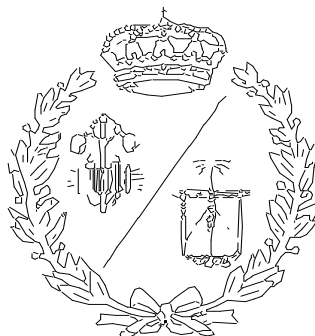


Andrés Coral

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**PRODUCCIÓN DE HIDROGENÓ VERDE A
PARTIR DE LA GENERACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO-ECUADOR.
PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN FROM
SOLID WASTE GENERATED BY THE
METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO,
ECUADOR**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Autor: Andrés Alfonso Coral Carrillo

Septiembre - 2025

Contenido

1	ABREVIATURAS	10
2	INTRODUCCIÓN	11
2.1.	Justificación	11
2.2.	Situación geográfica del Ecuador	11
2.3.	Situación energética del Ecuador	12
2.4.	Objetivos.....	13
	Objetivo General.....	13
	Objetivos Específicos	13
2.5.	Hipótesis	13
3.	QUÉ ES EL HIDRÓGENO VERDE	14
3.1.	El hidrógeno verde en el mundo.....	14
3.2.	Hidrógeno verde en Europa.....	17
3.3.	Hidrógeno verde en América	20
3.4.	Hidrógeno verde en Ecuador	22
	Oportunidades para Ecuador	22
	Costos de producción y competitividad.....	23
	Potencial del mercado interno y de exportación.....	23
	Metas y acciones priorizadas	23
	Riesgos del desarrollo del H ₂ verde en Ecuador.....	23
	Proyectos en Ecuador.	24
3.5.	Aplicaciones del H ₂ verde generado a partir de RSU.....	27
	Generación eléctrica	27
	Movilidad Sostenible.....	27
	Síntesis de amoníaco verde	28
	Portador de energía y almacenamiento	28
	Reducción de emisiones en procesos industriales.....	29
4.	METODOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS RSU.....	29
4.1.	Tipologías: metodologías de obtención y residuos utilizados	30
	Procesos termoquímicos	30
	Ventajas y limitaciones de procesos termoquímicos.....	31
	Procesos biológicos.....	31
	Ventajas y limitaciones de procesos biológicos	32

4.2.	Clasificación de las tecnologías para la producción de hidrógeno verde: directa, indirecta y combinada.....	32
4.3.	Procesos de pretratamiento y valorización de residuos para la producción de hidrógeno.....	33
	Clasificación y separación	33
	Trituración y molienda	33
	Secado y deshidratación.....	33
	Digestión anaerobia previa.....	33
	Valorización energética y materiales derivados.....	33
4.4.	Nivel de madurez tecnológica	33
	Los TRLs o niveles de madurez de la tecnología	34
4.5.	Evaluación comparativa de metodologías para la producción de hidrógeno a partir de RSU.....	34
5.	RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ECUADOR.....	37
5.1.	Producción de residuos sólidos en el Ecuador.....	37
5.2.	Gestión de residuos sólidos en el Ecuador	39
5.3.	Aprovechamiento energético de los Residuos Sólidos Urbanos en el Ecuador. 40	
5.4.	Residuos sólidos urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).....	41
6.	ANÁLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN EL DMQ..	44
6.1.	Cálculos de producción de hidrógeno verde en el DMQ.....	44
	Ejemplo de cálculo de teórico de producción de hidrógeno verde en el DMQ	44
6.2.	Selección del método más adecuado utilizando la metodología de juicio de expertos.....	49
	Percepción de expertos sobre tecnologías para la producción de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ.....	49
	Matriz de evaluación multicriterio	68
	Matriz de Evaluación de Tecnologías para Hidrógeno Verde	68
	Valoración de alternativas.....	71
	Cálculo del índice de desempeño global	72
	5.1.1.1. Aplicación de la Matriz.....	72
7.	Resultados	75
7.1.	Consulta a expertos.....	75
	Discusión	76
7.2.	Matriz de evaluación multicriterio	77
	Discusión.....	78
7.3.	Discusión Integrada de los resultados.	80
8.	Conclusiones y Recomendaciones	83

Andrés Coral

8.1. Conclusiones.....	83
8.2. Recomendaciones	83
9. Bibliografía.....	87

Figura 1. Residuos en el Ecuador (INEC, 2023b)	37
Figura 2. La situación de los residuos sólidos urbanos en el Ecuador (INEC, 2023a)... 38	
Figura 3. Producción teórica de Hidrógeno para el DMQ.....	48
Figura 4. Tecnología preferida por expertos.....	75
Figura 5. Barreras identificadas por los expertos	76
Figura 6. Potencial de aprovechamiento de RSU del DMQ identificado por los expertos en encuesta.....	76

Índice de tablas.

Tabla 1 Principales proyectos de producción de hidrógeno verde en el mundo.....	15
Tabla 2 Principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en Europa. (Andrés Coral 2025)	18
Tabla 3 Principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en América. (Andrés Coral 2025)	21
Tabla 4 Principales proyectos con energías renovables en el Ecuador (MEM Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, 2023; Ministerio de Energía y Minas, 2023).....	24
Tabla 5 Principales proyectos para la producción de Hidrógeno Verde en Ecuador. (Ministerio de Energía y Minas, 2023).....	25
Tabla 6 Comparativa de las diferentes metodologías para producir HV a partir de RSU con sus niveles de madurez	35
Tabla 7. Residuos en el DMQ.....	42
Tabla 8. Datos para Gasificación de RSU	44
Tabla 9. Rangos de producción de H ₂ estimados.....	45
Tabla 10. Criterios y preguntas de la encuesta realizada.	49
Tabla 11. Resultados de la encuesta a expertos	52
Tabla 12. Criterio de selección de las variables utilizadas	68
Tabla 13. Matriz de evaluación multicriterio.....	73
Tabla 14. IDG de las tecnologías de mayor a menor.....	78
Tabla 15. Resultados comparativos por los dos métodos de análisis	81

Resumen.

El presente trabajo fin de máster evalúa la viabilidad técnica, económica y ambiental de la producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), como estrategia de transición energética y economía circular en Ecuador.

A través de una revisión bibliográfica exhaustiva, se identificaron quince tecnologías relevantes para la conversión de residuos en hidrógeno, clasificadas en procesos directos, indirectos y combinados en función de la forma en que se utiliza la energía renovable. Estas fueron analizadas mediante una matriz multicriterio considerando factores técnicos (eficiencia, madurez tecnológica), económicos (costes de capital y de operación), ambientales (emisiones y residuos secundarios) y sociales (aceptación y escalabilidad) agrupados en 7 variables que proporcionan un valor máximo de 28.

La tecnología con mejor desempeño fue el reformado de biometano de rellenos sanitarios con un Índice de Desempeño Global (IDG) de 19, seguido tanto de la gasificación de RSU, como de la fermentación oscura con reciclaje de efluente, ambas con un IDG de 17. La estimación teórica indica que Quito podría producir hasta 3.360 toneladas anuales de hidrógeno verde, equivalente a más de 113.000 GJ de energía.

Los resultados revelan que, si se optimizan las etapas de pretratamiento, valorización energética y purificación de gases, y se implementan incentivos adecuados, la producción de hidrógeno verde mediante gasificación sería técnica y económicamente viable.

La investigación también evidenció, a través de una encuesta específica a expertos, una limitada familiaridad sobre el tema a nivel nacional, lo que resalta la necesidad de fortalecer capacidades técnicas y desarrollar marcos normativos estables.

En conclusión, el hidrógeno verde representa una alternativa estratégica para diversificar la matriz energética, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y consolidar un modelo de desarrollo bajo en carbono y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de gases de efecto invernadero y la transición hacia una economía circular en el Ecuador.

Palabras clave: Hidrógeno verde, residuos sólidos urbanos, gasificación, análisis multicriterio, Quito, economía circular.

Abstract

This master's thesis assesses the technical, economic, and environmental feasibility of producing green hydrogen from municipal solid waste (MSW) generated in the Metropolitan District of Quito (MDQ), as part of Ecuador's strategy for energy transition and the advancement of a circular economy.

An extensive literature review identified fifteen relevant technologies for converting waste into hydrogen, classified into direct, indirect, and hybrid processes according to the way renewable energy is integrated. These technologies were evaluated using a multi-criteria analysis matrix encompassing technical (efficiency, technological maturity), economic (capital and operating costs), environmental (emissions and secondary waste), and social (public acceptance, scalability) dimensions. The variables were grouped into seven categories, with a maximum achievable score of 28.

The highest performance was achieved by biomethane reforming from sanitary landfills, with a Global Performance Index (GPI) of 19, followed by MSW gasification and dark fermentation with effluent recycling, each scoring a GPI of 17. Theoretical estimates suggest that Quito has the potential to produce up to 3,360 tons of green hydrogen annually, equivalent to more than 113,000 GJ of energy.

The findings indicate that, provided pretreatment, energy recovery, and gas purification stages are optimized and appropriate policy incentives are implemented, green hydrogen production via gasification could be both technically and economically viable.

