaco y derivados (kt, 2021–2051)	22
Figura 12. Proyección de la demanda mundial de amoníaco y derivados (kt, 2025, 2030 y 2040)	22
Figura 13. Mapa de proyectos actuales y anunciados de amoníaco verde en el mundo	25
Figura 14. Red de valor del amoníaco en México y aplicaciones seleccionadas.....	26
Figura 15. Composición de las importaciones y exportaciones de amoníaco y derivados desde y hacia México (promedio 2011–2021)	28
Figura 16. Importaciones derivados amoníaco hacia México (kt, 2021)	29
Figura 17. Exportaciones de amoníaco y derivados desde México (kt, 2021)	29
Figura 18. Balanza comercial de amoníaco y derivados seleccionados en México (kt, 2011–2021).....	30
Figura 19. Demanda histórica de amoníaco y derivados seleccionados en México por volumen (arriba) y contenido de NH ₃ (abajo) (kt, 2011–2021)	31
Figura 20. Esquemático de la producción, comercio internacional y uso final del NH ₃ en México (kt, 2021).....	32
Figura 21. Demanda proyectada de amoníaco y derivados en México (kt, 2021–2051).....	33
Figure 22. Mapa de capacidad productiva actual y proyectada para la producción de NH ₃ en México (2023).....	35
Figure 23. Producción estimada de NH ₃ y fertilizantes seleccionados en México (kt, 2021–2031)	35
Figura 24. Puertos relevantes para el comercio de NH ₃ vs. infraestructuras existentes en las regiones	40
Figura 25. Cálculo de LCOA híbrido por región de la República Mexicana de 2025–2040	42
Figura 26. Proyección de los costos nivelados del NH ₃ verde en México (USD/t NH ₃ , 2025, 2030 y 2040)	43
Figure 27. Metodología para la identificación de potenciales destinos de exportación del NH ₃ verde desde México.....	44
Figura 28. Potenciales mercados importadores de NH ₃ verde mexicano	46
Figura 29. Costo de transporte (USD/tonNH ₃) de NH ₃ desde México.....	47
Figura 30. Costos en puerto de destino del amoníaco mexicano en 2025.....	48
Figura 31. Desglose del costo de exportación del NH ₃ de México a Alemania (2025)	48
Figura 32. Costos en puerto de destino del amoníaco mexicano en 2030.....	49
Figura 33. Desglose del costo de exportación del NH ₃ de México a Alemania (2030)	49
Figura 34. Costos en puerto de destino del amoníaco mexicano en 2040.....	50
Figura 35. Desglose del costo de exportación del NH ₃ de México a Alemania (2040)	51

Figura 36. Costo de transporte del amoníaco mediante amoniaducto	52
Figura 37. Costos de exportación del amoníaco mexicano en 2030, considerando el uso del amoniaducto Coatzacoalcos – Salina Cruz	52
Figura 38. Composición del LCOH, LCOA y el costo de NH ₃ de Mexicali a Alemania.....	53
Figura 39. Componentes del precio de mercado del amoníaco y consideraciones.....	55
Figura 40. Actividades económicas sujetas a la primera fase del CBAM	56
Figure 41. Precio estimado de las emisiones de CO _{2e} en países seleccionados (USD/tCO _{2e} ; 2023–2050).....	57
Figura 42. Precios indexados del ecosistema del NH ₃ en el contexto inflacionario global y precio del gas natural en ALC	58
Figura 43. Precio del gas natural en el clúster energético Henry Hub bajo escenarios seleccionados de la EIA (USD/mmBTU 2022–2040)	59
Figura 44. Consumo aparente de NH ₃ por mercado prioritario (Mt, 2017–2022)	60
Figura 45. Costo promedio de importación del NH ₃ por mercado prioritario (USD/t NH ₃ , 2017–2022).....	61
Figura 46. Evolución de acuerdos comerciales sobre amoníaco verde en mercados prioritarios	61
Figura 47. Rentabilidad del NH ₃ verde en el contexto de México (USD/t, 2017–2023)	63
Figura 48. Análisis de rentabilidad del NH ₃ renovable mexicano en mercados internacionales seleccionados (23'USD/TM + c/CO _{2e} tax, 2023–2040)	64
Figura 49. Análisis de rentabilidad del -NH ₃ renovable mexicano en mercados internacionales seleccionados (23'USD/TM + c/CO _{2e} tax, 2023–2040; caso alto CH ₄).....	65
Figura 50. Producción y capacidad instalada de proyectos Power-to-Ammonia por región (kt y MW _{ez} , 2022)	67
Figura 51. Rentabilidad del amoníaco verde de países competidores en mercados internacionales prioritarios (23'USD/TM + c/CO _{2e} tax, 2023–2040)	68
Figura 52. Rango de sensibilidad del LCOH ante mejoras en el costo del capital en países seleccionados (20's USD/kg H ₂ , 2050)	69
Figura 53. Resultados del análisis de sensibilidad – Economías de Escala en México.....	72
Figura 54. Resultados del análisis de sensibilidad – CAPEX de electrólisis en México.....	74
Figura 55. Resultados del análisis de sensibilidad – Instrumentos regulatorios en bajo carbono en México	76
Figura 56. Resultados del análisis de sensibilidad - Factor de planta de proyectos en México.....	78
Figura 57. Resultados del análisis de sensibilidad – Costo de la energía renovable en México	80
Figura 58. Panorama de alto nivel sobre la oferta de financiamiento en el marco de proyectos Power-to-X (PtX).....	81
Figura 59. Evolución del flujo de financiamiento hacia proyectos Power-to-NH ₃	82
Figura 60. Oportunidades de financiamiento bilateral y multilateral para México	82
Figura 61. Public sector financing opportunities in Mexico.....	83
Figura 62. Oportunidades de financiamiento bursátil y de capital de riesgo en México.....	83

Abreviaturas, siglas y términos

AHMSA	Altos Hornos de México, S.A.
CFR	Cost and Freight (Incoterm) Este término incluye los costos y el flete necesario para llevar la mercancía al puerto de destino, siendo responsabilidad del comprador
CPC	Complejo Petroquímico Cosoleacaque
DAP	Fosfato Diamónico
FOB	Free On-Board Price (Incoterm) Indica que el vendedor ha cumplido con su responsabilidad una vez que la mercancía ha sido cargada a bordo del barco en el puerto de embarque especificado
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GJ	Gigajulios
H₂V	Hidrógeno verde producido a partir de energía eléctrica renovable
Hidróxido de amonio	Compuesto químico
IAPH	Asociación Internacional de Puertos y Terminales
ICS	Cámara Internacional de Navegación
IMDG	Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)
ISGOTT	Guía Internacional para los Terminales de Buques Tanque
km	Kilómetros
kt	Kilotoneladas
LCOA	Costo Nivelado de Amoníaco
LCOH	Costo Nivelado de Hidrógeno
MAP	Fosfato Monoamónico
mmBTU	Millones de unidades térmicas británicas
Mt	Millones de toneladas
MW	Megavatios
Mwez	MegaWatt eléctrico (electrólisis)
NH₃	Amoníaco
Nitrato de amonio	Compuesto químico
Nitrato de calcio	Compuesto químico
Nitrato de calcio amónico (CAN)	Compuesto químico
NTT DATA	Empresa responsable de este estudio
OMI	Organización Marítima Internacional
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos
REACH	Reglamento de la Unión Europea sobre productos químicos
TACC	Tasa Anual Compuesta de Crecimiento
ton	Tonelada métrica
tpd	Toneladas por día
USD/	Dólares estadounidenses por (unidad no especificada)
USD/Kw	Dólares estadounidenses por kilovatio
USD/MWh	Dólares estadounidenses por megavatio-hora
USD/tonCO₂eq	Dólares estadounidenses por tonelada de CO ₂ equivalente
%FLH	Porcentaje de horas de funcionamiento a plena carga

Códigos de país ISO 3166-1 alfa 3

COL	Colombia
DEU	Alemania
GBR	Reino Unido
JPN	Japón
KOR	Corea del Sur
MEX	México
NLD	Países Bajos
PAN	Panamá
SAU	Arabia Saudita
USA	Estados Unidos

Resumen ejecutivo

Contexto del amoníaco y sus derivados

- Petróleos Mexicanos (PEMEX), la empresa del Estado mexicano es el único productor de amoníaco (NH_3) en México, este se usa para la producción de urea principalmente. PEMEX fabricó en promedio ≈ 500 kt de NH_3 por año en el período 2011 – 2021, sin embargo, dado el suministro intermitente de gas natural y el estado de las plantas, desde 2014 México ha importado cada vez más NH_3 y derivados.
- En 2018 México mostró el mayor déficit comercial de fertilizantes nitrogenados con -3,862 kt (última fecha de reporte).
- Rusia y China exportaron más de 1 millón de toneladas de fertilizantes hacia México en 2021. Las principales aduanas de internación están en los puertos de Topolobampo, Coatzacoalcos, Lázaro Cárdenas y Salina Cruz, lo que coincide con la ubicación de los estados con mayor producción agrícola: Michoacán, Jalisco, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, y Veracruz.
- Como impulsor de la demanda de amoníaco, en el periodo 2011–2021 el consumo de urea presentó una tasa anual de crecimiento compuesto (TACC) de 3.5% a nivel nacional.
- El mercado de amoníaco en México podría crecer 2.7 veces hacia el año 2050, con relación al tamaño registrado en 2021, gracias al incremento en la demanda de urea.
- Para 2030 el requerimiento neto de amoníaco en México será de 1,895 kt (2021: $\approx 1,673$).
- Hacia 2030 y 2040, México podría demandar 62.6 y 267.4 kt de NH_3 como combustible marítimo de uso nacional, respectivamente. Actualmente ya existen proyectos de amoníaco renovable en desarrollo en el país, el consorcio Mexicano-Alemania formado por MexCo y Hy2gen anunció un proyecto que producirá 170 kt NH_3 /año empezando en 2028. Por otro lado Tarafert está desarrollando un proyecto para producir 300 kt NH_3 /año y 1,000 kt/año de urea a partir de gas natural con captura de carbono para 2026, mientras que GPO – PROMAN anunció otro proyecto que producirá 770 kt/año de amoníaco gris para el mismo periodo.

LCOA y oportunidades de exportación

- Entre los sitios estudiados para la producción de amoníaco verde Mexicali destaca como la opción más rentable económicamente para exportar NH_3 hacia múltiples países en el corto y largo plazo (2025–2040), sin embargo existen retos asociados importantes como el uso de agua desalinizada y el desarrollo de infraestructura Portuaria en la zona de Tijuana – Ensenada.
- Debido a su alto potencial solar fotovoltaico, Mexicali podría romper la barrera de los 1,000 USD/ton NH_3 para 2025; y para 2030, este sitio podría romper también la barrera de los 700 USD/ton NH_3 , con costos nivelados de amoníaco de 984, 682 y 527 USD/ton NH_2 en 2025, 2030 y 2040, respectivamente.
- Salina Cruz es el segundo mejor sitio entre los estudiados para producir amoníaco verde, favorecido por su potencial eólico con LCOA de 1017, 742 y 586 USD/ton NH_3 en 2025, 2030 y 2040, respectivamente.
- Para 2030 la mayoría de las rutas de exportación de amoníaco desde México, el costo de llegada del amoníaco verde a los destinos estudiados (Alemania, China, Corea del Sur, Estados Unidos y Japón) se encuentra por debajo de los 1000 USD/ton. Incluso en las rutas desde Mexicali hacia Corea del Sur, Japón y Estados Unidos se rompe la barrera de los 800 USD/ton.
- En lo que respecta a la exportación de amoníaco hacia Estados Unidos: Laredo se mantiene como la opción de menor costo, mediante el transporte vía tren de la molécula con un costo de llegada del amoníaco de 761 USD/ton.
- Para 2040, Baja California y Sonora podrían ser las regiones de mayor costo-competitividad para la producción y exportación de amoníaco verde. Para este mismo año, Topolobampo (alto potencial solar fotovoltaico) se logra posicionar como el segundo sitio con costos de producción más competitivos en México, superando a Salina Cruz, un sitio que está dominado por su potencial eólico.
- La disponibilidad de electricidad a bajo costo es un factor crucial para alcanzar precios competitivos tanto en la producción de hidrógeno como de amoníaco. Garantizar un suministro de electricidad eficiente y económico resulta fundamental para alcanzar la rentabilidad deseada en la producción de amoníaco en los países de destino.

Competitividad del país en amoníaco verde

- La competitividad del amoníaco verde frente al gris dependerá del desempeño de los costos de cada uno. Por el lado del amoníaco verde, los principales factores que jugarán a favor de su competitividad es el aumento de la eficiencia

de procesos como la generación renovable, electrólisis y síntesis de amoníaco, mientras que para el amoníaco gris, la competitividad dependerá de su costo de producción (eficiencia del proceso más el costo de mercado del gas y la inversión en equipos, de ser necesaria), los gastos de operación y administración, la rentabilidad (ganancia) esperada por los productores y sus inversionistas y algo muy importante: la inclusión de externalidades del uso de recursos fósiles en el costo del amoníaco gris y su cobro mediante posibles impuestos a carbono, lo cual podría encarecer significativamente el precio del amoníaco fósil.

- Tan pronto como en 2030 el amoníaco verde producido en México estaría por debajo de los precios máximos históricos observados en EUA durante 2022 (800 a 950 USD/ton NH_3). Por su parte, el escalamiento de los impuestos al carbono vendría a cerrar la brecha para dar competitividad al NH_3 verde suministrado desde México
- Con base en el análisis de potenciales precios del amoníaco gris frente al verde, se observa que los mercados europeos y el de Estados Unidos representan las oportunidades inmediatas para la exportación; esto, sin dejar de lado que la costa del pacífico en México presenta costos competitivos para la exportación hacia Japón.
- La competitividad del amoníaco renovable se aceleraría fuertemente hacia finales de esta década; particularmente, aquel producido en Mexicali y Salina Cruz, alcanzando los 682 USD/ton en Mexicali y los 742 USD/ton en Salina Cruz, que lo acercaría a los costos del amoníaco gris.

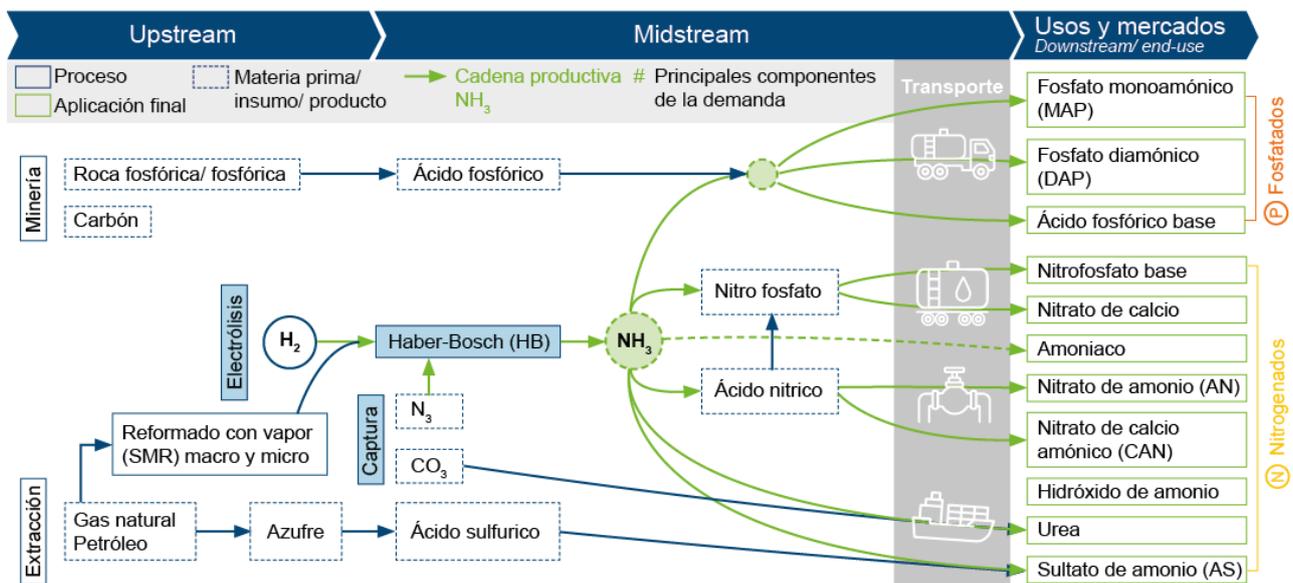
1 Mercados nacionales e internacionales de amoníaco

El amoníaco es un compuesto químico de gran importancia en diversas industrias, principalmente la agroquímica, y su producción y comercio desempeñan un papel fundamental en la economía global. Su versatilidad y propiedades físicas y químicas lo convierten en un recurso valioso en sectores como la agricultura, la industria química y la energética. En la agricultura, se utiliza como una fuente de nitrógeno para la elaboración de fertilizantes. Asimismo, el amoníaco es empleado en la industria química como materia prima para la síntesis de una amplia gama de compuestos, incluyendo plásticos, explosivos y productos de limpieza. El amoníaco también se ha convertido en una opción para la producción de combustibles alternativos sostenibles. Estas aplicaciones demuestran la importancia del amoníaco en el panorama industrial actual y su potencial para desempeñar un papel clave en la transición hacia una economía más sostenible.

La cadena de valor del amoníaco consta de tres grandes fases: *upstream*, *midstream* y *downstream* (Figura 1). Estas fases abarcan una serie de procesos que permiten la transformación de diversos productos en compuestos terminados de amoníaco, los cuales encuentran aplicaciones en diversas industrias.

En la fase *upstream*, la producción de amoníaco se lleva a cabo principalmente a través del proceso de Haber-Bosch, el cual involucra la síntesis de nitrógeno e hidrógeno en condiciones de alta presión y temperatura, utilizando catalizadores. El nitrógeno se obtiene del aire y el hidrógeno puede generarse a partir de gas natural, carbón o agua, mediante el proceso de electrólisis.

Figura 1. Cadena de valor del amoníaco



Fuente: NTTDATA con base en IEA (2022); IRENA (2022)

Una vez producido, el amoníaco debe ser transportado de manera segura y eficiente hacia los puntos de distribución y consumo. En la fase, denominada *midstream*, se incluyen los procesos de almacenamiento, logística y transporte. El amoníaco se puede transportar en forma líquida, ya sea a través de tuberías o en tanques criogénicos, lo cual permite su distribución a nivel nacional, regional e internacional. Además, existen buques especializados para el transporte de amoníaco a larga distancia. La infraestructura de transporte desempeña un papel crucial en la cadena de suministro del amoníaco.

En la etapa *downstream* en su cadena de valor, el amoníaco se comercializa y se aprovecha en diversos segmentos y aplicaciones finales, demostrando su versatilidad y contribución a múltiples sectores. El amoníaco tiene una variedad de usos y abarca una amplia gama de compuestos nitrogenados y fosfatados, que son fundamentales en numerosos procesos y productos. Algunos de estos compuestos incluyen:

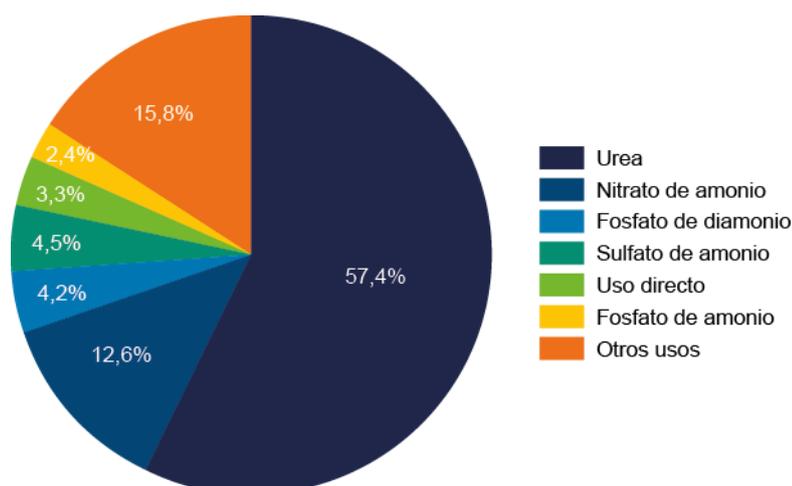
- **Fosfato monoamónico (MAP) y Fosfato diamónico (DAP):** estos compuestos se utilizan ampliamente como fertilizantes en la agricultura debido a su alta concentración de nitrógeno y fósforo, nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.
- **Ácido fosfórico base:** es un componente clave en la industria de alimentos y bebidas, ya que se utiliza en la producción de refrescos, alimentos procesados y aditivos alimentarios.
- **Yeso:** se utiliza en la construcción y la agricultura. En la construcción, se emplea como material de construcción y aditivo para mejorar la calidad del suelo en la agricultura.
- **Nitrofosfato base:** se trata de un fertilizante compuesto que combina nitrógeno, fósforo y otros elementos esenciales para nutrir el suelo y promover el crecimiento de las plantas.
- **Nitrato de calcio:** utilizado como fertilizante y fuente de nitrógeno y calcio para las plantas.
- **Nitrato de amonio:** un compuesto químico altamente utilizado en la industria de explosivos y pirotecnia debido a su alta capacidad de oxidación.
- **Nitrato de calcio amónico (CAN):** se emplea como fertilizante en la agricultura, proporcionando nitrógeno y calcio a las plantas.
- **Hidróxido de amonio:** un compuesto químico utilizado en la producción de productos de limpieza y detergentes, así como en la fabricación de productos farmacéuticos y textiles.
- **Urea:** uno de los fertilizantes nitrogenados más utilizados en la agricultura, que proporciona una fuente de nitrógeno de liberación lenta para las plantas.
- **Sulfato de amonio (AS):** utilizado como fertilizante en la agricultura, aportando nitrógeno y azufre a las plantas.

1.1 Mercado internacional del NH₃

1.1.1 Demanda global del NH₃

Actualmente, la demanda mundial de amoníaco es principalmente atribuible a su uso en la producción de fertilizantes, principalmente nitrogenados. De los 183 millones de toneladas demandados del producto globalmente (2019), aproximadamente el 57,4% se destina a la fabricación de urea, un componente esencial en la producción de fertilizantes agrícolas. En la siguiente figura es posible observar como el nitrato de amonio, que se emplea en la fabricación de explosivos y fertilizantes nitrogenados, representa el 12,6% de la demanda total de amoníaco a nivel mundial.

Figura 2. Usos actuales de la demanda global de amoníaco (183 Mton)



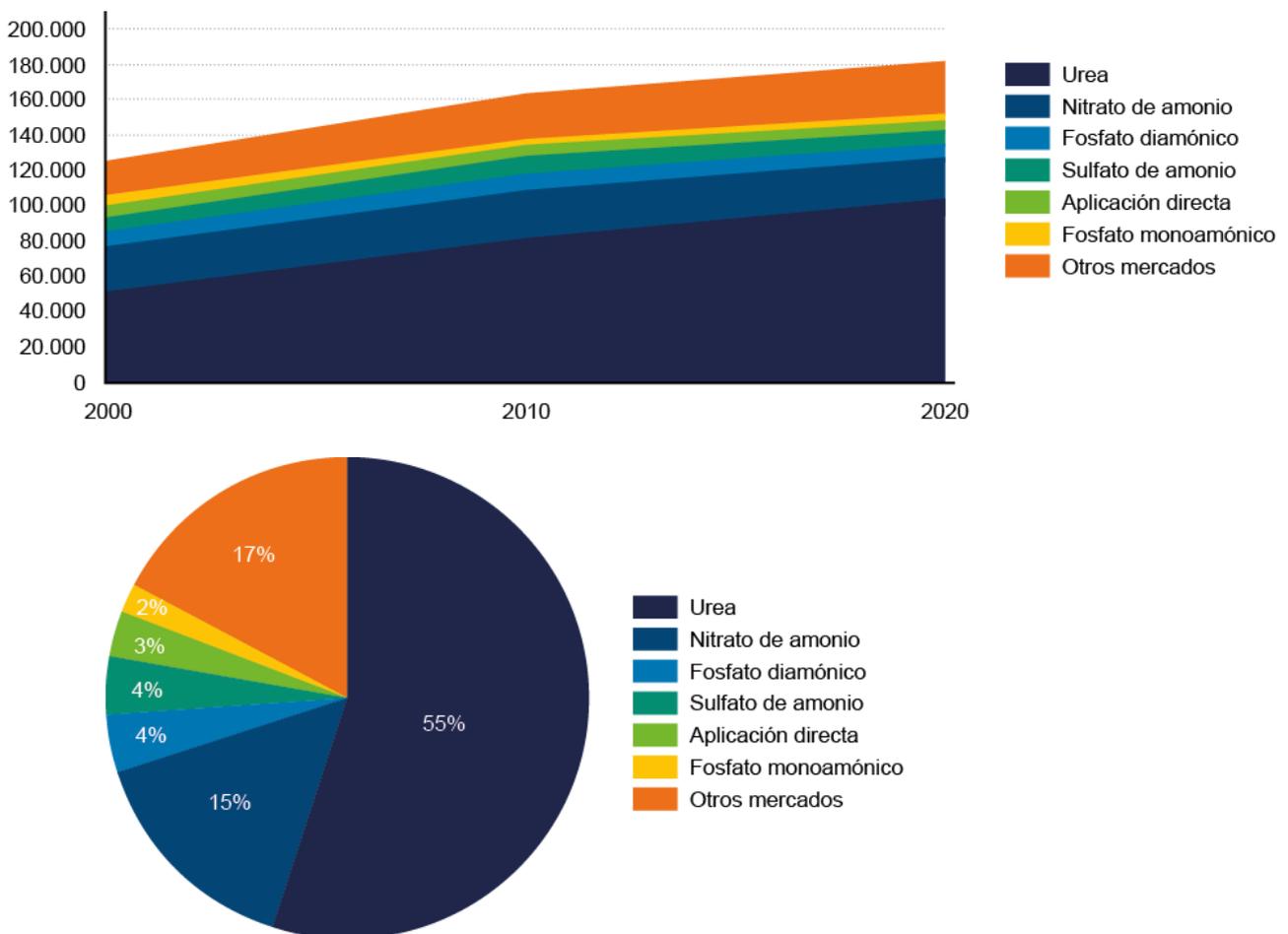
Fuente: NITTDATA con base en IRENA, 2019.

Desde el año 2000 hasta el año 2020, se ha observado un aumento constante en la demanda de amoníaco, impulsado por su uso en la producción de fertilizantes agrícolas e industria química. Este crecimiento no solo se ha manifestado en América Latina y el Caribe (ALC), sino también a nivel global, donde el amoníaco ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de diversas actividades económicas y en el impulso de la productividad agrícola en diferentes países.

1.1.1.1 Segmentos de consumo (usos)

En cuanto a los principales usos de este compuesto químico a lo largo de las últimas dos décadas, la demanda mundial ha mostrado un crecimiento significativo y se ha consolidado como una materia prima fundamental en la fabricación de diversos compuestos, incluyendo urea, nitrato de amonio, fosfato diamónico y otros derivados utilizados en fertilizantes, productos químicos y materiales. Alrededor del 80% del amoníaco producido a nivel mundial se destina a la producción de fertilizantes nitrogenados, lo que subraya su papel crucial en la agricultura y el aumento de la productividad de los cultivos a nivel mundial¹.

Figura 3. Aplicación de fertilizantes nitrogenados por productos (2020) y demanda mundial usos del amoníaco (2000–2020)



Fuente: IRENA, 2022.

La demanda internacional por los derivados del amoníaco ha experimentado un crecimiento sostenido cercano al 50% en los últimos 20 años. Esta tendencia se atribuye a factores como el crecimiento de la demanda de alimentos asociado al aumento de la población mundial, que ha impulsado la demanda de fertilizantes. La demanda de productos químicos y materiales derivados del amoníaco ha sido impulsada por el crecimiento de industrias como la producción de plásticos, fibras sintéticas y explosivos, entre otros (Figura 33).

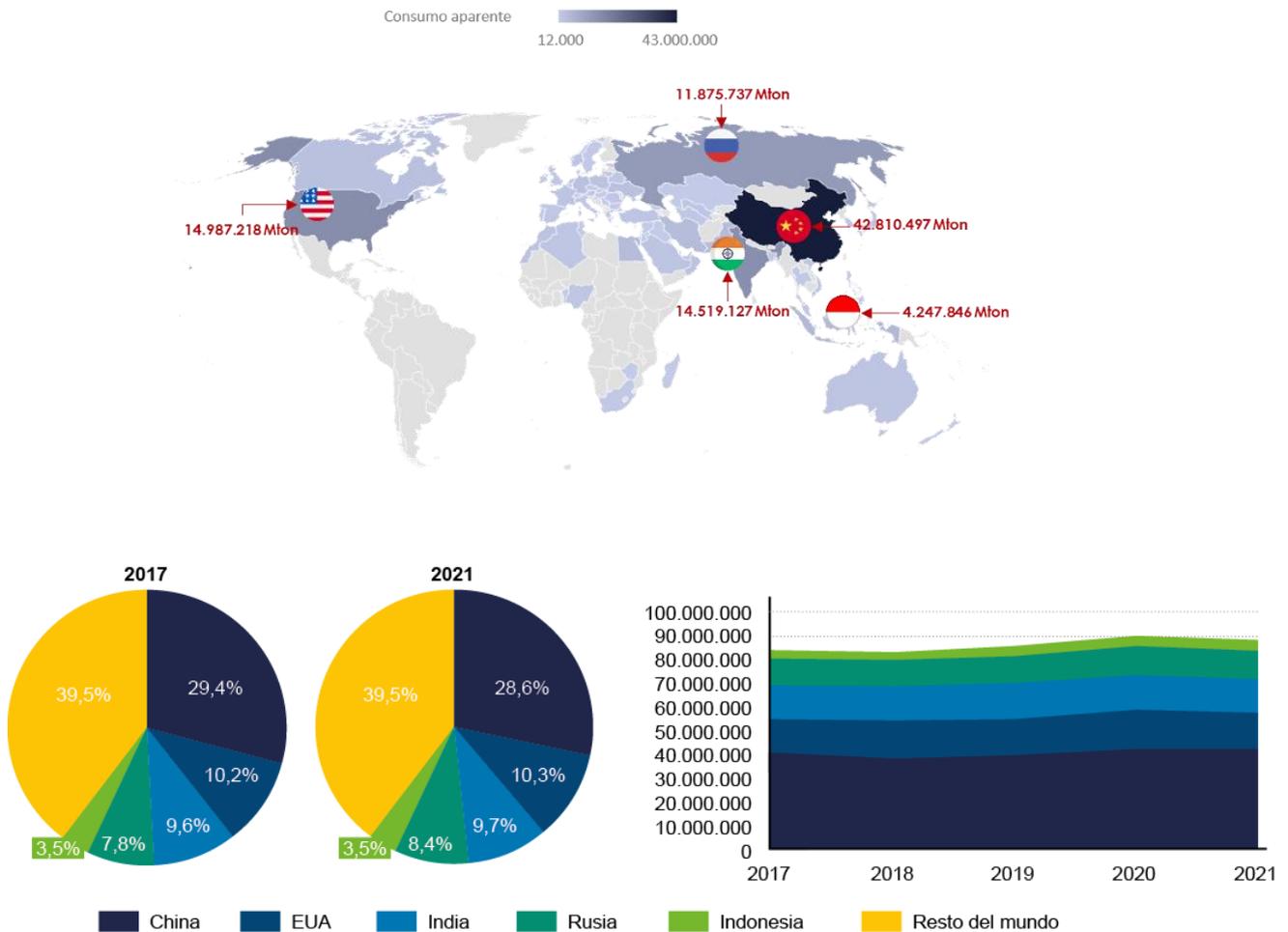
Bajo este contexto se examina el consumo aparente de amoníaco dentro y fuera de ALC, así como los factores que han influido en la demanda mundial y los principales usos de este compuesto químico a lo largo de las últimas dos décadas.

¹ IRENA and AEA (2022), Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

1.1.1.2 Fuera de ALC

China, Estados Unidos, India, Rusia, e Indonesia lideran el consumo de amoníaco gris; estas cinco naciones representan aproximadamente el 60% del consumo aparente de amoníaco gris a nivel mundial. China lidera la demanda de amoníaco a nivel global, y es responsable de casi la mitad del consumo total de este, con más de 42 millones de toneladas anuales. La demanda de amoníaco gris de estos países refleja la necesidad existente por este producto químico, relevante para diversas industrias y resalta la importancia estratégica de asegurar un suministro confiable y sostenible en el mercado internacional (Figura 6).

Figura 4. Mapa y evolución del consumo aparente de países fuera de ALC (2021)



Fuente: NTT Data con base en Trademap (2022); IFASTAT (2022).

Estados Unidos, además de importar amoníaco también es uno de los principales productores. La demanda interna de amoníaco en el país proviene la agricultura, la industria química y el procesamiento de alimentos. La disponibilidad de gas natural y una infraestructura industrial desarrollada respaldan la producción y el suministro de amoníaco en el país. Además, la industria petroquímica de Estados Unidos también se beneficia de las exportaciones de amoníaco, lo que contribuye a la participación del país en el mercado internacional. Estados Unidos ejerce una influencia considerable en el comercio de amoníaco en América del Norte y mantiene relaciones comerciales estrechas con Canadá y México.

Figura 5. Top países importadores, exportadores y productores de amoníaco

Top 10 Importadores 2021		Top 10 Exportadores 2021		Top 10 Productores [★] 2022		Mton
USA	14%	Trinidad & Tobago	17%	China		42.000
India	13%	Rusia	17%	Rusia		16.000
Marruecos	8%	Arabia Saudita	16%	USA		13.000
Corea del Sur	8%	Indonesia	9%	India		12.000
Bélgica	5%	Argelia	8%	Indonesia		6.000
Turquía	5%	Canadá	7%	Arabia Saudita		4.300
China	4%	Qatar	3%	Trinidad & Tobago		4.200
Noruega	4%	Egipto	3%	Egipto		4.000
Francia	3%	Malasia	3%	Iran		4.000
Tailandia	3%	Países Bajos	2%	Canadá		3.800

Fuente: NTT Data con base en Statista (2022); IEA (2022); IFASTAT (2022) y TradeMap (2022).

Arabia Saudita es uno de los principales exportadores de amoníaco. Este país desempeña un papel importante en el mercado internacional, con vastas reservas de gas natural y petróleo, Arabia Saudita ha desarrollado una sólida industria petroquímica que incluye la producción y exportación de amoníaco. El país ha invertido en la expansión de su capacidad de producción de amoníaco para satisfacer la creciente demanda regional e internacional. Arabia Saudita, como líder en la industria petroquímica del Medio Oriente, ha establecido asociaciones estratégicas con países vecinos para promover el desarrollo y la exportación de amoníaco hacia Europa y Asia.

Trinidad y Tobago por su parte ha establecido robustos vínculos comerciales con los países de América Latina y el Caribe, fortaleciendo así la cooperación regional en el sector petroquímico.

Además de estos actores clave, los países BRICS, como China e India, han surgido como participantes destacados en el mercado de amoníaco. Su participación como importadores y productores ha contribuido a la estabilidad y el equilibrio del suministro global de amoníaco. La presencia de estos actores ha fomentado la competencia y la cooperación en el mercado, impulsando la innovación y la eficiencia en la producción y distribución del amoníaco.

China, con su creciente demanda industrial y agrícola, ha aumentado sus importaciones de amoníaco y también ha desarrollado su capacidad de producción interna para satisfacer sus necesidades. India, por su parte, ha experimentado un aumento en la producción y ha buscado diversificar sus fuentes de suministro, lo que ha llevado a una mayor participación en el comercio internacional de amoníaco.

Figura 6. Mapa países importadores y exportadores de amoniaco



Fuente: NTT Data con base en Statista (2022); IEA (2022); IFASTAT (2022) y TradeMap (2022).

A medida que la demanda continúe creciendo, la cooperación entre los países mencionados, así como los países BRICS, será crucial para garantizar un suministro sostenible y satisfacer las necesidades de los sectores agrícolas y químicos en todo el mundo. La colaboración entre estos actores globales no solo fomentará el crecimiento y la estabilidad del mercado de amoniaco, sino que también permitirá abordar los desafíos ambientales y promover prácticas más sostenibles en la producción y el uso de este importante producto químico (Figura 6).