Furthermore, a targeted expert survey revealed limited awareness and technical expertise on the subject at the national level, emphasizing the need to strengthen human capacities and establish stable regulatory frameworks.

In conclusion, green hydrogen emerges as a strategic alternative to diversify Ecuador's energy mix, reduce greenhouse gas emissions, and foster a low-carbon development model aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Green hydrogen, municipal solid waste, gasification, multi-criteria analysis, Quito, circular economy.

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a mi Director Dr. Javier Viguri, por su ayuda a lo largo de la realización del Master y de este TFM, muchas gracias por su amistad.

Un agradecimiento especial a la Dra. Ana Andrés, gracias por su acompañamiento a lo largo del Master, por su acogida y su amistad.

Andrés Coral

1 ABREVIATURAS

BID = Banco Interamericano de Desarrollo

CCS = Captura y almacenamiento de carbono

COA = Código Orgánico del Ambiente

DMQ = Distrito Metropolitano de Quito.

EMGIRS = Empresa Municipal de Gestión de Residuos Sólidos del Distrito Metropolitano de Quito.

FO = Fracción orgánica

GADM = Gobiernos autónomos descentralizados municipales del Ecuador

GEI = Gases de Efecto Invernadero

GIZ = Cooperación Alemana en Ecuador

GRECI = Proyecto Gestión de Residuos y Economía Circular Inclusiva

HV = Hidrógeno verde

I+d+i = investigación, desarrollo e innovación

IRENA = Agencia Internacional de Energía Renovable

LCOH = Costo Nivelado de Hidrógeno (Levelized Cost of Hydrogen) en inglés

MAATE = Ministerio Ambiente, Agua y Transición Ecológica

MEC = Celdas de electrólisis microbianas

NDC = Contribución Determinada a nivel Nacional

ODS = Objetivos de Desarrollo sostenible

PEM = Electrólisis de membrana con intercambio de protones

PLANEE = Plan Nacional de Eficiencia Energética

PNGIRS = Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos No Peligrosos

PVE = Pacto Verde Europeo

RAEE = Residuos eléctricos y electrónicos

RCOA = Reglamento al Código orgánico del ambiente

RDF = Combustible derivado de residuos

RSU = residuos sólidos urbanos

SEMPADES = Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo

SOEC = Electrólisis con integración térmica usando óxidos sólidos

TMB = Tratamiento Mecánico Biológico

TRLs = Niveles de madurez de la tecnología (Technology Readiness Levels) en inglés

UE = Unión Europea

USD = Dólar estadounidense, actualmente la moneda oficial ecuatoriana

2 INTRODUCCIÓN

2.1. Justificación

La elección del presente tema para trabajo de fin de máster, responde a las necesidades ecuatorianas, su relevancia en el contexto de la transición hacia una economía sostenible, su potencial innovador en el ámbito tecnológico y su impacto positivo en la mitigación del cambio climático. La temática a abordar no solo puede suponer un aporte tecnológico, sino que además trata de responder a la nueva legislación ambiental ecuatoriana en materia de Economía Circular y Cambio Climático. La producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) es plausible como una alternativa estratégica para diversificar la matriz energética del Ecuador, constituida fundamentalmente por generación hidroeléctrica, al tiempo que se aprovechan recursos renovables y se valoriza una fracción significativa de los residuos generados por la población quiteña y que al momento no es aprovechada.

Esta propuesta no solo contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino que también promueve el desarrollo científico y tecnológico nacional, impulsa la economía circular mediante el cierre de ciclos de materiales y energía, y fomenta la innovación en soluciones energéticas limpias. Además, se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular aquellos relacionados con la energía asequible y no contaminante (ODS 7), la producción y el consumo responsables (ODS 12), la acción por el clima (ODS 13) y las ciudades sostenibles (ODS 11).

El estudio de esta alternativa energética es particularmente importante en una ciudad como Quito, donde la creciente generación de residuos sólidos representa un desafío ambiental crítico, pero también una oportunidad para la implementación de tecnologías limpias y sostenibles. En este sentido, la producción de hidrógeno verde no solo plantea una solución innovadora al problema de los residuos, sino que también constituye una herramienta clave para avanzar hacia la soberanía energética, la resiliencia climática y el cumplimiento de los compromisos ambientales del país.

2.2. Situación geográfica del Ecuador

El Ecuador dispone una ubicación privilegiada la cual se encuentra en la línea ecuatorial en América del Sur, se encuentra en ambos hemisferios, sus límites son al norte Colombia, al oeste con el océano Pacífico, al sur y al este con Perú, cabe recordar que el país posee de una de las islas más reconocidas a nivel mundial que son las Islas Galápagos. (Ramos Hernández, 2022) Ecuador ocupa un área de 256 370 km² terrestre, la parte marítima es de 700.000 km², posee 200 millas náuticas de mar territorial. (Ramos Hernández, 2022)

El país está dividido en cuatro regiones geográficas principales: la Costa, la Sierra, la Amazonía y la región Insular (Galápagos). Estas regiones presentan características distintas en cuanto a clima, altitud y recursos naturales. La Costa es una zona baja y húmeda con alta densidad poblacional y actividad económica basada en la agricultura y la industria. La Sierra, conformada por la cordillera de los Andes, es la región montañosa donde se concentra la mayor parte de las ciudades principales, como Quito y Cuenca. La Amazonía, rica en biodiversidad, representa un pulmón ecológico y un reservorio de recursos hídricos. Finalmente, la región Insular (Galápagos) es conocida por su importancia ecológica y turística (SENPLADES, 2017).

La diversidad geográfica de Ecuador plantea tanto oportunidades como desafíos para el manejo de residuos sólidos urbanos (RSU) y la generación de energías renovables. Por

Andrés Coral

ejemplo, las ciudades de la Costa generan grandes cantidades de RSU debido a su alta densidad poblacional, lo que podría ser aprovechado en proyectos de economía circular, como la producción de hidrógeno verde a partir de biogás obtenido de desechos orgánicos (Coello-Pisco et al., 2024).

2.3. Situación energética del Ecuador

El Ecuador tiene un firme compromiso con la reducción de GEI como parte de la lucha contra el cambio climático, mediante desafíos ambientales y sociales asociados a las emisiones, existen algunas medidas para abordar este problema. El país se está enfocando hacia una matriz energética limpia y sostenible, buscando la eficiencia energética y la conservación de sus ecosistemas. (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

Ecuador ha incentivado el uso de energías renovables, en la actualidad el 92% de la generación de energía en el país proviene de centrales hidráulicas, el 7% de térmicas y el 1% de fuentes no convencionales (fotovoltaica, eólica, biomasa, biogás, geotermia, entre otras). Esta producción, satisface parcialmente la demanda nacional de electricidad, sobre todo en épocas de estiaje. (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

La mayoría de esta generación eléctrica proviene de las hidroeléctricas; sin embargo, existe un limitante para el uso de estas estructuras. Este limitante es el clima, por el hecho que mientras más precipitaciones exista mejor para la planta hidroeléctrica, sin embargo, en la actualidad se tiene inconvenientes con la generación eléctrica debido a periodos prolongados de estiaje en la Sierra y Amazonía Ecuatorianas. (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

El país cuenta con el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 (PLANEE), con el que busca disminuir el uso de combustibles fósiles en el sector de transporte y movilidad. Además, el Ecuador se encuentra desarrollando políticas, las cuales aseguren la relación de la producción de hidrógeno verde con el incremento de la capacidad de energías renovables instaladas en el país. Con estas leyes persiguen la descarbonización de la matriz energética ecuatoriana. (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

Es necesario indicar que el Ecuador cuenta con un buen sistema de distribución de productos y herramientas para los centros de distribución de energía, así como también con el sistema de interconectado eléctrico. (Ministerio de Energía y Minas, 2023). A pesar de ello, en la actualidad el país afronta una crisis energética, debido a que la mayor parte de generación eléctrica se efectúa a través de plantas hidroeléctricas, las cuales dependen netamente de las condiciones climáticas que afronte el país o la región en donde se encuentren. Por esta razón es necesario tener en cuenta otras formas de energías renovables como la energía solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y biomasa.

2.4. Objetivos

Objetivo General

Impulsar nuevas alternativas tecnológicas para la generación energética, aprovechando los residuos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito con fines de diversificación de la matriz energética ecuatoriana

Objetivos Específicos

Buscar la alternativa óptima para la producción de hidrógeno verde, con biomasa de los residuos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito a través del estudio de las diversas tecnologías aplicadas a nivel mundial.

Promover a la conservación de los recursos no renovables, mediante las nuevas energías renovables para la producción de energía a partir de residuos sólidos urbanos.

2.5. Hipótesis

- Hipótesis técnica: La gasificación de residuos urbanos en Quito permitirá la producción eficiente de hidrógeno verde, siempre que se optimicen las tecnologías de conversión y purificación del gas resultante.
- Hipótesis económica: La producción de hidrógeno verde a partir de residuos urbanos puede ser económicamente viable si se implementan incentivos gubernamentales y modelos de economía circular que reduzcan los costos operativos.
- Hipótesis ambiental: La valorización energética de los residuos urbanos mediante la producción de hidrógeno verde contribuirá a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la disminución de la contaminación en Quito.
- Hipótesis social: La implementación de un proyecto de hidrógeno verde a partir de residuos urbanos fomentará la participación ciudadana y la conciencia ambiental, promoviendo prácticas de separación y reciclaje de desechos en la población quiteña.

3. QUÉ ES EL HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno es una de las moléculas más comunes en el universo, se ha venido utilizando en diferentes sectores industriales como la refinería, la química, y en la petroquímica, mostrando además un gran potencial como vector energético.(Yolanda & Soria, n.d.)

Debido al potencial energético que representa el hidrógeno, se han impulsado investigaciones en cuanto a la forma de producción de este elemento. El hidrógeno permite realizar una descarbonización en algunos sectores industriales y de movilidad. El hidrógeno se clasifica en distintos “colores” según la fuente de energía y el proceso utilizado para su producción, lo que permite identificar su impacto ambiental. El hidrógeno gris se obtiene a partir de combustibles fósiles, como el gas natural, mediante reformado con vapor, y es el más utilizado actualmente, aunque su generación emite grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂). El hidrógeno azul también proviene de fuentes fósiles, pero incorpora tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS), reduciendo parcialmente sus emisiones. Por su parte, el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua usando electricidad proveniente de fuentes renovables, como la solar o eólica, lo que lo convierte en una alternativa limpia y sostenible. Además, existen otras categorías emergentes como el hidrógeno turquesa, obtenido mediante pirólisis del metano, que genera carbono sólido en lugar de CO₂, y el hidrógeno rosa o púrpura, producido con energía nuclear. Esta clasificación por colores resulta fundamental para comprender el verdadero potencial del hidrógeno en la transición energética y su papel en la descarbonización de la economía. En la actualidad la mayoría de hidrógeno requerido se produce mediante combustibles fósiles, es decir que predomina en el mundo el hidrogeno gris.(Merino Alvaro, 2022; Ministerio de Energía y Minas, 2023)

En el Ecuador, las diversas fuentes de energías renovables (solar, hidráulica, geotérmica, eólica, biomasa), la disponibilidad de recursos hídricos, espaciales y fuentes de CO₂ sostenible a partir de residuos de biomasa, cuentan con los requerimientos necesarios para desplegar una economía de hidrógeno verde y sus derivados, que permita descarbonizar su economía, a la vez que abre nuevas oportunidades de comercio exterior, con todos los beneficios sociales, ambientales y económicos que esto conlleva.(Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, 2023)

3.1. El hidrógeno verde en el mundo

A nivel mundial, el hidrógeno verde ha sido reconocido como una solución fundamental para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Más de 30 países han desarrollado hojas de ruta nacionales que incluyen planes para producir, distribuir y utilizar hidrógeno verde en sus matrices energéticas(Moreira & Laing, 2022)

La Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) estima que el hidrógeno podría cubrir hasta el 12% del consumo energético global para el año 2050. El despliegue actual se concentra principalmente en Asia, Europa y América, con una creciente inversión en infraestructura, investigación y desarrollo (IRENA, 2022).

China, Japón y Corea del Sur han adoptado políticas firmes para fomentar la producción nacional de hidrógeno. Mientras tanto, la Unión Europea lidera la integración del hidrógeno en su estrategia de neutralidad climática (European Commission, 2020). En la Tabla 1 se muestran los principales proyectos de producción de hidrógeno verde en el mundo.

Tabla 1 Principales proyectos de producción de hidrógeno verde en el mundo.

Proyecto	Ubicación	Bibliografía	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo de Energía Renovable	Potencia Energía Renovable (MW)	Eficiencia Energía Renovable (%)	Costo de Mantenimiento (USD/año)	Costo de Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)
NorthH2	Países Bajos	(RWE, 2025b)	Sí	3	70	Eólica offshore	10	45	15,000,000	9,000,000,000	800,000,000	6 a 7
HyDeal España	España	(Green Hydrogen Organisation, 2025)	Sí	67	70	Solar PV	300	22	12,000,000	350,000,000	12,000,000	5 a 6
H2RES	Australia	(Boretti, 2023)	Sí	10	68	Solar + Eólica	50	35	8,000,000	500,000,000	25,000,000	6
REFHYNE	Alemania	(Refhyne, 2025)	Sí	10	72	Solar PV	13	20	5,000,000	200,000,000	10,000,000	7
Gigastack	Reino Unido	(GH2, 2025)	Sí	100	70	Eólica offshore	1	45	7,000,000	1,000,000,000	75,000,000	6 a 7

Proyecto	Ubicación	Bibliografía	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo de Energía Renovable	Potencia Energía Renovable (MW)	Eficiencia Energía Renovable (%)	Costo de Mantenimiento (USD/año)	Costo de Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)
H2 Future	Austria	(H2 Future Green Hydrogen, 2025)	Sí	6	68	Hidroeléctrica	50	40	3,000,000	120,000,000	3,000,000	7
Fukushima Hydrogen Energy	Japón	(NEDO, 2025)	Sí	10	70	Solar PV	20	20	4,000,000	250,000,000	9,000,000	6
NEOM Green Hydrogen	Arabia Saudita	(NEOM Green Hydrogen Company: NGHC, 2025)	Sí	4	70	Solar + Eólica	16	35	20,000,000	5,000,000,000	650,000,000	5 a 6
HyBalance	Dinamarca	(Fuel Cells, 2016)	Sí	2	65	Eólica onshore	40	40	2,000,000	80,000,000	1,200,000	8
Gigastack Phase 2	Reino Unido	(Element Energy Limited, 2023)	Sí	200	72	Eólica offshore	2.5	45	10,000,000	2,500,000,000	150,000,000	5 a 6

A nivel internacional, países como Japón, Alemania, Chile, y Colombia han desarrollado hojas de ruta específicas para el hidrógeno, en algunos casos diferenciándose por su rol como consumidores o productores. Se proyecta que la demanda mundial de hidrógeno aumentará siete veces hacia 2050, impulsada por sectores difíciles de electrificar como el transporte marítimo, aéreo y ciertas industrias (Ministerio de Energía, 2021).

3.2. Hidrógeno verde en Europa

Europa ha sido pionera en el impulso del hidrógeno verde como vector energético clave. En 2020, la Comisión Europea presentó su estrategia para integrar el hidrógeno en el sistema energético comunitario. Esta estrategia prevé la instalación de al menos 40 GW de electrolizadores en Europa para 2030 (European Commission, 2020).

Alemania ha destinado más de 9.000 millones de euros a su estrategia nacional de hidrógeno, que incluye inversiones en infraestructura, investigación y cooperación internacional (BMWK, 2021). España, por su parte, contempla la instalación de 4 GW de capacidad de electrólisis hacia 2030, priorizando el uso en transporte pesado e industria (MITECO, 2021).

Otros países como Países Bajos, Francia y Portugal también han desarrollado planes ambiciosos, creando una red de proyectos piloto y corredores de hidrógeno. La iniciativa European Hydrogen Backbone busca crear una red de transporte de hidrógeno que conecte los países europeos (MITECO, 2021).

El Pacto Verde Europeo (PVE) o European Green Deal, anunciado por la Comisión de la Unión Europea UE en diciembre de 2020, busca transformar a Europa en una sociedad libre de emisiones para 2050. Este pacto define un conjunto de objetivos y herramientas cuyo alcance y utilización sitúan a la UE ante el mayor reto asumido desde su fundación. El PVE incluye el apoyo a inversiones en nuevas tecnologías como el hidrógeno, junto con otras fuentes de energía renovables y redes inteligentes (Lasheras Merino, 2021).

La transición ecológica, impulsada por el PVE, busca un desarrollo sostenible y limpio, abordando el cambio climático y la degradación ambiental. Este proceso requiere una cooperación internacional y un fuerte apoyo individual para cambiar los hábitos de consumo y producción (Lasheras Merino, 2021).

La producción de hidrógeno a partir de residuos y biomasa mediante fermentación oscura, y la posibilidad de producción directa de mezclas de metano/hidrógeno, podría favorecer el desarrollo de motores de gas con mayor eficiencia y menores emisiones (De Simio et al., 2008).