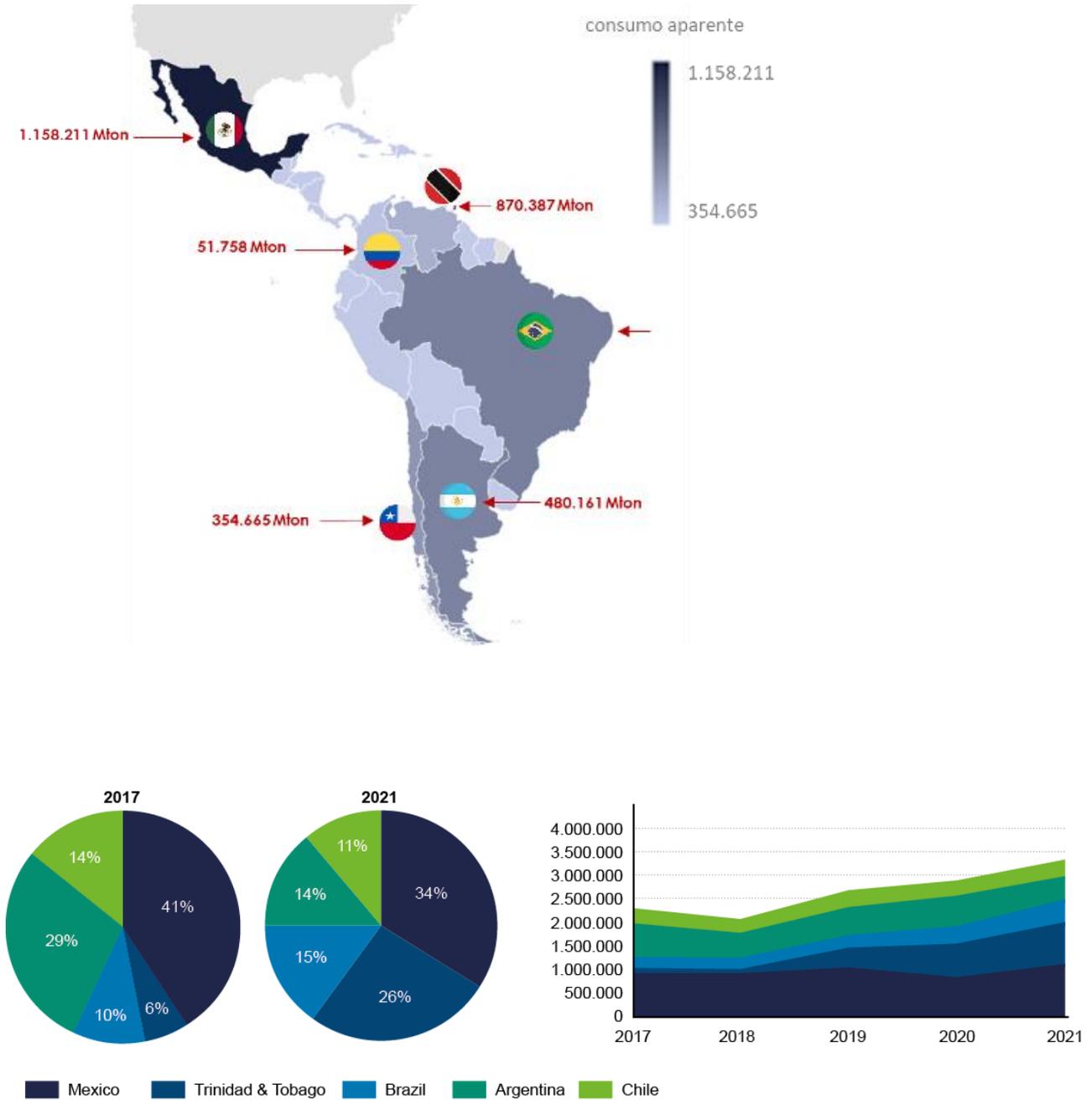
1.1.1.3 América Latina y el Caribe

Trinidad y Tobago es uno de los actores clave en el mercado global del amoniaco, ya que se ha convertido en uno de los tres mayores exportadores, junto a Rusia y Arabia Saudí, quienes en conjunto atienden a los mercados de China, Estados Unidos, la Unión Europea, y la India. Su posición estratégica, junto a sus abundantes reservas de gas natural, han facilitado el desarrollo de una industria petroquímica próspera centrada en la producción de amoniaco y metanol. A lo largo de las últimas décadas, el gobierno y el sector privados han establecido plantas de producción de amoniaco y ha invertido en infraestructura portuaria para facilitar las exportaciones.

En el resto de ALC se observa un panorama distinto. México destaca como el país con el mayor consumo aparente de amoniaco gris en la región, seguido de cerca por Brasil, Argentina y Chile. Aunque estos países ocupan posiciones destacadas en el consumo regional.

Entre 2017 y 2021 se ha registrado un incremento significativo en el consumo aparente de amoniaco de ALC, pasando de 2.5 millones de toneladas a 3.5 millones de toneladas. Esto representa un incremento cercano al 40% en un período de cinco años. Aunque este crecimiento es considerable, los volúmenes de consumo en la región aún están en un orden de magnitud inferior en comparación con los principales consumidores a nivel mundial (Figura 7).

Figura 7. Mapa y evolución del consumo aparente de países de ALC (2021)



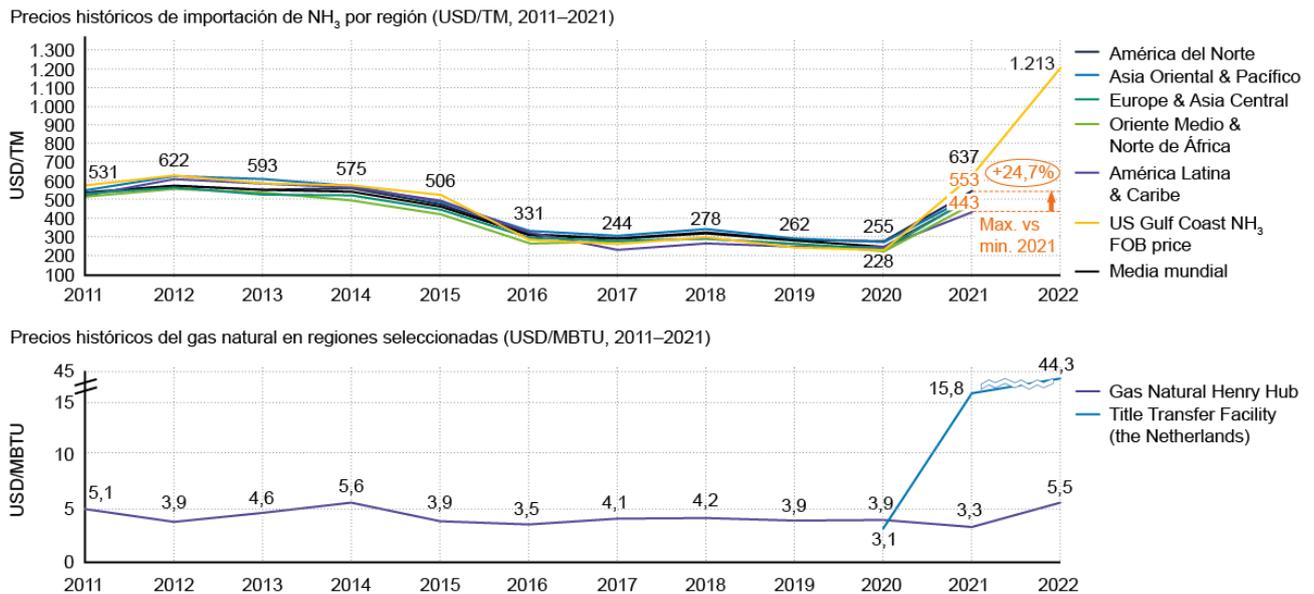
Fuente: NTT Data con base en Trademap (2022); IFASTAT (2022).
Mton: tonelada métrica/larga

Aunque la región de ALC ha experimentado un crecimiento constante en el consumo de amoníaco, existe un margen considerable para impulsar la autosuficiencia agroalimentaria y/o participar en el mercado internacional. Este panorama ofrece oportunidades para impulsar la industria del amoníaco en la región y fortalecer su posición en el mercado global, especialmente considerando los avances en el desarrollo del hidrógeno verde y las políticas regionales en torno a la sostenibilidad, la reducción de emisiones, el nearshoring o deslocalización cercana y la autosuficiencia alimentaria.

1.1.1.4 Costos asociados

El costo de producción actual del amoníaco gris varía en función de diversos factores. En primer lugar, la intensidad de capital de una planta de producción de amoníaco gris se sitúa generalmente entre 1.500 y 2.000 USD por tonelada de amoníaco anual. Los precios del gas natural, utilizado como materia prima en el proceso de producción, oscilan entre 2 y 10 USD por millón de unidades térmicas británicas (MBTU). Estos dos elementos tienen un impacto significativo en el costo de producción global del amoníaco gris, el cual se estima entre 110 y 340 USD por tonelada, dependiendo de los precios del gas natural.

Figura 8. Referencias de precios regionales del NH₃ (arriba) y del gas gas natural (2011– 2022)



Fuente: US Energy Information Administration (EIA); World Bank's WITS; IEA'S Gas Market Report Q4-2022; USGS

Es importante considerar también el costo global de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) asociadas a la producción de amoníaco. La fijación del precio del carbono es una estrategia para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Puede lograrse imponiendo cargos a las emisiones u ofreciendo incentivos para la reducción de estas. Este enfoque ha ganado una amplia aceptación global, y se espera que aproximadamente el 25% de las emisiones estén sujetas a algún tipo de mecanismo de fijación de precios del carbono.

Existe un creciente impulso global detrás de la fijación de precios del carbono: 40 jurisdicciones nacionales y 25 subnacionales ya han implementado dichos mecanismos, cubriendo aproximadamente el 15% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero del mundo. Estas iniciativas abarcan varios enfoques, incluidos impuestos al carbono y sistemas de comercio de emisiones (ETS), y muchos están explorando la posibilidad de vincular sus mercados de carbono a nivel internacional².

En Europa, el costo de producción de amoníaco gris en 2021 se situó en alrededor de 500 USD por tonelada, mientras que, con el impuesto al carbono, alcanzó los 665 USD por tonelada (con un impuesto de carbono promedio de 66 USD/ton CO_{2e} entre los países productores). Por su parte, en Estados Unidos, el costo de producción de amoníaco gris en 2021 fue de 195 USD por tonelada, pero con el impuesto al carbono se elevó a 360 USD por tonelada. En este contexto, el costo global de producción de amoníaco gris, considerando el impuesto al carbono, oscilaría entre 275 y 505 USD por tonelada en 2030, si el impuesto al carbono rondara los 100 USD/ton CO_{2e}. Estos datos reflejan la importancia de considerar los precios del gas natural y las implicaciones de los impuestos al carbono en los costos de producción del amoníaco gris.

² UNCC (2023) – About Carbon Pricing

1.1.1.5 Fomento internacional del NH₃ verde

Dada la tendencia entre los países importadores a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, la mayoría ya han definido acciones para promover el amoníaco e hidrógeno verde, mientras que la mayoría de los países exportadores no han comenzado a implementar políticas públicas habilitadoras (Figura 9).

Trinidad y Tobago, por ejemplo, como país exportador ha demostrado un compromiso significativo con la transición hacia productos verdes. A pesar de su papel tradicional como exportador de amoníaco gris, ha implementado regulaciones y publicado una hoja de ruta para el desarrollo del hidrógeno verde. También ha anunciado proyectos específicos de amoníaco verde, fomentando su producción y uso sostenible.

Figura 9. Regulaciones y acciones de promoción al amoníaco verde del top países importadores y exportadores

TOP países importadores al 2021	Hoja de ruta o Estrategia de H ₂	Acciones de impulso al NH ₃ verde	Proyectos anunciados de NH ₃ verde	TOP países exportadores al 2021	Hoja de ruta o Estrategia de H ₂	Acciones de impulso al NH ₃ verde	Proyectos anunciados de NH ₃ verde
ESTADOS UNIDOS 	✓	✓	✓	TRINIDAD & TOBAGO 	✓	✓	✓
INDIA 	✓	✓	✓	RUSIA 	✗	✗	✗
MARRUECOS 	✓	✓	✓	ARABIA SAUDITA 	✗	✗	✓
COREA DEL SUR 	✓	✓	✓	INDONESIA 	✗	✗	✗
BÉLGICA 	✓	✗	✓	ARGELIA 	✗	✗	✗
TURQUÍA 	✓	✓	✗	CANADÁ 	✓	✗	✓
CHINA 	✓	✗	✓	QATAR 	✗	✗	✗
NORUEGA 	✓	✓	✓	EGIPTO 	✗	✓	✓
FRANCIA 	✓	✓	✓	MALASIA 	✗	✗	✓
TAILANDIA 	✗	✗	✗	PAÍSES BAJOS 	✓	✗	✓

✗ Estrategia de hidrógeno en proceso

Fuente: NTT Data con base en IEA (2022); IRENA (2022).

1.1.2 Prospectiva del mercado global del NH₃

El amoníaco renovable se perfila como un vector clave en el panorama energético, químico, y agroalimentario del futuro. En particular, este compuesto ha ganado protagonismo debido a su bajo impacto ambiental y su potencial para abordar los desafíos asociados con las emisiones de gases de efecto invernadero. En esta sección se presentan los usos futuros del amoníaco verde, así como los proyectos anunciados a nivel global. Además, se presenta una proyección de la demanda del amoníaco verde hacia los años 2025, 2040 y 2050, brindando así un panorama integral del crecimiento y el potencial de esta fuente de energía y materia prima sostenible.

1.1.2.1 Usos futuros prospectivos

Con el desarrollo de tecnologías innovadoras, el amoníaco verde está destinado a convertirse en un combustible libre de carbono y un portador de hidrógeno, además de funcionar también como almacenamiento de energía, por lo que su potencial se extiende más allá de su función tradicional como fertilizante y producto químico industrial. En los últimos años, **el impulso hacia prácticas agrícolas sostenibles y neutrales en carbono ha llevado a una creciente demanda de fertilizantes verdes o bajos en emisiones.** En este contexto, el amoníaco verde ha emergido como una alternativa prometedora.

El amoníaco verde jugará un papel clave en el futuro de la agricultura sostenible, para 2050 la demanda de fertilizantes neutros en carbono alcanzaría aproximadamente 556 millones de toneladas métricas (tm). Su uso como fertilizante ofrece una doble ventaja al proporcionar nutrientes esenciales para las plantas y al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción y aplicación de fertilizantes convencionales. Esta tendencia hacia una agricultura más sostenible representa un paso significativo hacia la mitigación del cambio climático y la preservación de los recursos naturales para las generaciones futuras.

Figura 10. Usos prospectivos del NH₃ verde

			
<p>FERTILIZANTE NEUTRO EN CARBONO 566 Mt – 2050</p> <p>Debido a su alta concentración de nitrógeno, el amoníaco es un fertilizante agrícola muy eficaz y utilizado.</p> <p>La capacidad de producir amoníaco verde proporcionará un fertilizante con cero emisiones de carbono en la fuente a la industria agrícola, evitando millones de toneladas de emisiones de CO₂ al año en todo el mundo y contribuyendo al objetivo del sector agrícola.</p>	<p>COMBUSTIBLE CERO EMISIONES 197 Mt – 2050</p> <p>El amoníaco es un producto químico fácilmente combustible. Puede utilizarse en motores o pilas de combustible para producir energía.</p> <p>Los únicos subproductos de la combustión del amoníaco son el nitrógeno y el agua. Esto significa que, a diferencia de los combustibles fósiles, no se produce CO₂.</p>	<p>TRANSPORTADOR DE H₂ 127 Mt – 2050</p> <p>El hidrógeno tiene muchas aplicaciones y usos útiles, pero es difícil y costoso de almacenar en grandes cantidades. Sin embargo, el amoníaco es mucho más económico y fácil de almacenar y transportar, y es posible romper su molécula para obtener nuevamente hidrógeno y nitrógeno.</p> <p>El amoníaco se vislumbra como un medio costo eficiente para almacenar y transportar hidrógeno verde.</p>	<p>ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA</p> <p>El amoníaco puede almacenarse fácilmente a granel como líquido a presión atmosférica y a una temperatura de -33°C. Esto hace que sea atractivo como almacén de energía.</p> <p>El almacenamiento de energía es un gran problema al que se enfrenta actualmente el planeta, pero el amoníaco verde podría ser una solución que contribuya a atender este problema.</p>

Fuente: NTT Data con base en IEA (2022); IRENA (2022).

Al igual que en el ámbito de la agricultura, la demanda de soluciones neutras en carbono se está acelerando en el sector energético. En este contexto, el amoníaco verde ha surgido como una **opción prometedora de combustible neutro en carbono (zero-carbon fuel)**. El amoníaco verde se produce a partir de fuentes renovables, lo que reduce significativamente su huella de carbono. Se proyecta que para el año 2050, la demanda de combustibles neutros en carbono, como el amoníaco verde, rondaría 197 millones de toneladas (tm), reflejando tanto el cambio hacia prácticas más sostenibles en el sector energético como la creciente necesidad de reducir las emisiones de carbono.

El amoníaco verde se perfila también como un **portador de hidrógeno**. El hidrógeno es un vector energético para descarbonizar aplicaciones e industrias difíciles de electrificar, pero almacenarlo requiere grandes cantidades de energía y es costoso. Sin embargo, el amoníaco ofrece una solución más económica y sencilla para el almacenamiento y transporte de hidrógeno, ya que su molécula puede romperse para liberar hidrógeno y nitrógeno. Se proyecta que para el año 2050, la demanda de amoníaco verde como portador de hidrógeno alcanzará aproximadamente 127 millones de toneladas (Mt), lo que refleja su potencial para almacenar y transportar hidrógeno verde.

El amoníaco verde representa también una oportunidad para el **almacenamiento de energía**, ya que puede ser almacenado en forma líquida a presión atmosférica y a una temperatura de -33°C.

El amoníaco verde también presenta algunos retos técnicos para su despliegue a gran escala. Entre estos destacan:

Green ammonia presents some technical challenges for large-scale deployment. Among these challenges are:

- Aspectos de seguridad: la alta toxicidad del amoníaco (NH₃) implica una serie de consideraciones cruciales para garantizar la seguridad. Es altamente irritante para los ojos, la piel y las vías respiratorias, por lo que requiere una ventilación adecuada en áreas de manejo y almacenamiento para evitar la acumulación de vapores tóxicos. Además, es esencial el uso de equipos de protección personal, como gafas de seguridad, guantes y respiradores, junto con el almacenamiento en contenedores diseñados específicamente y un control estricto de acceso para limitar la exposición. La formación de los trabajadores, el etiquetado adecuado, los procedimientos de emergencia y el cumplimiento normativo son factores clave para mitigar los riesgos y garantizar un manejo seguro del amoníaco. Un monitoreo constante y pruebas de integridad en los sistemas de almacenamiento y distribución complementan estas medidas de seguridad, protegiendo la salud humana y el entorno.
- Disponibilidad de buques marítimos para el transporte de amoníaco: la demanda global de amoníaco varía según las estaciones y las regiones, lo que puede generar desafíos logísticos para garantizar un suministro constante y eficiente.

Los buques deben adaptarse a las fluctuaciones en la demanda y a la necesidad de llegar a puertos específicos, lo que puede ser costoso y complejo de gestionar. Además, la infraestructura portuaria y de almacenamiento debe ser adecuada para recibir, almacenar y distribuir grandes cantidades de amoníaco de manera segura.

- El número de barcos dedicados al transporte de amoníaco varía con valores que rondan los 200 buques cisterna que pueden transportar amoníaco como carga³, movilizandolos 18-20 millones de toneladas de amoníaco que se comercializan cada año marítimamente⁴. Actualmente hay pedidos de 130 buques para transportar amoníaco y 6 hidrógeno⁵.
- Craqueo del amoníaco: Los desafíos relacionados con el craqueo del amoníaco abarcan varias áreas clave. En primer lugar, existe la necesidad de catalizadores y procesos eficientes que puedan permitir la descomposición del amoníaco a temperaturas más bajas, especialmente para aplicaciones energéticamente eficientes. En segundo lugar, garantizar el almacenamiento y transporte seguro y eficiente del amoníaco. En tercer lugar, el desarrollo de catalizadores robustos y eficientes para el craqueo de amoníaco, actualmente la investigación en este tema tiene como objetivo optimizar los materiales para mejorar el rendimiento y la estabilidad.

1.1.2.2 *Global demand forecast for NH₃*

Between 2021 and 2051, the forecast for global demand for ammonia and its derivatives reveals a dynamic and promising outlook. As technological advances and environmental concerns continue to drive significant changes in various sectors, demand for ammonia is expected to undergo significant transformations.

The arrival of the first engine designed to use ammonia as fuel for shipping in 2024, according to engine manufacturer MAN Energy Solutions, will mark an important milestone in the development and adoption of this technology. Wärtsilä, in collaboration between key stakeholders in the shipping industry is aiming at developing marine engines that can use ammonia as fuel.

Demand for NH₃ as a CO₂eq-free marine fuel is seen as a key factor driving global growth from 2030 onwards. The use of ammonia as a transportation fuel, particularly in marine applications, is gaining attention as a solution to reduce greenhouse gas emissions in the shipping industry. About 95% of global freight transport is by sea, accounting for 2.6% of global greenhouse gas emissions. The International Maritime Organization (IMO) aims to reduce emissions from the sector by 50% by 2050, and several shipping companies, such as Maersk, have committed to even more ambitious targets. The adoption of ammonia as a marine fuel is being explored, with potential demand ranging from 100 million tons by 2030 to more than 1 billion tons of ammonia by 2050, depending on several factors.

Marine engine manufacturers plan to commercialize ammonia engines by 2024 or 2025, and the first ammonia-fueled vessels are expected to be operational at sea by that time. While the combustion characteristics of ammonia present some challenges, such as high NO_x production, ongoing research aims to address these issues. Solid oxide fuel cells are also being considered for ammonia utilization, as they offer improved energy efficiency. To gain practical experience and inform the development of codes and standards, an ammonia fuel demonstration will be conducted at the port of Singapore. Regulatory approval for ammonia as a marine fuel is currently required on a case-by-case basis, but as safety and operational experience grows, the adoption of ammonia-fueled vessels is expected to accelerate.

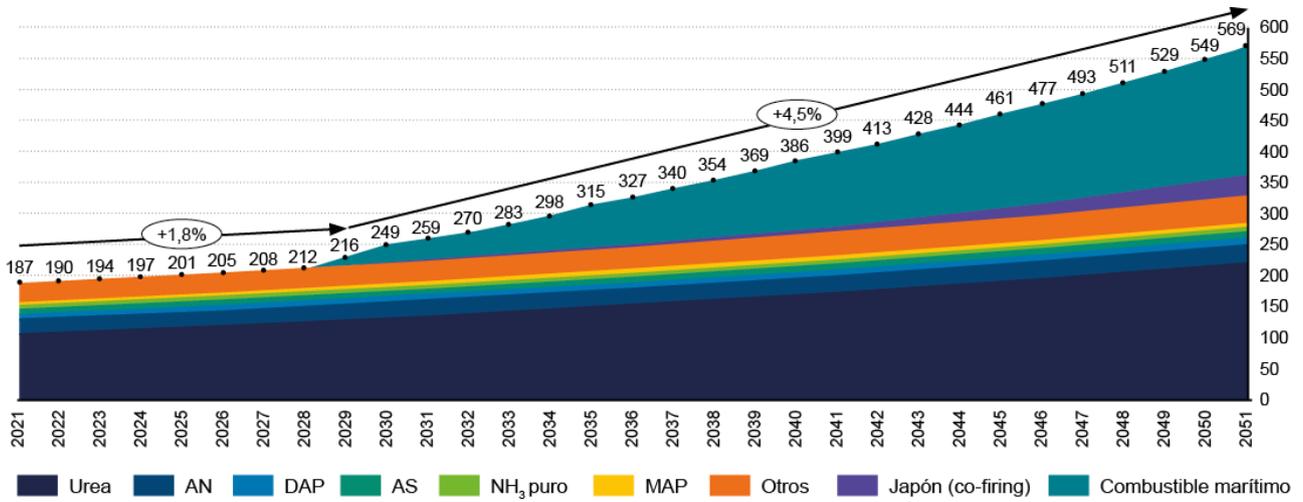
Demand for ammonia will not only be influenced by these new technologies, but also by its traditional uses. Therefore, the global demand for ammonia and its derivatives is expected to keep growing and promoting innovation in the coming decades.

³ DNV (2022) – Smells like sustainability: Harnessing ammonia as ship fuel

⁴ Shipintel (2023) – Will the Ammonia Shipping Market Boom?

⁵ Offshore Energy (2022) – Clarksons: There are 130 ammonia-ready and 6 hydrogen-ready vessels on order

Figura 11. Proyección de la demanda mundial de amoníaco y derivados (kt, 2021–2051)

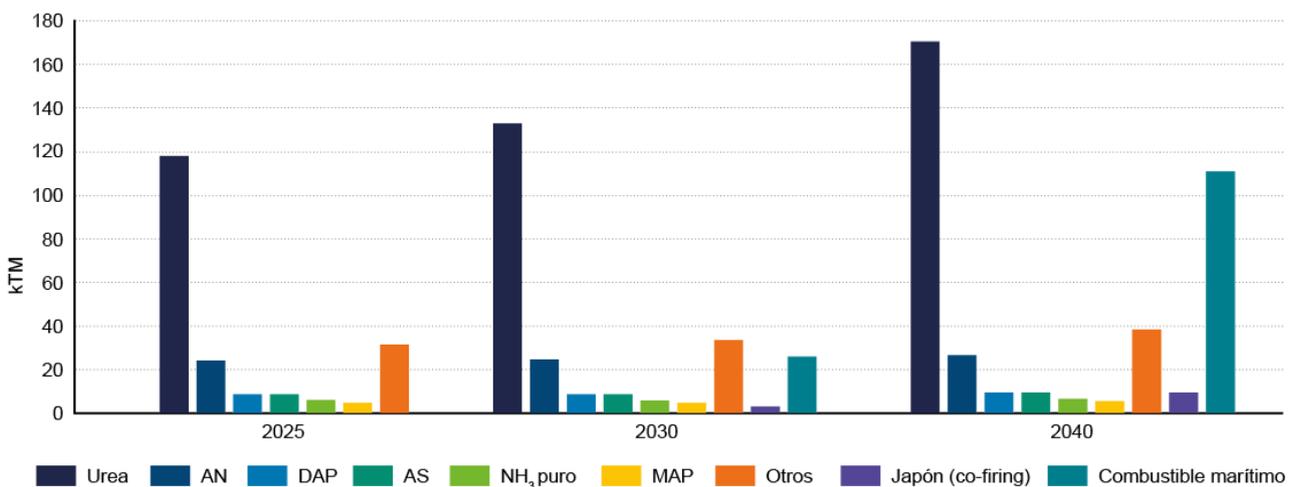


Fuente: IRENA, 2022

La demanda de amoníaco y sus derivados seguirá siendo impulsada por su uso tradicional en la agricultura y la industria química. Se proyecta la demanda de urea en 133 kt para 2030 y 170 kt para 2040, lo que refleja un aumento sustancial en comparación con la demanda actual. Estas proyecciones indican un escenario en el cual la urea seguirá desempeñando un papel fundamental en la industria agrícola en las próximas décadas⁶.

Si bien hacia 2025 el incremento en la demanda de amoníaco estará impulsado principalmente por la demanda de la urea, en el horizonte de 2030 a 2040 se vislumbra un crecimiento de $\approx 2.20X$ (Figura 11), asociado a la nueva demanda de **combustible marítimo libre** de emisiones de CO_{2eq}, que se proyecta en 26 kt para 2030 y 111kt para 2040.

Figura 12. Proyección de la demanda mundial de amoníaco y derivados (kt, 2025, 2030 y 2040)



Fuente: IRENA (2022), Reuters, 1Global Maritime Forum.

⁶ IRENA y AEA (2022), Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

1.1.2.3 Futuro de la capacidad productiva

Con más de 60 plantas de amoníaco renovable anunciadas en los últimos cuatro años, se espera que esta vía productiva domine las adiciones de capacidad más allá de 2025. Estas plantas anunciadas tienen una capacidad combinada de 15 millones de toneladas y se espera que entren en funcionamiento durante esta década, representando aproximadamente el 6% de la producción total de amoníaco en 2030. Es importante destacar que gran parte de esta capacidad anunciada se encuentra en Australia.

Los proyectos de amoníaco renovable están ganando impulso en todo el mundo como una alternativa viable a la producción tradicional de amoníaco. Para 2040, la capacidad total de amoníaco renovable anunciada alcanzará 71 millones de toneladas y se anticipa un aumento en la capacidad proyectada de amoníaco verde a medida que los proyectos a escala de demostración industrial se expandan (Figura 9).

En el panorama global de proyectos de amoníaco verde, se han anunciado diversas iniciativas que demuestran el creciente interés en esta tecnología sostenible. En América del Norte, destacan los avances en Estados Unidos, donde Maire Technimont ha anunciado la primera planta de amoníaco verde en Greenfield, basada en energía solar y eólica. CF Industries, el mayor productor de amoníaco del mundo también ha revelado un proyecto de 20 mil toneladas anuales de amoníaco verde en sus instalaciones de Donaldsonville, Luisiana, con operaciones previstas para 2023. Por su parte, en Canadá, Hy2Gen ha anunciado una planta de amoníaco verde impulsada por energía hidroeléctrica en Quebec, la cual se espera que entre en funcionamiento en el año 2025.

Las naciones del Medio Oriente están promoviendo importantes proyectos de amoníaco verde. En NEOM (acrónimo de Nuevo Futuro, es el nombre de la nueva ciudad y área económico-tecnológica, con una superficie tres veces la de Chipre, que Arabia Saudí está promoviendo en el noroeste el país, frente a la Península del Sinaí.), una planta impulsada por energía eólica y solar producirá alrededor de 1.2 millones de toneladas de amoníaco renovable al año a partir de 2025. Esta planta se encuentra actualmente en construcción. Además, se han anunciado otras plantas de amoníaco renovable en Omán, los Emiratos Árabes Unidos y Namibia, donde la empresa Enertrag desarrolla el proyecto “Hyphen” con una producción planificada de 2 millones de toneladas anuales de amoníaco. Adicionalmente se presenta el proyecto desarrollado por Minbos Resources, con sede en Australia, y el Ministerio de Agricultura de Angola; quienes acordaron un plan para desarrollar la producción de amoníaco verde y fertilizantes en el país africano mediante una generación hidroeléctrica de 200 MW proveniente de la planta “Capanda”, asociada a 149 MW de electrolisis.

En Europa, la empresa Yara, el segundo mayor productor de amoníaco, tiene planes de instalar un electrolizador alcalino de 5 MW en Porsgrunn, Noruega, para fines de 2023. La planta de Porsgrunn tiene como objetivo lograr una completa descarbonización para 2025, con una capacidad total de alrededor de 500 mil toneladas anuales de amoníaco verde alimentado por la red hidroeléctrica. Por su parte, en España, Iberdrola y Fertiberia se han asociado para crear la primera planta de este tipo en el mundo que produce amoníaco verde. La planta está ubicada en Puertollano, España, y es la más grande de su tipo en Europa. El proyecto supone el desarrollo de 830 MW de hidrógeno verde con una inversión de 1.800 millones de euros hasta 2027⁷. El hidrógeno verde producido por Iberdrola se utiliza para fabricar fertilizantes verdes en la fábrica de Fertiberia en Puertollano. Se espera que el proyecto cree hasta 1.000 puestos de trabajo y evite emisiones de 48.000 tCO₂ al año.

En ALC se han anunciado varios proyectos de amoníaco verde debido a las óptimas condiciones eólicas y solares, así como a la presencia de una industria minera que utiliza explosivos a base de nitrato de amonio. Específicamente en Chile, ENGIE y Enaex están construyendo una planta piloto que se espera comience a funcionar en 2024. Adicionalmente, durante el mes de agosto de 2023 se ha dado a conocer un importante proyecto de producción de amoníaco verde en México, el proyecto denominado Marengo I. El proyecto Marengo es desarrollado por el consorcio MexCo – Hy2Gen y propone la generación anual de 170,000 toneladas de amoníaco renovable utilizando fuentes de energía eólica y solar independientes de la red eléctrica, con una capacidad de electrolizador de 200 MW.

⁷ Iberdrola (2023) – Iberdrola installs the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe.

En Australia se encuentran en desarrollo los proyectos Asian Renewable Energy Hub (AREH), en Pilbara, y el Western Green Energy Hub (WGEH), en Australia Occidental. Asimismo, en diferentes partes del mundo se han anunciado numerosos proyectos con una capacidad de entre 1 y 3 millones de toneladas anuales de amoníaco renovable; estos proyectos **dan cuenta del creciente impulso y la viabilidad del amoníaco verde como una alternativa sostenible a la producción tradicional.**

Figura 13. Mapa de proyectos actuales y anunciados de amoníaco verde en el mundo



Fuente: NTT Data con base en IEA (2022); IRENA (2022).

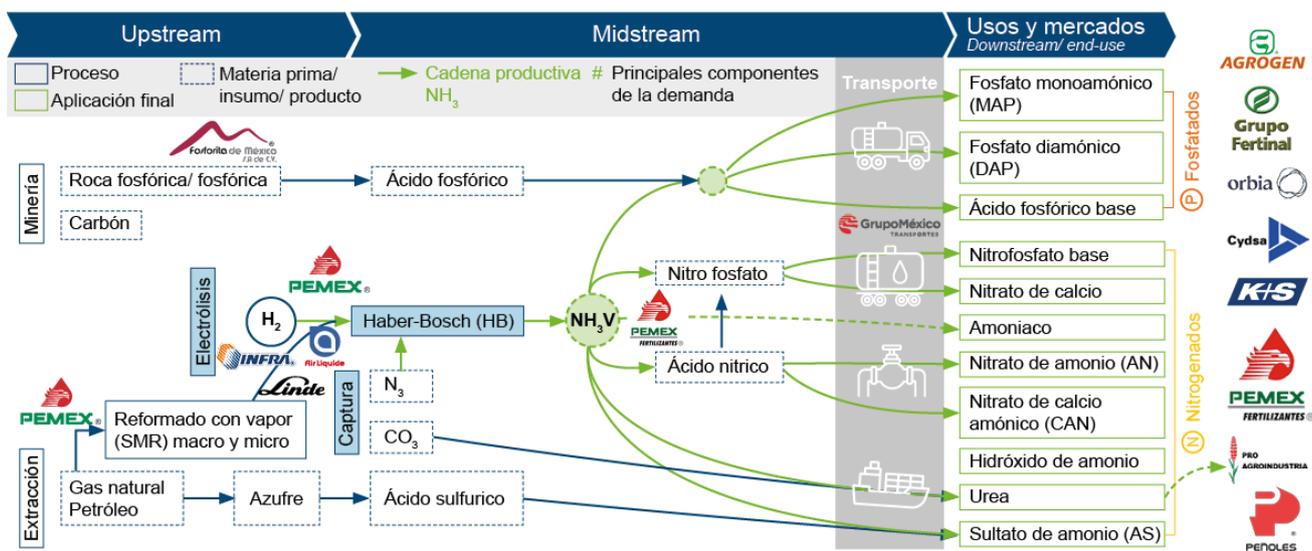
1.2 Mercado del NH₃ en México

En esta sección se presenta una caracterización de la cadena de valor del amoníaco en el contexto mexicano, elaborada a partir de investigación documental, entrevistas con actores clave del mercado, e información pública disponible. El contenido de esta sección se presenta organizado en tres rubros, **(1) cadena de valor del NH₃**, **(2) caracterización de la demanda histórica y proyectada**, y una descripción de la **(3) capacidad productiva actual y proyectada en el país**.

1.2.1 Cadena de valor del NH₃ en México

Petróleos Mexicanos (PEMEX), es la única entidad productora de NH₃ en México, la producción es realizada en las instalaciones del Complejo Petroquímico Cosoleacaque (CPC o Copeco), localizado en Minatitlán, dentro del área metropolitana de Coatzacoalcos en el estado de Veracruz. PEMEX es una compañía verticalmente integrada en el procesamiento de gas (principal insumo para la producción de H₂ gris mediante el proceso de reformado de metano a vapor) con PEMEX Transformación Industrial, y en la extracción de minerales para fertilizantes mediante la empresa Fosforita de México.

Figura 14. Red de valor del amoníaco en México y aplicaciones seleccionadas



Fuente: NTT Data con base en PEMEX, IEA (2022); IRENA (2022); Siemens Energy; EU CEPS; Scielo; Yara.

La mayor parte de la producción realizada en Copeco tiene como destino la integración de urea en el Complejo Petroquímico de Pajaritos, donde se localiza la subsidiaria de PEMEX, Pro-Agroindustria; adicionalmente, PEMEX cuenta infraestructura para el almacenamiento del amoníaco en tanques esféricos, que en ocasiones es directamente comercializado hacia el mercado local y/o de exportación. Por otro lado, dado que el reformado del gas natural tiene como subproducto importantes volúmenes de CO₂, este es aprovechado por diversos sectores industriales del país como el alimentario, de bebidas carbonatadas, automotriz, metalmecánico, entre otros⁸.

Una particularidad de este clúster productivo es que cuenta con el único amoniaducto de largo alcance en ALC, uniendo una Terminal Refrigerada de PEMEX en Salina Cruz (Oaxaca) con el CPC, prácticamente conectando de manera directa al océano Pacífico (Oaxaca) con el Atlántico (Coatzacoalcos-Minatitlán), a lo largo del Istmo de Tehuantepec. El mismo, cuenta con una capacidad instalada de 10" y corre a lo largo de 256 kilómetros entre los puntos antes indicados^{9,10}.

⁸ Forbes. (2018). Pemex responsabiliza al regulador energético por desabasto industrial de CO₂. Disponible en <https://t.ly/iITM>

⁹ Cuenta Pública 2020 – Análisis Del Ejercicio Del Presupuesto De Egresos Petróleos Mexicanos. Disponible en <https://t.ly/Uqpb8>

¹⁰ Crónica del Poder. (2016). Complejo de Cosoleacaque, único productor de amoníaco. Disponible en <https://t.ly/PPsSz>

El transporte de amoníaco hacia la costa oeste es realizado a través del ducto referido, que después es cargado en buques dedicados para su transporte hacia Topolobampo, en el Noroeste de México. Desde la costa del Atlántico el transporte se realiza principalmente a través de buques. El transporte terrestre se realiza comúnmente en carro-cisterna (camiones), o si la distancia lo amerita por medio de carro tanques ferroviarios¹¹.

Si bien, el uso final del amoníaco y sus derivados consiste en la aplicación de estos en los cultivos, como grandes aglutinadores de este tipo de productos en México se hallan empresas como Pro-Agroindustria y Grupo Fertinal (subsidiarias de PEMEX), formuladores de fertilizantes como Agrogen, CYDSA, K+S, e Industrias Peñoles, así como empresas de manufactura como Orbia o Plastiglas de México, por destacar algunas.

1.2.2 Caracterización de la demanda histórica y proyectada en México

1.2.2.1 Producción de NH₃ en México

Cada año comprendido entre 2007 y 2014, el CPC fue capaz de producir más de 700 kt de amoníaco por año (promedio 07-14: 868 kt), aunque, a partir de 2015 la producción del compuesto entró en declive, inclusive mostrando una producción nula en 2019. Los datos de producción nacional (P), importación, y exportación de NH₃ en México se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo aparente de NH₃ en México (kt, 2000–2022)

Año	(P) Producción nacional NH ₃	(IM) Importaciones de NH ₃	(EX) Exportaciones de NH ₃	= P+IM-EX Consumo aparente de NH ₃ México
Unidad	kt	kt	kt	kt
2000	922,7	-	-	922,7
2001	707,1	94,1	20,1	781,1
2002	679,7	88,6	123,2	645,1
2003	534,5	34,2	3,1	565,6
2004	681,3	39,4	39,4	681,3
2005	513,7	68,3	3,4	578,7
2006	591,8	64,6	38,3	618,1
2007	759,8	51,3	60,0	751,0
2008	896,2	148,9	104,9	940,2
2009	790,0	341,5	2,8	1.128,7
2010	898,9	306,9	82,5	1.123,3
2011	867,3	261,1	34,4	1.094,0
2012	939,1	224,7	102,4	1.061,5
2013	921,6	161,6	40,9	1.042,2
2014	869,1	132,4	35,6	965,9
2015	575,5	274,3	1,9	847,8
2016	532,8	350,5	19,3	864,0
2017	499,7	382,6	1,7	880,5
2018	151,1	580,8	1,5	730,4
2019	-	870,5	1,5	869,0
2020	136,4	761,9	1,8	896,4
2021	244,0	870,5	1,5	1.113,0
2022	256,0	539,9	-	795,9
Promedio 02–11	721,3	140,5	49,2	812,6
Promedio 12–22	512,5	468,2	20,8	915,1

Fuente: Sistema de Información Energética y SIAVI 5.0 de México.