A continuación, en la Tabla 2, se enumeran los principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en Europa:

Tabla 2 Principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en Europa. (Andrés Coral 2025)

Proyecto	Bibliografía	Ubicación	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo Energía Renovable	Potencia Renovable (MW)	Eficiencia Renovable (%)	Costo Mantenimiento (USD/año)	Costo Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel TRL
NorthH2	(RWE, 2025b)	Países Bajos	Sí	3000	70	Eólica offshore	10000	45	15,000,000.00	9,000,000,000.0	800000000	5 a 6
REFHYNE	(Refhyne, 2025)	Alemania	Sí	10	72	Solar PV	13	20	5,000,000.00	200,000,000.0	10000000	7
HyBalance	(Fuell Cells, 2016)	Dinamarca	Sí	2	65	Eólica onshore	40	40	2,000,000.00	80,000,000.0	1200000	8
Gigastack	(GH2, 2025)	Reino Unido	Sí	100	70	Eólica offshore	1000	45	7,000,000.00	1,000,000,000.0	75000000	6 a 7
H2Giga	(La french Fab, 2022)	Francia	Sí	50	69	Solar PV	400	22	4,000,000.00	600,000,000.0	20000000	6
AquaVentus	(RWE, 2025a)	Alemania	Sí	50	68	Eólica offshore	200	45	6,000,000.00	700,000,000.0	25000000	6
WindH2	(Artal Sevil et al., 2023)	España	Sí	20	70	Solar PV	100	22	2,500,000.00	300,000,000.0	10000000	5 a 6

Proyecto	Bibliografía	Ubicación	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo Energía Renovable	Potencia Renovable (MW)	Eficiencia Renovable (%)	Costo Mantenimiento (USD/año)	Costo Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel TRL
H2Mare	(Federal Ministry of Research, 2023)	Alemania	Sí	25	70	Eólica offshore	150	45	3,000,000.00	400,000,000.0	15000000	5 a 6
Westküste100	(HY-5. The new initiative aims to make Northern Germany, 2022)	Alemania	Sí	15	67	Eólica offshore	60	45	1,500,000.00	150,000,000.0	8000000	5 a 6
H2-PORT	(Port of Asterdam, 2023)	Países Bajos	Sí	30	70	Eólica offshore	120	45	3,500,000.00	350,000,000.0	18000000	6

3.3. Hidrógeno verde en América

América se encuentra en una fase de transición energética que impulsa cada vez más el desarrollo de tecnologías limpias. El hidrógeno verde ha emergido como una de las alternativas clave para lograr la descarbonización de sectores como el transporte, la industria y la generación de electricidad. Países como Chile, Estados Unidos, Brasil y Canadá han iniciado estrategias nacionales para fomentar la producción y uso de hidrógeno verde (IRENA, 2021).

Chile se ha posicionado como líder regional, gracias a su potencial en energías renovables, principalmente solar y eólica. Su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, lanzada en 2020, establece metas ambiciosas de producción y exportación, con una visión de convertirse en uno de los principales productores a nivel mundial (Ministerio de Energía de Chile, 2020).

Estados Unidos, por su parte, ha destinado miles de millones de dólares a la investigación, desarrollo y despliegue de tecnologías relacionadas con el hidrógeno limpio, como parte del programa Hydrogen Shot del Departamento de Energía. Además, se promueven zonas de hidrógeno limpio (Hydrogen Hubs) que integran producción, almacenamiento y distribución (DOE, 2021).

Brasil y Canadá también avanzan en proyectos piloto para la producción de hidrógeno verde, aprovechando sus recursos hídricos y renovables. Ambos países ven el hidrógeno como una vía para fortalecer su matriz energética y cumplir sus compromisos climáticos (IEA, 2022).

América Latina en general enfrenta retos asociados a la infraestructura, regulación y financiación de estos proyectos. Sin embargo, la abundancia de recursos renovables y el interés creciente por parte de inversionistas extranjeros son factores que favorecen su desarrollo en la región (CEPAL, 2022).

En la Tabla 3 se ha resumido los principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en América:

Tabla 3 Principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en América. (Andrés Coral 2025)

Proyecto	Bibliografía	Ubicación	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo Energía Renovable	Potencia Renovable (MW)	Eficiencia Renovable (%)	Costo Mantenimiento (USD/año)	Costo Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel TRL
HyDeal América	(HYdeal, 2025)	USA/Canadá	Sí	50	70	Solar PV	200	22	10,000,000.00	700,000,000.0	30000000	5 a 6
Hydrogen Energy California	(MIT, 2023)	USA	Sí	30	68	Solar + Biomasa	100	40	9,000,000.00	450,000,000.0	18000000	6
H2 Chile	(H2 Chile, 2024)	Chile	Sí	20	70	Hidroeléctrica	80	40	5,000,000.00	250,000,000.0	9000000	7
Quito Verde	(Ministerio de Energía y Minas, 2023)	Ecuador	Sí	5	65	Hidroeléctrica	20	40	1,000,000.00	120,000,000.0	3000000	4 a 5
Tolima Verde	(Ministerio de Energía de Colombia & BID, 2021)	Colombia	Sí	3	60	Biomasa	10	40	1,100,000	70,000,000	2000000	3

3.4. Hidrógeno verde en Ecuador

Ecuador ha dado pasos iniciales para incorporar el hidrógeno verde en su transición energética. En 2021, el Ministerio de Energía firmó un memorando de entendimiento con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la cooperación alemana (GIZ) para el desarrollo de una hoja de ruta nacional de hidrógeno (Ministerio de Energía, 2021).

El potencial del país radica en el uso de su matriz eléctrica renovable, dominada por la hidroelectricidad, lo cual permite una producción de hidrógeno con bajo costo marginal de electricidad (BID, 2022). Las oportunidades identificadas incluyen aplicaciones en transporte público (autobuses eléctricos a hidrógeno), producción de fertilizantes y exportación hacia países con alta demanda (Ministerio de Energía, 2021).

Ecuador, al igual que muchos países firmantes del Acuerdo de París, reconoce la necesidad de descarbonizar su economía. Con una matriz energética compuesta en su mayoría por energías renovables, en especial hidroeléctrica (78% en 2021), el país se encuentra en una posición favorable para desarrollar una economía del hidrógeno verde (Ministerio de Energía, 2021).

Oportunidades para Ecuador

Ecuador identifica múltiples oportunidades al implementar una economía del hidrógeno verde, acorde con la “Hoja de ruta del Hidrógeno verde en Ecuador, estas son: (Ministerio de Energía y Minas, 2023):

- Cumplimiento de compromisos climáticos internacionales, como la NDC (Contribución Determinada a nivel Nacional) en el Acuerdo de París.
- Despliegue de energías renovables mediante uso eficiente de recursos como la hidráulica, eólica y solar.
- Industrialización del país con un cambio de paradigma hacia productos de alto valor agregado como combustibles sintéticos.
- Desarrollo de capacidades técnicas, tecnológicas y de investigación.
- Beneficios sociales como creación de empleos y mejoras en calidad de vida.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- Oportunidades en el mercado regional y global mediante alianzas estratégicas.

Adicionalmente, Ecuador dispone de condiciones geográficas, energéticas e infraestructurales favorables para el desarrollo del hidrógeno verde, tal es el caso de: (ARC, 2023)

- Amplia disponibilidad de fuentes renovables tales como: solar, eólica, geotérmica, biomasa e hidráulica
- Acceso a biomasa residual agrícola como fuente de carbono biogénico.
- Infraestructura existente: red eléctrica nacional, transporte terrestre y puertos.
- Potencial para almacenamiento geológico de H₂ en yacimientos petroleros agotados.
- Cercanía con mercados de exportación a través del Océano Pacífico y Canal de Panamá.

Costos de producción y competitividad

Los costos de producción de hidrógeno verde (LCOH- *Levelised Cost of Hydrogen*) varían según la fuente energética utilizada. En 2023, los costos más bajos provienen de generación hidroeléctrica (hasta 3,1 USD/kg), seguidos por eólica en Loja (3,2 USD/kg). Los más altos provienen de energía solar en Guayas y Galápagos (6,2 a 6,3 USD/kg) (Ministerio de Energía, 2021).

Se proyecta una reducción significativa en estos costos hacia 2050:

- Solar: hasta 0,89 USD/kg
- Eólica: hasta 1,27 USD/kg

Asimismo, se calculan costos de producción de derivados como amoníaco, metanol, diésel y gasolina sintética, los cuales disminuyen progresivamente hacia 2050 (Ministerio de Energía, 2021).

Potencial del mercado interno y de exportación

Ecuador prevé un uso creciente del hidrógeno verde en sectores como transporte pesado, marítimo y procesos industriales. El país también contempla la exportación de hidrógeno y sus derivados hacia mercados como Europa, Japón y Corea del Sur, donde la demanda superará la capacidad interna de producción (Ministerio de Energía, 2021).

Los potenciales centros de producción se ubicarían cerca de fuentes energéticas renovables y de infraestructura logística, permitiendo un uso eficiente del recurso (Ministerio de Energía, 2021).

Metas y acciones priorizadas

Las metas principales de la hoja de ruta son la capacidad de electrólisis instalada de 1 GW para 2030, 3 GW en 2040 y 6 GW en 2050. Desde el estado ecuatoriano, se han priorizado acciones como las que se enumeran a continuación: (Ministerio de Energía, 2021).

- Desarrollo normativo y regulatorio.
- Capacitación técnica y profesional.
- Expansión de infraestructura eléctrica y portuaria.
- Establecimiento de alianzas internacionales.

Riesgos del desarrollo del H₂ verde en Ecuador

La hoja de ruta para el hidrógeno verde en Ecuador identifica riesgos determinantes para el desarrollo del Hidrógeno verde en el país, estos riesgos son: (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

- Tecnológicos, reflejados en la inmadurez de algunas tecnologías.
- Sociales y ambientales, fundamentados en la limitada aceptación comunitaria a tecnologías nuevas y al intensivo uso de agua.
- Infraestructura: si bien el país cuenta con infraestructura en la actualidad, a futuro se prevé la necesidad de expansión eléctrica y portuaria.
- Políticos: inestabilidad normativa ante la inexistencia de una política energética transversal y definitiva.
- Económicos: competitividad frente a otros países con menores costos, debido principalmente por la dolarización del Ecuador.

3.4.1. Cierre de brechas y políticas públicas

Para consolidar una economía del hidrógeno verde, se requiere cerrar brechas tales como las económicas, a través de incentivos fiscales, mecanismos de financiamiento verde, acuerdos de cooperación internacional y modelos de asociación público-privada que mejoren la competitividad frente a países con menores costos de producción; las brechas técnicas deberán paliarse a través de fomentar programas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), en colaboración con universidades, centros de investigación y actores internacionales. En cuanto a las brechas Infraestructurales, se requiere una planificación a largo plazo para la expansión de redes eléctricas, sistemas de almacenamiento, transporte y logística portuaria, priorizando la integración de energías renovables en la red nacional. Sin embargo, las brechas sociales son de especial interés en el Ecuador, requiriéndose políticas de inclusión, beneficios comunitarios y economía circular entre otros. Precisamente por lo anterior, las brechas Políticas son fundamentales para el impulso del hidrógeno verde en el Ecuador, requiriéndose un marco legal claro, estable y a largo plazo, que integre el hidrógeno verde en las políticas energéticas, industriales y ambientales del país, garantizando su transversalidad y continuidad en el tiempo. (Argelia et al., 2006; Ministerio de Energía y Minas, 2023; Yolanda & Soria, n.d.)

Proyectos en Ecuador.

En el Ecuador existen ocho (7) proyectos con energías renovables (Tabla 4) (Ministerio de Energía y Minas, 2023). La Tabla 5 registra los principales proyectos para la producción de hidrógeno verde en Ecuador a detalle, evidenciándose que, aunque inicial, El Ecuador piensa ya en este nuevo vector energético.

Tabla 4 Principales proyectos con energías renovables en el Ecuador (MEM Ministerio de Energía y Minas del Ecuador; 2024; Ministerio de Energía y Minas, 2023)

PROYECTO	TIPO DE APLICACIÓN	POTENCIA ESTIMADA
Clúster H2. Galápagos	Movilidad y Energía	10-20 MW
Refinería. Esmeraldas	H ₂ para Refinería Esmeraldas	50 kW
Refinería. Shushufindi	Electrólisis con energía solar	50 MW
Chimborazo	Amoniac Verde	200 MW
Movilidad sostenible. Pichincha (Quito)	Transporte público H ₂	5 MW
Centro de amoniac verde. Guayas	Fertilizantes/Combustibles verdes	200 MW
Manabí	Metanol Verde	No determinado

Tabla 5 Principales proyectos para la producción de Hidrógeno Verde en Ecuador. (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

Proyecto	Ubicación	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo Energía Renovable	Potencia Renovable (MW)	Eficiencia Renovable (%)	Costo Mantenimiento (USD/año)	Costo Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel TRL
Proyecto Quito Verde	Quito	Sí	5	65	Hidroeléctrica	20	40	1,000,000.00	120,000,000.0	3000000	4 a 5
Hidrógeno Verde Guayaquil	Guayaquil	Sí	4	66	Solar PV	15	22	900,000.00	90,000,000.00	2500000	4 a 5
Proyecto Cuenca Sustentable	Cuenca	Sí	3	64	Biomasa	10	40	700,000.00	80,000,000.00	1800000	3 a 4
Hidrógeno Verde Manabí	Manabí	Sí	4	65	Solar PV	12	22	850,000.00	85,000,000.00	2200000	4
Proyecto Loja Limpia	Loja	Sí	2	63	Eólica onshore	8	40	600,000.00	60,000,000.00	1000000	3
Proyecto Ambato	Ambato	Sí	3	64	Hidroeléctrica	10	40	700,000.00	70,000,000.00	1500000	3 a 4
Proyecto Esmeraldas	Esmeraldas	Sí	3	63	Solar PV	10	22	650,000.00	65,000,000.00	1200000	3 a 4

Proyecto	Ubicación	Electrolizador	Potencia Electrolizador (MW)	Eficiencia Electrolizador (%)	Tipo Energía Renovable	Potencia Renovable (MW)	Eficiencia Renovable (%)	Costo Mantenimiento (USD/año)	Costo Inversión (USD)	Producción Energía (kg H ₂ /año)	Nivel TRL
Proyecto Santo Domingo	Santo Domingo	Sí	2	62	Biomasa	8	40	600,000.00	60,000,000.00	900000	3
Proyecto Ibarra	Ibarra	Sí	2	62	Solar PV	7	22	550,000.00	55,000,000.00	850000	2 a 3
Proyecto Machala	Machala	Sí	2	61	Eólica onshore	7	40	500,000.00	50,000,000.00	800000	2 a 3

Datos tomados de la Hoja de Ruta del hidrógeno verde en el Ecuador (Ministerio de Energía y Minas, 2023)

3.5. Aplicaciones del H₂ verde generado a partir de RSU

El hidrógeno verde no solo es por sí mismo una fuente de energía renovable, adicionalmente puede ser usado en algunas aplicaciones que lo hacen importante como un nuevo vector energético. A continuación, se detallan algunas de las aplicaciones más actuales y con investigación de respaldo para las mismas.

Generación eléctrica

La producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos urbanos no solo representa una alternativa energética limpia, sino también una vía estratégica para la descarbonización de procesos industriales fundamentales, como la síntesis de amoníaco (NH₃). Según Rahimpour et al. (2025), la transición hacia rutas sostenibles de producción de amoníaco requiere la sustitución del hidrógeno fósil por hidrógeno verde y del nitrógeno obtenido mediante procesos energéticamente intensivos por tecnologías más eficientes como la adsorción por oscilación de presión (PSA). Si bien el proceso Haber-Bosch es el método predominante en la actualidad, nuevas alternativas como la producción de amoníaco por ciclos químicos (CLAP) muestran ventajas importantes en cuanto a condiciones operativas, eficiencia energética y reducción de emisiones. La integración de electrólisis alcalina (AWEL) o por membrana de intercambio protónico (PEMEL) con energías renovables permite la generación descentralizada de hidrógeno de alta pureza, apto para la síntesis de NH₃ verde. Estas tecnologías, aunque enfrentan desafíos en costos, estabilidad de materiales y escalabilidad, representan una ruta prometedora para ampliar las aplicaciones del hidrógeno verde más allá del sector energético, especialmente en territorios como Quito, donde el aprovechamiento de residuos urbanos ofrece un potencial considerable.(Rahimpour et al., 2025)

Esta aplicación resulta especialmente atractiva para comunidades o instalaciones remotas que necesitan fuentes de energía descentralizadas. Su alta eficiencia y cero emisiones locales lo convierten en una opción ideal para una transición energética sostenible, especialmente si el hidrógeno es producido a partir de residuos urbanos, lo que cierra el ciclo del aprovechamiento energético. No obstante, el alto costo de las celdas y la necesidad de infraestructura adecuada siguen siendo desafíos para su implementación a gran escala.

Movilidad Sostenible

El hidrógeno verde está emergiendo como una solución prometedora para el transporte sostenible, al ser empleado como combustible en vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV) con almacenamiento presurizado. Este sistema ofrece ventajas significativas frente a las baterías eléctricas tradicionales, como tiempos de recarga más cortos y mayor autonomía. La producción de hidrógeno a partir de RSU podría integrarse en sistemas urbanos circulares para abastecer flotas públicas (buses, camiones de recolección) con una huella de carbono muy reducida. Sin embargo, la infraestructura de recarga y distribución aún es limitada en países como Ecuador. Sin embargo, este sistema requiere una infraestructura especializada, con elevados costos(IEA, 2023) para los que la incipiente movilidad sostenible ecuatoriana debe empezar a prepararse.