Como aproximación a la demanda nacional de amoníaco en México, el consumo aparente del compuesto se encuentra persistentemente por encima de los ≈ 800 kt de NH₃, mostrando períodos con una demanda por encima de $\approx 1,000$ kt entre 2009 y 2013, así como en 2021.

¹¹ Ferromex. Disponible en <https://t.ly/ku6y>

La escasez de gas natural que típicamente es suministrado por PEMEX TRI o la Comisión Federal de Electricidad ha sido reconocida como la razón principal detrás de la baja eficiencia de producción en el Copeco¹². Al respecto, de particular incidencia es la prelación en el uso del gas natural en México, cuyo aprovechamiento tiende a destinarse a la generación de energía eléctrica antes que a otros usos con menor criticidad.

1.2.2.2 Comercio internacional

Aunque en casos específicos el NH₃ es aplicado directamente en los cultivos o en la industria, su uso más extendido es como insumo intermedio para la producción de fertilizantes sintéticos con contenido de nitrógeno.

A pesar de tener una menor proporción de contenido de nitrógeno que el amoníaco anhidro (contenido N: ≈82%), la urea (N: ≈46%) representa más del 50.0% de las importaciones de fertilizantes a nivel internacional; siendo esto explicable por su facilidad de manejo y menor volatilidad respecto de la aplicación directa del amoníaco. Además de requerir equipo especial para su aplicación, el amoníaco líquido es menos eficiente cuando se aplica en suelos con temperaturas por debajo de los 10°C¹³. Por volumen de importaciones, en segundo lugar, se encuentra el amoníaco (20.5% del total), seguido en un lejano tercer lugar por el sulfato de amonio (9.4% del total). Al respecto, en la Figura 15 se muestra la participación en términos de volumen de los principales derivados del compuesto en la canasta de importaciones (izquierda) y exportaciones (derecha).

Figura 15. Composición de las importaciones y exportaciones de amoníaco y derivados desde y hacia México (promedio 2011–2021)



Fuente: ITC Trade Map, WITS.

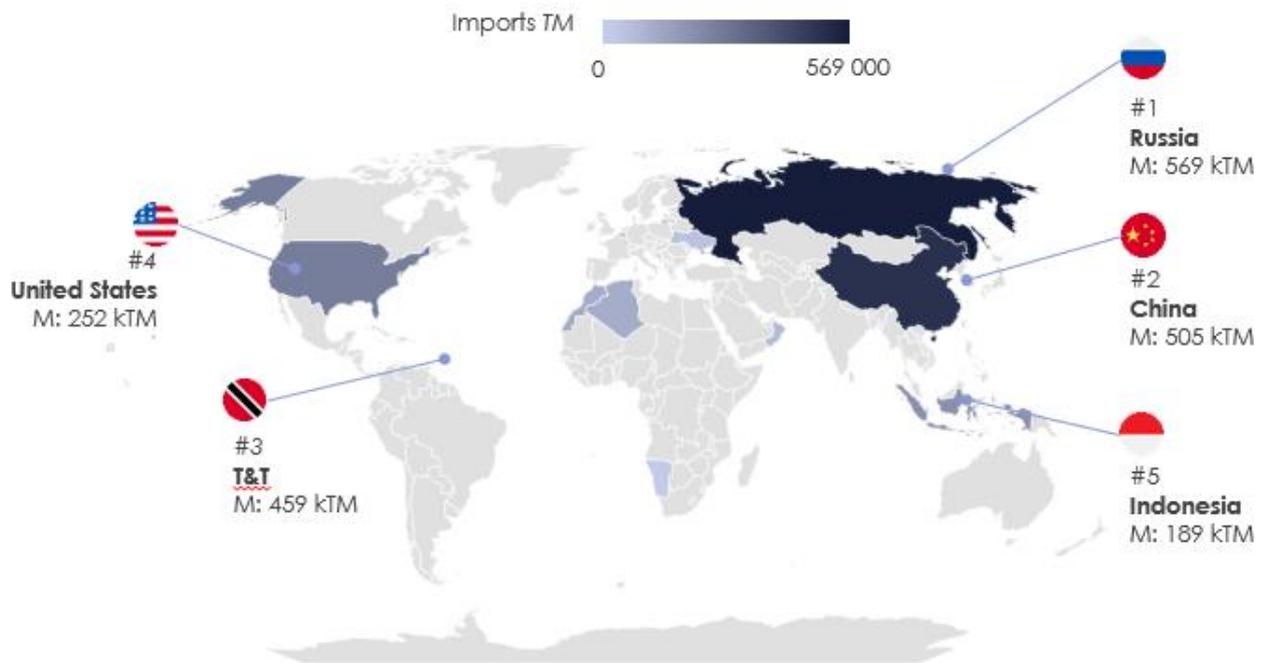
Si bien las exportaciones representan una porción pequeña en comparación con las importaciones, México tiende a exportar pequeños volúmenes de fertilizantes complejos. Como primer fertilizante sintético en la canasta de exportación se destaca el caso del fosfato monoamónico (MAP) con 59.6% de la participación de mercado en dicho período, seguido por el fosfato diamónico (DAP) que representó el 29.4% de las exportaciones. Sobre este último, cabe destacar que PEMEX cuenta con actividades productivas de estos fertilizantes, cuyo mercado objetivo es principalmente el nacional.

Rusia, China, y Trinidad y Tobago han ido incrementado su participación en la canasta de consumo nacional, siendo México altamente dependiente de las importaciones en general, y de estos países en lo particular. Considerando los principales fertilizantes sintéticos nitrogenados, en 2021 México importó ≈2.5 millones de TM (por peso). Como se ilustra en la siguiente imagen, en primera posición destaca el caso de Rusia que exportó 569 kt, hacia el país (≈431 kt de urea), al tiempo que China ocupó el segundo lugar al representar 505 kt (≈413 kt de urea); por su parte, Trinidad y Tobago destaca por ser el principal suministrador de amoníaco con un volumen de 459 kt en 2021.

¹² Auditoría Superior de la Federación. (2018). Auditoría 2018-6-90T9I-19-0470-2019

¹³ Nafziger, E. (2019). Soil temperatures and fall ammonia application. Department of Crop Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign.

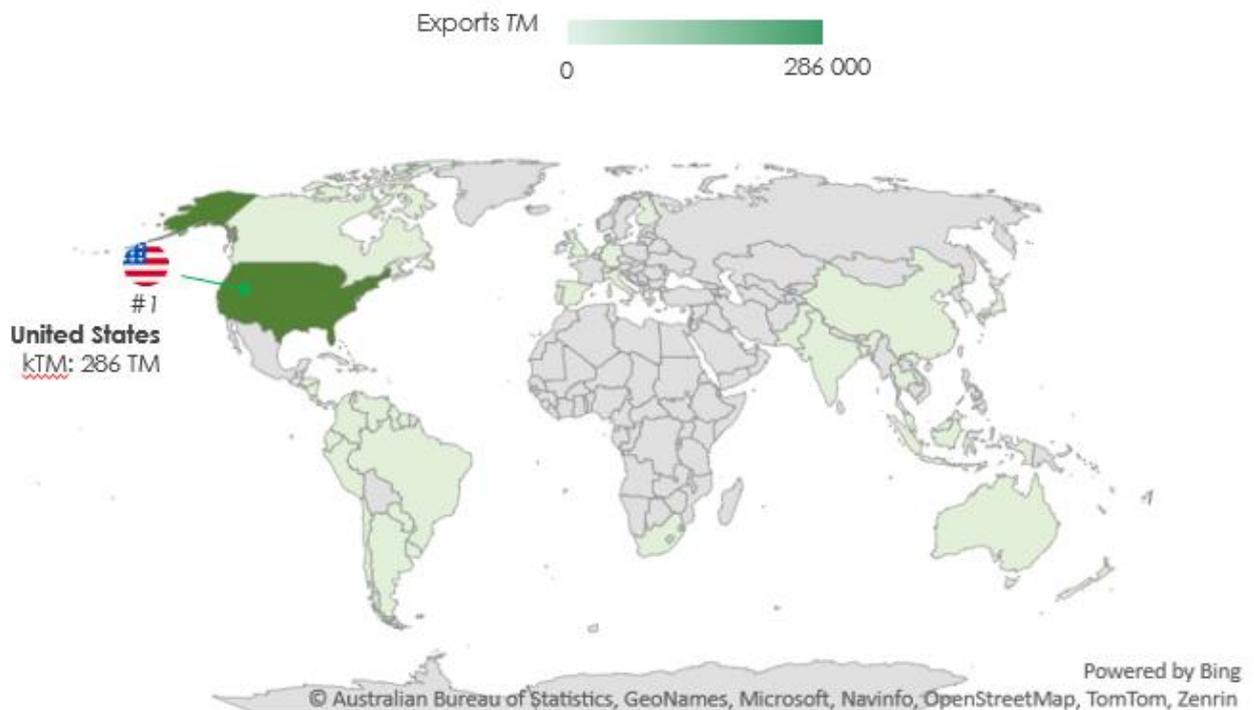
Figura 16. Importaciones derivadas amoníaco hacia México (kt, 2021)



Fuente: ITC Trade Map, WITS; visualización de Bing.

Posicionado como un importador de volúmenes importante de fertilizantes, México no participa activamente en el comercio exterior de estos productos. A pesar de esto, es importante resaltar que en 2021 se exportaron 286 kt de fosfato monoamónico (MAP) hacia Estados Unidos.

Figura 17. Exportaciones de amoníaco y derivados desde México (kt, 2021)



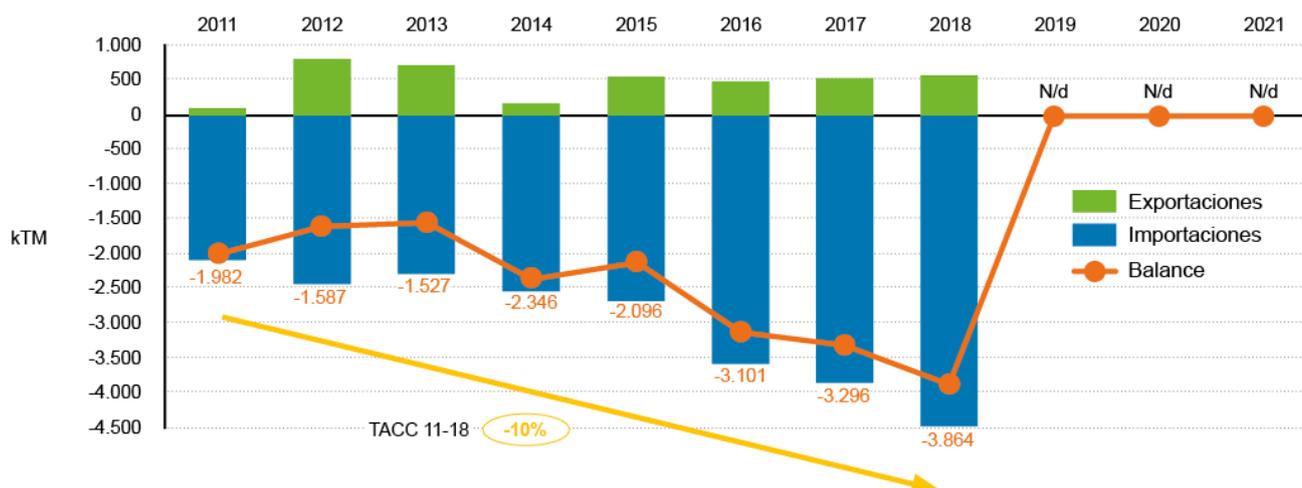
Fuente: ITC Trade Map, WITS; visualización de Bing.

Los puntos de internación para el amoníaco están en los puertos de Topolobampo en Sinaloa, Lázaro Cárdenas en Michoacán, Coatzacoalcos en Veracruz, y Salina Cruz en Oaxaca (estos dos últimos hacen parte del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec), lo que coincide con la localización de los mayores productores agrícolas en términos monetarios de México, que son Michoacán, Jalisco, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, y Veracruz¹⁴.

1.2.2.2.1 Balanza comercial

En 2018 México mostró el mayor déficit comercial de fertilizantes nitrogenados documentado¹⁵, equivalente a -3.86 millones de toneladas métricas (Mt) de balance comercial. Este es un valor relevante, ya que representa el volumen más alto registrado en la historia del país, y en términos absolutos es 1.88 Mt más alto que el déficit de -1.98 Mt observado en 2011 (TACC balanza comercial 11-18: -10%). Aunque no el único, un factor determinante de este comportamiento es la trayectoria decreciente de oferta local de amoníaco que en 2018 montó el nivel de producción más bajo observado desde el año 2000. Sobre esto último, se destaca que PEMEX ha enfrentado dificultades para garantizar el suministro de gas natural necesario para la producción del amoníaco en Cosoleacaque; además, otros aspectos que podrían estar contribuyendo a la mayor demanda de fertilizantes importados, se encuentran las dificultades técnicas para operar continuamente la planta de producción de urea Pro-Agroindustria (antes Agro Nitrogenados), así como las instalaciones productivas de Grupo Fertinal¹⁶, por mencionar algunos.

Figura 18. Balanza comercial de amoníaco y derivados seleccionados en México (kt, 2011–2021)



Fuente: ITC Trade Map, WITS, UN Comtrade, SIAVI.

Desde otra óptica, la balanza comercial deficitaria de fertilizantes nitrogenados sintéticos contrasta con el superávit de la balanza comercial agropecuaria observado en 2022, que montó 5 806 MDD (exportaciones agroalimentarias en 2022: +50 000 MDD)¹⁷.

1.2.2.3 Demanda histórica de amoníaco

El uso de fertilizantes y la productividad agrícola están condicionados por el costo de los insumos: a precios más bajos, mayor aplicación en los cultivos. De acuerdo con la información del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de México (SIAP), en la última década, 2016 fue el año con la mayor superficie agrícola cosechada (≈21 millones ha.), lo que podría justificar el optimismo en la demanda de fertilizantes nitrogenados observada en 2017.

Como se ilustra en la parte superior de la Figura 19, la demanda agregada de amoníaco (línea roja) y derivados fue del orden de 4.13 Mt en 2011, alcanzado su máximo en 2017, para finalmente ubicarse en 4.35 Mt en 2021. Esto implica una TACC de

¹⁴ Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en <https://tly/cudD>

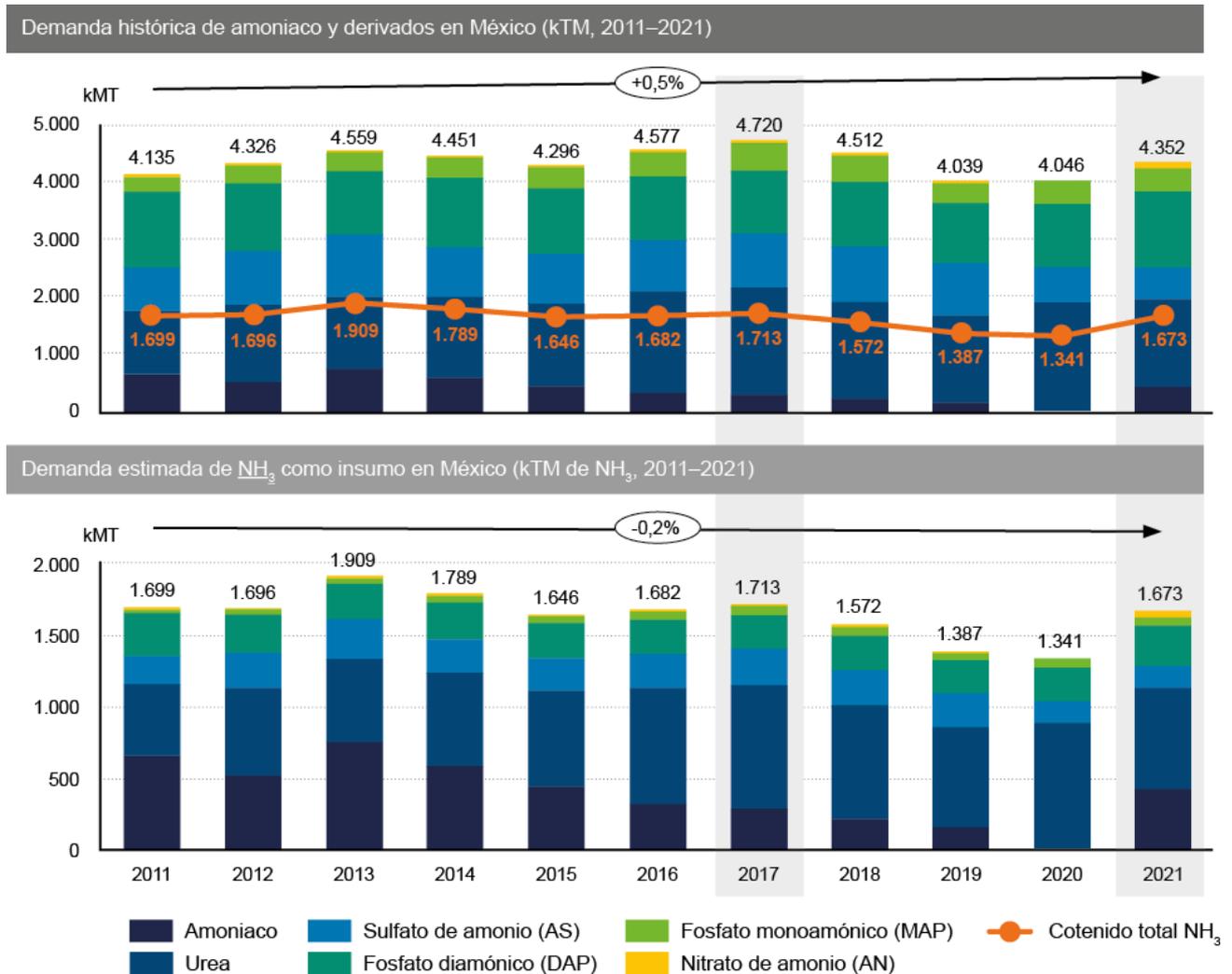
¹⁵ Última fecha en la que México ha reportado información consolidada de importaciones y exportaciones de los productos analizados

¹⁶ Expansión. (2019). La planta 'chatarra' de AHMSA tiene un primo hermano incómodo en Pemex

¹⁷ Milenio. (2023). México supera los 50 mil mdd en exportaciones agroalimentarias en 2022

0.5%, lo cual está en línea con el crecimiento estimado de la población en México de la última década¹⁸ (TACC: 1.2%), representando a los consumidores finales de los productos agrícolas que se demandan para consumo interno.

Figura 19. Demanda histórica de amoníaco y derivados seleccionados en México por volumen (arriba) y contenido de NH₃ (abajo) (kt, 2011-2021)



Fuente: NTT Data.

Tal como se ilustra en la parte baja de la Figura 19, ante la caída en la demanda agregada por la crisis económica de 2018, el apetito por amoníaco y derivados mostró una fuerte desaceleración a partir de dicho año y hasta 2020, año en que comenzó la pandemia por la COVID-19. Asimismo, como su sustituto más próximo, la urea tiende a reemplazar al amoníaco en la aplicación final en el cultivo; en el periodo 2011-2021, este fertilizante mostró una TACC de 3.5%, notablemente por encima del decremento en el consumo aparente de fertilizantes nitrogenados del mismo periodo (-0.2%).

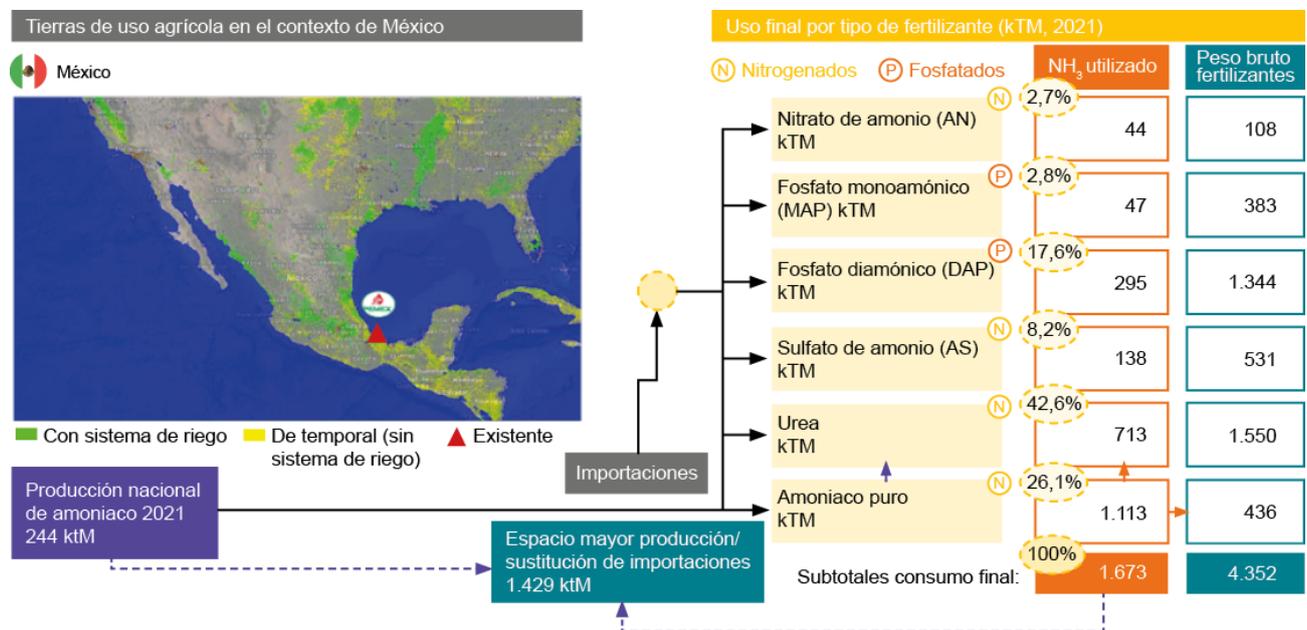
¹⁸ INEGI. Disponible en <https://t.ly/jVB9>

1.2.2.3.1 Síntesis demanda

De acuerdo con la información presentada a lo largo de las secciones anteriores, la siguiente ilustración resume aspectos estratégicos de la dinámica del mercado del amoníaco y derivados en México, sintetizados a continuación:

- **Demanda**
 - ⇒ Los principales centros de producción agrícola se ubican en (i) la costa del Pacífico en los estados de Jalisco y Sinaloa; en este último es conocida la aplicación directa de un volumen importante de amoníaco líquido en los cultivos; (ii) la región del Bajío mexicano, conformada por la parte oriental de Jalisco, así como Guanajuato y la parte norte del Estado de México; y, (iii) la costa del Golfo de México, especialmente con zonas tecnificadas al norte de Veracruz y de temporal al sur, así como en el estado de Tabasco.
 - ⇒ El consumo aparente del grupo de fertilizantes nitrogenados seleccionados en 2021 fue de ≈4.35 Mt. A la vez, el consumo aparente de NH₃ en ese mismo período ascendió a 1.11 Mt, de los cuales más de la mitad se habrían utilizado en la formulación de urea.
 - ⇒ Además, si el consumo aparente de fertilizantes antes mencionado se mide exclusivamente por el su contenido de NH₃, tenemos que la demanda agregada de NH₃ consumido en el país representó 1.67 Mt, destacándose además de la urea el nitrógeno contenido en el fertilizante DAP equivalente a 295 kt de amoníaco.
- **Oferta**
 - ⇒ El único complejo operativo para la producción de amoníaco en México se ubica al sur del estado de Veracruz, en la costa del Golfo de México; en este sitio se produjeron 244 kt del compuesto en 2021.
 - ⇒ Para completar el volumen del compuesto necesario para la producción de fertilizantes en territorio nacional, se importaron 870.5 kt de amoníaco en el mismo año.
- **Oportunidad**
 - ⇒ Asumiendo que la producción en el CPC se equipare con el promedio observado entre 2012 y 2022 (512.5 kt), en 2021 habría espacio para reemplazar importaciones de NH₃ líquido por un volumen de 1.16 Mt.

Figura 20. Esquemático de la producción, comercio internacional y uso final del NH₃ en México (kt, 2021)



NH₃ utilizado: se refiere al insumo, en términos de amoníaco, teóricamente utilizado en la producción del fertilizante.

Peso bruto fertilizantes: indica el volumen total del abono en su – forma final – de comercialización.

Fuente: NTT Data con base en USGS, IFASTAT, Trade Map, ANIQ, Plan de Negocios de PEMEX, SIE.

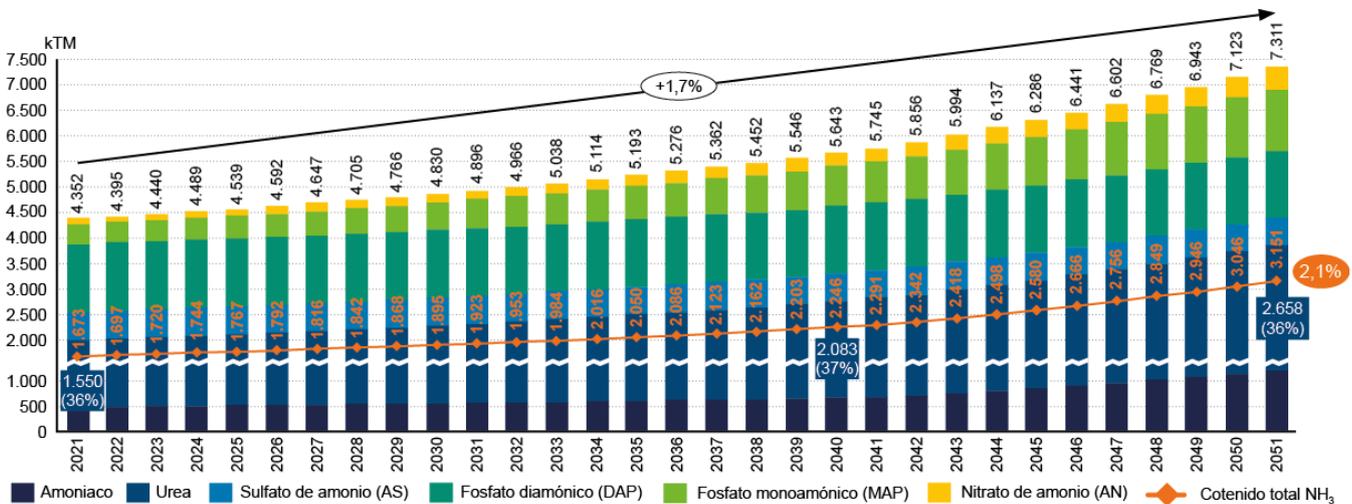
1.2.2.4 Pronóstico de la demanda

Partiendo del comportamiento observado del mercado y los datos de las secciones previas, se realizó una proyección de la demanda previsible del amoníaco y sus derivados en el país con base en las siguientes premisas:

- Se proyectó la demanda esperada a nivel de producto: NH₃, urea, AS, DAP, MAP y AN
- Cada producto crece según su TACC 2011–2021
- El valor mínimo de demanda de cada producto está limitado al volumen mínimo observado en el periodo 2011-2021

Como resultado, la demanda por fertilizantes nitrogenados sintéticos crecería a un ritmo de 1.7% anual, en términos agregados. Asimismo, de la mano de la urea, el amoníaco podría incrementar su participación de mercado 2.7X hacia 2050 (vs TAM 2021).

Figura 21. Demanda proyectada de amoníaco y derivados en México (kt, 2021–2051)



Fuente: NTT Data.

Finalmente, **respecto del potencial de usos futuros del amoníaco**, a partir de la demanda internacional esperada hacia 2030 y 2050, México podría consumir 0.2 y 0.9 Mt de NH₃ como combustible marítimo, respectivamente.

1.2.3 Capacidad productiva actual y proyectada en México

Como se ha mencionado anteriormente, PEMEX es el único fabricante de amoníaco en México, y cuenta con la infraestructura necesaria para integrar completamente la cadena de producción gas natural-amoníaco-urea en el estado de Veracruz; sin embargo, la mayor parte de dichas instalaciones han estado fuera de servicio en años recientes, encontrándose hoy en día en rehabilitación.

Tabla 2. Aspectos clave de las instalaciones de producción de NH₃ y productos seleccionados en México (2023)

Instalación	Empresa	Ubicación	Inicio de operación	Estado actual (fecha rehabilitación)	Tipo de prod.	NH ₃	Urea
Complejo Petroquímico Cosoleacaque (CPC)	PEMEX	Minatitlán, Veracruz				1,960	990
Planta IV	""	""	1977	Activa	SMR	480	-
Planta V	""	""	1978	Rehabilitación (2024)	SMR	480	-
Planat VI	""	""	1981	Rehabilitación (2024)	SMR	480	-
Planta VII	""	""	1981	Rehabilitación (2023)	SMR	480	-
Plantas de urea I and II	Pro-Agroindustria	Pajaritos, Veracruz	N/A	Activa	Gris	-	990

Fuente: NTT Data con base en Plan de negocios 2023-2027 PEMEX, ASF¹⁹, Imagen del Golfo²⁰.

El CPC está conformado por 4 plantas de amoníaco (trenes), entre las cuales **únicamente la planta IV se encuentra en condiciones operativas**. Los otros tres trenes de producción se encuentran en proceso de rehabilitación (plantas V, VI, y VII), y se espera que la planta VII vuelva a entrar en operación durante el 2023 tras un proceso de rehabilitación²⁰. Con esta intervención se espera incrementar la producción de 800 a 1900 TM/d (288 y 684 kt en términos anuales, respectivamente).

Por otro lado, la cartera de proyectos en desarrollo incluye las siguientes iniciativas de conocimiento público:

- **Proyecto GPO – Proman Topolobampo:** anunciado como uno de los más grandes de ALC, desde hace 7 años este no ha podido materializarse²¹. Se trata de una planta para la producción de amoníaco gris vía reformado con vapor de 81 mmBTU de gas natural con suministro asegurado por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para producir 770 kt de NH₃ (2 200 TM/d)²².
- **Tarafert Fertilizantes Durango:** se trata de un proyecto para elaborar de forma conjunta 300 kt de amoníaco vía SMR y 1,000 kt de urea con tecnología de captura de carbono^{23 24}, a ubicarse en el estado de Durango (al norte de México). De acuerdo con los promotores del proyecto, la inversión total ascendería a 1500 MDD y se busca que inicie operaciones en 2025.
- **Proyecto amoníaco verde Marengo I (Hy2gen + MexCo):** por ubicarse en Champotón, Campeche, este representa iniciativa pionera en México para la producción de amoníaco verde. Con una inversión de 1,100 MUSD, la planta utilizará energía eólica y solar para la producción de 170,000 tm de amoníaco verde anualmente, destinadas al mercado europeo. La energía para la planta provendrá de un parque híbrido, solar y eólico, con una capacidad total de 623 MW^{25 26}.

En la Figura 22 se presenta la ubicación de las instalaciones productivas existentes y en desarrollo.

¹⁹ ASF. (2018). Auditoría de Desempeño: 2018-6-90T9I-07-0469-2019. Disponible en <https://t.ly/2ntu>

²⁰ Imagen del Golfo. (2023). Disponible en <https://t.ly/PIKHU y t.ly/oc6Si>

²¹ Lado B. (2016). El gigante de amoníaco que se levantará sobre el ecosistema protegido: Ouhira, reserva amenazada por el influentismo

²² Expansión. (2022). CFE proveerá gas natural a una nueva planta de fertilizantes en Sinaloa

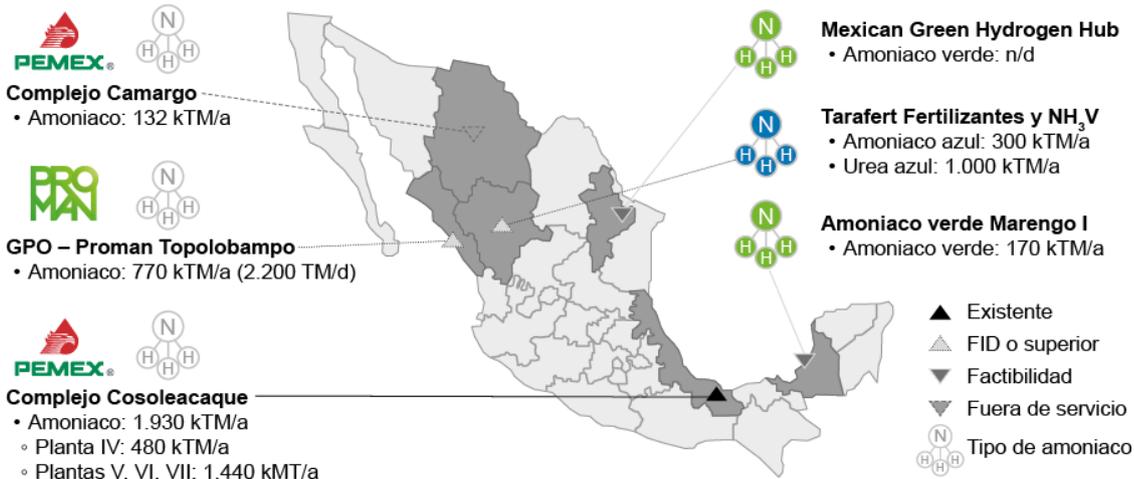
²³ Tarafert. Disponible en <https://t.ly/oSc0>

²⁴ La Jornada. (2023). Firma de fertilizantes invertirá mil 500 mdd en planta en La Laguna

²⁵ La Jornada Maya. (2023). Disponible en <https://t.ly/vU5rA>

²⁶ El Periódico de la Energía. (2023). Disponible en <https://t.ly/YC87B>

Figure 22. Mapa de capacidad productiva actual y proyectada para la producción de NH₃ en México (2023)

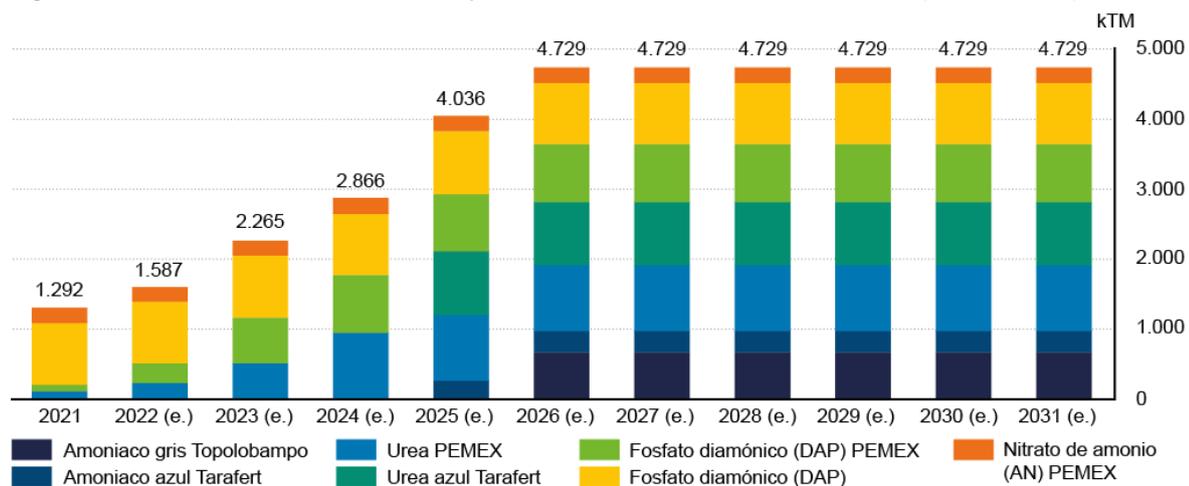


Fuente: NTT Data con base en IEA, PEMEX.

De acuerdo con información oficial divulgada a principio de año, hacia 2024, PEMEX prevé llevar su plataforma de producción anual de fertilizantes a 2 Mt, esto a partir del (i) relanzamiento de las actividades productivas de los trenes de producción V, VI, y VII de amoníaco en el CPC, y por medio del (ii) incremento en la producción de fosfato diamónico (DAP) y nitrato de amonio (AN)²⁷. In addition to PEMEX's production, by 2026 with the inclusion of the private projects mentioned above, private producers could produce an additional 300 kt of NH₃ and 1,000 kt of blue urea (Tarafert) and another 770 kt of gray NH₃ at Topolobampo (GPO – Proman).

En la siguiente Figura 23 se presenta un pronóstico de la producción de fertilizantes en México bajo un escenario en el que llegasen a materializarse en los plazos anunciados, la totalidad de los proyectos de rehabilitación y greenfield comentados en esta sección.

Figure 23. Producción estimada de NH₃ y fertilizantes seleccionados en México (kt, 2021–2031)



Fuente: NTT Data con información del Gobierno de México.

La cifra de producción estimada en 2022 refleja las condiciones productivas actuales en el país, esta representa solo ≈36.0% de la demanda estimada en la sección 1.2.2.4 para el mismo año. Por lo que hay oportunidad para llevar amoníaco renovable a este mercado, garantizando un suministro confiable y de bajas emisiones tan pronto como sea posible.

²⁷ Andrés Manuel López Obrador. Disponible en <https://t.ly/o886E>

2 Costos nivelados de producción y transporte del amoníaco verde

En esta sección se presenta un estimado de los costos de producción de amoníaco verde en México y la estimación de costo del transporte hacia los países identificados como potenciales países importadores.

2.1 Consideraciones generales sobre la producción, manejo, y exportación de NH₃

2.1.1 Producción

A pesar de que la producción de amoníaco verde puede desarrollarse a lo largo del territorio de México debido a su potencial renovable, el objetivo es identificar regiones convenientes tanto para la exportación de la molécula como para la adopción local de ella. Para ambos mercados, los puertos marítimos resultan ser ubicaciones atractivas debido a que acumulan en sus alrededores importantes actividades industriales y logísticas, además de ser el sitio natural de salida de las mercancías hacia los mercados internacionales.