Según Rahimpour et al. (2025), los vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV) alimentados con H₂ producido por electrólisis de agua (especialmente PEMEL o AWEL) representan una alternativa competitiva frente a los vehículos eléctricos con baterías, especialmente por su rápido tiempo de repostaje, mayor autonomía (hasta 600 km) y mayor eficiencia operativa en condiciones variables. Países como Japón y Corea del Sur ya están implementando flotas de buses y camiones propulsados por H₂, y el artículo

enfatisa el potencial de integrar esta tecnología con la producción distribuida de H_2 verde a partir de residuos. No obstante, Rahimpour et al. (2025) destacan como desafíos críticos la necesidad de infraestructura para el almacenamiento presurizado (350–700 bar), estaciones de repostaje seguras y una red logística para el suministro eficiente de hidrógeno, lo cual requiere planificación estratégica y marcos regulatorios adecuados. (Rahimpour et al., 2025)

Síntesis de amoníaco verde

El hidrógeno verde también puede ser utilizado como materia prima en la producción de amoníaco, especialmente a través del proceso Haber-Bosch cuando se integra con electrólisis y separación de nitrógeno mediante tecnologías como PSA. Esta aplicación tiene gran relevancia para la industria de fertilizantes, ya que permite reemplazar el amoníaco gris de origen fósil por uno de bajo impacto ambiental. Además, el amoníaco puede actuar como vector energético o medio de almacenamiento de hidrógeno. Tecnologías emergentes como el CLAP (Chemical Looping Ammonia Production) permiten una síntesis más eficiente a temperaturas y presiones moderadas, aunque aún están en etapa de investigación. (Rahimpour et al., 2025)

La síntesis de amoníaco (NH_3) representa una de las aplicaciones industriales más prometedoras del hidrógeno verde. En el artículo de Rahimpour et al. (2025), se analiza detalladamente cómo reemplazar el H_2 fósil (obtenido por reformado de gas natural) por hidrógeno renovable —como el generado por electrólisis de agua— en el proceso Haber-Bosch, para obtener NH_3 con huella de carbono mínima. El NH_3 verde es vital no solo como fertilizante sin carbono, sino también como portador de energía y vector para el almacenamiento de H_2 . El NH_3 puede ser utilizado como combustible directo en turbinas o motores adaptados, lo que amplía aún más sus posibilidades en la transición energética. A pesar del potencial, se identifican barreras tecnológicas, como la estabilidad de los catalizadores (especialmente los basados en Ru, Ni o Fe), los costos de electrólisis y la falta de escalamiento industrial del proceso CLAP. La Producción de Amoníaco por Bucles Químicos (CLAP) es un método de síntesis de amoníaco que opera a presión atmosférica y utiliza materiales portadores de nitrógeno. Este proceso es una alternativa prometedora al tradicional proceso Haber-Bosch, que requiere condiciones de alta presión (10–20 MPa) y tiene una alta huella de carbono. CLAP tiene como objetivo reducir estos impactos ambientales al permitir la producción de amoníaco a presión casi ambiental, haciéndolo así más sostenible y eficiente. El proceso implica una reacción cíclica donde el gas hidrógeno reacciona con un portador de nitrógeno a presión casi ambiental para formar amoníaco, regenerando el portador de nitrógeno en gas N_2 en un paso separado. (Lai et al., 2022)

Portador de energía y almacenamiento

El hidrógeno puede actuar como un portador versátil de energía, facilitando su almacenamiento y transporte, especialmente cuando se convierte en amoníaco, metanol u otros compuestos. Esta función es clave para superar la intermitencia de fuentes como la solar y eólica. Al producirse a partir de RSU, se suma un valor agregado al sistema de manejo de residuos y se refuerza la seguridad energética. Sin embargo, su conversión, almacenamiento a alta presión o licuefacción, y posterior reconversión a electricidad o calor implican costos y desafíos técnicos que deben ser abordados. (Chiong et al., 2021; Valera-Medina et al., 2021) El NH_3 , derivado del H_2 verde, puede actuar como un medio

eficiente para el almacenamiento y transporte de energía, especialmente en forma líquida o gaseosa a menor presión que el hidrógeno puro. El amoníaco tiene una densidad energética de 22.5 MJ/kg, comparable a la de los combustibles fósiles, y puede ser almacenado a temperaturas moderadas (-33 °C) y presiones más bajas, lo que lo hace más manejable en comparación con el hidrógeno comprimido o licuado. (Lai et al., 2022; Rahimpour et al., 2025). Estas características lo convierten en una opción idónea para sistemas energéticos intermitentes basados en energía solar o eólica, ya que permite almacenar el excedente energético como NH_3 para ser utilizado posteriormente, incluso fuera del sitio de generación. A esto se suma la posibilidad de utilizar el amoníaco como insumo energético en procesos industriales, motores modificados, o reconvertirlo en H_2 mediante craqueo. Sin embargo, el artículo subraya que se requieren sistemas eficientes de descomposición de NH_3 y estándares de seguridad adecuados para su manejo y transporte, debido a su toxicidad. (Chiong et al., 2021; Lai et al., 2022; Valera-Medina et al., 2021)

Reducción de emisiones en procesos industriales

El hidrógeno verde puede sustituir al hidrógeno fósil (gris) en diversos procesos industriales, como el refinado de petróleo, la producción de acero, productos químicos o vidrio. Esta sustitución permite reducir significativamente las emisiones de CO_2 en sectores difíciles de descarbonizar. Si se aprovecha el hidrógeno obtenido a partir de RSU, se genera un doble beneficio: valorización energética de residuos y reducción de la huella de carbono industrial. No obstante, adaptar procesos industriales existentes para operar con hidrógeno verde implica modificaciones técnicas y costos que deben evaluarse cuidadosamente. (IRENA, 2020)

La sustitución del hidrógeno gris por hidrógeno verde en procesos industriales es una de las rutas más efectivas para descarbonizar sectores como la refinación de petróleo, la producción de acero, la industria química o la elaboración de materiales. Rahimpour et al. (2025) sostienen que el mayor impacto ambiental de la industria del amoníaco (1.2% de las emisiones globales de CO_2) proviene del H_2 fósil, por lo que su reemplazo por H_2 verde puede transformar la industria química hacia la neutralidad climática. Además, la electrólisis, al operar con energías renovables, permite prescindir del metano como fuente energética y reduce sustancialmente las emisiones. La integración del H_2 verde con tecnologías industriales existentes requiere adaptaciones técnicas —por ejemplo, en presiones de operación, purificación del gas, o reformulación de catalizadores—, pero ofrece beneficios ambientales y económicos a largo plazo. El artículo enfatiza la necesidad de políticas públicas, incentivos fiscales y precios del carbono que hagan competitiva esta transición frente a tecnologías fósiles aún dominantes. (Rahimpour et al., 2025)

4. METODOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS RSU.

El hidrógeno verde, generado a partir de fuentes renovables, representa una vía prometedora para alcanzar la descarbonización de las ciudades. La valorización de los residuos sólidos urbanos (RSU) como recurso energético no solo permite la producción de energía limpia, sino que también constituye una solución sostenible para la gestión de desechos, enmarcada en la economía circular. A continuación, se detallan las principales metodologías para la obtención de hidrógeno a partir de RSU, así como los tipos de residuos empleados y su nivel de madurez tecnológica.

4.1. Tipologías: metodologías de obtención y residuos utilizados

La producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) puede clasificarse en función de las metodologías utilizadas para su obtención y los tipos de residuos empleados como materia prima. Esta clasificación permite identificar las rutas tecnológicas más adecuadas según la naturaleza del residuo, las condiciones operativas y los requerimientos energéticos del proceso. A grandes rasgos, las tecnologías actuales se agrupan en dos grandes categorías: procesos termoquímicos, biológicos, electroquímicos e híbridos. A continuación, se describen estas rutas y sus principales variantes, incluyendo ejemplos de aplicaciones, residuos utilizados y referencias técnicas relevantes.

Procesos termoquímicos

Las tecnologías actuales se dividen en procesos termoquímicos, electroquímicos e híbridos. A continuación, se describen sus principales variantes:

- **Gasificación**

Es un proceso termoquímico en el que se convierte la fracción orgánica de los RSU en un gas de síntesis rico en hidrógeno mediante la aplicación de temperaturas entre 700 y 1200 °C y un agente gasificante como vapor o aire. Esta técnica es madura y escalable, con plantas en operación comercial (Chai et al., 2021; Kundu et al., 2025).

Los residuos utilizados son: materia orgánica, plásticos, textiles, papel.

- **Pirólisis**

La pirólisis consiste en la descomposición térmica de residuos en ausencia de oxígeno. Genera gases ricos en hidrocarburos e hidrógeno, biochar (material sólido rico en carbono (Cobos-Torres et al., 2025)) y aceites. Aunque su eficiencia depende del tipo de residuo, es una opción viable para materiales complejos (Zhu et al., 2022; Rosati et al., 2022; Cobos-Torres et al., 2025).

Los residuos utilizados son: plásticos, caucho, residuos electrónicos.

- **Reformado con vapor de biometano (BSR)**

El reformado con vapor aplicado al biogás o biometano, especialmente de rellenos sanitarios, es una estrategia de alta eficiencia. Este método ha sido evaluado en Brasil, donde se estimó que más de 200 vertederos tienen el potencial técnico y económico para producir hidrógeno verde por debajo de 10 USD/kg (Przybyla et al., 2025).

Los residuos utilizados son: fracción orgánica de RSU convertida en biogás.

- **Electrólisis con integración térmica (SOEC)**

Un enfoque innovador consiste en integrar ciclos orgánicos Rankine (ORC) con electrólisis de óxido sólido (SOEC), alimentada por la incineración de RSU. Este método permite aprovechar calor residual para reducir el consumo eléctrico del electrolizador, logrando eficiencias de hasta 22,7% y cogeneración de electricidad, calor e hidrógeno (Rosati et al., 2022).