Para identificar los puertos viables para la producción y embarque de amoníaco en México se evaluó:

- **Escala del puerto:** identificando los puertos de mayor tamaño, cuantificado en volumen de contenedores movilizados o de transacciones realizadas anualmente.
- **Enlace marítimo:** para garantizar que el puerto tiene las características de calado y puntos de recepción para barcos con las características de los transportadores de amoníaco que actualmente existen en el mercado.
- **Enlace ferroviario:** para movilizar volúmenes grandes de amoníaco desde y hacia el puerto: dependiendo de la ubicación geográfica de los sitios de producción y de las dinámicas comerciales internas y externas de la molécula.
- **Enlace por ducto:** como elemento de infraestructura que en el futuro podría aprovecharse, mediante las adecuaciones necesarias, para el transporte de hidrógeno o amoníaco desde o hacia el puerto.
- **Almacenamiento:** enfocado en el almacenamiento de moléculas químicas similares al amoníaco, que eventualmente pudieran ser aprovechadas para el manejo del amoníaco verde en el puerto.

2.1.2 Manejo

Analizando la documentación disponible, se identificó que el costo para construir un puerto para el manejo de amoníaco puede rondar los 5 a 10 mil millones de dólares, motivo por el cual es fundamental partir de la infraestructura actual de los países para lograr ser costo-eficientes y hacer viable la producción y exportación de amoníaco verde.

Aunque el amoníaco presenta diferentes riesgos por su toxicidad e inflamabilidad, actualmente se considera una gestión rutinaria debido a la experiencia mundial de más de un siglo en su manejo. Se considera entonces que los lineamientos de seguridad existentes²⁸ permiten mitigar los riesgos de incidentes frente al manejo del amoníaco en los puertos estudiados en México. Algunos de estos lineamientos son:

- **Cumplir con las regulaciones existentes:** Existen diferentes normativas nacionales e internacionales para la gestión de amoníaco a lo largo de su cadena de producción.
- Algunas de las organizaciones internacionales que se destacan son:
 - ⇒ **Normativa IMDG:** Es el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas, emitido por la Organización Marítima Internacional (OMI), que establece las normas y requisitos para el transporte de mercancías peligrosas por vía marítima, incluyendo el amoníaco.
 - ⇒ **Normas OSHA:** Son las normas emitidas por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (OSHA), que establecen los estándares para la seguridad y salud ocupacional en el lugar de trabajo, incluyendo instalaciones que manejan sustancias peligrosas como el amoníaco.
 - ⇒ **Normativa ISGOTT:** Es la Guía Internacional para los Terminales de Buques Tanque, emitida por la Cámara Internacional de Navegación (ICS) y la Asociación Internacional de Puertos y Terminales (IAPH), que establece

²⁸ Review of Global Regulations for Anhydrous Ammonia Production, Use, and Storage (2016), ITC MIE-APQ 4.

los estándares para el manejo seguro y eficiente de buques tanque que transportan productos químicos, incluyendo el amoníaco.

⇒ **Reglamento REACH – Unión Europea:** El Reglamento REACH establece las regulaciones para la fabricación, importación y uso de sustancias químicas en la Unión Europea, incluyendo el amoníaco.

- **Almacenamiento adecuado del amoníaco:** Cumplir con los requerimientos normativos para el almacenamiento seguro del amoníaco en las instalaciones portuarias
- **Inspecciones regulares y plan de emergencia:** Para asegurar que se cumplan con los requisitos de seguridad es necesario contar con una política de inspección regular a las facilidades.
- **Equipos de protección del personal y plan de emergencia:** Debido a la toxicidad del amoníaco es necesario contar con los elementos de protección necesarios para asegurar el bienestar de los trabajadores. Asimismo, es fundamental contar con un plan de emergencias para contener cualquier riesgo.
- **Mantener una distancia adecuada de lugares públicos:** Por ejemplo, Según la normativa ITC MIE-APQ-4 de España, las siguientes son las distancias para considerar para el almacenamiento de amoníaco:
 - ⇒ Vías de comunicación pública de circulación rápida: 20 metros
 - ⇒ Vías de comunicación pública de tráfico denso y con posibilidad de retenciones: 75 metros
 - ⇒ Lugar de concentración de personal de la propia fábrica (edificio administrativo, comedor, vestuario): 50 metros
 - ⇒ Lugar de concentración del personal del establecimiento industrial ajeno a la propia fábrica: 100 metros
 - ⇒ Agrupamiento de viviendas: 200 metros
 - ⇒ Local de pública concurrencia: 500 metros

2.2 Premisas para la estimación de los costos nivelados de producción y transporte

A continuación, se describe la metodología para el cálculo del costo nivelado de producción y transporte de amoníaco, que incluye el cálculo de costo nivelado de hidrógeno la estimación del costo nivelado de electricidad renovable a partir de energía solar fotovoltaica y eólica.

En el Anexo 1 se encuentra el libro de consideraciones y datos empleados para el modelado matemático de los costos mencionados.

2.2.1 Costo nivelado para la electricidad (LCOE) para México

El costo nivelado de electricidad (LCOE por sus siglas en inglés) corresponde al valor presente de la suma de los costes de un activo de generación de energía a lo largo de su vida útil, dividido entre la cantidad de energía que se prevé generará la planta. El cálculo de LCOE incluye los costos fijos y variables, así como el costo de posibles consumibles o combustibles, en el caso de las plantas de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles. Considerando que el LCOE se expresa en valor presente, se puede asumir constante a lo largo de los años, especialmente considerando que las plantas renovables están libres de la volatilidad del precio de los combustibles fósiles. El LCOE se expresa en USD/MWh.

Se analizaron dos tecnologías de generación renovable: la solar fotovoltaica y la eólica en dos modalidades: produciendo de forma independiente e híbrida. El análisis de planta híbrida se realizó mediante una ecuación simultánea de maximización del factor de planta y minimización del costo de producción del hidrógeno que se generaría con la electricidad de dicha planta. En algunos casos se podrá observar que la planta híbrida de menor costo corresponde a una planta de sólo una tecnología: solar o eólica cuando el potencial de generación de algunas de ellas sea muy bajo en el sitio estudiado.

En lo que respecta al potencial renovable de los sitios estudiados, a continuación, se describen algunos de los parámetros que se utilizaron para cuantificar el volumen de energía producible y con ello, el LCOE:

- Fuente de potenciales renovables:
 - ⇒ Renewables Ninja: herramienta web desarrollada por Imperial College London y ETH Zürich que muestra la cantidad estimada de energía que podrían generar los parques eólicos o solares en cualquier lugar del mundo.
 - ⇒ Datos presentados en series de 8760 datos (definición horaria)

- Base de datos para energía solar:
 - ⇒ MERRA-2 (global) (NASA)
 - ⇒ Características del modelado:
 - Sistema de seguimiento: Dos ejes
 - Inclinación: Latitud de cada sitio estudiado

- Base de datos para energía eólica:
 - ⇒ MERRA-2 (global) (NASA)
 - ⇒ Características del modelado:
 - Altura de torre eólica: Superior a 100 m
 - Modelo de generador usado: Vestas V90 2000 (2 MW)

En el Anexo 1 de este documento se muestra el detalle de las consideraciones **de CAPEX, OPEX, desempeño técnico y otras variables para el cálculo del LCOE.**

2.2.2 Costo nivelado del hidrógeno (LCOH) para México

La definición del costo nivelado de hidrógeno es bastante similar a la del costo nivelado de electricidad, con la diferencia de que el producto generado aquí es hidrógeno. Algunas de las variables consideradas para el cálculo de este indicador son: CAPEX y OPEX de la planta de electrólisis, consumo de electricidad, consumo de agua, costo del capital o de la deuda para el desarrollo de la planta, y aspectos técnicos para la cuantificación del hidrógeno que producirá el proyecto. Dentro de las variables técnicas más relevantes para el cálculo del LCOH se encuentran:

- **Eficiencia del electrolizador:** expresada en kWh/kgH₂, representa la cantidad de energía necesaria para la producción de un kilogramo de hidrógeno.
- **Carga mínima del electrolizador:** es el porcentaje mínimo de la capacidad nominal del equipo a la cual, este puede operar. Para el caso de los electrolizadores este valor ronda el 10%.
- **Carga máxima del electrolizador:** es el porcentaje máximo de la capacidad nominal a la cual puede operar un electrolizador. Los electrolizadores tipo PEM, como el que se ha elegido para el diseño de este proyecto puede operar hasta en un 120% de su capacidad nominal, lo cual le permite aumentar significativamente su factor de planta, gracias al sobredimensionamiento de la planta renovable sobre la de electrólisis.
- **Factor de planta:** Es la cantidad producida por una la planta, respecto a su capacidad de producción nominal anual. En este caso, el factor de planta considera el dimensionamiento de proyectos renovables y la capacidad de los electrolizadores de operar por encima de su capacidad nominal.

2.2.3 Costo nivelado del amoníaco (LCOA) para México

La definición de costo nivelado de amoníaco es homóloga a las definiciones de LCOE y LOCH y guarda el mismo encadenamiento: a la vez que el LCOE es un insumo para calcular el LCOH, aquí el LCOH es un dato para el cálculo del LCOA.

Los valores económicos de CAPEX, OPEX, costo de deuda, entre otros, se pueden encontrar en el Anexo 1 de este informe, junto con los datos del LCOE, LCOH y LCOA.

A nivel técnico, es importante destacar que la tecnología para la producción de amoníaco es bastante madura y sería natural pensar en el hidrógeno verde como un sustituto del hidrógeno gris, sin embargo, para que lo anterior sea posible habría que abordar el reto que supone desarrollar proyectos de electrólisis de una escala tan grande que puedan satisfacer la demanda de una planta Haber-Bosch convencional, que podrían ser centenas de MW.

Una alternativa al reto de la escala está en el desarrollo de plantas de amoníaco de menor capacidad, que sean compatibles con proyectos en la escala de decenas de MW de electrólisis. Este tipo de plantas se encuentran ahora en desarrollo y sus retos están en la miniaturización requerida, y en la flexibilidad que se necesita para operarlas, ya que las plantas renovables operan

de forma intermitente, lo que se traduce a tener que operar las plantas Haber-Bosch en rangos de capacidad más amplios de lo que se acostumbra.

2.2.4 Levelized Cost of Overseas Hydrogen and Carriers Transport

La cuantificación de costos de exportación parte del costo nivelado de producción del amoníaco (upstream). Posteriormente se cuantifica la infraestructura y energía necesaria para el transporte terrestre, almacenamiento, embarque y transporte marítimo de las moléculas desde los puertos estudiados en México, hacia los destinos que se mostrarán más adelante.

La cadena de valor considerada de las moléculas para su comercio internacional incluye:

- **Producción de hidrógeno:** se considera una producción de hidrógeno directamente acoplada a plantas renovables híbridas solar fotovoltaico – eólico.
- **Ducto:** se considera una etapa de transporte de hidrógeno gaseoso mediante un ducto de aproximadamente 40 km, el cual conectaría la planta de producción de hidrógeno con el puerto de embarque marítimo.
- **Síntesis de NH₃:** síntesis mediante el proceso Haber – Bosch. Se considera que la planta de conversión se encuentra en las cercanías del puerto (menos de 3 km de distancia).
- **Almacenamiento:** se considera un sitio de almacenamiento de amoníaco, tanto en el puerto de partida como en el puerto de destino. El dimensionamiento del almacenamiento es función del volumen de producción del proyecto, la cantidad de barcos destinada a la ruta y el tiempo de trayecto de los barcos y de acuerdo con las rutas entre origen y destinos.
- **Transporte marítimo:** se considera el transporte marítimo de amoníaco mediante un barco de las características de los que actualmente movilizan amoníaco gris alrededor del mundo. Para este proyecto se consideró una embarcación de 85,000 m³ de capacidad (aproximadamente 56 950 toneladas, considerando una densidad de 670 kg/m³ a -33°C).

2.3 Costo nivelado de producción de amoníaco en México

A continuación, se muestra la selección de sitios de producción de amoníaco, basado en el análisis de infraestructura portuaria, y el resultado de los costos de producción de electricidad y amoníaco en México.

2.3.1 Puertos de exportación

A partir de las capacidades existentes, México podría integrar un hub de producción y exportación de moléculas renovables sin incurrir inversiones considerables. Históricamente, el país ha contado con infraestructura relevante para la producción, manejo, e importación del amoníaco debido a la actividad de PEMEX, lo cual facilitaría la producción, manejo y embarque de amoníaco. Sin embargo, es importante realizar un contraste entre la disponibilidad de infraestructura existente (la cual está vinculada a la presencia de recursos fósiles en la zona) con la disponibilidad de un recurso renovable (eólica o solar) de calidad suficiente.

Con base en lo anterior, se identificaron 5 puertos marítimos de alta importancia para el amoníaco verde y un puerto terrestre que podría habilitar la entrada de amoníaco renovable mexicano a los Estados Unidos. Esta identificación consideró solo aspectos de infraestructura portuaria, enlace ferroviario, enlace por ducto y almacenamiento de petroquímicos. Estos 6 sitios son:

- API Topolobampo
- API Lazaro Cardenas
- API Salina Cruz
- API Coatzacoalcos
- ASIPONA Veracruz
- Cruce fronterizo Laredo (terrestre)

Figura 24. Puertos relevantes para el comercio de NH₃ vs. infraestructuras existentes en las regiones



Fuente: NTTDATA.

Posteriormente se analizó el potencial renovable alrededor de los 6 sitios identificados, con el objetivo de encontrar los puertos de menor costo de producción del amoníaco verde. Este análisis descartó a dos de los cinco puertos previstos originalmente, pero añadió a un sitio que a pesar de no contar con infraestructura relacionada con el amoníaco, podría ser una región productora de amoníaco verde debido a su alto potencial renovable; posiblemente uno de los más altos del país: la región de Mexicali – Baja California.

El desarrollo de capacidades de producción de hidrógeno y amoníaco verde en Mexicali tendría dos retos asociados: (1) el uso obligatorio de agua desalinizada, ya que la zona cuenta con un estrés hídrico importante y (2) el desarrollo de infraestructura Portuaria en la zona de Tijuana – Ensenada; lo cual, a pesar de tener un costo financiero importante, es una actividad que se realiza en la zona: la adecuación de puertos para el embarque de moléculas hacia Japón y otros países de Asia. Un ejemplo de esta dinámica es el proyecto Costa Azul²⁹, el cual desarrolla una planta de licuefacción de gas natural para la exportación de gas natural licuado a Japón. Este antecedente abre la posibilidad de que en el futuro se desarrollara más infraestructura para la movilización de moléculas verdes.

Posterior al análisis de potencial renovable de los puertos identificados y a la adición de la zona de Mexicali, los sitios de estudio para la producción de amoníaco verde serían:

- Mexicali
- Salina Cruz
- Topolobampo
- Coatzacoalcos
- Laredo (exportación terrestre)

2.3.2 Costos de producción del amoníaco verde

The calculation and comparison of the levelized cost of ammonia production in Mexico from 2025 to 2040 at the five selected sites was carried out using the assumptions described at the beginning of this section and the considerations in Annex 1.

It is found that, due to its high solar photovoltaic potential, the site with the greatest potential for cost-competitive green H₂ and NH₃ production in Mexico could be Mexicali, being the only site that by 2025 could deliver costs below 1000 USD/ton NH₃; and by 2030, below 700 USD/ton NH₃.

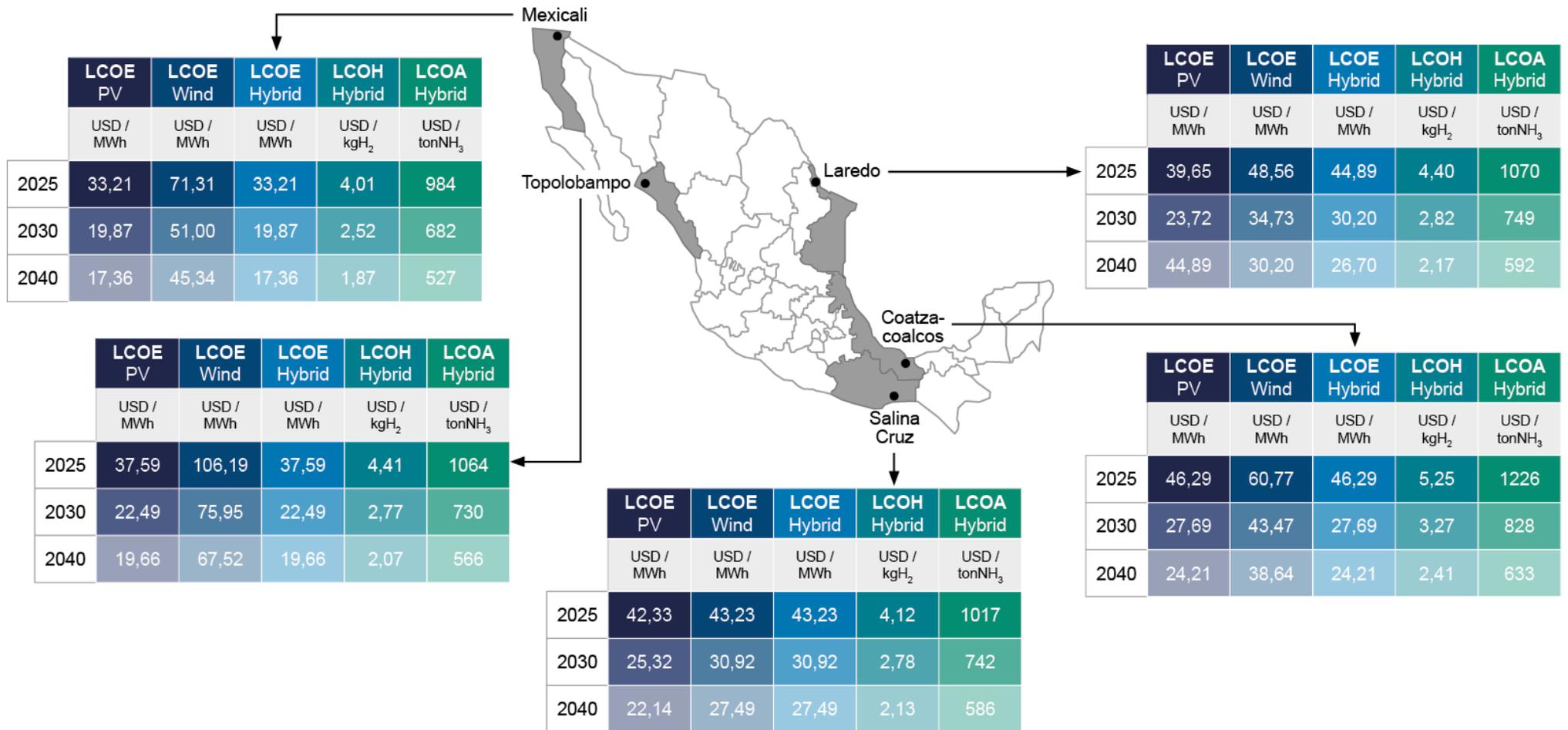
²⁹ The San Diego Union Tribune (2020) – Sempra construirá una instalación de exportación de gas natural en Ensenada

In second place comes Salina Cruz, a site favored by its wind potential; followed by Topolobampo and lastly Laredo and Coatzacoalcos, the latter with the highest LCOA in the period analyzed. Production and transportation cost in Coatzacoalcos could be up to 20% higher with respect to the Mexicali.

In the medium and long term, places such as Topolobampo and Laredo could become competitive by taking advantage of the solar photovoltaic resource (which will achieve a lower LCOE compared to solar PV), while Salina Cruz could take advantage of its wind resource.

This study has a municipal resolution of the wind resource, and the values represent area averages. In all the sites studied it is possible that an hourly resolution of the sites wind resource could result in more competitive costs than those shown in Figure 25.

Figura 25. Cálculo de LCOA híbrido por región de la República Mexicana de 2025–2040



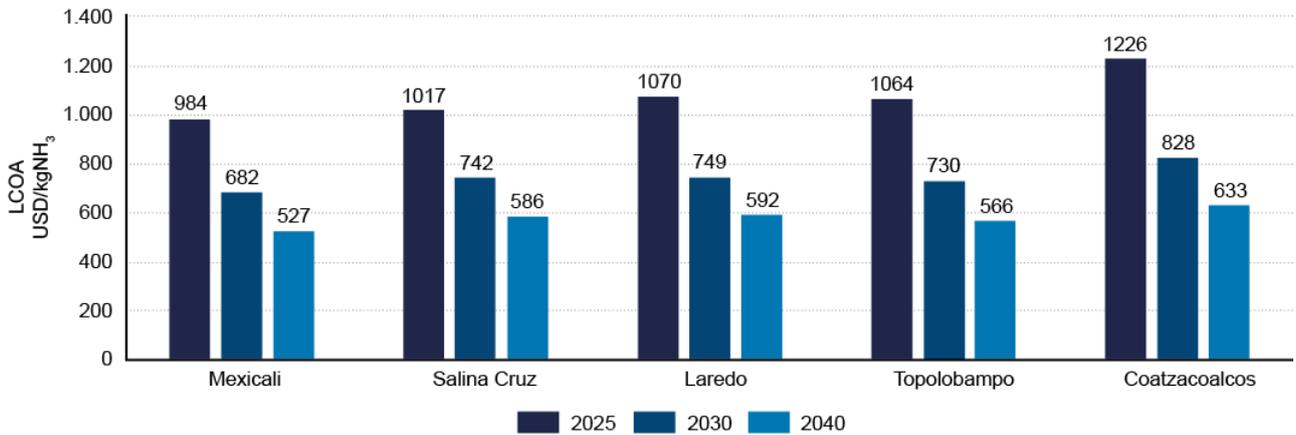
Fuente: Análisis de NTTD.

En el largo plazo (2040) Mexicali y Topolobampo se perfilan como las mejores opciones para obtener NH₃ competitivo en la costa del Pacífico, mientras que Laredo y otras regiones de Tamaulipas destacan en el lado del Golfo. Esto tendrá un efecto en los costos de transporte del amoníaco producido del lado del Pacífico hacia destinos en el Atlántico, el cual se estudiará más adelante; sin embargo, el costo de producción de las moléculas tiene un mayor impacto en el costo en el destino del amoníaco que el costo del transporte marítimo por las distancias.

En términos generales, se estima que entre 2025 y 2040 habrá una disminución en el costo nivelado de NH₃ que oscilará entre el 42% y el 48% en las diferentes zonas de México. Esto será debido a la reducción de costos de las tecnologías de generación renovable, de hidrógeno y del propio amoníaco, que se espera que mejoren su disponibilidad comercial y sus costos por efecto de la demanda incrementada.

Coatzacoalcos lidera con reducción porcentual en el costo nivelado del NH₃ con una disminución del 48.37%; siguen Topolobampo y Mexicali con reducciones del 46.80% y 46.44%. Laredo y Salina Cruz ocupan el 4o y 5o lugar, con disminuciones del 44.67% y 42.38%.

Figura 26. Proyección de los costos nivelados del NH₃ verde en México (USD/t NH₃, 2025, 2030 y 2040)

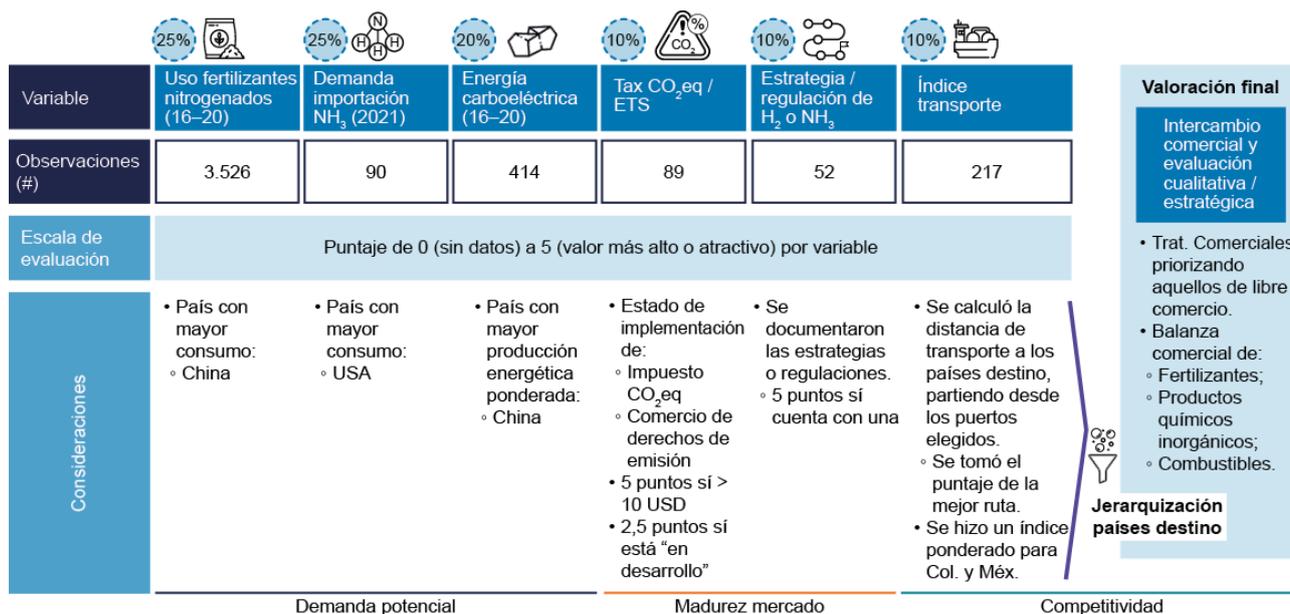


Fuente: Análisis de NTTD.

2.4 Identificación de mercados de destino

Se elaboró una metodología para identificar aquellos países con un perfil más idóneo para absorber volúmenes relevantes de amoníaco verde de origen mexicano. No obstante, pudiesen desarrollarse acuerdos, en condiciones competitivas, entre productores locales y consumidores privados que no pertenezcan al grupo de destinos prioritarios. El proceso así como algunos aspectos clave de las variables analizadas, se ilustran en la siguiente figura:

Figure 27. Metodología para la identificación de potenciales destinos de exportación del NH₃ verde desde México



Source: NTT Data

En una primera etapa, a partir del análisis de una serie de variables comparables entre países se procede a calificarlos según su desempeño en las siguientes dimensiones:

- **Demanda potencial:** se recolectaron variables que permitiesen cuantificar la demanda real de amoníaco en su estado puro como (i) el volumen de importaciones en 2021, así como el (ii) uso de fertilizantes nitrogenados inorgánicos (consumo del periodo 2016 y 2020). Asimismo, dada la creciente necesidad de encontrar fuentes de energía más sostenibles, se incluyó también la (iii) producción de energía eléctrica a partir de centrales carboeléctricas en el periodo de 2016 a 2020.
- **Madurez del mercado:** con el fin de determinar un potencial de adopción del amoníaco renovable, se documentaron por un lado (iv) el estado de la implementación de sistema de comercio de derechos de emisión o de gravámenes directos a las emisiones de CO₂e y (v) la existencia de políticas estratégicas o leyes para el uso del amoníaco o del H₂V como su precursor.
- **Competitividad:** en esta dimensión se compararon la (vi) distancia náutica desde los principales puertos de México hacia los destinos.

En conjunto, a través de estas variables se analizaron todos los países con información pública disponible y se jerarquizaron utilizando una escala de cero a cinco para cada una de las 6 variables.

Los resultados de este ejercicio condujeron a una matriz de selección de potenciales mercados importadores de amoníaco verde desde México. Como se puede observar en la Tabla 3, los mercados más atractivos, junto a Estados Unidos y la India, están en la Unión Europea y la región de Asia-Pacífico (China, Corea del Sur y China).

Tabla 3. Parámetros clave de los principales países con potencial de recibir amoníaco verde de México

Orden	Región (BM)	País	Demanda H ₂ (2040)	Demanda H ₂ (2050)	Uso fertilizantes nitrogenados 16–20	Demanda importación NH ₃ (2021)	Σ GWh 16–20 Carboeléctrica y gas	Impuesto CO _{2eq} /ETS	Estrategia H ₂
			Unidades	Mt	Mt	kt de nutrientes N	kt	GWh	USD (2023)
1	Asia Pacífico y Este de Asia	China	17,5	56,3	121.243	809	22.853.281	6,5	Sí
2	Norteamérica	Estados Unidos	18,3	42,3	59.201	2.531	13.467.890	30,8	Sí
3	Sur de Asia	India	15,8	28,0	90.838	2.438	6.040.002	-	Sí
4	Europa y Asia Central	Belgica	2,5	10,4	927	1.037	133.176	86,5	Sí
5	Asia Pacífico y Este de Asia	Corea del Sur	1,3	3,9	1.575	1.366	1.918.237	18,8	Sí
6	Europa y Asia Central	Francia	1,3	2,3	10.609	683	229.512	86,5	Sí
7	“”	Alemania	5,3	6,8	7.136	367	1.529.492	86,5	Sí
8	“”	Noruega	0,8	1,1	524	-	10.959	86,5	Sí
9	Medio Oriente y Norte de África	Marruecos	-	-	1.065	1.654	134.832	-	Sí
10	Norteamérica	Canadá	3,2	6,2	13.474	4	573.551	40,0	Sí
11	Europa y Asia Central	Países Bajos	0,9	3,4	939	306	445.578	86,5	Sí
12	“”	Portugal	-	-	360	193	129.149	86,5	Sí
13	“”	Italia	1,0	2,8	2.958	51	811.155	86,5	Sí
14	“”	Reino Unido	1,3	1,7	5.089	-	738.015	99,0	Sí
15	“”	Polonia	-	-	5.396	49	691.786	86,5	Sí
16	“”	Suecia	1,3	1,8	973	267	7.179	86,5	Sí
17	Latinoamérica y Caribe	Chile	0,7	1,1	1.049	355	212.344	5,0	Sí
18	Europa y Asia Central	Dinamarca	0,2	0,3	1.122	27	37.644	86,5	Sí
19	Asia Pacífico y Este de Asia	Nueva Zelanda	-	-	2.265	0	38.925	52,6	Sí
20	Europa y Asia Central	Finlandia	-	-	739	-	62.012	86,5	Sí
21	“”	Eslovenia	-	-	119	1	25.786	86,5	Sí
22	“”	Turquía	-	-	8.990	839	-	-	Sí
23	Asia Pacífico y Este de Asia	Japón	3,0	20,0	1.847	217	3.716.563	2,4	Sí
24	Europa y Asia Central	República Checa	-	-	1.710	-	-	86,5	Sí
25	“”	España	1,2	3,4	5.168	434	470.952	-	Sí

Fuente: NTT Data.

Los acuerdos tipo memorandum of understanding (MoU) o de off-take agreements tienden a ser requeridos por instituciones financieras y otros proveedores de capital para lograr el cierre financiero de una transacción que pudiese demandar recursos financieros del orden descrito en la sección **Puertos de exportación**.

Tomando en cuenta que la formalización de esta clase de acuerdos será clave para llevar a buen término un proyecto de amoníaco verde en México, como paso final y de manera complementaria al análisis previo, se realizó una valoración cualitativa de la dinámica comercial en materia de fertilizantes, químicos inorgánicos y combustibles.

Así, los mercados internacionales con mayor atractivo quedaron definidos de la siguiente forma:

Figura 28. Potenciales mercados importadores de NH₃ verde mexicano

Destino	 Origen México – Consideraciones clave
ALEMANIA 	Está en el TOP 10 de metodología de priorización
CHINA 	Mayor consumidor de fertilizantes nitrogenados y mayor generador de energía termoeléctrica
COREA DEL SUR 	4to mayor importador de NH ₃ (2021) y ecosistema apropiado para el uso de H ₂
ESTADOS UNIDOS 	México es el principal exportador a EU, por medio del USMCA
JAPÓN 	Está en el cuartil superior de consumo de NH ₃ (2021); Su ambición es desarrollar las tecnologías para el uso masivo del H ₂ / derivados renovables

Fuente: NTTDATA.

2.5 Exportación de amoníaco verde desde México

2.5.1 Costo del transporte hacia los mercados destino

Considerando los países seleccionados como objeto de estudio para la exportación de amoníaco renovable, se analizaron dos formas de transporte: marítima y terrestre mediante tren.

Ambas alternativas de transporte fueron estudiadas desde la misma óptica de costos nivelados mediante la que se estudió el costo de producción del amoníaco, es decir, una suma de costos de inversión (CAPEX), mantenimiento (OPEX), combustibles, consumibles, costo de deuda, etc.; dividido por la variable útil del proceso, que en este caso son los km de transporte. El análisis de costos nivelados se hace considerando el tiempo de vida útil de los activos.

La etapa de transporte marítimo en la cadena de valor de la exportación de amoníaco verde es una función directamente proporcional a la distancia entre los puntos de origen y destino y el principal rubro de contribución al costo es el combustible. Este estudio ha considerado el uso de barcos convencionales de transporte de amoníaco de acuerdo con la oferta internacional de estos navíos, es decir, que el combustible considerado en el modelo de cálculo es IFO (International Fuel Oil).

Por otro lado, el transporte terrestre de amoníaco entre Laredo y Houston consideró el uso de carro tanques convencionales, muchos de los cuales incluso movilizan amoníaco gris entre México y Estados Unidos, los cuales tienen una capacidad de 125 – 130 m³. En el caso de la ruta Laredo – Houston se aprovecha el enlace ferroviario internacional operado por Kansas City Southern de México.

Figura 29. Costo de transporte (USD/tonNH₃) de NH₃ desde México



Fuente: Análisis de NTTDATA.

Los resultados del costo de transporte marítimo de amoníaco desde México hacia Asia colocan a Mexicali como el puerto de salida más económico, mientras que las rutas marítimas desde México hacia Europa y Estados Unidos establecen a Coatzacoalcos como el puerto más competitivo. Esta información permite conocer el rango de costos del transporte marítimo desde orígenes distantes dentro del país. Por ejemplo, el transporte de amoníaco de México a Hamburgo en Alemania podría rondar los 38.30 a 55.46 USD/ton NH₃, sin embargo, es información que no permite tomar decisiones, sino hasta que se conjuga con el análisis del costo de producción de amoníaco alrededor de cada sitio.

2.5.2 Costo de exportación del amoníaco mexicano en 2025

De acuerdo con el análisis de costos realizado, Mexicali se perfila como el sitio de mayor potencial para la producción y exportación de amoníaco verde en México. Como se mencionó anteriormente, a pesar de que Coatzacoalcos es un origen de mayor cercanía geográfica hacia Europa, sus mayores costos de producción de la molécula no logran ser compensados con una menor distancia al destino, de modo que, en puerto de destino, el amoníaco de Mexicali es 212 USD/ton más competitivo que el de Coatzacoalcos.

Figura 30. Costos en puerto de destino del amoníaco mexicano en 2025

Costo del NH ₃ verde* (USD/tonNH ₃ , Escenario 2025)					Costo del NH ₃ * (USD/tonNH ₃ , Escenario 2025)	
	Mexicali	Salina Cruz	Topolobampo	Coatzacoalcos	HOUSTON	Laredo
HAMBURGO 	↓ \$ 1.124	\$ 1.137	\$ 1.200	↑ \$ 1.332		\$ 1.082
SHANGHAI 	↓ \$ 1.103	\$ 1.157	\$ 1.193	↑ \$ 1.408		
BUSAN 	↓ \$ 1.097	\$ 1.154	\$ 1.190	↑ \$ 1.396		
HOUSTON 	↓ \$ 1.075	\$ 1.088	\$ 1.148	↑ \$ 1.280		
KOBE 	↓ \$ 1.095	\$ 1.148	\$ 1.185	↑ \$ 1.395		

↑ mayor costo
↓ menor costo

* costo del NH₃ verde = costo transporte + costo de venta de NH₃ en el destino

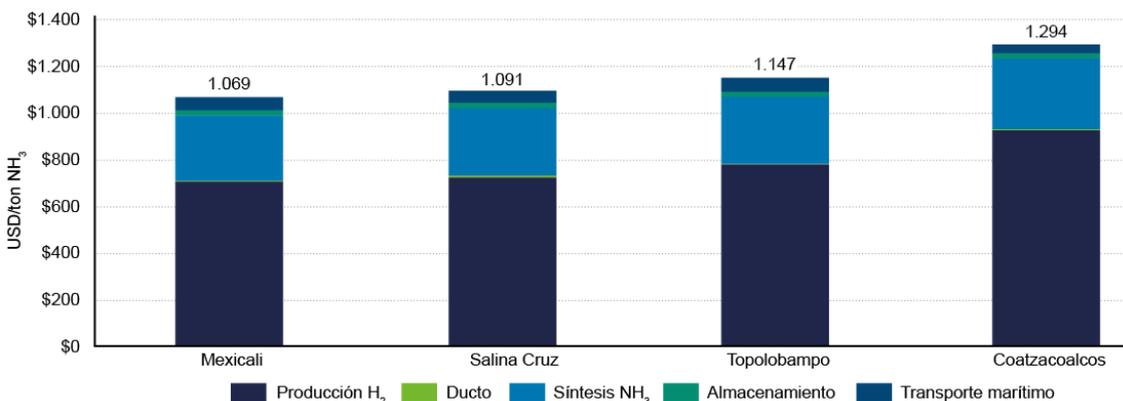
Fuente: Análisis de NTTDATA.

Se observa que el segundo sitio de mayor competitividad para la producción y exportación de amoníaco verde desde México es Salina Cruz, llegando a los destinos con costos de solo 60 USD/ton mayor que los de Mexicali, esto incluso en destinos como Alemania y Estados Unidos (Houston), donde la ruta marítima obligaría a los navíos a ir hasta Panamá para cruzar del lado Pacífico al lado Atlántico. Lo anterior deja como principal mensaje que la proximidad a un destino no garantiza costos más bajos; la clave está en la producción eficiente y en el acceso a energía asequible para lograr una síntesis competitiva del NH₃.

Cuando se analiza el desglose de costos a lo largo de la cadena de valor del amoníaco en exportación en 2025: se puede ver que más del 60% del costo de amoníaco en destino corresponde al costo de producción de hidrógeno y que cuando se incorpora la síntesis del amoníaco, estas dos etapas representan en todos los casos más del 85%, mientras que en ningún caso el transporte marítimo supera el 8% del costo. Más adelante se analiza cómo evoluciona esta distribución de costos, sin embargo, la tendencia será a que el costo de producción del amoníaco represente los mayores costos a lo largo de la cadena de valor de la exportación.

La cadena de valor analizada considera el transporte de hidrógeno mediante ducto (40 a 50 km) desde su sitio de producción hasta las cercanías de puerto (radio de 5 km). No obstante, existen múltiples alternativas mediante las cuales se podrían movilizar insumos desde el sitio de generación hacia el puerto, incluyendo la transmisión eléctrica, el transporte de hidrógeno terrestre (comprimido o licuado en camiones), el ducto e incluso el transporte terrestre o por ducto de la molécula de amoníaco ya sintetizada. La aproximación de transportar hidrógeno mediante ducto tiene como objetivo el aprovechar la infraestructura de producción de amoníaco de lugares como Coatzacoalcos, si esto fuera viable a nivel de negocio y operativamente.

Figura 31. Desglose del costo de exportación del NH₃ de México a Alemania (2025)



Fuente: Análisis de NTTDATA.

2.5.3 Costo de exportación del amoníaco mexicano en 2030

Se observa que a diferencia del escenario 2025, para 2030 la mayoría de las rutas de exportación de amoníaco desde México se encuentran por debajo de los 1000 USD/ton llegando a los destinos estudiados. Incluso en las rutas desde Mexicali hacia Corea del Sur, Japón y Estados Unidos se rompe la barrera de los 800 USD/ton.

Para 2030, Salina Cruz deja de ser el segundo mejor sitio para exportación de amoníaco hacia todos los destinos, ganando competitividad Topolobampo y siendo la segunda alternativa más costo competitiva después de Mexicali en las rutas hacia China, Corea del Sur y Japón con costos del 3% al 5% menores respecto a Salina Cruz.

Por su parte, Coatzacoalcos seguiría siendo el origen mexicano con menor costo competitividad hacia los destinos elegidos e incluso podría ser el único origen con un costo de llegada de más de 100 USD/ton de amoníaco en la ruta hacia China. Lo anterior se debe a que su evaluación de potencial renovable fue la menos favorecida entre los sitios estudiados en México.

En lo que respecta a la exportación de amoníaco hacia Estados Unidos, Laredo se mantiene como la opción de menor costo, mediante el transporte vía tren de la molécula, sin embargo, la diferencia entre Laredo y Mexicali es de solo 12 USD/ton NH₃, a pesar de que el amoníaco de Mexicali debería ser embarcado y el navío tendría que ir hasta el canal de Panamá para llegar a Houston. Esto es interesante, puesto que, a pesar de ser geográficamente tan distantes, más regiones de la frontera norte, podrían suministrar amoníaco verde a costos competitivos en Estados Unidos.

Figura 32. Costos en puerto de destino del amoníaco mexicano en 2030

Costo del NH ₃ * (USD/tonNH ₃ , Escenario 2030)					Costo del NH ₃ * (USD/tonNH ₃ , Escenario 2030)	
	Mexicali	Salina Cruz	Topolobampo	Coatzacoalcos		Laredo
HAMBURGO 	↓ \$ 822	\$ 862	\$ 866	↑ \$ 934	HOUSTON 	\$ 761
SHANGHAI 	↓ \$ 801	\$ 882	\$ 859	↑ \$ 1.010		
BUSAN 	↓ \$ 795	\$ 879	\$ 856	↑ \$ 998		
HOUSTON 	↓ \$ 773	\$ 813	\$ 814	↑ \$ 882		
KOBE 	↓ \$ 793	\$ 873	\$ 851	↑ \$ 997		

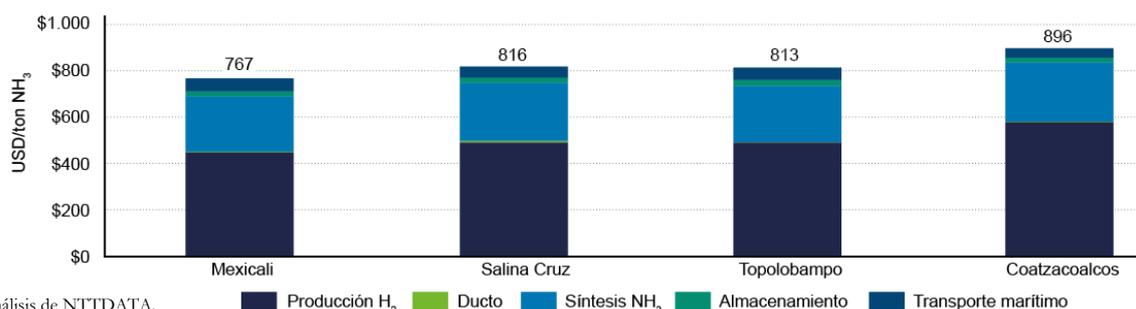
↑ mayor costo
↓ menor costo

* costo del NH₃ verde = costo transporte + costo de venta de NH₃ en el destino

Fuente: Análisis de NTTDATA.

En 2030, el costo del NH₃ desde México a Alemania sigue siendo impulsado por la producción de H₂ y la síntesis de NH₃, sin embargo, a medida que la electricidad renovable y la producción de H₂ disminuyan sus costos, se espera que el costo de producción de amoníaco disminuya también en todos los lugares de origen. Por ejemplo, en promedio, el costo de síntesis del amoníaco disminuye en un 15% en comparación con 2025, sin embargo, las etapas asociadas a la logística del amoníaco (almacenamiento y transporte) se mantienen aportando menos del 10% al costo de la molécula en puerto de destino.

Figura 33. Desglose del costo de exportación del NH₃ de México a Alemania (2030)



Fuente: Análisis de NTTDATA.

2.5.4 Costo de exportación del amoníaco mexicano en 2040

En el largo plazo, la exportación de amoníaco desde México tiene una tendencia marcada y es la mayor viabilidad en las zonas donde el potencial solar es el más alto. Lo anterior se explica por las proyecciones de la evolución del costo de las tecnologías de generación solar fotovoltaica. En los últimos 15 años, pocas tecnologías han visto un mayor desarrollo tecnológico y un decremento de costos más acelerado como la solar fotovoltaica.

Mexicali y sus cercanías en Baja California y Sonora podrían ser las regiones de mayor costo competitividad para la producción de amoníaco desde el 2025 y hasta el 2040, año en el cual Topolobampo se logra posicionar como el segundo sitio de mayor costo en México, superando a Salina Cruz, un sitio que está dominado por su potencial eólico.

Aunque Coatzacoalcos alcanza costos cercanos a Topolobampo como 739 USD/ton NH₃ frente a los 702 USD/ton NH₃ de Topolobampo en la ruta hacia Alemania, en general se mantiene como una ruta poco competitiva hacia los destinos asiáticos, donde la diferencia en costos de llegada a destino supera en por lo menos 100 USD a Topolobampo y son al menos 160 USD más altos frente a Mexicali.

En lo que respecta a la exportación terrestre de amoníaco entre Laredo y Houston, la ruta se mantiene como la más económica desde 2025 y hasta 2040, aunque en costos Mexicali es muy cercana con 618 USD/ton frente a los 604 USD/ton de Laredo. La ubicación geográfica y la disponibilidad de infraestructura en Laredo para comerciar con Estados Unidos podría sentar un habilitador muy importante para Tamaulipas para participar del mercado americano del amoníaco renovable.

Figura 34. Costos en puerto de destino del amoníaco mexicano en 2040

Costo del NH ₃ * (USD/tonNH ₃ , Escenario 2040)					Costo del NH ₃ * (USD/tonNH ₃ , Escenario 2040)	
	Mexicali	Salina Cruz	Topolobampo	Coatzacoalcos		Laredo
HAMBURGO 	↓ \$ 667	\$ 706	\$ 702	↑ \$ 739	HOUSTON 	\$ 604
SHANGHAI 	↓ \$ 646	\$ 726	\$ 695	↑ \$ 815		
BUSAN 	↓ \$ 640	\$ 723	\$ 692	↑ \$ 803		
HOUSTON 	↓ \$ 618	\$ 657	\$ 650	↑ \$ 687		
KOBE 	↓ \$ 638	\$ 717	\$ 687	↑ \$ 802		

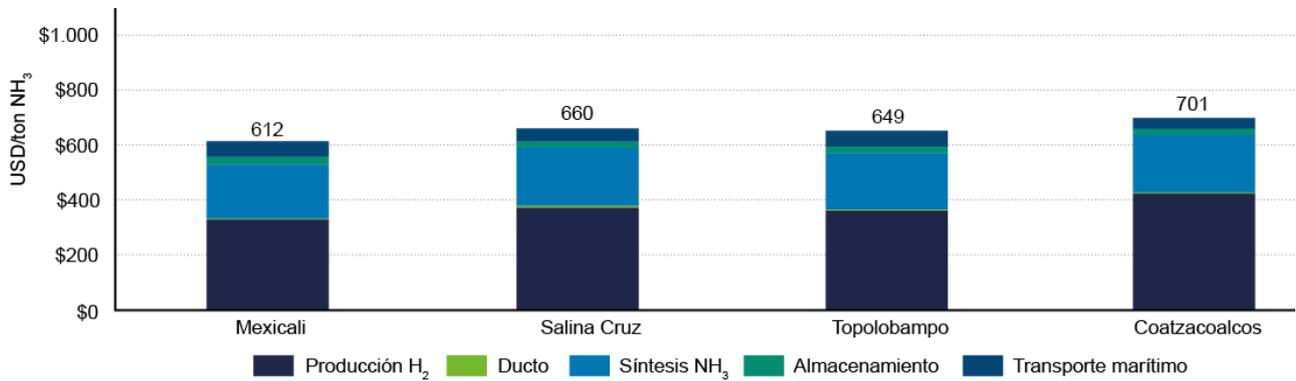
↑ mayor costo
↓ menor costo

* costo del NH₃ verde = costo transporte + costo de venta de NH₃ en el destino

Fuente: Análisis de NTTDATA.

La disminución esperada en los costos de producción de H₂ y síntesis de NH₃ para 2040 podría resultar en precios de venta más bajos del NH₃ exportado desde México hacia todos los destinos. Por citar un ejemplo, se espera que el costo del amoníaco mexicano en Alemania disminuya aproximadamente un 20% para el año 2040 en comparación con 2030 y un 43% en comparación con los costos de 2025.

Figura 35. Desglose del costo de exportación del NH₃ de México a Alemania (2040)



Fuente: Análisis de NTTDATA.

2.5.5 Coatzacoalcos: caso de producción en Salina Cruz y transporte mediante amoniaducto a Veracruz

El análisis de costos de producción y exportación de amoníaco desde los distintos puertos de México ha identificado que, debido a sus bajas velocidades de viento y limitados niveles de radiación solar, Coatzacoalcos es el puerto mexicano con mayores costos de producción de la molécula, y por tanto, mayores costos de exportación.

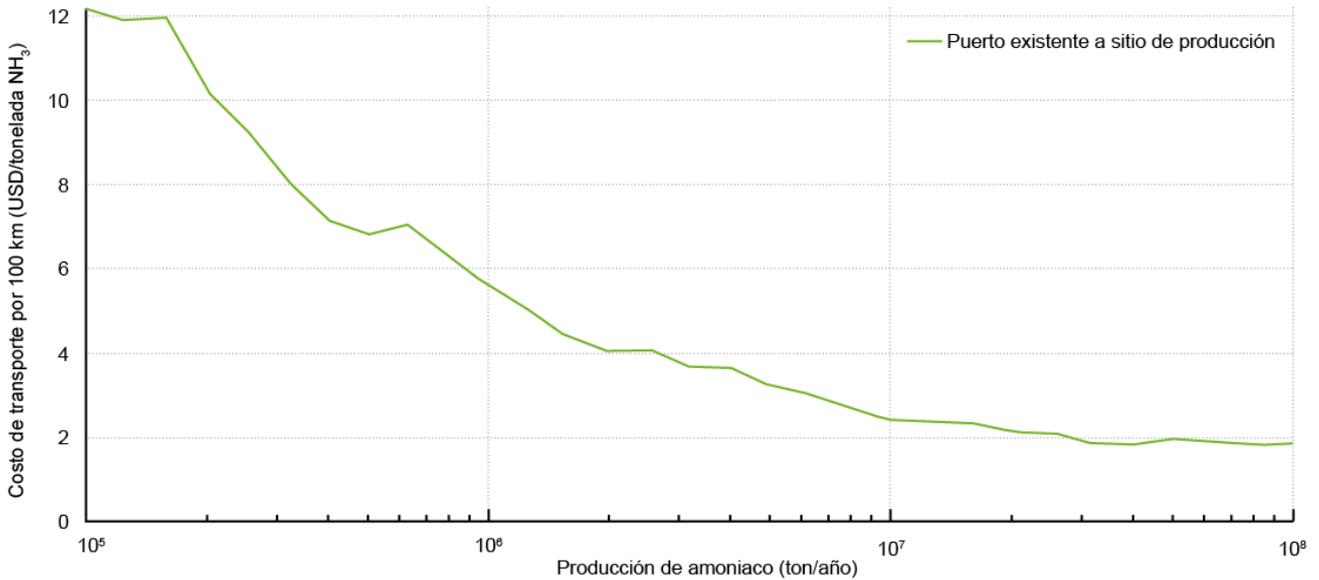
Como se ha mencionado anteriormente, la región del Istmo de Tehuantepec en México cuenta con el único amoniaducto de largo alcance en ALC, el cual une a la Terminal Refrigerada de PEMEX en Salina Cruz (Oaxaca) con el Complejo Petroquímico Cosoleacaque, prácticamente conectando de manera directa al océano Pacífico (Oaxaca) con el Atlántico (Coatzacoalcos-Minatitlán). Este ducto es propiedad y operado por la empresa PEMEX y cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 6600 ton/día, siendo este un ducto de 10 pulgadas de diámetro que corre a lo largo de 256 kilómetros entre los puntos antes indicados.

En este ejercicio, se ha estimado el costo de producir el amoníaco en Salina Cruz, donde el potencial eólico y solar fotovoltaico es favorable y transportarlo a Coatzacoalcos, donde la infraestructura de transporte se encuentra desplegada.

De acuerdo con un estudio del Department of Engineering Science de la Universidad de Oxford del año 2021³⁰, el costo de transporte del amoníaco mediante ducto es una función exponencial decreciente respecto a la variable “producción anual de amoníaco”, tal como se muestra en la Figura 36 - Costo de transporte del amoníaco mediante amoniaducto (Fuente: Salmon et al., iScience 24,2021) De acuerdo con esta figura, el costo de transporte del amoníaco de Salina Cruz a Coatzacoalcos debería ser ubicado en el gráfico, en el eje X, entre 10⁶ y 10⁷, siendo que la capacidad de 6600 ton/día de amoníaco se traduce a 2.4 millones de toneladas anuales, resultando en un costo aproximado de **4 USD/ton – 100km**. Este valor, multiplicado por 2.56, para considerar los 256 km de ducto entre el lado Pacífico y Atlántico del Istmo, representa un costo de aproximadamente **10.24 USD/ton de amoníaco**.

³⁰ Salmon, Nicholas, ENG OX (2021), Optimization of green ammonia distribution systems for intercontinental energy transport

Figura 36. Costo de transporte del amoníaco mediante amoniaducto



Fuente: Salmon et al., iScience 24, 2021.

Cuando se hace el análisis de costo del amoníaco en exportación en 2030, por ejemplo, Coatzacoalcos permanece como el lugar más costoso para exportar amoníaco desde México, sin embargo, se observa una reducción notable de costos. En el caso de Alemania, por ejemplo, la diferencia entre producir en Coatzacoalcos o traer desde Salina Cruz es de 62 USD, representando un potencial ahorro de hasta 2 995 840 USD si consideramos el volumen de un barco promedio de amoníaco de 80 mil metros cúbicos (48 320 toneladas).

Los costos de llegada a puertos de destino del amoníaco proveniente de Coatzacoalcos o de Salina Cruz permanecen muy cercanos, sin embargo, en la práctica esto puede significar una ventaja para el aprovechamiento de la infraestructura en Veracruz o para el despacho eficiente desde la perspectiva logística de amoníaco según el destino: a Europa desde el Golfo de México y a Asia desde el Océano Pacífico.

Figura 37. Costos de exportación del amoníaco mexicano en 2030, considerando el uso del amoniaducto Coatzacoalcos – Salina Cruz

Costo del NH ₃ * (USD/tonNH ₃ , Escenario 2030)					
	Costo NH ₃ (2021)	Mexicali	Salina Cruz	Topolobampo	Coatzacoalcos amoniaducto
HAMBURGO	\$499	↓ \$ 822	\$ 862	\$ 866	↑ 872
SHANGHAI	\$510	↓ \$ 801	\$ 882	\$ 859	↑ 892
BUSAN	\$546	↓ \$ 795	\$ 879	\$ 856	↑ 889
HOUSTON	\$535	↓ \$ 773	\$ 813	\$ 814	↑ 823
KOBE	\$557	↓ \$ 793	\$ 873	\$ 851	↑ 883

↑ mayor costo

↓ menor costo

* costo del NH₃ verde = costo transporte + costo de venta de NH₃ en el destino

Fuente: Análisis de NTTDATA.

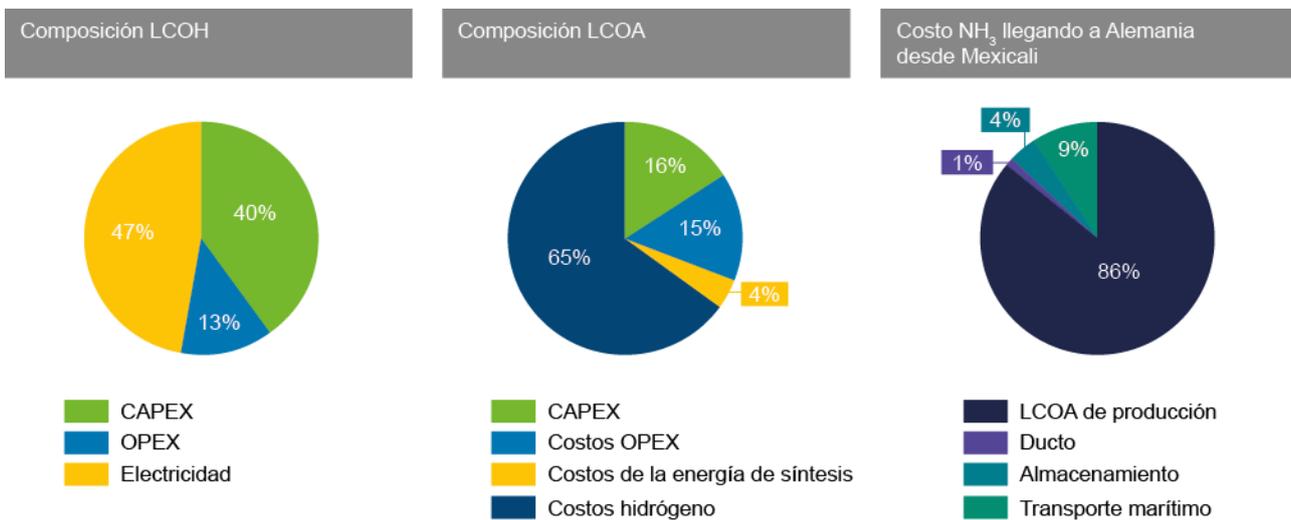
2.5.6 Análisis de costos para la competitividad de la exportación del NH₃ mexicano

La disponibilidad de electricidad a bajo costo es un factor crucial para alcanzar precios competitivos tanto en la producción de hidrógeno como de amoníaco.

Garantizar un suministro de electricidad eficiente y económico resulta fundamental para alcanzar la rentabilidad deseada en la producción de amoníaco en los países de destino. Se realizó un análisis de composición de costos de la molécula de hidrógeno, de amoníaco y del amoníaco puesto en destino, para la ruta Mexicali – Alemania en 2030, y se encontró que la producción contribuye a más del 86% del costo del amoníaco en destino, mientras que el transporte marítimo contribuye solamente con un 9% al costo total. Del costo de producción del amoníaco, el 65% corresponde al costo de producción de hidrógeno, del cual, a su vez, la electricidad renovable representa el 47%.

El decremento de costos del amoníaco verde, del hidrógeno y de la electricidad renovable serán consecuencia de mejoras tecnológicas, decrementos en CAPEX y optimización en la ejecución de los proyectos, sin embargo, el análisis realizado nos confirma que cualquier política de adopción de hidrógeno debe ser en esencia una política de energía renovable, lo mismo que las actuales y futuras políticas que se desarrollan en el mundo alrededor de las tecnologías Power to X.

Figura 38. Composición del LCOH, LCOA y el costo de NH₃ de Mexicali a Alemania



Fuente: Análisis de NTTDATA.

3 Rentabilidad de la producción de amoníaco verde y potenciales mercados para su distribución

Conociendo las bases técnicas, económicas, y logísticas abordadas en el capítulo anterior, bajo las cuales se produciría el amoníaco verde en México para su posterior comercialización a nivel doméstico e internacional, desde la óptica de la oferta se tiene una perspectiva completa a nivel de costos nivelados; así, **para generar una visión de 360 grados sobre la potencial rentabilidad del NH₃ renovable**, en este capítulo se evalúa su competitividad considerando los precios a los cuales se puede vender tanto en los mercados nacionales correspondientes, como en el mercado internacional. El análisis y alcance están estructurados de la siguiente forma:

Determinantes del precio de mercado	<ul style="list-style-type: none"> Los componentes intrínsecos y extrínsecos que influyen en la formación del precio del amoníaco, analizando su estado actual y su futuro previsible.
Panorama de rentabilidad en México	<ul style="list-style-type: none"> El desempeño potencial del amoníaco renovable mexicano en los (i) mercados nacionales y (ii) de exportación.
Panorama competitivo internacional	<ul style="list-style-type: none"> La competitividad del amoníaco verde producido en las principales naciones competidoras de este nuevo mercado global. Trazado de conclusiones sobre la rentabilidad potencial.

3.1 Determinantes del precio de mercado

El reformado de gas natural con vapor se ha posicionado como el método predilecto para la producción del amoníaco a nivel global, por lo que el costo del primero juega un papel determinante en el precio final del NH₃. Durante el siglo pasado, en paralelo a las mejoras en el proceso Haber-Bosch desarrolladas por actores clave del sector, estos instalaron sus plantas productivas en localizaciones como Canadá, Arabia Saudí, Rusia, o Trinidad y Tobago, que representaban un suministro confiable y asequible de gas natural.

Ante esta estrategia productiva y en el contexto de un mercado tradicional, el precio final del amoníaco gris está determinado por el **costo de producción** (eficiencia del proceso más el costo de mercado del gas y la inversión en equipos, de ser necesaria), **los gastos de operación y administración**, y por la **rentabilidad (ganancia)** esperada por los productores y sus inversionistas.

Sobre el primer aspecto, es importante notar que la síntesis de amoníaco tradicional ha alcanzado las fronteras de su eficiencia energética. Si bien las instalaciones más modernas pueden producir a una razón menor a 36 GJ (37.8 MBTU) por tonelada métrica de NH₃, este es un parámetro representativo de la productividad global de este proceso³¹. En locaciones como Trinidad y Tobago, el suministro de gas natural opera bajo un contrato de cinco años y que incluye un requisito mínimo de toma de producto o pago³². Respecto de los gastos de operación, típicamente anclados a las condiciones laborales y de negocio de los países donde se realiza la producción, estos incluyen los conceptos de gasto asociados a la fuerza laboral, servicios y otros insumos generales utilizados en sitio. Bajo condiciones eficientes, estos gastos de operación representan ≈15% del costo del producto final³³, mientras que los costos de transporte son típicamente cubiertos por el comprador.

Los **factores macroeconómicos y externos**, que escapan de la esfera de influencia de los productores y demandantes, también tienen un efecto importante en la formación del precio de mercado del NH₃. Como se ilustra en la **Figura 8**, el fenómeno inflacionario global observado desde 2021 ha conllevado al encarecimiento del NH₃ a nivel mundial; si bien es cierto que esta dinámica no explica completamente la variación en los precios de mercado. Esto se aborda en las secciones siguientes.

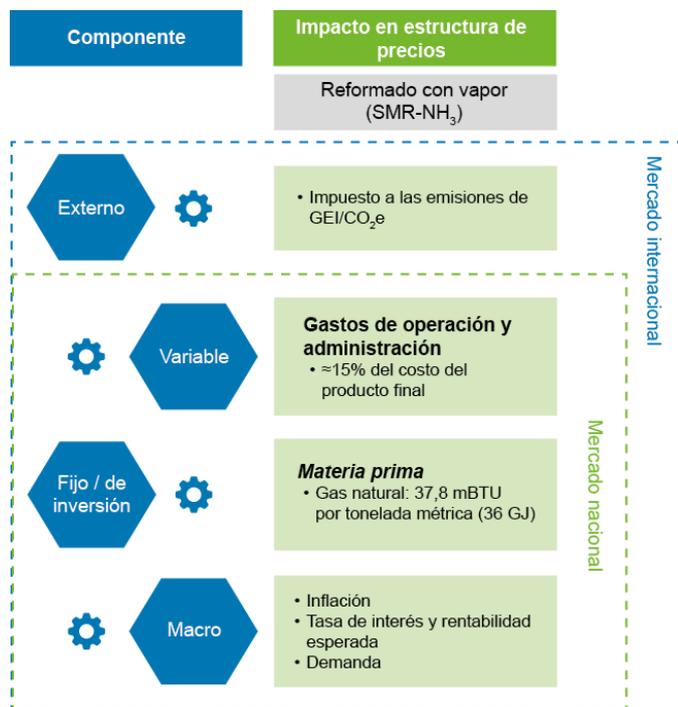
A mayor costo del dinero local (tasa de interés), mayor tenderá a ser el valor presente (costo nivelado) de proyectos productivos de amoníaco, especialmente si las condiciones de financiamiento están dadas por tasas variables, o cuando deben realizarse operaciones de refinanciamiento, por mencionar algunos casos.

³¹ IRENA. (2022). Innovation Outlook – Renewable Ammonia

³² Nutrien. Annual Information Form 2022

³³ US Department of Agriculture. Disponible en <https://t.ly/jnnzi>

Figura 39. Componentes del precio de mercado del amoníaco y consideraciones



CONSIDERATIONS

- Dada la intensidad de carbono en su producción, en esta década se vislumbra que la compra del amoníaco esté sujeta a gravámenes específicos vinculados a sus emisiones.
- Este costo variable considera los gastos de personal, administrativos, y de operación vinculados a la actividad de la planta productiva.
- Siendo la materia prima indispensable, el gas natural representa el principal componente del costo del amoníaco.
- Por último, los factores listados a la izquierda representan los factores exógenos a la producción, pero con un peso importante en la definición del precio final de venta.

Fuente: NTT Data.

Estos componentes tienen incidencia en el mercado mexicano; no obstante, hacia la mitad de esta **década la asignación de costos a las externalidades** vinculadas a los sectores con mayores impactos ambientales y sociales negativos **tendrá un efecto importante sobre el precio final y la demanda del amoníaco en los mercados internacionales**. Las emisiones de GEI del NH₃ gris se consideraron en 2.5 tCO₂e por tonelada métrica de amoníaco (ciclo de vida)³⁴.

3.1.1 Costo de las emisiones de CO₂e

Ya sea en la modalidad de gravamen directo, o a través de un mercado obligatorio o voluntario de emisiones (ETS), este costo jugará un rol clave a favor de los productos latinoamericanos sostenibles. De acuerdo con el Fondo Monetario Internacional (IMF), para limitar el calentamiento global, la cobertura de estos mecanismos debe de expandirse y los precios aumentar de un promedio global actual de 6 hasta 75 USD/tCO₂e para 2030. La forma en que se costean las emisiones de carbono varía según la geografía, aunque los dos principales instrumentos utilizados son:

- **Impuesto local o fronterizo sobre el CO₂e de ciertos bienes:** en función de las emisiones asociadas con la producción o ciclo de vida de estos.
- **Sistema de Comercio de Emisiones (ETS):** límite en la cantidad de emisiones que las empresas pueden emitir sobre la base de un período anual.

De cara a los mercados de exportación potenciales y relevantes para México, vale la pena destacar la evolución reciente en torno a los gases de efecto invernadero (GEI). En la Unión Europea (UE), por ejemplo, el **Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono de la Unión** (CABM, por sus siglas en inglés) que tiene como objetivo abordar el problema de las emisiones de carbono equivalentes (CO₂e) que ocurren cuando las empresas que exportan productos intensos en carbono hacia Europa (y otros destinos diferentes a los sitios de producción) realizan procesos productivos contaminantes en países con políticas climáticas menos ambiciosas, lo que lleva a un aumento global de emisiones de gases de efecto invernadero.

³⁴ Saygin, et al. (2023). Ammonia Production from Clean Hydrogen and the Implications for Global Natural Gas Demand

Por lo anterior, el CBAM impondrá un impuesto fronterizo al carbono sobre ciertos bienes importados, en función de las emisiones asociadas con su producción, cuyo objetivo será generar condiciones equitativas para las empresas europeas que están sujetas al sistema de comercio de derechos de emisión de la UE (ETS UE), que pone un precio a las emisiones de carbono³⁵.

Inicialmente, el CBAM se aplicará a las importaciones de ciertos bienes y precursores seleccionados, cuya producción es intensiva en carbono y que, a su vez, conllevan un riesgo más significativo de emisiones fugitivas de carbono: cemento, hierro y acero, aluminio, fertilizantes, electricidad e hidrógeno. Para muestra del mercado que será impactado por esta medida, en 2022 hacia la Unión Europea se importaron alrededor de 12.4 BnUSD de fertilizantes³⁶.

Figura 40. Actividades económicas sujetas a la primera fase del CBAM



Fuente: EU Green Deal

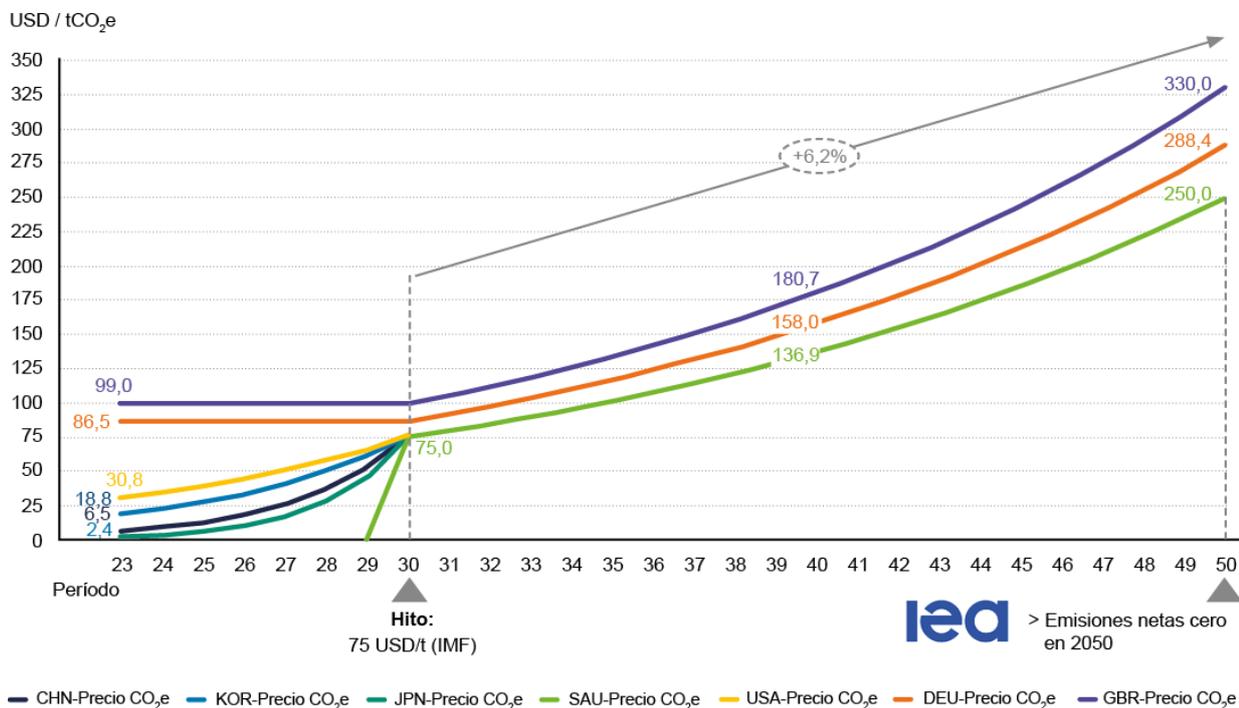
El Banco Mundial ha indicado que, en 2023, se cubren casi un cuarto de las emisiones globales de gases de efecto invernadero con los instrumentos de fijación de precios del carbono antes mencionados. Como tal, el alcance la cobertura es destacable y refleja la velocidad con que estos instrumentos se pueden posicionar alrededor del mundo, aunque debe contemplarse que las vías compatibles con el desarrollo sostenible implican la gestión de la demanda agregada, la eficiencia energética, y descarbonización de los procesos productivos, y no así, el pago de cuotas para hacerse con el derecho a emitir gases de efecto invernadero.

En 2023 el valor de mercado del carbono en el ETS de la UE monta 86.5 USD/tCO_{2e}, posicionado como uno de los más altos del mundo, únicamente superado por el valor actual en Inglaterra. Como se presenta en la siguiente figura, hacia 2050 es deseable que los precios del carbono tengan alcance global, llegando a un precio promedio de 250 en las economías avanzadas y de 200 USD/tCO_{2e} en las economías emergentes; estos valores en línea con lo planteado por la IEA en su escenario *Net Zero Emissions by 2050*.

³⁵ EC. Carbon Border Adjustment Mechanism. Disponible en <https://t.ly/FUXJ>

³⁶ Trading Economics. Disponible en <https://t.ly/gZtlv>

Figure 41. Precio estimado de las emisiones de CO_{2e} en países seleccionados (USD/tCO_{2e}; 2023–2050)



Fuente: NTT Data con base en WBG Carbon Pricing Dashboard, IMF, e IEA.

En 2030, un productor de NH₃ vía reformado de gas natural tendría que pagar alrededor de 247 USD en impuesto al CO_{2e} por cada tonelada de amoníaco que desee comercializar en Inglaterra, de forma independiente al precio de su producto.

Para el análisis de rentabilidad internacional que se presenta más adelante, se ha considerado que al precio del NH₃ gris en los mercados internacionales priorizados se les deberá computar, de manera adicional, el monto correspondiente por el pago de emisiones según el año del que se trate. En una situación de mercado, la aplicación del impuesto se realizaría de la siguiente forma:

3.1.1.1 Componente fijo del costo

Actualmente el precio del gas natural (GN o CH₄) es equivalente al precio de 2011 en término reales (Henry Hub, EUA), este producto había presentado un comportamiento deflacionario desde dicho año. La recuperación del precio vino precedida por la dinámica inflacionaria global, así como por disrupciones en la producción de hidrocarburos, ya sean de causa mayor (por la invasión de Rusia a Ucrania) o intencionadas, como el ajuste de volúmenes de producción por parte de grupos como la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEC), entre otros factores.

Cabe destacar que, durante la década de 2010, el precio de este producto presentó un comportamiento decreciente, especialmente alimentado por el suministro incremental de gas de lutita originado en EUA (extracción de gas en 2010: 26.0; 2020: 40.7 trillones de pies cúbicos)³⁷. En línea con lo anterior, durante el periodo comprendido entre 2013 y 2020, el NH₃ de importación a México mostró un abaratamiento importante respecto de su precio en 2011.

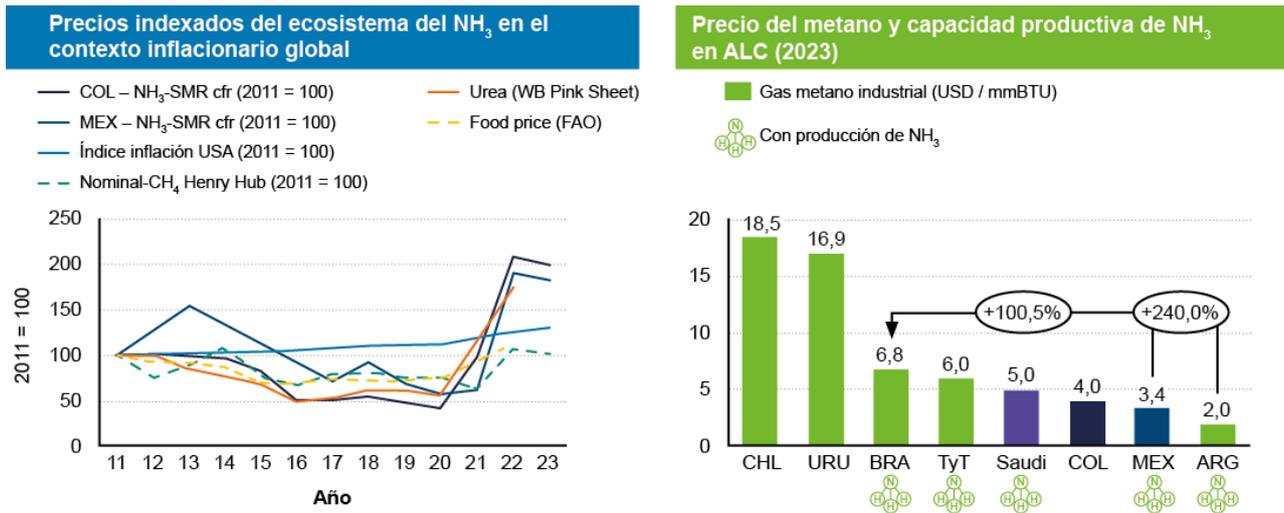
Tal como se presenta del lado izquierdo de la siguiente figura, a pesar de que el gas natural es el determinante de valor más importante en la producción del amoníaco, e inclusive goza de un mercado relevante de derivados, futuros, y otros productos financieros especializados y de cobertura a nivel global, el NH₃ tiende a reaccionar con mayor fuerza que el gas natural

³⁷ US EIA. US Natural Gas Gross Withdrawals. Available at <https://t.ly/P2uWv>

a cambios en las condiciones de sus ecosistemas aguas arriba y abajo. Esto es aún más relevante, si se considera que esta volatilidad toma lugar en un mercado con mecanismos financieros limitados para la mitigación de riesgos tanto financieros, como de mercado.