Los residuos utilizados son: RSU incinerables, RDF, biomasa húmeda.

- **Celdas de electrólisis microbianas (MEC)**

Tecnología emergente que emplea microorganismos para descomponer materia orgánica en aguas residuales y generar hidrógeno con ayuda de corriente externa. Representa una alternativa viable para residuos líquidos o mezclados (Kundu et al., 2025).

Ventajas y limitaciones de procesos termoquímicos

- Las principales ventajas de esta tecnología son su alta producción de hidrógeno; adecuada para residuos mixtos; integración con otras tecnologías y escalabilidad industrial.
- En tanto que sus limitaciones básicamente comprenden la necesidad de altas temperaturas y energía, lo cual afecta a su sostenibilidad si no se integran a energías renovables; además de requiere de pretratamiento de residuos y puede impactar al ambiente con la emisión de contaminantes si no se controla adecuadamente.

Procesos biológicos

Los procesos biológicos emplean microorganismos que degradan la materia orgánica en condiciones anaeróbicas o foto autotróficas para producir hidrógeno. Estos métodos operan a temperaturas moderadas y son más sostenibles desde el punto de vista energético.(Pascualone, 2014; Rodríguez et al., 2016)

- **Fermentación oscura**

Este proceso utiliza bacterias anaerobias para descomponer azúcares y compuestos orgánicos en hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos. Es adecuado para residuos con alta biodegradabilidad como restos de alimentos, residuos agrícolas y lodos de depuradora (Das & Veziroglu, 2020). La fermentación oscura es sencilla y económica, pero limita el rendimiento de hidrógeno debido a subproductos y producción de ácidos.(Feria et al., 2022)

- **Fermentación foto fermentativa**

Complementa a la fermentación oscura mediante bacterias fotosintéticas que, en presencia de luz, convierten los productos de fermentación oscura (ácidos orgánicos) en hidrógeno, incrementando el rendimiento total. Sin embargo, su implementación a escala industrial aún es limitada debido a la necesidad de condiciones específicas de iluminación y control ambiental (Das & Veziroglu, 2020).

- **Digestión anaerobia**

Aunque está más orientada a la producción de biogás (mezcla de metano e hidrógeno), la digestión anaerobia puede contribuir a la generación de hidrógeno en fracciones iniciales de degradación de residuos orgánicos. Este proceso se aplica a residuos orgánicos municipales y residuos agroindustriales (Cheng et al., 2021).

- **Digestión anaerobia + reformado**

Una ruta combinada en la que se produce biogás mediante digestión anaerobia y luego se convierte a hidrógeno por reformado. Es eficaz en residuos con alto contenido biodegradable (Kundu et al., 2025).

Los residuos utilizados son: lodos, restos alimentarios, residuos agroindustriales.

Ventajas y limitaciones de procesos biológicos

- Ventajas: Operación a bajas temperaturas; menor consumo energético; utilización de residuos biodegradables; potencial para integración en sistemas de economía circular.
- Limitaciones: Rendimiento bajo comparado con termoquímicos; sensibilidad a condiciones ambientales; producción de subproductos no deseados.

4.2. Clasificación de las tecnologías para la producción de hidrógeno verde: directa, indirecta y combinada

La producción de hidrógeno verde se puede clasificar según la forma en que se utiliza la energía renovable, especialmente la energía solar, en tres tipos principales de tecnologías.(IRENA, 2020):

- directas,
- indirectas y
- combinadas

Las tecnologías directas convierten la energía solar directamente en hidrógeno sin una etapa intermedia de generación de electricidad. Entre estas destacan la fotocatalisis, la pirólisis solar directa y la fotoelectrocatalisis, que permiten dividir la molécula de agua utilizando materiales semiconductores o concentradores solares. Estas tecnologías presentan el beneficio de evitar pérdidas energéticas asociadas a la conversión eléctrica, aunque todavía se encuentran en fases tempranas de desarrollo tecnológico y su eficiencia es limitada.(Dincer & Acar, 2015)

Las tecnologías indirectas, por su parte, utilizan fuentes renovables como la energía solar, eólica o hidroeléctrica, para generar electricidad, la cual luego se emplea en procesos electroquímicos como la electrólisis del agua. Este es actualmente el método más maduro y extendido para la obtención de hidrógeno verde, especialmente a través de tecnologías como la AEC (electrólisis alcalina), la PEM (Proton Exchange Membrane) y la SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell). Estas tecnologías permiten una mejor integración en redes energéticas y procesos industriales, aunque su eficiencia está sujeta a la fuente eléctrica y al tipo de electrolizador utilizado (IRENA, 2020; Zeng & Zhang, 2010; Zhang et al., 2022)

Finalmente, las tecnologías combinadas integran procesos termoquímicos y electroquímicos, o bien combinan diferentes fuentes de energía renovable para optimizar la eficiencia global del sistema. Un ejemplo relevante es la combinación de ciclos termoquímicos asistidos por energía solar con electrólisis de alta temperatura, lo que permite aprovechar el calor solar para reducir el consumo energético del proceso electroquímico. Estas soluciones híbridas están siendo estudiadas para aumentar la eficiencia energética global y mejorar la viabilidad económica del hidrógeno verde (Amores et al., 2021; Rosati et al., 2022).

La clasificación en tecnologías directa, indirecta y combinada permite entender mejor el enfoque tecnológico y el nivel de madurez de los procesos de producción de hidrógeno verde, así como identificar oportunidades de innovación e integración energética.

4.3. Procesos de pretratamiento y valorización de residuos para la producción de hidrógeno

La heterogeneidad y variabilidad de los residuos sólidos urbanos (RSU) demandan procesos de pretratamiento que optimicen su aprovechamiento en la producción de hidrógeno verde. Estas etapas buscan homogenizar, reducir tamaño, disminuir la humedad y eliminar componentes no deseados para mejorar la eficiencia de los procesos termoquímicos y biológicos.

Clasificación y separación

Una primera etapa crítica es la clasificación del RSU en fracciones homogéneas: orgánica, plásticos, papel y cartón, metales, vidrio, entre otros. La separación manual o mecánica permite destinar cada fracción a procesos específicos, evitando contaminantes que puedan inhibir reacciones o dañar equipos (Liu et al., 2019). En particular, la extracción de materiales inorgánicos y no biodegradables es fundamental para asegurar la calidad del hidrógeno producido. Una separación en origen mediante un contenedor específico para materia biodegradable evitaría en gran medida este pretratamiento.

Trituración y molienda

La reducción del tamaño de partícula mediante trituración o molienda incrementa la superficie de contacto y mejora la velocidad de reacción durante la gasificación o fermentación. La selección de la granulometría depende de la tecnología empleada, considerando además el costo energético del pretratamiento (Kumar et al., 2021).

Secado y deshidratación

El contenido de humedad es un factor limitante en los procesos termoquímicos. Altos niveles de agua aumentan el consumo energético y pueden reducir el rendimiento de hidrógeno. Por ello, técnicas de secado por aire caliente, tambor rotatorio o procesos solares, se aplican para reducir la humedad a niveles óptimos (Liu et al., 2019).

Digestión anaerobia previa

En los procesos biológicos, el uso de digestión anaerobia previa puede facilitar la degradación parcial de la materia orgánica, generando productos intermedios que potencian la fermentación oscura o fotofermentativa posterior (Cheng et al., 2021).

Valorización energética y materiales derivados

Además de hidrógeno, los procesos termoquímicos generan productos secundarios valorizables: Biochar, que puede emplearse como enmienda del suelo o adsorbente; y líquidos pirolíticos que pueden tener usos químicos o como combustibles. La valorización integral de residuos mejora la sostenibilidad económica y ambiental de la cadena de producción (Zhou et al., 2022).

4.4. Nivel de madurez tecnológica

Los niveles de madurez de la tecnología, más conocidos por sus siglas inglesas TRLs: *Technology Readiness Levels*, surgen como concepto en la NASA, pero posteriormente se generaliza para aplicarse a cualquier proyecto y no necesariamente a los proyectos aeronáuticos o espaciales, desde su idea original hasta su despliegue (Ibañez de Aldecoa, 2020).

Más en concreto un TRL es una forma aceptada de medir el grado de madurez de una tecnología. Por lo tanto, si se considera una tecnología concreta y se dispone de

información del TRL o nivel en el que se encuentra es factible hacerse una idea de su nivel de madurez (Ibañez de Aldecoa, 2020).

En la práctica y como es lógico, no se puede considerar el mismo grado o nivel de innovación cuando se realiza un determinado proyecto si se parte para su realización de tecnologías maduras o de tecnologías probadas con éxito en entornos reales (TRL 8 - TRL 9) y que pueden encontrarse disponibles de forma libre o mediante licencia, que el que se aborda a partir de tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo y validación (TRL 4-TRL 7) o el que se aborda a partir de tecnologías que se encuentran todavía en un nivel más básico, a nivel de idea o de prueba de concepto (TRL 1 – TRL 3)(Ibañez de Aldecoa, 2020).