Por otra parte, el desacoplamiento observado entre los precios del NH₃ y gas natural desde 2020, indica que ciertos segmentos del mercado final del amoníaco presentan inelasticidad de la demanda.

Figura 42. Precios indexados del ecosistema del NH₃ en el contexto inflacionario global y precio del gas natural en ALC



Fuente: NTT Data con base en IEA, FAO, IDB, Olade, Columbia University.

Hablando del contexto latinoamericano, Argentina, Brasil y México cuentan con capacidad productiva de NH₃, si bien los niveles de producción recientes son acotados e inclusive intermitentes en ciertos períodos de tiempo. Asimismo, se destaca el caso de Trinidad y Tobago (Trinidad y Tobago) con una participación en el mercado internacional, por volumen, mayor al 10% (2020: 14.3%; 2021: 21.4%).

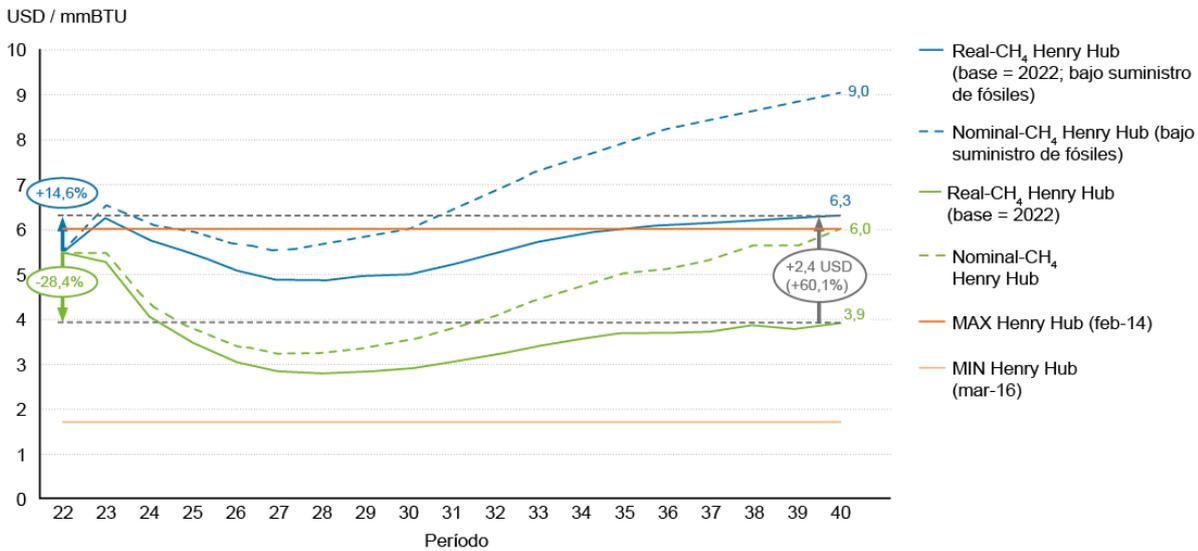
Para este análisis de rentabilidad se considerará al reformado de gas natural como la tecnología de referencia para la producción del amoníaco y estimar, consecuentemente, la evolución de los precios de mercado hacia los horizontes de 2030 y 2040.

3.1.1.1.1 Precio del gas natural a futuro

Como fuente de información para determinar los precios futuros del gas, se emplearon las series de datos que ha proyectado la Energy Information Administration (EIA) en su *Annual Energy Outlook 2023*. Esto, tomando en cuenta el replanteamiento del suministro de gas natural de Rusia hacia los mercados mundiales, así como el hecho de Estados Unidos es el mayor productor y, a la vez, el sitio con el precio de mercado más competitivo.

La relevancia del Annual Energy Outlook 2023 radica en generar una visión clara, sobre el benchmark global del precio del gas natural con una visión de largo plazo; de este reporte se han seleccionado dos escenarios de precio para conducir este análisis de rentabilidad. Si bien difieren en términos de escala, **hacia 2030 ambos escenarios de la EIA muestran un gas natural por debajo de 4 USD por mmBTU.**

Figura 43. Precio del gas natural en el clúster energético Henry Hub bajo escenarios seleccionados de la EIA (USD/mmBTU 2022–2040)



Fuente: EIA. Annual Energy Outlook 2023.

Desde la óptica del caso base de referencia, hacia 2040 el gas natural presentaría un decremento de $\approx -24.8\%$ en términos reales respecto del nivel de precio observado en 2022 (≈ 5.5 USD / mmBTU), mientras que, dentro del escenario de baja oferta de gas y petróleo se presentaría un ligero incremento real del orden de $\approx 14.6\%$ respecto de la misma base. Vale destacar que ambos casos estarían dentro del rango conformado por el precio máximo y mínimo observados en el clúster energético Henry Hub en febrero de 2014 y marzo de 2016, respectivamente.

Las características más relevantes de los escenarios son las siguientes:

<p>Caso alto del gas natural Baja oferta de gas y petróleo</p>	<ul style="list-style-type: none"> Este caso asume que la producción final estimada de yacimientos de combustibles fósiles (petróleo y de gas natural), así como las tasas de mejora tecnológica son un 50% más bajas que en los supuestas del caso base de referencia. Precio del gas natural: para 2040 se tendría un incremento real de +14,6%, respecto de 2022.
<p>Caso base del gas natural Caso base de referencia</p>	<ul style="list-style-type: none"> Se usa para evaluar los mercados energéticos de EUA y del mundo hacia 2050, considerando las leyes y regulaciones vigentes a partir de noviembre de 2022, e incorporando supuestos de desarrollo tecnológico. IRA: Esto incluye el impacto de la Ley de Reducción de la Inflación (IRA) de EUA, aprobada en 2022. Impuestos al carbono: No contempla la imposición de impuestos o tarifas arancelarias relacionados con la comercialización del gas natural y/o con sus emisiones fugitivas. Precio gas natural: para 2040 se tendría un decremento real de -28,4%, respecto de 2022.

Para este estudio, **el caso base de referencia** planteado por la EIA se consideró el más adecuado para evaluar la competitividad, y viabilidad financiera y de mercado de proyectos Power-to-X que sean promovidos en México.

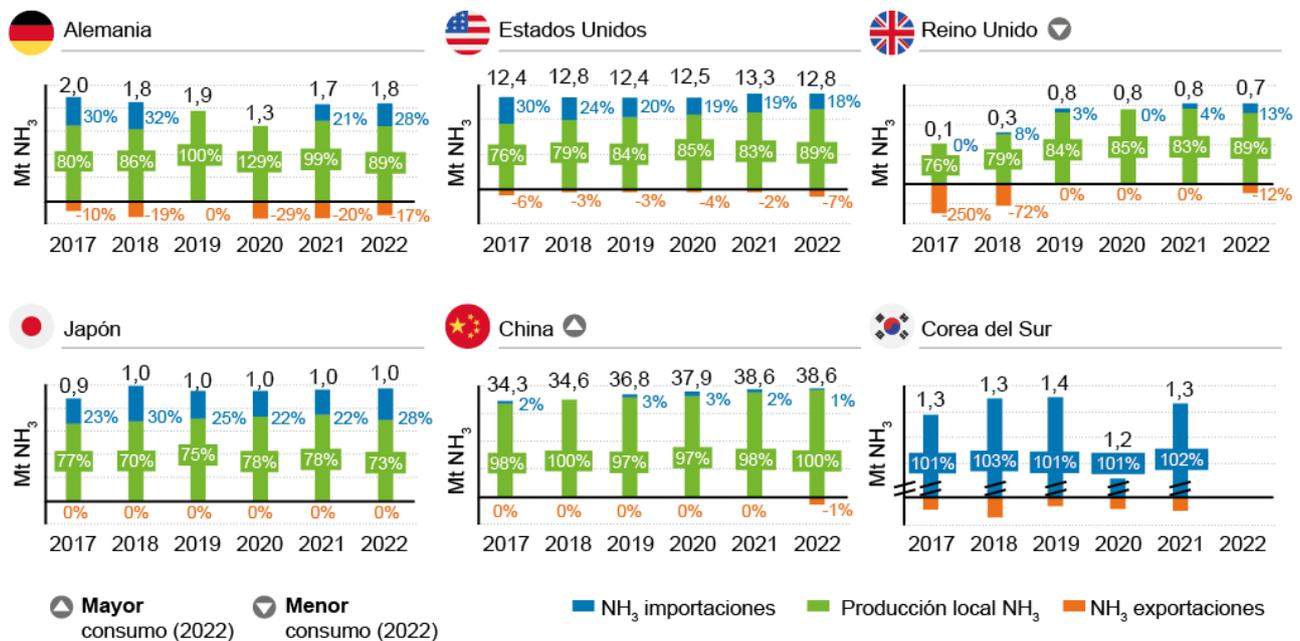
3.1.2 Demanda internacional en mercados clave

Se empleó el enfoque de consumo aparente, el cual describe la cantidad total de bienes y servicios que aparentemente son consumidos por un particular, una industria, una región, o un país en un período de tiempo determinado. Esta forma de dimensionar la demanda está dada por la relación: **consumo aparente = producción local (+) importaciones (-) exportaciones**.

Para este fin, se aprovecharon diversas fuentes de información con datos comparables entre países, para integrar series históricas sobre el comercio exterior de amoníaco. Posteriormente, siendo la producción una variable desconocida, se realizó una búsqueda documental de las capacidades instaladas en los mercados prioritarios planteados en la sección **Identificación de mercados** de destino.

China y Estados Unidos representan más del 40% del consumo aparente de NH₃ a nivel mundial; el segundo tiende a importar ≈20% de su demanda en los últimos cuatro años, mientras que China no lo hace. De entre los países estudiados, también Alemania y Japón tienden a importar alrededor de una tercera parte de su consumo anual, mientras que China y Reino Unido tienen una marcada tendencia a satisfacer su consumo mediante la producción local mediante procesos de SMR.

Figura 44. Consumo aparente de NH₃ por mercado prioritario (Mt, 2017–2022)

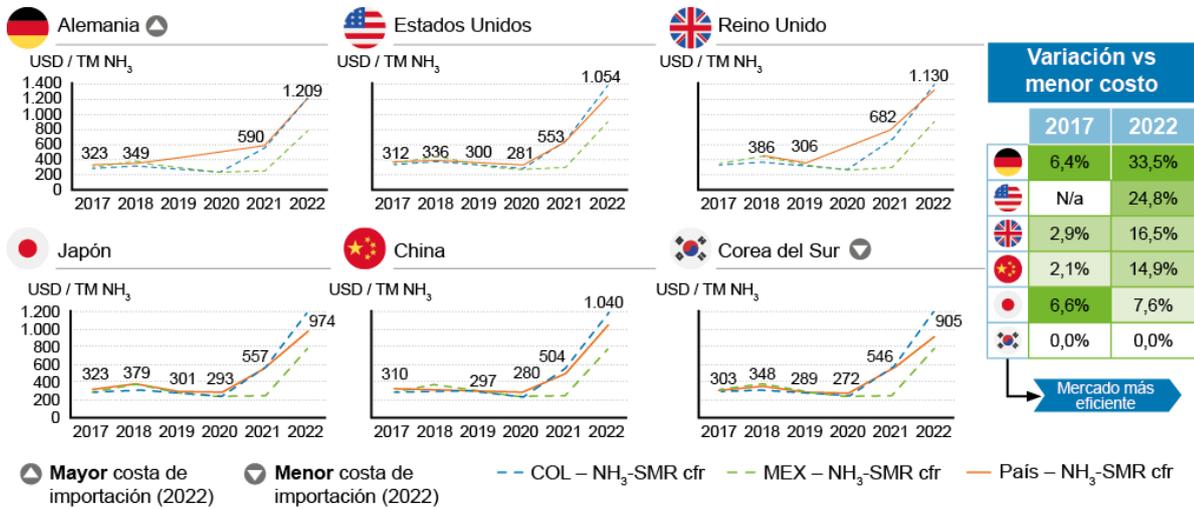


Fuente: NTT Data con base en WB WTIS, UN Comtrade, ITC Trade Map.

South Korea is positioned as one of the most attractive markets to consider launching exports to as it has been a net importer. Corea del Sur se posiciona como uno de los mercados más atractivos para considerar el lanzamiento de exportaciones siendo un importador neto de NH₃ desde hace tiempo.

En cuestión de las dinámicas de precio observadas en la importación del compuesto, en general, **los mercados de Asia tienden a presentar precios más competitivos (Corea del Sur 2022: 905; Alemania 2022: 1209 USD/t NH₃)**, lo que podría indicar que, a mayores volúmenes pactados se esperan mejores condiciones de precio para el comprador. Esta condición de los mercados asiáticos podría explicarse por una estrategia de fidelización por parte de los productores en Indonesia.

Figura 45. Costo promedio de importación del NH₃ por mercado prioritario (USD/t NH₃, 2017–2022)



Fuente: NTT Data con base en WB WITS, UN Comtrade, ITC Trade Map.

Por su parte, tomando en cuenta los cuantiosos volúmenes de NH₃ que se importan hacia Alemania, los niveles de precio mostrados en la figura anterior tienden a confirmar que Europa es el mercado más encarecido a nivel global (junto al del Reino Unido). Como oportunidad y a la luz del CABM, potencialmente, **los mercados europeos podrían presentar más disposición a pagar costos más altos por el amoníaco verde**, debido a que ya lo han hecho en el pasado reciente y porque estarán obligados a cumplir con el propio CABM.

A pesar del atractivo de los mercados potenciales, naturalmente México no es el único país con condiciones competitivas para abastecer a los destinos internacionales planteados. De hecho, diversos países han comenzado a anunciar y/o formalizar acuerdos de cooperación y comerciales para convertirse en los proveedores predilectos de compuestos renovables en el mundo. La siguiente figura sintetiza el progreso de esta dinámica hasta la fecha, mostrando en las columnas a los países competidores en este mercado naciente.

Figura 46. Evolución de acuerdos comerciales sobre amoníaco verde en mercados prioritarios

Acuerdos comerciales de NH ₃ V / H ₂ V con >	Medio oriente		África					Sureste asiático		ALC		UE	Subtotal
	Arabia Saudi	UAE	Argelia	Marruecos	Namibia	Túnez	Sudáfrica	Malasia	Australia	Chile	Brasil	Nonuego	
LOCA 2030 (USD 23' / TM)	951,8	-	950,9	711,3	-	795,4	-	661,8	461,3	768,1	924,8	-	
ALEMANIA	✓	-	○	✓	✓	-	○	-	-	-	-	✓	6
ESTADOS UNIDOS	-	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-	3
REINO UNIDO	○	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	2
JAPÓN	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	✓	○	-	-	4
COREA DEL SUR	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	4
CHINA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TRADERS	-	-	-	Vitol	-	-	-	-	-	Tramm	-	-	

Hub logístico
 ✓ Con acuerdo(s) firmado(s)
 ○ Destino potencial (no confirmado)

Fuente: NTT Data; UAE: United Arab Emirates; MOU: Memorandum of Understanding; LOI: letter of intent

Organizados por país demandante, se presentan algunos hitos en el desarrollo de relaciones comerciales y/o tecnológicas en materia de amoníaco e hidrógeno verdes alrededor de los mercados prioritarios objetivo de este estudio:

- **Alemania**
 - ⇒ Recientemente, Colombia firmó un MoU con la Fraunhofer Gesellschaft de Alemania para impulsar la investigación en el desarrollo del sector de hidrógeno en el país. El acuerdo se centra en la producción de hidrógeno verde, amoníaco verde, metanol y fertilizantes verdes³⁸.
 - ⇒ La alemana VNG ha firmado una LOI con Aker Horizons para adquirir 200 kt de NH₃V desde Narvik, en Noruega³⁹.
 - ⇒ Freepan Holdings Corp ha firmado un MoU por 10 años para adquirir 800 kt de NH₃V desde Egipto⁴⁰.
 - ⇒ MoU de cooperación con Arabia Saudita para la producción, procesamiento, uso y transporte de H₂V⁴¹.
 - ⇒ Alemania invertirá €38m en la primera planta de H₂V de Marruecos⁴².
- **Estados Unidos**
 - ⇒ Tiene con Australia el Net-Zero Technology Acceleration Partnership⁴³.
 - ⇒ Firmó un acuerdo marco de energía limpia con los EAU⁴⁴.
- **Reino Unido**
 - ⇒ Junto a socios, Air Products planea producir y exportar 1.2 Mt de NH₃V desde NEOM hacia Rotterdam and Immingham⁴⁵.
 - ⇒ El Puerto de Shoreham, en alianza con H₂evolution, se encuentra desarrollando un puerto especializado para la producción y manejo de H₂V⁴⁶.
- **Japón**
 - ⇒ Firmó un MoU con Malasia para el estudio técnico y comercial del H₂⁴⁷.
 - ⇒ Arabia Saudita transporta a Japón el único amoníaco certificado como low-carbon⁴⁸.
 - ⇒ Con Australia, crearán la primera cadena global de suministro de H₂V líquido⁴⁹.
- **Corea del Sur**
 - ⇒ A partir de 2027 el hidrógeno producido en Malasia y los UAE se importará a Corea para generar energía y exportarlo como NH₃⁵⁰.
 - ⇒ Con Australia estableció the Australia-Korea Low and Zero Emissions Technology Partnership para el suministro de H₂V⁵¹.
- **China**
 - ⇒ Considerando la escala de los recientemente anunciados, tan pronto como en 2025 China podría convertirse en exportador de NH₃V⁵².
- **Otros**
 - ⇒ El Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Transporte de Colombia firmaron un memorando de entendimiento con el Puerto de Rotterdam, con miras a establecer diálogos en torno a la creación de un corredor de exportación e importación de hidrógeno verde y sus derivados entre Colombia y Países Bajos⁵³.

³⁸ Disponible en <https://shorturl.at/jlGM8>

³⁹ Disponible en <https://t.ly/OrQ5>

⁴⁰ Disponible en <https://t.ly/umTYa>

⁴¹ Disponible en <https://t.ly/LK117>

⁴² Disponible en <https://t.ly/RCHs3>

⁴³ Disponible en https://t.ly/Z_6V5

⁴⁴ Disponible en <https://t.ly/1xLsw>

⁴⁵ Disponible en <https://t.ly/D68i>

⁴⁶ Disponible en <https://t.ly/IQ2S>

⁴⁷ Disponible en <https://shorturl.at/bnFKP>

⁴⁸ Disponible en <https://t.ly/w4Avx>

⁴⁹ Disponible en <https://shorturl.at/pIQX9>

⁵⁰ Disponible en <https://shorturl.at/joB16>

⁵¹ Disponible en <https://shorturl.at/qtQR5>

⁵² Disponible en <https://t.ly/T-yn>

⁵³ Disponible en <https://shorturl.at/eEJN4>

3.2 Panorama de rentabilidad en México

3.2.1 Rentabilidad internacional del amoníaco verde mexicano

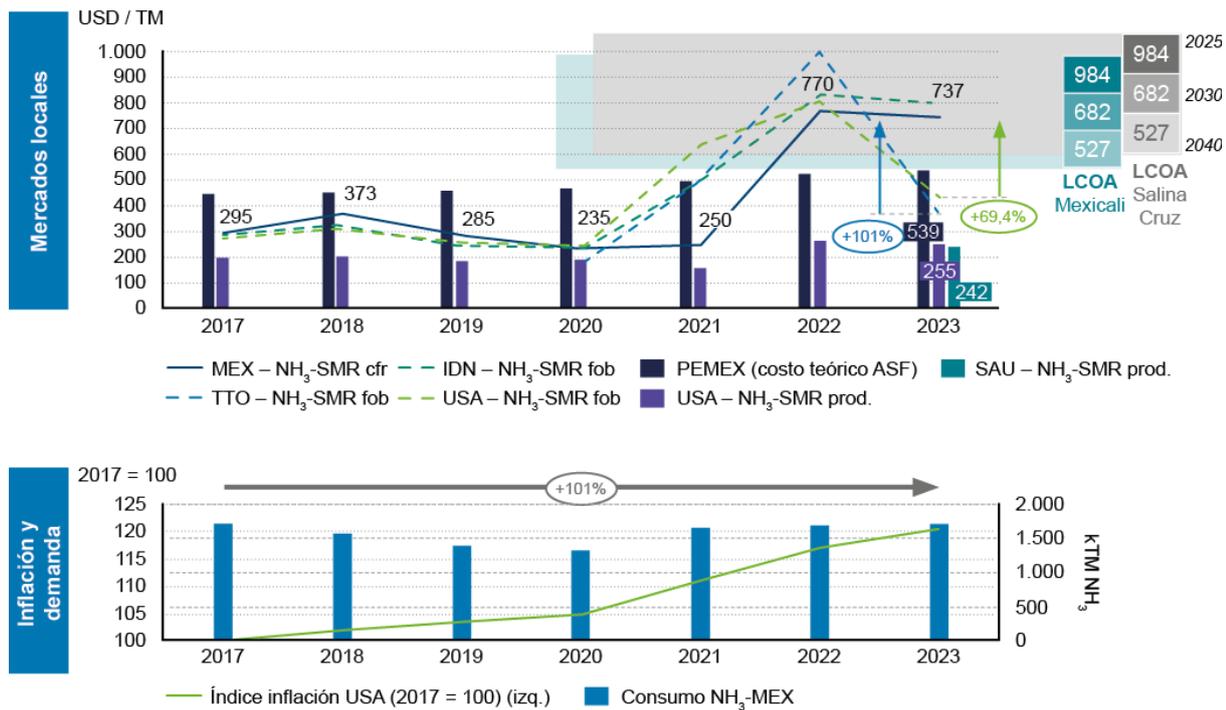
Con la entrada de 2020, se terminó de consolidar una tendencia bajista en el precio del amoníaco. Naturalmente, esto representaba un incentivo para el grupo de productores globales, incluyendo a los principales proveedores del mercado mexicano, como Trinidad y Tobago o Estados Unidos, a incrementar los márgenes de venta. A continuación, se presentan los valores observados en 2020:

- **Importación** – México NH₃ CFR: 234 USD t
- **Exportación** – Trinidad y Tobago NH₃ precio FOB: 175 USD/t

En 2023 el producto importado a México implicaría un margen de 69.4% por arriba del valor de exportación desde EUA, y 100.7% para el mismo caso desde Trinidad y Tobago. Cabe mencionar que estas magnitudes de rentabilidad son desproporcionadas para este tipo de actividades económicas, además, dadas las trayectorias de precios históricamente observadas, este fenómeno debería de terminarse durante el 2024.

En línea con lo anterior, considerando el costo vigente del gas natural para uso industrial en mercados clave, en 2023 la producción de NH₃ utilizando gas natural en **Estados Unidos y Arabia Saudita rondaría los 255 y 242 USD/t, respectivamente** (excluyendo impuesto al CO_{2eq}, rentabilidad esperada, y costos de transporte y/o manejo).

Figura 47. Rentabilidad del NH₃ verde en el contexto de México (USD/t, 2017–2023)



Fuente: NTT Data con base en USGS, WB WITS, UN Comtrade, ITC Trade Map; costos de producción: ASF, IDB, Olade, University of Columbia.

Hacia adelante, la disponibilidad o escasez del gas natural en las principales naciones productoras, y la aplicación de gravámenes al carbono serán clave en la formación de precios locales, a su vez, fundamentalmente ligados a la dinámica global del ecosistema productivo.

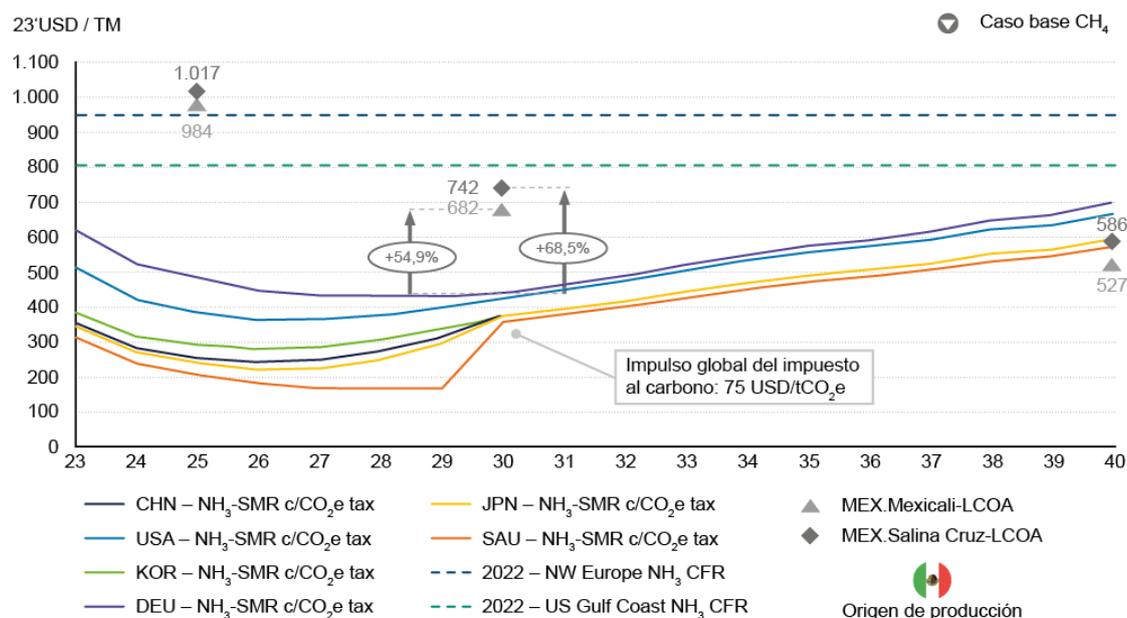
3.2.2 Rentabilidad del amoníaco verde en México

Se ha proyectado el **precio que se tendría que desembolsar, para adquirir una tonelada métrica de amoníaco verde en los mercados prioritarios objeto de estudio**, concretamente, Alemania, Corea del Sur, Estados Unidos, China, y Japón. Siguiendo la proyección del **caso base del gas natural**, e incorporando el impuesto al carbono local dentro del precio final en los destinos mencionados, los compradores de amoníaco fósil se beneficiarían por un decremento en el precio final del amoníaco (en términos reales).

Como primer acontecimiento importante, tan pronto como en 2030 el amoníaco verde producido en México estaría por debajo de los precios máximos históricos observados en EUA durante 2022 (ver Figura 48). Por otra parte, el escalamiento de los impuestos al carbono vendría a cerrar la brecha para dar competitividad al amoníaco verde suministrado desde México. Además, otro efecto sería la reducción de los márgenes de rentabilidad del amoníaco saudí, así como de otros productores del Medio Oriente (i.e. Qatar).

Bajo este escenario, nuevamente, los mercados europeos y el de Estados Unidos representan las oportunidades inmediatas, esto sin dejar de lado que la costa del pacífico en México presenta costos competitivos para la exportación hacia Kobe, Japón.

Figura 48. Análisis de rentabilidad del NH₃ renovable mexicano en mercados internacionales seleccionados (23^oUSD/TM + c/CO_{2e} tax, 2023–2040)



Fuente: Data con base en USGS, WB WITS, UN Comtrade, ITC Trade Map.

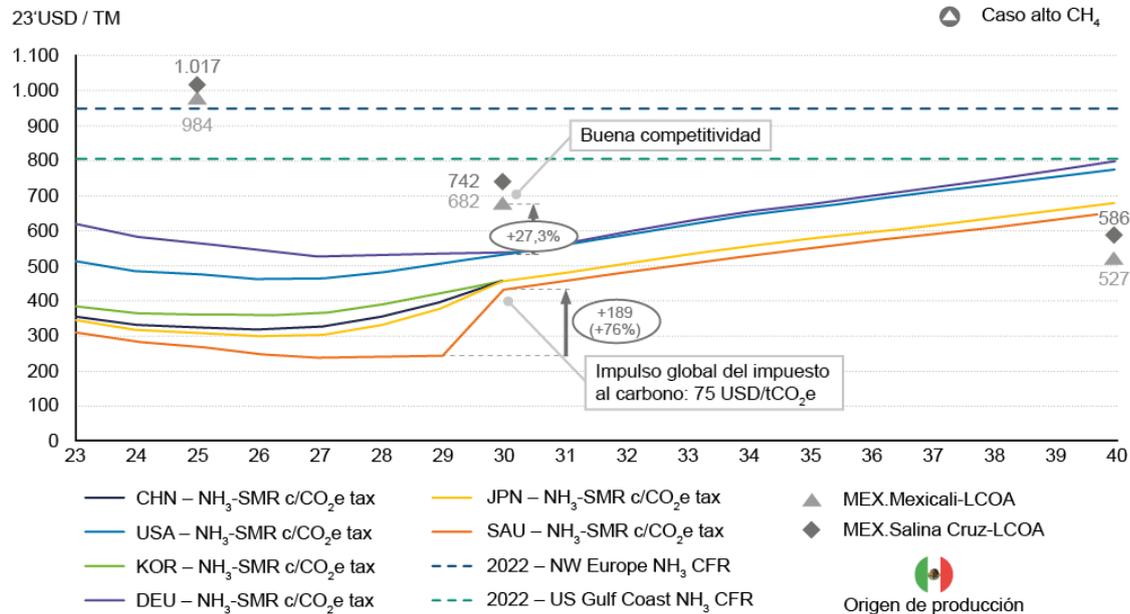
Ante una escasez creciente de los combustibles fósiles, bajo este escenario se acelera fuertemente el caso de negocio del NH₃ verde hacia finales de esta década, particularmente aquel producido en Mexicali y Salina Cruz. En el caso del primero, la brecha a solventar se reduciría a solo 27.3% respecto del mercado más próximo (Alemania). Este escenario no considera otros sobrecostos que pudiese enfrentar el NH₃ gris a nivel mundial, por ejemplo, debido a:

- Sobredemanda
- Gravámenes o medidas especiales ante las emisiones de CH₄
- Conflictos geopolíticos que puedan generar volatilidad en el costo del gas natural;
- Desastres naturales que afecten la operación de los principales corredores de comercio del gas natural, entre otros aspectos.

Un aspecto revelador que resulta de analizar **este caso alto del gas natural** (baja oferta de gas y petróleo) es que, **evidencia desde la óptica de un potencial mercado mexicano de exportación de amoníaco verde**, lo que podría ocurrir, dentro del caso base, durante los períodos cuando se presente un encarecimiento del gas natural o de los productos agrícolas.

Como se ilustra en la siguiente figura, el caso de negocio del amoníaco renovable de exportación se aceleraría de forma importante en Estados Unidos, además de Alemania.

Figura 49. Análisis de rentabilidad del -NH₃ renovable mexicano en mercados internacionales seleccionados (23*USD/TM + c/CO_{2e} tax, 2023–2040; caso alto CH₄)



Fuente: Data con base en USGS, WB WITS, UN Comtrade, ITC Trade Map.

Cuando se realiza un análisis desde la perspectiva de las finanzas de proyectos de ingeniería, es necesario considerar tres importantes indicadores de rentabilidad:

1. Tasa Interna de Retorno (TIR):

- La TIR es una medida de rentabilidad que representa la tasa de rendimiento de una inversión o proyecto.
- Calcula la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de efectivo futuros con la inversión inicial.
- Si la TIR es mayor que la tasa de descuento requerida, el proyecto se considera rentable.
- Cuanto mayor sea la TIR, más atractiva es la inversión.

2. Período de Recuperación:

- El Período de Recuperación es la cantidad de tiempo que se necesita para recuperar la inversión inicial a través de los flujos de efectivo generados por un proyecto.
- Se calcula sumando los flujos de efectivo hasta que la inversión inicial se recupere por completo.
- Es útil para evaluar la rapidez con la que se recupera una inversión y cuándo comienzan a generarse ganancias netas.
- Es especialmente relevante en proyectos de corto plazo y para considerar la liquidez.

3. Valor Presente Neto (VPN):

- El VPN es una medida que evalúa la rentabilidad de una inversión al considerar el valor presente de los flujos de efectivo futuros y la inversión inicial.
- Se calcula restando la inversión inicial del valor presente de los flujos de efectivo usando una tasa de descuento.
- Un VPN positivo indica que la inversión generará ganancias por encima de la tasa de descuento y es rentable.
- Cuanto mayor sea el VPN, más atractiva es la inversión.

Este estudio desarrolló en análisis de estas variables para dos de los puertos más significativos entre los estudiados: Mexicali y Coatzacoalcos, por ser los de menor y mayor costo de producción del amoníaco, respectivamente.

Las proyecciones de precio del amoníaco gris realizadas en este estudio, incluido su impuesto al carbono, prevén precios de amoníaco gris en el mercado internacional de aproximadamente 490, 550 y 780 USD/tonelada de amoníaco. En este ejercicio de rentabilidad se han calculado la TIR, ROI y VPN del amoníaco verde considerando que se oferta al precio de venta del amoníaco gris.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. Análisis de indicadores financieros para el amoníaco verde mexicano

Parámetro	Ubicación	2025	2030	2040
Tasa Interna de Retorno	Mexicali	---	---	44%
	Coatzacoalcos	---	---	30%
Período de recuperación	Mexicali	---	---	3,3 years
	Coatzacoalcos	---	---	4,27 years
Valor Presente Neto	Mexicali	-381 188 717 USD	-96 439 769 USD	204 956 354 USD
	Coatzacoalcos	-571 619 927 USD	-211 688 350 USD	121 472 300 USD

Fuente: NTT Data.

A partir de los resultados de los indicadores financieros proporcionados para las ubicaciones de Mexicali y Coatzacoalcos en los años 2025, 2030 y 2040, es posible concluir que en 2040, Mexicali con una TIR del 44% es más atractivo desde el punto de vista de la rentabilidad en comparación con el proyecto en Coatzacoalcos, lo cual es consecuencia de que el costo de producción del amoníaco en Mexicali es al menos 106 USD/ton menor que en el puerto del Golfo de México.

Por su parte, el período de recuperación en Mexicali es de 3.3 años en 2040, mientras que en Coatzacoalcos es de 4.27 años en el mismo año. Esto indica que en Mexicali se recupera la inversión más rápidamente e incluso a un régimen muy rápido para el estándar del sector energético e industrial, lo cual es una consecuencia del modelado de costos y precios que se ha hecho, asumiendo que la molécula de amoníaco producida en 527 USD/ton en Mexicali pudiera venderse en 780 USD/ton, lo que significaría un margen de 48%, el cual es por demás atípico en este sector donde los márgenes rondan el 10 al 15%.

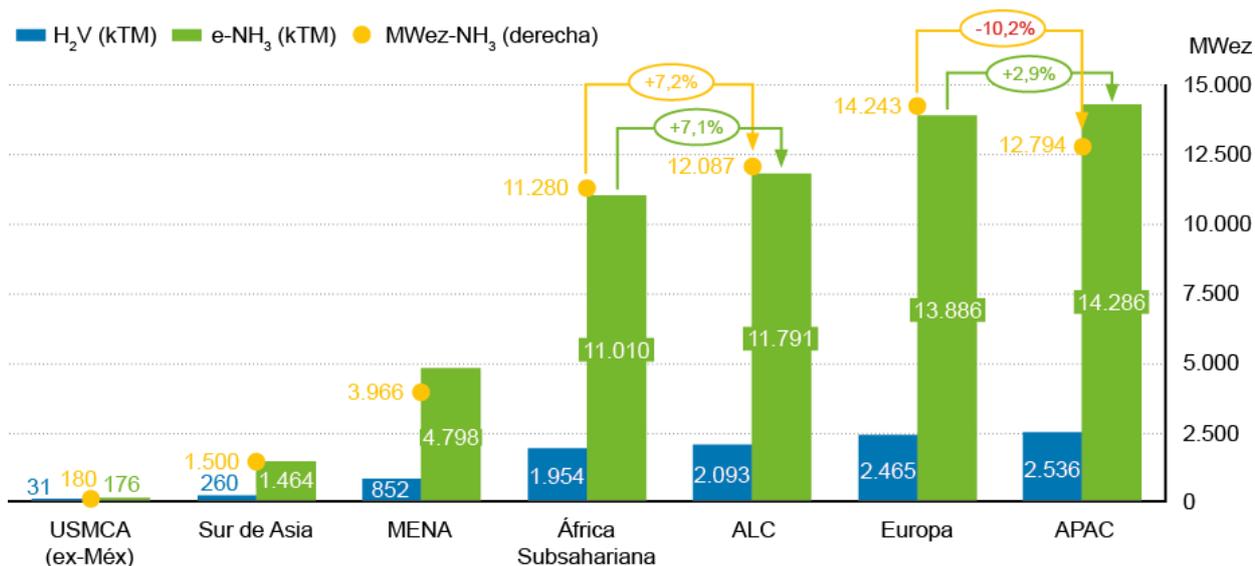
En lo que se refiere al Valor Presente Neto, aunque ambos proyectos tienen un VPN negativo en 2025 y 2030, en 2040, el VPN se vuelve positivo en ambas ubicaciones. Mexicali muestra un VPN positivo de 204.95 millones de dólares, mientras que Coatzacoalcos muestra un VPN positivo de 121.47 millones de dólares. Esto sugiere que ambos proyectos eventualmente generan ganancias netas, pero el proyecto en Coatzacoalcos tendrá menos ganancias en 2040 respecto al de Mexicali.

Este ejercicio representa un modelado simple de un negocio multivariable que está sujeto a muchas condiciones de mercado, desarrollo de las tecnologías de hidrógeno y Power to X, sin embargo, lo que nos deja ver es que los proyectos de producción de amoníaco verde podrían adquirir autosuficiencia financiera en la década de 2030, es decir, dejar de depender de subsidios y estímulos externos: esto, siempre que se cumplan las proyecciones de aumento al precio del amoníaco fósil.

3.3 Panorama competitivo internacional

Conforme las soluciones subyacentes para la producción del amoníaco verde van madurando tecnológicamente y se vuelven más competitivas económicamente, países como México tendrán que insertarse en una competencia global, en la que diversas naciones del Sur Global argumentan y/o promocionan el tener las mejores condiciones técnicas, legales, sociales, y económicas para desarrollar proyectos de amoníaco verde, o simétricamente, de hidrógeno o metanol renovables. Al respecto, es importante conocer de qué manera se ha ido perfilando el desarrollo y promoción de proyectos para la producción de amoníaco verde alrededor del mundo.

Figura 50. Producción y capacidad instalada de proyectos Power-to-Ammonia por región (kt y MWez, 2022)



Fuente: NTT Data a partir de la base de datos de proyectos de hidrógeno de la IEA.

Tras completar un análisis de alto nivel sobre la base de datos de proyectos de hidrógeno de la IEA (octubre, 2022), como se ilustra en la Figura 50 es evidente que, fuera de Europa (y Asia central), el grueso de la cartera de proyectos está concentrada en la región Asia Pacífico (APAC; Australia, Indonesia, entre otros), seguida por ALC (Chile, Brasil, y Paraguay, principalmente), y África Subsahariana. Respecto a esta última región, al menos diez mil megawatts de electrólisis corresponden al proyecto Aman en Mauritania, con una inversión anunciada que ronda los 40 billones de dólares⁵⁴.

Dicho lo anterior, recientemente la exportación potencial de moléculas renovables desde los países de África está ganando momento. Algunos de los eventos más recientes incluyen:

- Mediante el proyecto amoníaco HEVO, para 2026 se planea producir 183 kt de amoníaco verde en Marruecos⁵⁵.
- Freepan Holdings Corp ha firmado un MOU por 10 años para adquirir 800 kt de NH₃V desde Egipto ⁵⁶.
- Con la primera fase de desarrollo en marcha, HIVE Green Ammonia producirá 900 kt de amoníaco verde en Nelson Mandela Bay, Sudáfrica⁵⁷.

Profundizando en el panorama competitivo de este mercado emergente, si bien, los costos nivelados implícitos de los proyectos no son de carácter público, se documentaron los costos de producción mostrados en la Figura 46 para los países mencionados, tomando en cuenta los valores estimados hacia 2030, con el objetivo de que sean comparables respecto de los costos nivelados de producción de México.

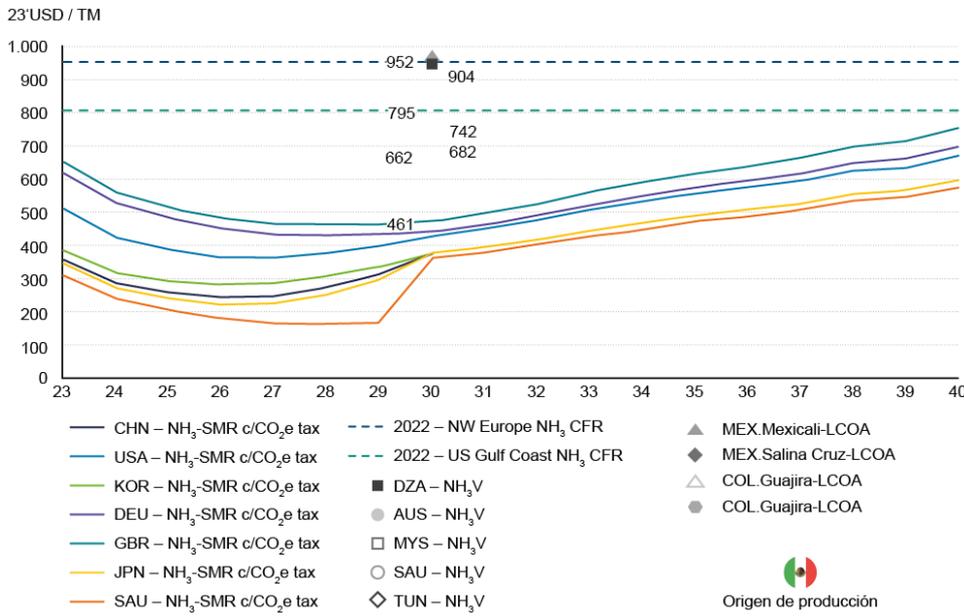
⁵⁴ Energy Central. (2022). Disponible en https://t.ly/7Z_7

⁵⁵ Disponible en <https://shorturl.at/bpBIZ>

⁵⁶ Disponible en <https://t.ly/umTYa>

⁵⁷ Disponible en <https://t.ly/E5thw>

Figura 51. Rentabilidad del amoníaco verde de países competidores en mercados internacionales prioritarios (23^oUSD/TM + c/CO_{2e} tax, 2023–2040)



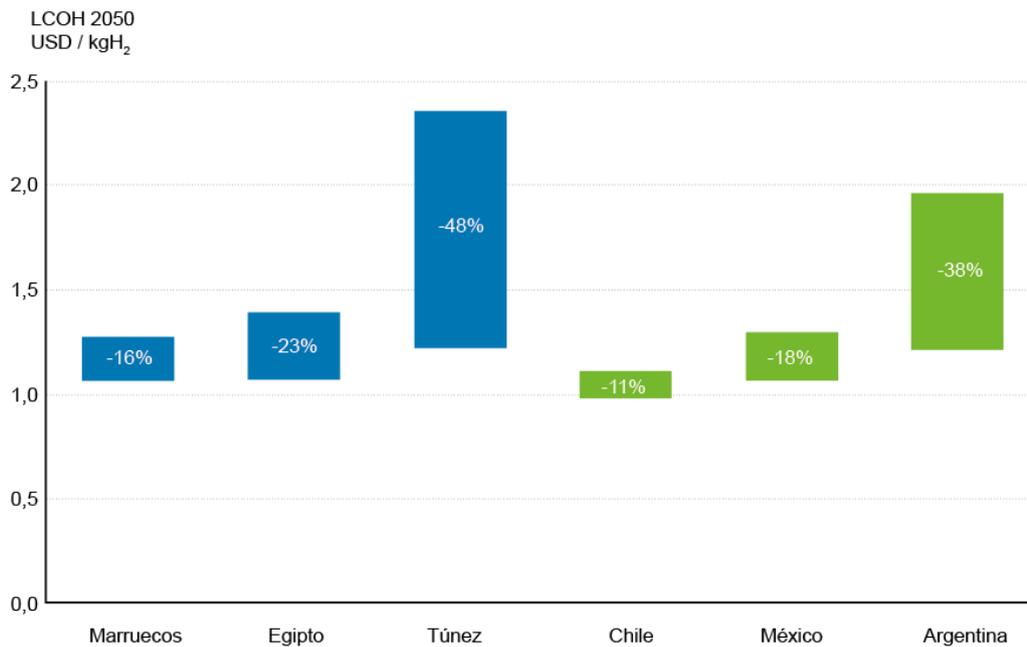
Fuente: NTT Data con base en USGS, WB WITS, UN Comtrade, ITC Trade Map.

Entre las potenciales powerhouses del NH₃V, destaca el caso de Australia, que tan pronto como en 2030 (461 USD/t) podría ser rentable en los mercados de Alemania y Reino Unido; Incluso, bajo el escenario base de la EIA planteado. En segundo lugar, se posiciona Malasia, dónde sería posible tener amoníaco verde a 662 USD/t en 2030. Bajo estas condiciones, es posible confirmar que el amoníaco verde producido en Mexicali y Salina Cruz (México), **presenta condiciones adecuadas para ser más competitivo que varias naciones que ya han anunciado proyectos de este tipo, como Arabia Saudita, Argelia, o Marruecos.**

3.3.1 Efecto del costo de capital en el costo nivelado

Al contrastar los costos nivelados con las curvas de precio del amoníaco gris en los destinos priorizados, se ha sugerido que, **una brecha de costo o diferencial menor a 30% indicaría un potencial alto de competitividad**. Es importante considerar es que el costo del capital para este tipo de proyectos puede tener efectos muy significativos en la viabilidad económico-financiera de estos. Por tanto, para facilitar el **dimensionamiento del efecto que cambios en el costo del capital tendrían en el costo nivelado del hidrógeno**, se presenta una comparativa de la reducción potencial que esto puede representar para un proyecto PtX alrededor del mundo.

Figura 52. Rango de sensibilidad del LCOH ante mejoras en el costo del capital en países seleccionados (20's USD/kg H₂, 2050)



Fuente: Deloitte⁵⁸.

A raíz de lo anterior, es oportuno sugerir que optimizaciones en los términos y condiciones de financiamiento de proyectos PtX podrían conducir a reducciones en el LCOA de $\approx -11\%$, en sitios con condiciones económicas ya competitivas, o de hasta $\approx -38\%$ en lugares con condiciones actuales más adversas. A su vez, estas reducciones serían proporcionales a la participación del LCOH en el valor total del LCOA (aproximadamente 65%).

⁵⁸ Deloitte (2023). Green hydrogen-Energizing the path to net zero.

4 Análisis de sensibilidad

Como último componente de análisis se desarrolló un análisis de sensibilidad de variables clave en el desarrollo y operación de proyectos Power to X, específicamente, proyectos de producción de amoníaco renovable.

El objetivo de es visualizar el impacto que tiene la modificación de algunas variables (estudiadas de manera aislada) en el costo nivelado de producción de amoníaco. Las variables estudiadas son:

- Economías de escala de los proyectos
- CAPEX Electrólisis
- Instrumentos regulatorios en bajo carbono
- Factor de planta de los proyectos renovables
- Costo de energía eléctrica renovable

4.1 Variables del análisis de sensibilidad

La selección de variables para el análisis de sensibilidad fue realizada con base en la experiencia de los desarrolladores del proyecto, pero también basándose en las variables más frecuentemente mencionadas en la literatura como aspectos clave para el desarrollo de proyectos exitosos de hidrógeno y amoníaco, así como indicadores fundamentales para lograr costos competitivos de estas moléculas.

La Tabla 5 resume las variables y los intervalos estudiados en este análisis de sensibilidad:

Tabla 5. Resumen de las variables estudiadas en el análisis de sensibilidad del proyecto

No.	Variable	Units	Minimum Value	Maximum Value	Step	Comments
1	Economías de escala de los proyectos	[MW] _{ez}	30	1000	50	Se analiza desde la escala del proyecto HyEX (26 MW) hasta la escala GW. Horizonte temporal 2030.
2	CAPEX Electrólisis	[USD/kW]	450	1000	50	Se analiza la variable desde las perspectivas BAU de decremento de costos y desde la meta de largo plazo de CAPEX de electrólisis de IEA. Horizonte temporal 2030.
3	Instrumentos regulatorios en bajo carbono	[USD/tonCO] _{2eq}	0	150	15	Previsiones del impuesto al carbono hacia el año 2030 en economías desarrolladas como los países de potencial importación identificados. Horizonte temporal 2030.
4	Factor de planta de los proyectos renovables	[%FLH]	20%	120%	10	Intervalo de operabilidad de un electrolizador tipo PEM, de acuerdo con fabricantes de estos equipos.
5	Costo de energía eléctrica renovable	[USD/MWh]	10	160	5	Valor desde los valores más pequeños observados como precio marginal de plantas depreciadas de generación hidroeléctrica y hasta los precios de red promedio de cada país. Horizonte temporal 2030. Tarifa de electricidad media tensión.

4.2 Economías de escala de los proyectos

Se definen a las economías de escala como “Una situación en la que una empresa reduce sus gastos de producción al expandirse o aumentar su capacidad productiva o de manufactura”.

Se trata de una circunstancia en la que cuanto más se produce, el coste que tiene la empresa por fabricar un producto es menor; y esto aplicado a los proyectos de producción de energía, hidrógeno o amoníaco, significa la instalación de capacidades mayores de producción.

Los rangos de estudio de esta variable son:

- **Mínimo:** 30 MW – Escala del primer proyecto piloto de amoníaco verde en LATAM (HyEX Chile – 26 MW)
- **Máximo:** 1000 MW – Escala de producción GW (consideración del proyecto)

4.2.1 Relevancia de las economías de escala

Las economías de escala son relevantes para los proyectos de producción de hidrógeno y de amoníaco renovable porque:

- Permiten la **reducción de costos de los proyectos**, a la vez que garantizan la demanda de los bienes, o en este caso, moléculas que se producirán; es decir, permiten a los consumidores elegir comprar alternativas de menos emisiones al estar estas disponibles en el mercado.
- Permite el **uso de infraestructura compartida** por múltiples potenciales compradores de la molécula de amoníaco, lo cual puede ocasionar una reducción de costos logísticos y de transporte de la molécula.
- Habilita la **planificación de largo plazo de la oferta, demanda e infraestructura de producción** de energía, hidrógeno y amoníaco. Al tratarse de proyectos de escala X00 o X000 MW, obligan a las organizaciones planificadoras de infraestructura a robustecer sus análisis y permiten con ello una mejor organización de los proyectos de crecimiento de capacidades como la transmisión eléctrica, el crecimiento de capacidades portuarias, etc.

4.2.2 Acciones para el control de la variable

Algunas acciones clave para tomar control sobre esta variable y poder beneficiarse de la reducción de costos de amoníaco que viene junto con el desarrollo de proyectos de gran escala, son:

- Planificación de proyectos de gran escala, mediante el conocimiento de la demanda y a través también del establecimiento de metas Estado o metas país para la adopción tecnológica, las cuales, idealmente pueden venir acompañadas de estímulos fiscales y no fiscales para su cumplimiento.
- Desarrollar contratos de largo plazo que aseguren clientes para los proyectos de gran escala, teniendo esto como ventajas la certeza para el proveedor de la molécula y eliminación de la volatilidad de costos para el comprador; lo cual es definitivamente una ventaja de las moléculas renovables sobre las fósiles.
- A nivel nación es posible controlar esta variable mediante el estímulo a las capacidades de manufactura de los equipos y plantas involucradas, a fin de que se pueda garantizar la disponibilidad a gran escala de los proyectos necesarios para los proyectos.

4.2.3 Resultados

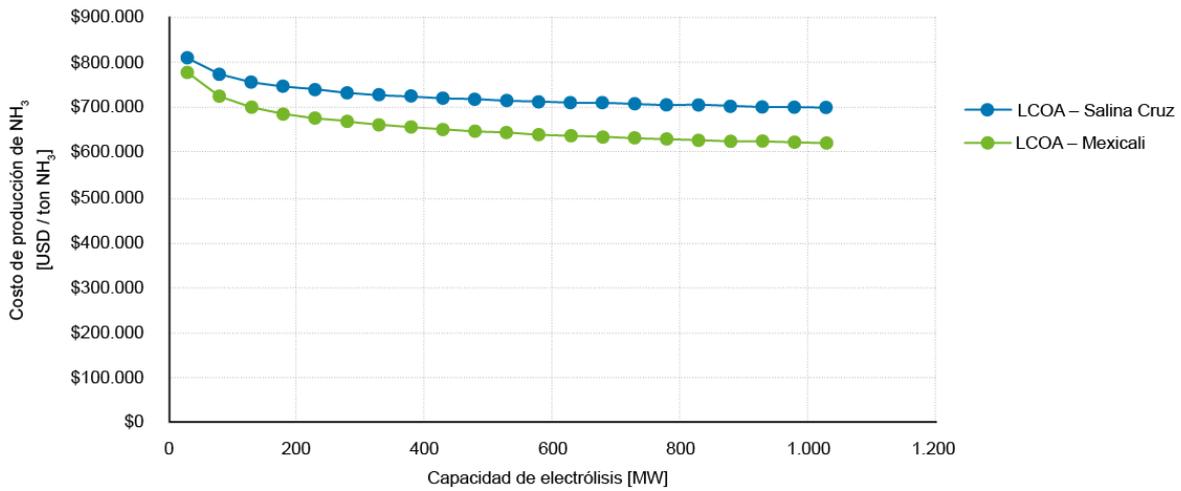
Se observa que el comportamiento de las economías de escala es de tipo asintótico, es decir, que a valores altos de escala de proyectos, la reducción de costos es menos acelerada que en los proyectos de menor escala, e incluso, a una escala superior a 1000 MW (en el análisis de sensibilidad planteado), el cambio en el costo de los equipos y de las moléculas de amoníaco se vuelve despreciable, tal que se puede considerar que el costo de producción de amoníaco mantendría constante su valor.

Con el objetivo de hacer un análisis comparativo de las variables estudiadas y su impacto en el LCOA, se define el concepto “razón de LCOA ante el cambio”, la cual es: el porcentaje que disminuye el LCOA ante el aumento porcentual de la variable estudiada. Por ejemplo, en el caso de las economías de escala de los proyectos el costo de amoníaco pasa de 811 USD/ton a

699 USD/ton (reducción del 13.81%) cuando el proyecto crece su escala de 30 a 1000 MW (aumento del 3333%). Entonces, la razón de LCOA ante el cambio para la economía de escala es de $13.81\%/3333\% = 0.004$. Mientras más grande sea esta razón de cambio, significa que cambios más pequeños de la variable en estudio tienen un mayor impacto en el LCOA.

Para el caso de la escala de los proyectos, se puede observar que aproximadamente después de los 700 MW de escala, el cambio de LCOA es muy pequeño, es decir, que la curva alcanza una zona asintótica. El mayor impacto de esta variable en México está al transitar de los proyectos escala X0 MW a los proyectos de hasta 400 MW.

Figura 53. Resultados del análisis de sensibilidad – Economías de Escala en México



4.3 CAPEX de la electrólisis

El CAPEX (capital expenditure) es la **inversión en capital o inmovilizado fijo que realiza una compañía ya sea para adquirir, mantener o mejorar su activo no corriente.**

Para este caso se estudió como variable de sensibilidad el CAPEX de la electrólisis, el cual considera al electrolizador, su instalación, la obra civil alrededor de él, así como la instrumentación necesaria para operar

Los rangos de estudio de esta variable son:

- **Mínimo:** 450 USD/kW – Meta de largo plazo del costo de electrólisis
- **Máximo:** 1000 USD/kW – Proyección de costo BAU de la electrólisis en 2030

4.3.1 Relevancia del CAPEX de la electrólisis

El CAPEX de la electrólisis es el segundo elemento de mayor contribución al LCOH, luego del costo de electricidad para producir el hidrógeno, de modo que es una variable relevante. Adicionalmente, se le ha estudiado considerando que:

- Siendo el **hidrógeno el componente de mayor costo en la construcción del costo de producción de amoníaco**, y al ser este un equipo que constituye aproximadamente el 40% del costo de hidrógeno, su CAPEX merece atención
- Esta es posiblemente **la tecnología con mayor área de mejora tecnológica y de crecimiento en la capacidad mundial de producción**, de forma que es el equipo que más podría decrecer su costo entre ahora y 2040

4.3.2 Acciones para el control de la variable

Algunas de las acciones que es posible hacer para tomar control del CAPEX de la electrólisis son:

- **Desarrollo de capacidades de manufactura de electrolizadores y/o componentes** de estos o bienes necesarios para su instalación: de modo que se eviten costos de envío, internación al país y sobre todo: márgenes altos en su precio de venta.
- **Reducción o eliminación de impuestos** a la importación de estos equipos y de insumos relacionados con su instalación, para que en caso de no desarrollarse localmente: se puedan traer a los países de estudio al menor costo posible
- **Desarrollo de capacidades de instalación** eficiente que reduzcan el costo de esta etapa de los proyectos, el cual está considerado dentro del costo total de los equipos.

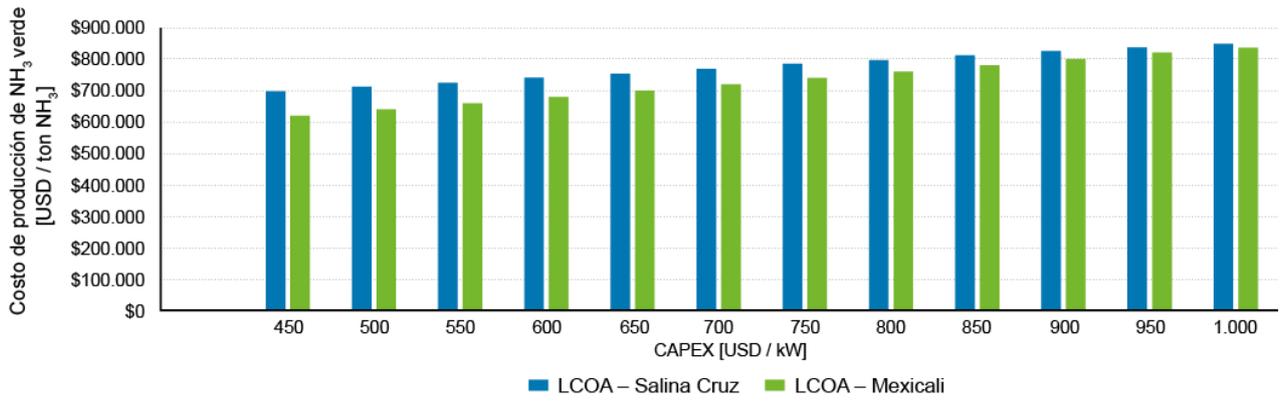
4.3.3 Resultados

El CAPEX de la electrólisis presenta una razón de LCOA ante el cambio de 0.18, lo cual, aunque es alto comparativamente con la razón de cambio de las economías de escala, aún parece una variable de cambio conservador.

Una caída del CAPEX en un 50% traería al LCOA una reducción de solo 18%, esto debido a que no es el CAPEX una variable de altísima contribución al LCOH y por tanto al LCOA. Recordemos que, hacia la década de 2030, el CAPEX de la electrólisis puede representar menos del 25% del LCOH.

Este análisis se ha realizado desde los 450 y hasta los 1000 USD/kW de electrólisis, sin embargo, la mayoría de las proyecciones de evolución de esta variable predicen que para 2030 su valor debería rondar entre los 600 a 700 USD/kW, de modo que, en México, con esos valores podría esperarse un LCOA de entre 742 y 770 USD/ton para Salina Cruz y de 682 a 722 USD/ton en Mexicali.

Figura 54. Resultados del análisis de sensibilidad – CAPEX de electrólisis en México



4.4 Instrumentos regulatorios en bajo carbono

Los Instrumentos regulatorios en bajo carbono consiste en una forma de penalizar o desarrollar mecanismos de mercadeo de emisiones (permisos para contaminar) para las empresas y organizaciones que consumen combustibles fósiles.

La forma más popular de instrumento regulatorio en bajo carbono es el impuesto al carbono (CO_2), que consiste en aplicar una tasa impositiva sobre el precio de todas las formas de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), dependiendo de su grado de emisión (definido en toneladas de CO_2 equivalente $-\text{tCO}_{2e}$). Este impuesto puede aplicarse de manera diferencial o indistinta según el uso de los combustibles: ya sea como fuentes de energía, o como materia prima, como es el caso de la producción de amoníaco.

Los rangos de estudio de esta variable son:

- **Mínimo:** 0 USD/ton CO_{2e} – Peor escenario posible, en el que no se imponga un impuesto a las emisiones en México.
- **Máximo:** – 150 USD/ton CO_{2e} – Proyección del valor más alto visualizado en 2030 por la IEA en el World Energy Outlook.

4.4.1 Relevancia de los instrumentos en bajo carbono

Algunos de los aspectos que hacen relevante incluir un análisis de sensibilidad para los instrumentos regulatorios en bajo carbono incluyen:

- Permiten **cuantificar las externalidades causadas por los combustibles fósiles** al emitir gases de efecto invernadero, ayudando a reducir la brecha económica entre las soluciones fósiles y las renovables.
- Establecen un **campo de competitividad en igualdad de condiciones** para las nuevas tecnologías de cero y bajas emisiones, en comparación con el uso de combustibles fósiles: al permitir a las soluciones verdes capitalizar sus beneficios, o desde la otra perspectiva, impactando a los combustibles fósiles de manera proporcional a su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero
- Permiten a los gobiernos diseñar y financiar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático: dando flujos de capital que pueden invertirse en soluciones de descarbonización que contribuyan a la transición energética de los países.

4.4.2 Acciones para el control de la variable

Los instrumentos regulatorios en bajo carbono, al ser elementos de política pública y cuyo principal actor detonante es el gobierno, poseen una principal acción para regular la variable:

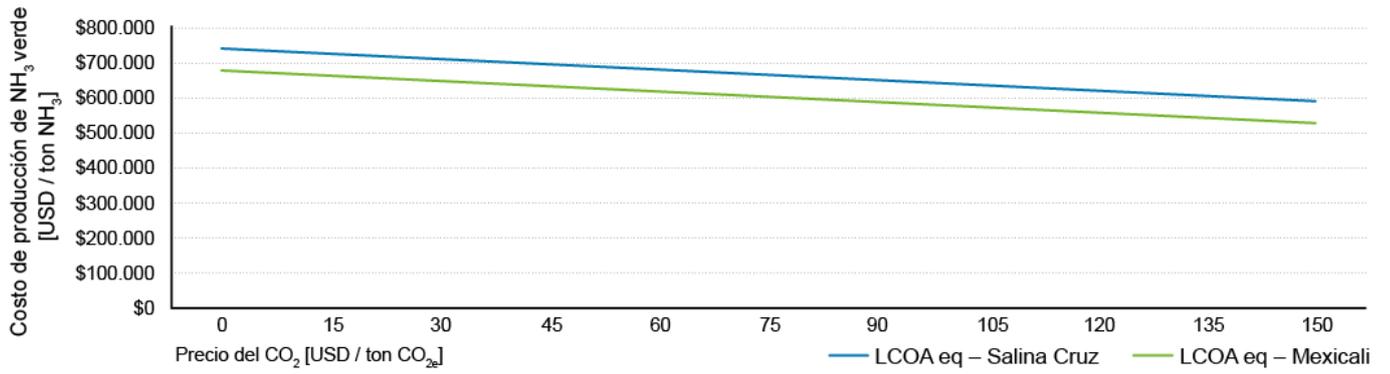
- **Política ambiental coordinada entre distintos actores**, como son los Ministerios de Energía, Ambiente, Finanzas, Industria, empresas del sector energético (especialmente aquellas del ramo del petróleo y gas)

4.4.3 Resultados

Existen diversos mecanismos de regulación al carbono, que van desde los impuestos al carbono aplicados directamente a los combustibles fósiles; hasta los mercados de carbono que les permiten a las soluciones de bajas emisiones emitir certificados por volúmenes reducidos de emisiones, los cuales pueden ser comercializados entre empresas y organizaciones con el objetivo de cumplir sus metas de descarbonización (exigidas por el regulador o autoimpuestas. Este análisis de sensibilidad ha definido precios a las emisiones de CO_2 y ha restado del LCOA este precio, simulando que el flujo de efectivo, el crédito al carbono producible se comercializa por separado y reduce el costo de producción del amoníaco verde.

Para México, la inclusión de un instrumento regulatorio en bajo carbono tiene una razón de LCOA ante el cambio de 0.020, mostrando que para un impuesto al carbono que pase de 15 a 150 USD/ton, la reducción porcentual en el LCOA sería de 19%, pasando de 742 a 592 USD/ton en Salina Cruz y de 667 a 531 USD/ton en Mexicali.

Figura 55. Resultados del análisis de sensibilidad – Instrumentos regulatorios en bajo carbono en México



4.5 Factor de planta de los proyectos renovables

El factor de planta (también llamado factor de capacidad) de una planta es el cociente entre cantidad de energía o sustancia producida durante un período (generalmente anual) y la cantidad de energía o sustancia que esa planta pudo generar trabajando a capacidad plena durante el mismo período. Es una indicación de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo.

Los rangos de estudio de esta variable son:

- **Mínimo:** 20% - Factor de planta mínimo aceptable para plantas solares fotovoltaicas
- **Máximo:** 120% - Factor de planta máximo de la electrólisis PEM, considerando su característica de poder operar en valores superiores a su capacidad nominal

4.5.1 Relevancia del factor de planta de los proyectos renovables

El factor de planta de los proyectos renovables es una variable técnica sumamente relevante; de hecho, entre las primeras variables que se identifican a la hora de proponer un sitio para el desarrollo de un proyecto renovable es precisamente esta, ya que de ella depende una producción eficiente de energía. Además de esto, el factor de planta es relevante porque:

- **Mientras más alto es este valor, más económica es la producción de energía,** hidrógeno o amoníaco (según sea el caso) por unidad producida
- **En el caso del amoníaco:** se requieren factores de planta altos, dada la necesidad de las plantas de síntesis (Haber Bosch) de mantener una carga mínima de producción para evitar paros y con eso pérdidas de tiempo y energía en el arranque de la planta

4.5.2 Acciones para el control de la variable

El factor de planta es una variable que en buena medida está dictada por el potencial renovable de cada sitio o localidad geográfica, sin embargo, existen algunas consideraciones técnicas que se pueden tomar en cuenta para mejorar el desempeño de esta variable, como son:

- Identificación de sitios de **alto potencial renovable:** lo cual es una importante labor de los desarrolladores de proyectos y a pesar de que las fuentes públicas de potencial renovable brindan una buena guía, el estudio en campo del potencial renovable del sitio específico de cada proyecto es de suma importancia para garantizar el despliegue de proyectos relevantes.
- **Uso de plantas híbridas:** entre distintas fuentes renovables o incluso haciendo uso de la red eléctrica (cuidando la huella de emisiones de GEI de esta), lo cual permite que el factor de planta del proyecto crezca mediante el aprovechamiento de un recurso (por ejemplo, eólico) cuando otro recurso se encuentra ausente o intermitente (por ejemplo, el solar fotovoltaico durante las noches) aumentando así el número de horas en que hay energía disponible y por tanto, el electrolizador se encuentra en funcionamiento.
- **Sobredimensionamiento de proyectos de generación eléctrica** respecto a la capacidad de los electrolizadores: esto permite aprovechar la característica de los electrolizadores de poder operar en un rango que puede ir desde el 10 y hasta el 120% de su capacidad nominal, pudiendo proveer de más energía al equipo durante las horas de máxima producción renovable y obteniendo así más hidrógeno respecto al “dato de placa” del equipo.
- Uso de sistemas de **almacenamiento de energía:** la viabilidad económica de esto dependerá del costo que tenga la energía renovable y el sistema de almacenamiento mismo, sin embargo, a nivel técnico es una buena alternativa para aumentar las horas de operación de los equipos de producción de hidrógeno y de amoníaco.

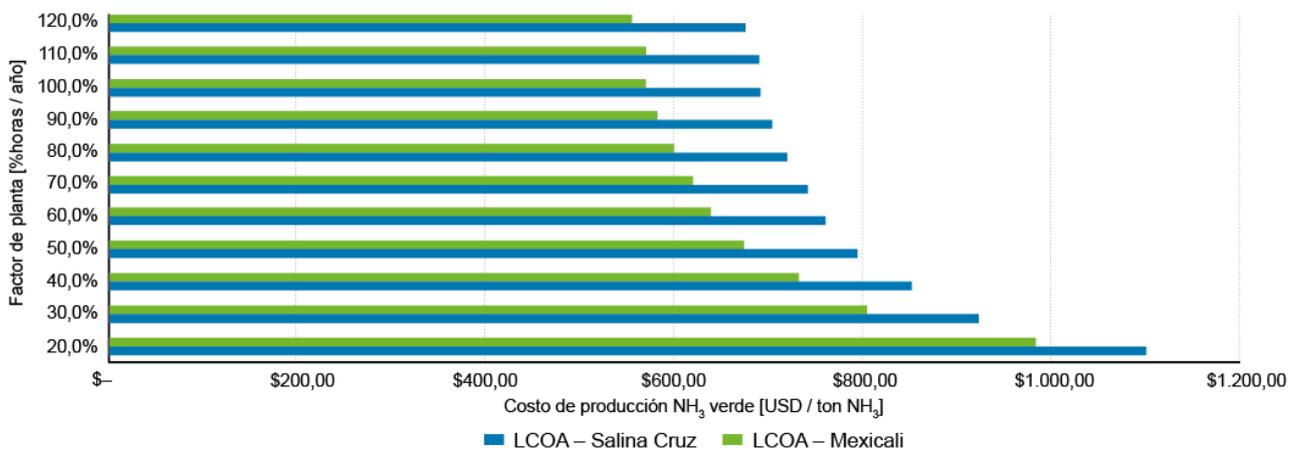
4.5.3 Results

El análisis de datos mostró que, en México, la razón de LCOA ante el cambio del factor de planta es de 0.08, pasando el LCOA de 1101 a 676 USD/ton NH₃ cuando el factor de planta aumentó del 20% al 120% en Salina Cruz, mientras que, en Mexicali, para ese mismo cambio en el factor de planta resultó en un LCOA que disminuyó de 984 a 555 USD/ton NH₃ en el año 2030.

El comportamiento del LCOA frente al factor de planta no es lineal; conforme más pequeño es el factor de planta, el LCOA crece de manera exponencial, por lo que, en términos generales, se recomienda que el factor de planta de este tipo de proyectos supere el 70%, que es cuando la gráfica alcanza un comportamiento asintótico. Lo anterior significa que, aunque después del 70% de factor de planta el LCOA aún disminuye, este cambio ya no es tan grande como cuando el factor de planta pasa del 20 al 30% o del 30 al 40%.

En México, los factores de planta fueron de 70% en Salina Cruz (plantas eólicas) y de 50% en Mexicali (plantas solares), lo cual se logró mediante un factor de planta eólico de 44.7% y solar fotovoltaico de 28.3%, respectivamente y en ambos casos diseñando la planta bajo un sobredimensionamiento de 2x la capacidad renovable respecto a la capacidad de electrólisis.

Figura 56. Resultados del análisis de sensibilidad - Factor de planta de proyectos en México



4.6 Costo de la energía eléctrica renovable

El costo de la energía renovable, expresado como “Costo Nivelado de Electricidad” o LCOE, por sus siglas en inglés se define como la **valoración económica del costo del sistema de generación de electricidad** que incluye todos los costos a lo largo de la vida útil del proyecto: la inversión inicial, operación y mantenimiento, costo de capital, etc. En el caso de las plantas de generación eléctrica convencional, el LCOE incluye el costo del combustible.

Los rangos de estudio de esta variable son:

- **Mínimo:** 10 USD/MWh – Valores mínimos observados en la literatura del costo marginal de operación de plantas renovables depreciadas
- **Máximo:** 160 USD/MWh – Valores máximos reportados para el uso de energía de red a escala industrial en México.

4.6.1 Relevancia del costo de la energía eléctrica renovable

El costo de la energía eléctrica renovable es un factor que se ha mencionado a lo largo de este reporte como un habilitador definitivo de la industria del amoníaco renovable. Algunos aspectos que confirman su relevancia son:

- El costo de energía renovable es la **variable crítica para la producción de hidrógeno y moléculas verdes derivadas** de forma competitiva. La electricidad constituirá en 2030 entre el 45 y hasta el 60% del costo del hidrógeno, que a su vez representa más del 50% del costo de producción de amoníaco
- La clave para la transición energética será la **capacidad de producir energía renovable de forma fiable y económica**
- Se puede considerar, en términos generales, que la meta de último plazo del costo de energía renovable que viabilizará al hidrógeno y sus derivados va de los **20 a los 30 USD/MWh**

4.6.2 Acciones para el control de la variable

El costo de energía renovable puede ser controlado o modificado si los países con interés en el hidrógeno y amoníaco renovables desarrollan algunas acciones, tales como:

- Desarrollo de **capacidades de manufactura de equipos** de generación renovable: que permitan reducir el CAPEX de los proyectos de generación renovable y con eso, el principal concepto del costo de la energía que ellos producirán.
- **Investigación y desarrollo** para mejorar el desempeño de los equipos de generación: pudiendo generar más energía de una misma instalación y llevando con ello hacia abajo los costos nivelados de electricidad (costos totales divididos por la energía producida).
- **Desarrollo de capacidades de instalación, mantenimiento y operación** eficiente de las plantas renovables: que mantengan los costos de instalación y operación bajos.
- **Uso de tecnologías digitales para la predicción del comportamiento** de las plantas renovables variables y sistemas de redes inteligentes para la gestión de la intermitencia: con lo cual se podría maximizar el factor de planta de los proyectos, con ello producir más energía y reducir el LCOE.
- **Estímulos a la inversión pública y privada** en el desarrollo de proyectos renovables: que impacten directamente y de forma positiva el modelo financiero de los proyectos renovables.
- **Economías de escala:** proyectos de escala X00 MW e incluso X a X0 GW: lo cual es una variable que hemos estudiado en este trabajo para la electrólisis de agua, pero que aplica por igual a la generación de energía renovable

4.6.3 Resultados de México

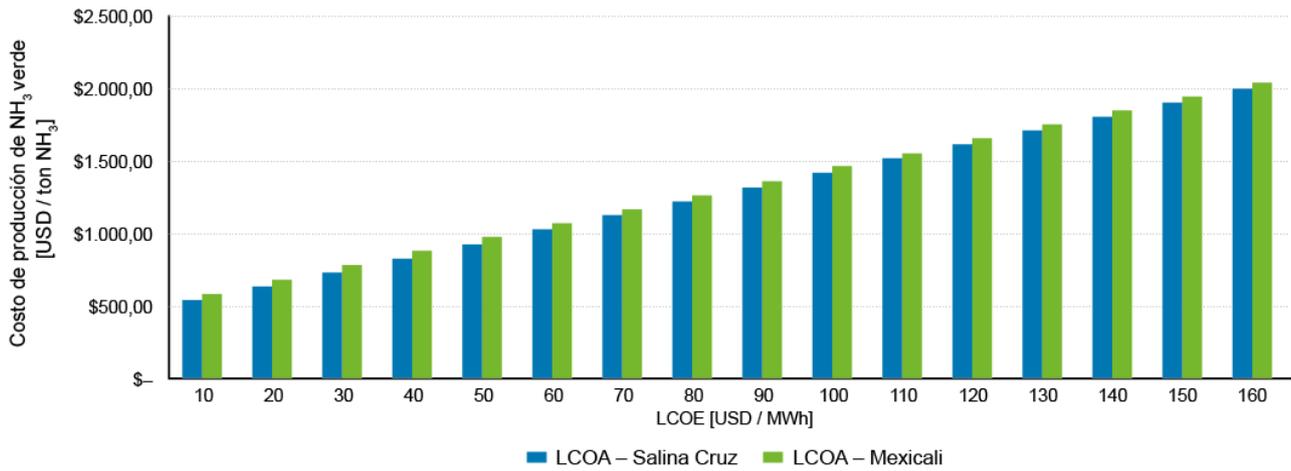
El análisis de sensibilidad del costo de electricidad muestra que la razón de LCOA ante el cambio del costo de electricidad es de 0.18, el valor más alto entre las razones de cambio estudiadas en este reporte.

Esto corresponde con las estimaciones presentadas en secciones anteriores sobre la relevancia del costo de electricidad para el éxito de los proyectos de producción de amoníaco renovable en México. De este modo, en México, un cambio de LCOE

de 160 a 10 USD/MWh produce una caída drástica en el costo del amoníaco, que va de los 2006 a los 537 USD/ton en 2030 en Salina Cruz.

A diferencia de otras variables analizadas en esta sección: el costo de amoníaco tiene un comportamiento lineal frente al costo de electricidad, de modo que es fácilmente extrapolable e interpolable a valores distintos de costo de electricidad que pudieran conocerse en algún sitio en específico.

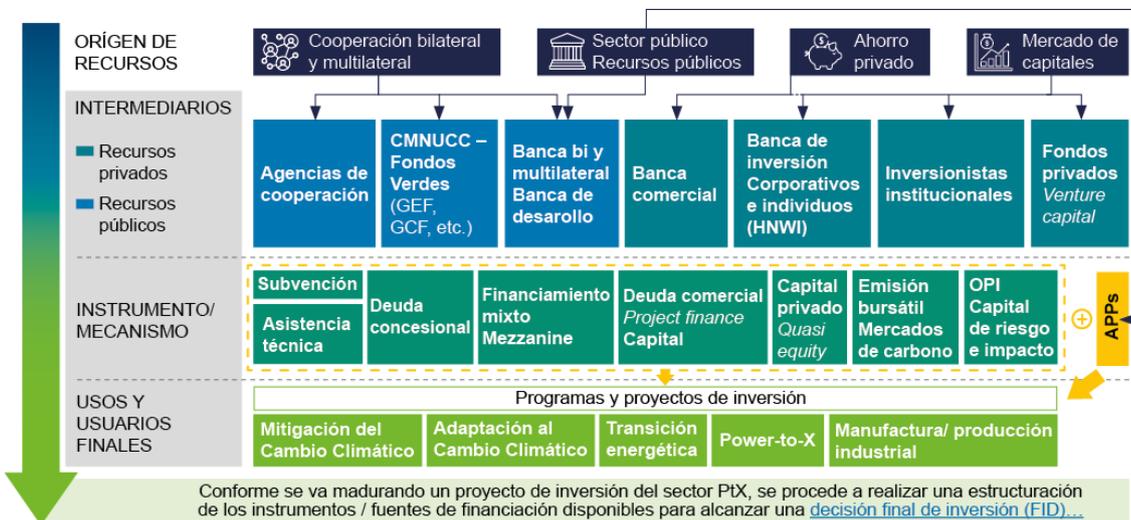
Figura 57. Resultados del análisis de sensibilidad – Costo de la energía renovable en México



5 Oportunidades de financiamiento

Con la mira puesta en detonar el desarrollo de actividades económicas bajas en carbono a partir de la **tecnología Power-to-Ammonia** en el mercado mexicano se completó un análisis de alto nivel sobre las oportunidades de financiamiento disponibles para este tipo de proyectos. En primer lugar, se presenta un panorama del financiamiento disponible para programas y proyectos de inversión cuyo uso final está enfocado en acciones de mitigación o adaptación al cambio climático, transición energética, Power-to-X, y/o de manufactura industrial. Como se muestra en la siguiente figura, los recursos para financiamiento incluyen desde la cooperación bilateral y multilateral, pasando por el sector público gracias a sus diversas modalidades de inversión, así como el ahorro de personas y empresas, hasta los mercados de capitales. Los recursos son acercados a los usuarios finales a través de los instrumentos ofertados por los proveedores de financiamiento; dichos instrumentos pueden ser -no reembolsables o reembolsables sin costo financiero- cuando son canalizados vía la cooperación multilateral y/o el sector público, o con costo financiero o inversiones de capital cuando el sector privado financiero (y no financiero) está implicado.

Figura 58. Panorama de alto nivel sobre la oferta de financiamiento en el marco de proyectos Power-to-X (PtX)

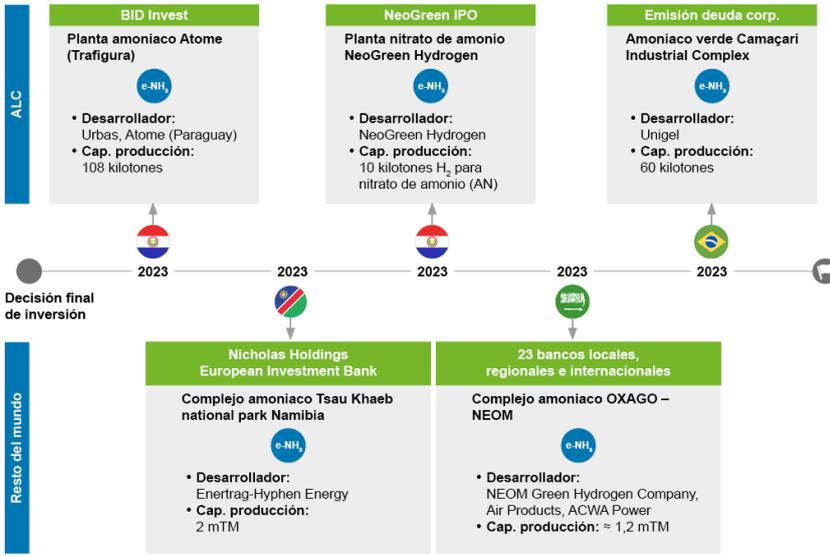


Fuente: NTT Data.

A continuación se describe cómo ha ido **evolucionando el financiamiento de proyectos P-to-Ammonia en la región de ALC y en el mundo**, este último a partir de casos seleccionados. Para el primer caso, destaca que a la fecha sólo han alcanzado una decisión final de inversión (FID), públicamente divulgada, tres proyectos con una capacidad de producción combinada <200 kt de amoníaco verde, dos de ellos en Paraguay; el de mayor capacidad con un financiamiento aprobado por el brazo de inversión privada del Banco Interamericano de Desarrollo (BID Invest), mientras que la planta de Power-to-Nitrato de amonio de NeoGreen Hydrogen si bien está siendo financiada con recursos privados, se ha indicado la intención de realizar una oferta pública inicial de acciones. Por su parte, la planta de amoníaco verde de la multinacional brasileña Unigel estaría siendo financiada con recursos corporativos, aunque la compañía ha realizado emisiones de deuda corporativa para financiar sus operaciones.

A nivel internacional, cabe destacar dos de los proyectos de mayor envergadura que han logrado su cierre financiero, por un lado, está el caso del complejo de amoníaco Tsau Khaeb national park en Namibia que, por su posición geográfica, representa un competidor directo para el amoníaco verde mexicano, el cual ha recibido financiamiento privado por parte de Nicholas Holdings y del European Investment Bank (EIB). Además, el desarrollador de una ciudad en línea en Arabia Saudí, NEOM, recientemente anunció la obtención de financiamiento por parte de 23 instituciones financieras para una planta de amoníaco verde en Oxagon con capacidad de producir 1.2 millones de TM; al respecto, es importante destacar que las autoridades han indicado **que la transacción incluye un off-take agreement de 30 años para el amoníaco verde.**

Figura 59. Evolución del flujo de financiamiento hacia proyectos Power-to-NH₃



xyz Principal proveedor financiero

IPO: oferta pública inicial. Fuente: NTT Data con base en Reuters, IEA, anuncios de las compañías.

En cuanto a las oportunidades específicamente disponibles en México, se presentan las alternativas de **cooperación bilateral y multilateral**. Los organismos financieros multilaterales de desarrollo y las agencias de cooperación bilateral colaboran a nivel nacional y subnacional con el sector público, la sociedad, empresas, y otras partes interesadas para promover el acceso a energía segura, asequible, y sostenible, ofreciendo apoyo, información, recursos financieros, o asistencia técnica para iniciativas sostenibles, lo que abarca la implementación de energías renovables para una transición energética justa e inclusiva, prácticas de desarrollo sostenible, así como en la mitigación y adaptación ante el cambio climático. En la siguiente figura se muestra una selección de las oportunidades de financiamiento a nivel de intermediario presentes en México.

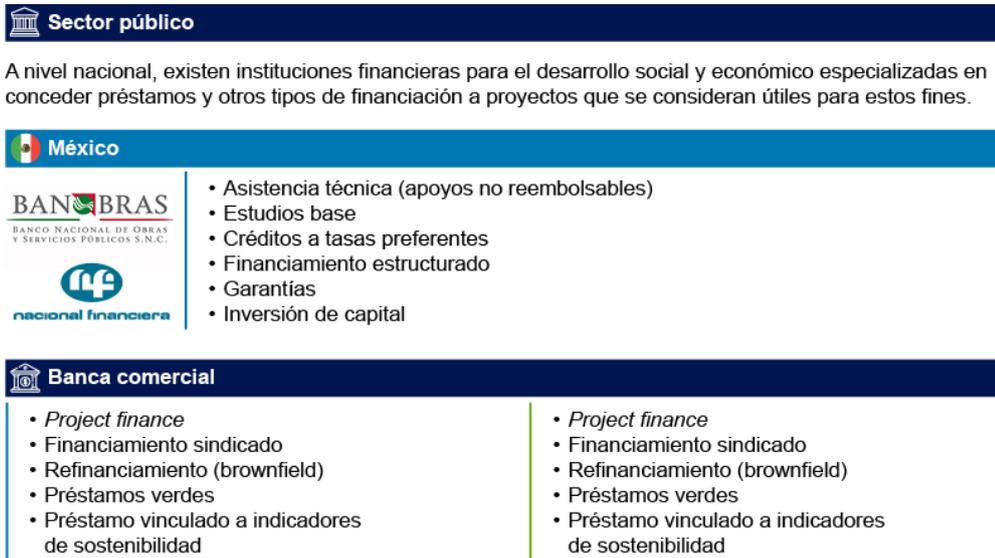
Figura 60. Oportunidades de financiamiento bilateral y multilateral para México



Fuente: NTT Data con base en los oferentes.

En cuanto al **financiamiento público**, a nivel nacional existen instituciones financieras para el desarrollo social y económico que se especializan en proporcionar préstamos y otro tipo de financiamiento reembolsable y no reembolsable a programas y proyectos que son considerados de utilidad para lograr estos fines. La Figura 61 presenta las oportunidades de financiamiento disponibles en México.

Figura 61. Public sector financing opportunities in Mexico



Fuente: NTT Data con base en los oferentes.

Por último, en los **mercados financieros de capital y deuda**, se emiten instrumentos para financiar proyectos de transición energética, que permiten apoyar a las empresas a recaudar capital, desarrollar, y ejecutar proyectos de energía renovable, y gestionar sus finanzas. Si bien han experimentado una buena evolución para adoptar los marcos y estándares necesarios para la financiación de proyectos y acciones sostenibles, estos mercados suelen aprovecharse para financiar o refinanciar paquetes de varios activos o activos en operación. La Figura 62 muestra las oportunidades de financiamiento disponibles.

Figura 62. Oportunidades de financiamiento bursátil y de capital de riesgo en México



Fuente: NTT Data con base en los oferentes.

6 Conclusiones

En este estudio, se llevaron a cabo diversas investigaciones con el propósito de identificar potenciales mercados receptores de amoníaco verde producido en México, considerando su competitividad a corto y mediano plazo con relación a los costos en el mercado internacional tanto del gas natural como del amoníaco gris.

La demanda mundial de amoníaco se encuentra estrechamente ligada a su uso en la producción de fertilizantes nitrogenados, siendo la urea su componente principal. Este vínculo entre la demanda y el sector agrícola ha propiciado un crecimiento sostenido desde el año 2000, impulsado por el crecimiento poblacional y sus aplicaciones en la industria química.

En el panorama global, China, Estados Unidos, India, Rusia e Indonesia sobresalen como líderes en el consumo de amoníaco gris, evidenciando la relevancia de este compuesto en diversas industrias a nivel mundial. La presencia de actores clave como Estados Unidos, Arabia Saudita y Trinidad y Tobago en el mercado internacional de amoníaco subraya su importancia estratégica.

En el contexto de América Latina y el Caribe (ALC), si bien ha habido un incremento en el consumo de amoníaco, aún existe margen para aumentar la producción y la participación en el mercado global. Trinidad y Tobago se destacan como uno de los principales exportadores de amoníaco a nivel mundial, gracias a su ubicación estratégica y la abundancia de recursos naturales, en particular el gas natural. En colaboración con Rusia y Arabia Saudita, atiende a mercados clave como China, Estados Unidos, la Unión Europea e India.

Países exportadores muestran diversos niveles de compromiso en el desarrollo de tecnologías verdes, impulsados por regulaciones de mercado y compromisos de reducción de emisiones. Esta adaptación y enfoque en prácticas más sostenibles pueden tener un impacto significativo en la industria del amoníaco en el futuro.

Para la determinación de los costos es relevante la selección estratégica de puertos, la gestión de riesgos, la utilización de infraestructura existente, la adopción de energía renovable, el enfoque en la escala de producción y el análisis de los costos nivelados como factores críticos en el desarrollo exitoso de la industria de amoníaco verde en México. Estos aspectos deben considerarse cuidadosamente para garantizar la viabilidad económica y ambiental de esta prometedora fuente de energía sostenible.

La selección estratégica de puertos marítimos es un factor crítico debido a su proximidad a centros industriales y su infraestructura logística, que facilita tanto la producción como la exportación eficiente de amoníaco verde. El aprovechamiento de la infraestructura portuaria existente en ambos países se presenta como una estrategia esencial para lograr una producción de amoníaco verde costo-eficiente y acelerar el desarrollo de la industria.

La evaluación de tecnologías de generación de energía renovable, como la solar fotovoltaica y la eólica, desempeña un papel fundamental en la determinación de costos. Esto no solo incide en el costo nivelado de electricidad (LCOE) sino también en el costo nivelado del hidrógeno (LCOH) y, en última instancia, en el costo nivelado del amoníaco (LCOA). Estos indicadores son vitales para evaluar la viabilidad económica de toda la cadena de producción y transporte de amoníaco verde.

Abordar el desafío de la escala en la producción de amoníaco verde es una estrategia efectiva. Plantas de menor capacidad que sean flexibles y compatibles con la intermitencia de las energías renovables permiten una producción más eficiente y rentable.

Las proyecciones sobre la demanda global de amoníaco y su capacidad de producción indican un futuro prometedor para el amoníaco verde, que se espera juegue un papel fundamental en las industrias energéticas, químicas y agroalimentarias. Este crecimiento se sustenta en su bajo impacto ambiental y su versatilidad, con aplicaciones en la agricultura sostenible, la energía limpia, y como portador de hidrógeno y combustible marítimo sin emisiones de CO_{2eq}.

La demanda de amoníaco, especialmente como combustible marítimo, se proyecta en constante crecimiento a partir de 2030, en respuesta a la necesidad de reducir emisiones en la industria naviera. En este contexto, México tiene la oportunidad de posicionarse como exportador de hidrógeno y amoníaco verde, contribuyendo así a la creciente demanda global de energías limpias. Asimismo, la adopción local del amoníaco verde podría impulsar una transición hacia una economía más sostenible en ambos países.

Para que esta visión se materialice, será esencial el desarrollo de infraestructura de transporte eficiente, así como la investigación y desarrollo continuo de tecnologías para la producción y almacenamiento de hidrógeno y amoníaco verde.

Además, la implementación efectiva de regulaciones y medidas de seguridad resulta fundamental para garantizar operaciones seguras y sostenibles en toda la cadena de producción y transporte.

Del análisis de rentabilidad de la producción de Amoníaco Verde en México, destaca la factibilidad de que la producción de amoníaco verde en México alcance precios por debajo de los máximos históricos observados en Estados Unidos a partir de 2030. La introducción de impuestos al carbono se perfila como una herramienta para reducir esta brecha y hacer que el amoníaco verde de México sea competitivo a nivel internacional. Mercados como Europa y Estados Unidos representan oportunidades inmediatas, mientras que la ubicación estratégica de la costa del Pacífico mexicano ofrece costos competitivos para la exportación, en particular hacia Japón.

El análisis de sensibilidad destaca que la implementación de un instrumento regulatorio de bajo carbono en México podría tener un impacto significativo en la reducción del costo nivelado del amoníaco verde. Un aumento en el impuesto al carbono de 15 a 150 USD por tonelada podría llevar a una reducción del costo en un 19%, lo que tiene implicaciones cruciales para la competitividad del amoníaco verde.

Se recomienda que el factor de planta de estos proyectos supere el 70% para lograr una reducción significativa de los costos. Además, resalta que el costo de capital (CAPEX) de la electrólisis no tiene un impacto tan relevante en el costo nivelado del amoníaco verde, especialmente hacia la década de 2030. Una disminución del CAPEX en un 50% resultaría en una reducción del costo de producción del amoníaco verde del 18%.

En el contexto mexicano, la cadena de valor y producción de amoníaco está en gran medida representada por PEMEX, que abarca desde el procesamiento de gas natural hasta la extracción de minerales para fertilizantes. PEMEX está trabajando en la rehabilitación de sus plantas de producción de amoníaco, y se anticipan nuevos proyectos en el sector privado.

La demanda histórica de amoníaco en México ha sido alta, pero el país depende en gran medida de las importaciones de fertilizantes nitrogenados, con Rusia, China y Trinidad y Tobago como principales proveedores. Este déficit comercial en fertilizantes nitrogenados contrasta con el superávit en la balanza comercial agropecuaria de México. La dependencia de las importaciones se atribuye parcialmente al suministro intermitente de gas natural y al estado de las plantas de producción en el país.

El amoníaco verde presenta una oportunidad significativa para México debido a su ubicación estratégica y recursos renovables en regiones como Mexicali y Salina Cruz. La competitividad de esta nueva fuente de amoníaco dependerá de mejoras en la eficiencia de procesos y costos de producción, además de considerar factores externos como impuestos al carbono.

En cuanto a las perspectivas, se espera un crecimiento moderado en la demanda de amoníaco en México, impulsado por la agricultura y la necesidad de aumentar la productividad. La producción de amoníaco verde, utilizando energía renovable, se presenta como una oportunidad para reducir las emisiones de carbono en la cadena de valor. México podría aprovechar su posición estratégica para exportar amoníaco a nivel internacional, especialmente como combustible marítimo en el futuro, lo que abriría nuevas oportunidades de mercado y fortalecería la economía del país.

Para capitalizar estas oportunidades, se requerirá una inversión significativa en infraestructura portuaria, energética y de transporte. La tendencia global hacia energías limpias y los incentivos a la sostenibilidad respaldarán la competitividad del amoníaco verde producido en México en un mercado internacional en crecimiento.

México se enfrenta a desafíos y oportunidades en el mercado del amoníaco, que incluyen el aumento de la producción nacional, la exploración de la producción de amoníaco verde y la consideración de las perspectivas de exportación en el sector marítimo. Estas acciones podrían contribuir al crecimiento sostenible de la industria del amoníaco en el país y posicionar a México como un actor importante en la producción y exportación de amoníaco verde. Se requerirá una inversión significativa y un enfoque en la sostenibilidad para capitalizar plenamente estas oportunidades.

7 Referencias bibliográficas

- Agenda Marítima. (2022) Amoníaco verde y déficit en puertos para exportarlo; disponible en: https://t.ly/_f3Ch
- Ammonia Energy Association; Atchison Julian. (2023) NEOM project reaches financial close, 30 year offtake secured; disponible en: <https://t.ly/iPTs6>
- ANIQ. (2020) Volumen de producción y comercio exterior amoníaco México (Toneladas); disponible en: <https://t.ly/KYrq5>
- Argus media.(2023) China eyes green ammonia exports by late 2024; disponible en: <https://t.ly/Sc2Va>
- BBVA. (2022) BBVA México anuncia alianza con reconocidas empresas para ofrecer facilidades en la adquisición de paneles solares; disponible en: <https://t.ly/6cLNE>
- BID. (2018)BID Invest firma el mayor proyecto de energía renovable en Colombia | IADB;disponible en: <https://shorturl.at/gGX04>
- Bloomberg. (2023) Markets Data; disponible en: <https://shorturl.at/fCKV8>
- Bloomberg; Salazar Castellanos Daniel. (2022) Los millonarios planes de empresas de fertilizantes en Colombia en pulso con Monómeros; disponible en: <https://shorturl.at/pNST6>
- Boulamanti, A., & Moya, J. A. (2017) Production costs of the chemical industry in the EU and other countries: Ammonia, methanol and light olefins; disponible en: <https://shorturl.at/qCK29>
- CHEMANALYST. (2023) Chemical and Petrochemical Industry Market Overview & Analysis; disponible en: <https://t.ly/n371>
- Chen, A., & Nunez, K. (2006) Managing supply chain's transaction costs through logistics. Journal of Applied Business Research (JABR); disponible en: <https://acortar.link/771d5u>
- Cision PR Newshire; Horizons Aker. (2023) Aker Horizons and VNG sign letter of intent to supply green ammonia from Norway to Germany; disponible en: <https://shorturl.at/eGQ15>
- COSIA GHG Working Group. (2018) GHG_Emerging and Existing Oxygen Production Technology; disponible en: <https://acortar.link/6FnKyz>
- CSIRO_GenCost 2021–22; Graham Paul. (2022) Assessment-of-the-cost-of-hydrogen-from-PV; disponible en: <https://shorturl.at/otDG7>
- DAI Infrastruktur. (2023) Green Hydrogen Roundtable under the hospices of HE the Prime Minister of Egypt, Dr. Moustafa Madbouli.; disponible en: <https://t.ly/JC3p>
- Deger Saygin & Herib Blanco & Francisco Boshell & Joseph Cordonnier & Kevin Rouwenhorst & Priyank Lathwal & Dolf Gielen. (2023) Ammonia Production from Clean Hydrogen and the Implications for Global Natural Gas Demand; disponible en: <https://t.ly/mC-A>
- El Economista. (2022) México importa 24% de sus fertilizantes desde Rusia; disponible en: <https://acortar.link/rYThlk>
- El Economista. (2022) Banco Mundial aprueba financiamiento de 1,000 millones de dólares a Colombia para transición energética; disponible en: <https://acortar.link/AZw7DC>
- EU CEPS; Righetti Edoardo/Egenhofer Christian. (2022) Exploring cost-effective support mechanisms for hydrogen mobility infrastructure; disponible en: <https://acortar.link/ARMt0c>
- Fitch Ratings. (2023) Economical ratings in Colombia; disponible en: <https://acortar.link/k8hrRQ>
- Forbes Colombia; Montes Sebastian. (2023) El gobierno colombiano está determinado en comprar Monómeros, pero... ¿sí es buen negocio?; disponible en: <https://shorturl.at/orTY0>
- García-Salazar, J. A., Rodríguez-Licea, G., & Bravo, M. B. (2018) Consumo de fertilizantes en el sector agrícola de México: un estudio sobre los factores que afectan la tasa de adopción; disponible en: <https://shorturl.at/abqLU>
- GIZ Colombia; Fichtner; Gomez Mejia Adriana. (2023) Estudio técnico, económico e identificación de hubs de hidrógeno verde en Colombia;
- GIZ Colombia; Fichtner; Gomez Mejia Adriana. (2023) Estudio técnico económico para la identificación y evaluación de tecnologías PtX en Colombia; Potencial y tecnologías Power to X en Colombia;
- GIZ en cooperación con Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022) Estudio de diagnóstico normativo para incorporar las tecnologías Power to x en el ordenamiento jurídico colombiano;
- GIZ; Programa de Energías renovables Chile. (2022) Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización; disponible en: <https://shorturl.at/aqxL8>
- Global Maritime Forum. (2023) Ammonia as a shipping fuel; disponible en: <https://acortar.link/Ehb3pU>
- Hive Energy. (2023) COEGA GREEN AMMONIA PROJECT; disponible en: <https://acortar.link/aT3ZNp>
- Hydrogen Europe; Bastien Bonnet-Cantalloube, Marie Espitalier-Noël. (2023) Clean Ammonia in the future of energy system;
- IADB. (2023) Colombia estrena el Programa de Integración de Energías Renovables de los Climate Investment Funds en América Latina – Sostenibilidad; disponible en: <https://shorturl.at/jvwJ4>
- IEA. (2022) Gas Market Report Q4-2022; disponible en: <https://acortar.link/meR9rY>
- IEA. (2019) The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex; disponible en: <https://acortar.link/h3DClq>
- IEA. (2022) Renewable energy costs forecasts;disponible en: <https://shorturl.at/svx04>
- IEA. (2022) Electrolyzers; disponible en: <https://acortar.link/nFNEud>

- IEA. (2021) Ammonia Technology Roadmap; disponible en: <https://acortar.link/M4szlC>
- IEA. (2022) Global Energy and Climate Model – Macro drivers; disponible en: <https://shorturl.at/HKMN7>
- IEA Technology Collaboration Programme. (2023) Advanced Motor Fuels; disponible en: <https://shorturl.at/diow3>
- IFASTAT. (2023) Markets Outlook; disponible en: <https://acortar.link/d0uSbO>
- IFC – International Finance Corporation. (2023) Scaling Up Private Finance for Clean Energy in Emerging and Developing Economies; disponible en: <https://t.ly/Rnsi>
- IMF. (2022) More Countries Are Pricing Carbon, but Emissions Are Still Too Cheap; disponible en: <https://t.ly/dxvI>
- IRENA. (2022) Innovation Outlook Renewable Ammonia (Pág 36); disponible en: <https://shorturl.at/moNX3>
- IRENA. (2022) Power_Generation_Costs_2021; disponible en: <https://t.ly/cudD>
- IRENA. (2020) Green_hydrogen_cost; disponible en: <https://t.ly/gmQz>
- ITC MIE-APQ 4. (2016) Review of Global Regulations for Anhydrous Ammonia Production, Use, and Storage; disponible en: <https://t.ly/mo7A>
- KPMG. (2022) Cost of electrolysis; disponible en: <https://t.ly/OrQ5>
- La Jornada; Alegria Alejandro. (2023) Firma de fertilizantes invertirá mil 500 mdd en planta en La Laguna; disponible en: <https://t.ly/umTYa>
- Ladob. (2016) El gigante de amoníaco que se levantará sobre el ecosistema protegido: Ouhira, reserva amenazada por el influyentismo; disponible en: <https://t.ly/IQ2S>
- Luke Nayak. (2021) Techno-Economic Aspects of NH₃ value chain; disponible en: <https://t.ly/T-yn>
- Milenio. (2022) México supera los 50 mil mdd en exportaciones agroalimentarias en 2022; disponible en: <https://t.ly/-p1F>
- Milind Jain. (2022) Electrified ammonia production as a commodity; disponible en: <https://t.ly/qrzK>
- NEL Hydrogen. (2023) Technical Sheet M Series PEM Ez; disponible en: <https://t.ly/b2OF>
- OECD- FAO. (2023) OECD-FAO Agricultural Outlook 2023–2032; disponible en: <https://t.ly/D68i>
- Pemex Fertilizantes. (2019) Plan Estratégico de la ASF – PEMEX; disponible en: <https://t.ly/oYQHS>
- Presidencia México discurso. (2023) Fertilizantes para el Bienestar llegarán a todo el país durante 2023. Conferencia presidente AMLO; disponible en: <https://t.ly/PR03>
- PRIME Tanker & PRIME Gas. (2023) Gas Carriers; disponible en: <https://shorturl.at/fsRU8>
- RE Ninja from. (2019) MERRA-2 (2019 PV y 20 Wind); disponible en: <https://shorturl.at/cfK23>
- Rivarolo Massimo. (2019) Clean Hydrogen and Ammonia Synthesis; disponible en: <https://shorturl.at/yCMYZ>
- S6P Global. (2023) Platts Hydrogen Assessments; disponible en: <https://shorturl.at/fHPRY>
- Science Direct; Verleysen Kevin. (2023) Where to build the ideal solar-powered ammonia plant?; disponible en: <https://acortar.link/D7mfh5>
- SIAP. (2023) Producción Agrícola; disponible en: <https://shorturl.at/deFX8>
- Splash – Gas carriers – Ajdin Adis. (2023) Shipping shown path for ammonia-powered gas carriers from 2026; disponible en: <https://acortar.link/bKDFBb>
- Sussex Showcase. (2023) Shoreham port and h2evolution announce hydrogen hub partnership; disponible en: <https://shorturl.at/KTVW9>
- Tarafert. (2023) Fertilizer and Green Ammonia; disponible en: <https://acortar.link/02raut>
- The Greenbrier Companies. (2023) 34,300 Gallon Anhydrous Ammonia Pressure Tank Car; disponible en: <https://shorturl.at/pqDKM>
- Universidad del Rosario; Rozo Mendieta Claudia Patricia; Hernández Corredor Omar Javier. (2023) Competitividad de Colombia como productor y exportador de hidrógeno verde y su derivado amoníaco verde;
- Voanews; Angula Vitalio. (2023) Namibia Signs \$10 Billion Green Energy Deal With Germany's Hyphen; disponible en: <https://shorturl.at/aCIK7>
- WBG. (2023) WBG Carbon Pricing Dashboard; disponible en: <https://acortar.link/nn8Wv2>
- Wikipedia. (2023) Ammonia; disponible en: <https://shorturl.at/mwxL4>
- Wittrig Steve. (2022) Fuel ammonia supply cost analysis; disponible en: <https://shorturl.at/qtCDS>

8 Anexos

8.1 Anexo 1: Libro de consideraciones para el cálculo de costos nivelados del estudio

Tabla 6. Supuestos para el Cálculo del Costo Nivelado de Electricidad

Parámetro	Unidades	Valor 2025	Valor 2030	Valor 2040	Fuentes y notas
Financiero					
Año inicial del proyecto	año	2025	2030	2040	Parámetro del proyecto
Tasa de descuento	%		10%		Supuesto NTT DATA
Contingencias	CAPEX		10%		Supuesto NTT DATA
CAPEX Solar PV MX	USD/kW _p	680	400	350	[1e], [2e].
CAPEX Viento MX	USD/kW _p	1200	782	685	[1e], [2e].
CAPEX Solar PV MX	USD/kW-año	14,1	9,2	8,0	[1e], [2e].
CAPEX Viento MX	USD/kW- año	42,0	38,1	35,0	[1e], [2e].
Técnico					
Capacidad del proyecto	MW	200	200	200	Supuesto NTT DATA
Vida útil del sistema	Años	30	30	30	Supuesto NTT DATA basado en [1e]
Degradación solar fotovoltaica	%/año	0,50%	0,50%	0,50%	[3e]
Ubicación & potencial de RE					
México		Factor de carga FV	Factor de carga Viento		
Topolobampo	[% anual]	25,0%	18,2%		RE Ninja from MERRA-2 (2019 PV y 20 Wind)
Coatzacoalcos	[% anual]	20,3%	31,8%		RE Ninja from MERRA-2 (2019 PV y 20 Wind)
Salina Cruz	[% anual]	22,2%	44,7%		RE Ninja from MERRA-2 (2019 PV y 20 Wind)
Laredo	[% anual]	23,7%	39,8%		RE Ninja from MERRA-2 (2019 PV y 20 Wind)
Mexicali	[% anual]	28,3%	27,1%		RE Ninja from MERRA-2 (2019 PV y 20 Wind)

Table 7. Supuestos para el cálculo del Costo Nivelado de Hidrógeno

Parámetro	Unidades	Valor 2025	Valor 2030	Valor 2040	Fuentes y notas
Financiero					
Año inicial del proyecto	año	2025	2030	2040	Parámetro del proyecto
Tasa de descuento	%	10%			Supuesto NTT DATA
Capital propio % de CAPEX	%	100%			Supuesto NTT DATA
Costo de la deuda	%/año	0%			Supuesto NTT DATA
Plazo de la deuda	años	0			Supuesto NTT DATA
Aduanas para las unidades de infraestructura	%CAPEX	0			Supuesto NTT DATA
IVA para infraestructuras	%CAPEX	0			Supuesto NTT DATA
Tasa de cambio	USD/EUR	1,05			https://www.bloomberg.com/quote/EURUSD:CUR
Electrolisis					
Capacidad del electrolizador	MW	0			Supuesto NTT DATA basado en el tamaño actual de los proyectos de hidrógeno
Factor de carga del electrolizador	%año	Análisis por centro de producción de H ₂			Cálculo de NTT DATA
Tecnología		PEM			Supuesto NTT DATA
Eficiencia inicial	kWh/kg H ₂	54	50	48	Propuesta NTT DATA basada en [1], [2] y [3]
CAPEX	USD/kW	900	600	450	Propuesta NTT DATA basada en [1], [2] y [4]
CAPEX por pila	USD/kW	405	300	210	Propuesta NTT DATA basada en [1], [2] y [4]
Costos de instalación y propiedad	%CAPEX	15%	15%	12%	Propuesta NTT DATA basada en [5]
OPEX	%CAPEX/y	5%			[5]
Vida útil de la pila	horas	50000	60000	80000	[1], [5]
Tasa de degradación de la pila	kWh/kgH ₂ /1000h	0,200	0,167	0,125	Cálculo basado en la vida útil de la pila
Vida útil del electrolizador	años	25			Supuesto NTT DATA
Potencia mínima de operación	% de la capacidad nominal	10%			[6]
Cubrir potencia mínima con red	1=SÍ 2=NO	1			Propuesta de cálculo por NTT DATA
Potencia máxima de operación	% de la capacidad nominal	120%			[1]
Consumo de agua	l/kg H ₂	18	16	12	[1]
Costos de agua y energía					
LCOE	USD/MWh	Análisis por país			Cálculo de NTT DATA
Costo del agua	USD/m ³	3.5			Costo promedio del agua desalinizada en LATAM

Table 8. Supuestos para el cálculo del Costo Nivelado del Amoníaco

Parámetro	Unidades	Valor 2025	Valor 2030	Valor 2040	Fuentes y notas
Financiero					
Año inicial del proyecto	year	2025	2030	2040	Parámetro del proyecto
Tasa de descuento	%	10%			Supuesto NTT DATA
Capital propio % de CAPEX	%	100%			Supuesto NTT DATA
Costo de la deuda	%/year	NA			Supuesto NTT DATA
Plazo de la deuda	years	NA			Supuesto NTT DATA
Impuestos de aduana	%CAPEX	0			Supuesto NTT DATA
IVA para infraestructuras	%CAPEX	0			Supuesto NTT DATA
Otros impuestos	%CAPEX	0%			Supuesto NTT DATA
Pre Haber Bosch					
Almacenamiento de Hidrógeno					
Volumen de almacenamiento de Hidrógeno	días	0,5			Supuesto NTT DATA
CAPEX de almacenamiento de Hidrógeno	USD/ton H ₂	\$ 91.000	\$ 91.000	\$ 91.000	[1a]
OPEX de almacenamiento de Hidrógeno	%CAPEX/año	4%			[1h]
Almacenamiento de Nitrógeno					
Volumen de almacenamiento de N ₂	días	0,3			Supuesto NTT DATA
CAPEX de almacenamiento de N ₂	USD/ton N ₂	\$ 3.000	\$ 3.000	\$ 3.000	[2a]
OPEX de almacenamiento de N ₂	%CAPEX/año	3%			[2a]
Unidad de separación de aire (ASU)					
Capacidad de ASU	ton N ₂ /día	212,8			Cálculo por NTT DATA
Consumo de energía de ASU	kWh/kgN ₂	0,421			[4a]
ASU CAPEX	USD/ton N ₂ /día	\$ 42.000			[3a]
ASU OPEX	%CAPEX/año	5%			[3a]
Haber Bosch					
Parámetros técnicos					
Capacidad de planta	ton/día	250	250	250	Supuesto NTT DATA basado en [9]
Consumo de hidrógeno	kgH ₂ /ton NH ₃	182,5			[5a]
Consumo de N ₂	kg N ₂ /ton NH ₃	851,2			[5a]
Consumo de electricidad	kWh/kg NH ₃	0,778			[4a]
Precio de la electricidad	USD/MWh	Análisis por país			Cálculo por NTT DATA
Eficiencia de Haber Bosch	%	73%			[4a]
Vida útil	años	30			Supuesto NTT DATA
Factor de capacidad	%horas/año	95%			Supuesto NTT DATA

LHV del amoníaco	MJ/kg NH ₃	18,60	https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/ammonia		
Densidad del producto valioso	kg/m ³	0,77	https://en.wikipedia.org/wiki/Ammonia		
Parámetros económicos					
Costo del hidrógeno	USD/kg H ₂	Análisis por país		Cálculo por NTT DATA	
Haber Bosch CAPEX	USD/ton/día	240000	\$ 220.000	\$ 176.000	Propuesta por NTT DATA basada en [9] y [2]
Instalación de la planta Haber Bosch	CAPEX	30%		[6a]	
Haber Bosch OPEX	%CAPEX/año	5%		[4a]	
Costos operativos adicionales	%CAPEX/ año	5%		[6a]	

Fuentes utilizadas para la elaboración de los supuestos

A continuación, se muestran las referencias bibliográficas utilizadas para la construcción de los supuestos para el cálculo del Costo Nivelado de Producción de Electricidad, Hidrógeno y Amoníaco.

LCOE

[1e]_2022_IRENA_Power_Generation_Costs_2021

[2e]_2020_NREL_Renewable energy costs forecasts

LCOH

[1h]_2020_IRENA_Green_hydrogen_cost

[2h]_2019_IEA_The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex

[3h]_2023_NEL_Hydrogen_Technical Sheet M Series PEM Ez

[4h]_2022_KPMG_Cost of electrolysis

[5h]_2022_IEA_Electrolyzers

[6h]_2016_CSIRO_Assessment-of-the-cost-of-hydrogen-from-PV

LCOA

[1a]_2019_IEA_The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex

[2a]_2021_Luke Nayak_Techno-Economic Aspects of NH₃ value chain

[3a]_2018_COSIA_GHG_Emerging and Existing Oxygen Production Technology.

[4a]_2022_Milind Jain_Electrified ammonia production as a commodity

[5a]_2019_Rivarolo Massimo_Clean Hydrogen and Ammonia Synthesis

[6a]_2022_NE_Fuel ammonia supply cost analysis

8.2 Anexo 2: Listado de actores entrevistados

A continuación, se enlistan los actores y se agradece la participación de los actores entrevistados. La lista se expone a lo largo de la producción de este estudio en orden alfabético.

- API Campeche
- Celsia
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ)
- FNC (Federación Nacional de Cafeteros)
- Grupo Bal - Peñoles
- Hy2gen
- ICIS
- MEXION
- Puerto brisa
- SQ
- TGI
- Yara



Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede social
Bonn y Eschborn, Germany

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

E info@giz.de
I www.giz.de

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn, Deutschland
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5

El Programa Internacional de Aceleración del Hidrógeno (H2Uppp) del Ministerio Federal de Economía y Acción por el Clima de Alemania (BMWK) promueve proyectos y el desarrollo del mercado del hidrógeno verde en determinados países en desarrollo y emergentes como parte de la Estrategia Nacional del Hidrógeno.