Los TRLs o niveles de madurez de la tecnología

Se consideran nueve (9) niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real: (Ibañez de Aldecoa, 2020).

- TRL 1: Principios básicos observados y reportados
- TRL 2: Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.
- TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.
- TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.
- TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante.
- TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real.

4.5. Evaluación comparativa de metodologías para la producción de hidrógeno a partir de RSU

Para una adecuada selección de tecnologías, es imprescindible evaluar indicadores técnicos, económicos y ambientales. La Tabla 6 resume comparativamente aspectos clave de las metodologías descritas.

Tabla 6 Comparativa de las diferentes metodologías para producir HV a partir de RSU con sus niveles de madurez

Referencia	Tecnología	Bases técnicas desarrolladas	TRL	Tipo de tecnología
Alouani et al., 2022	Gasificación de residuos sólidos municipales (RSU)	Conversión termoquímica de residuos orgánicos en gas de síntesis rico en H ₂ mediante gasificación con vapor y aire. La eficiencia máxima se alcanza a 800 °C con relación vapor/RSU de 0.7–0.8.	6–7	Directa
Paillet et al., 2021	Fermentación oscura con reciclaje de efluente	Producción biológica de H ₂ por fermentación de fracción orgánica de RSU. Se mejora mediante reciclaje de efluente con tratamiento térmico sistemático, logrando productividad de 1.51 mL H ₂ /gVS/h (gVS = gramos de sólidos volátiles).	4–5	Directa
González Arcos J, 2024	Pirólisis catalítica de residuos compuestos	Conversión de residuos textiles reforzados con fibra en gas rico en H ₂ mediante pirólisis catalítica usando NiO/Al ₂ O ₃ . Producción óptima a 700 °C con relación Ni ⁰ /Ni ²⁺ específica.	5–6	Directa
Tabu et al., 2023	Plasma no térmico a presión atmosférica	Producción de H ₂ desde celulosa y polietileno de baja densidad usando plasma no térmico en reactor de descarga de barrera dieléctrica. Eficiencia para celulosa: 0.8 mol H ₂ /kWh.	3–4	Directa
Hai et al., 2024	Fotoreformado de residuos plásticos	Producción de H ₂ y compuestos valiosos vía fotocatalisis con oxinitruros de alta entropía, con estructura distorsionada para mayor separación de cargas y menor recombinación electrón-hueco.	2–3	Directa
Aravindan & Kumar, 2024	Ciclo Rankine Orgánico (ORC) + SOEC con solar y RSU	Integración de ciclo Rankine Orgánico (ORC) con electrólisis SOEC y energía solar, aprovechando calor de RSU.	5–6	Directa
Aravindan & Kumar, 2024	Kalina + Electrólisis de alta temperatura SOEC	Ciclo Kalina (mezcla NH ₃ -H ₂ O) acoplado con electrólisis SOEC y fuente solar/RSU, para mejorar eficiencia térmica y producción de H ₂ .	5–6	Directa

Referencia	Tecnología	Bases técnicas desarrolladas	TRL	Tipo de tecnología
Kundu et al., 2025	Fermentación oscura / fotofermentación / MEC	Procesos biológicos para H ₂ : fermentación oscura con bacterias anaeróbicas, fotofermentación con bacterias fotosintéticas y celdas de electrólisis microbiana (MEC – <i>Microbial Electrolysis Cell</i>).	3–4	Directa
Mondal, 2022	Gasificación con vapor de MSW en lecho fijo	Gasificación en lecho fijo con vapor de MSW (<i>Municipal Solid Waste</i> – residuos sólidos municipales), usando modelado termodinámico y RSU (<i>Response Surface Methodology</i>) para optimización.	4–5	Directa
Soler Crespo et al., 2021	Reformado con vapor de biometano	Producción de H ₂ a partir de biometano (producto de digestión anaerobia de RSU), seguido de reformado con vapor (Steam Reforming). Capturando CO ₂ , las emisiones netas pueden ser negativas. <u>Se refiere específicamente al proceso de Steam Methane Reforming (SMR) aplicado a cualquier fuente de biometano, incluyendo, pero no limitándose a rellenos sanitarios.</u>	5–6	Combinada
Wang et al., 2023	Gasificación de RSU integrada con electrólisis	Integración de gasificación de RSU con electrólisis de alta temperatura tipo SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell – Electrólisis de óxido sólido), usando calor residual de la gasificación para el proceso.	4–5	Combinada
Kim et al., 2024	SOEC + HESS (CAES + ATES) integrado con incinerador	Electrólisis de óxido sólido (SOEC), HESS (Hybrid Energy Storage System – Sistema Híbrido de Almacenamiento de Energía) con CAES (Compressed Air Energy Storage – Almacenamiento de aire comprimido) y ATES (Aquifer Thermal Energy Storage – Almacenamiento térmico en acuíferos), más integración con incinerador y almacenamiento térmico con aminas.	4–5	Indirecta
Przybyla et al., 2025	Reformado de biometano de rellenos sanitarios	IPCC Tier 1 (Intergovernmental Panel on Climate Change – Método de estimación de metano), BSR (<i>Biomethane Steam Reforming</i> – Reformado con vapor de biometano), análisis económico y escalabilidad de producción en rellenos sanitarios de Brasil. <u>Es un aprovechamiento del metano purificado obtenido del biogás generado en sitios de disposición final de residuos sólidos municipales.</u>	6–7	Indirecta

Referencia	Tecnología	Bases técnicas desarrolladas	TRL	Tipo de tecnología
Rosati et al., 2022	Producción de H ₂ mediante incineración de MSW con sistema ORC-SOEC	Incineración de MSW integrada con ciclo ORC (<i>Organic Rankine Cycle</i>) y electrólisis SOEC. Modelado en Aspen Plus, cálculo del LCOH (<i>Levelized Cost of Hydrogen</i> – Costo Nivelado del Hidrógeno).	4–5	Indirecta
Gopalakrishnan et al. (2025)	Gasificación por plasma integrada con electrólisis alcalina	Plasma térmico + electrólisis alcalina, modelado Aspen Plus + MATLAB	3–4	Indirecta

Debido a la confusión entre los procesos de Reformado de Biometano de rellenos Sanitarios y el Reformado de vapor con biometano, se ha subrayado la diferencia clave de estos dos procesos.

5. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ECUADOR

5.1. Producción de residuos sólidos en el Ecuador

Según el informe del INEC (INEC, 2023a), en 2021 un habitante urbano ecuatoriano produjo en promedio 0,9 kg de residuos sólidos diarios. De estos, el 55 % eran orgánicos y el 45 % inorgánicos, lo cual indica una alta proporción de residuos potencialmente compostables o reciclables, que podrían ser aprovechados si existiera un sistema efectivo de separación en la fuente (Figura 1). El mismo informe indica que apenas el 33,9 % de los municipios ha iniciado procesos de separación en la fuente, lo que refleja una débil cultura de clasificación y escasa implementación de políticas locales para incentivar este comportamiento. Complementariamente, el 85,2 % de los residuos se recolectan sin diferenciación, limitando fuertemente las posibilidades de reciclaje o reutilización.

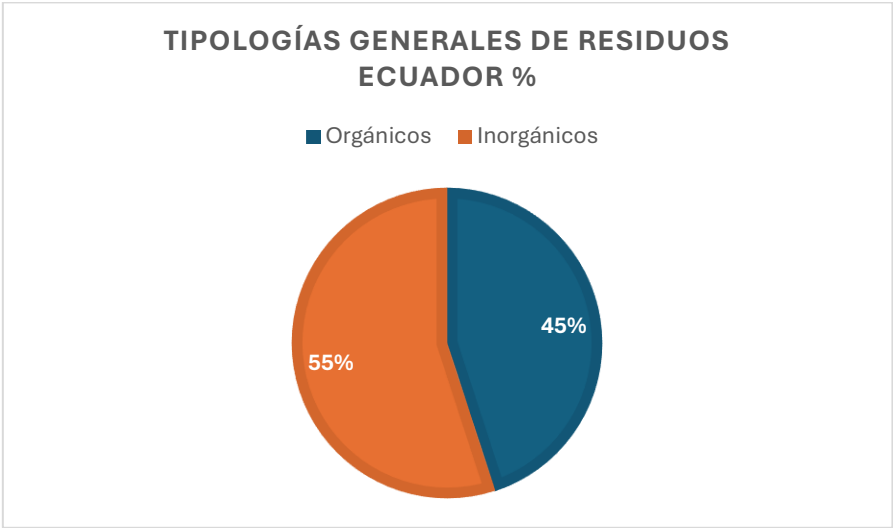


Figura 1. Residuos en el Ecuador (INEC, 2023b)

La situación anterior se agrava cuando se analiza la disposición final. Apenas el 51,6 % de los municipios utilizan rellenos sanitarios, mientras que el resto continúa recurriendo a celdas emergentes (29,9 %) y botaderos a cielo abierto (18,6 %), estos últimos prohibidos por la normativa ambiental vigente (INEC, 2023; INEC - Instituto Nacional

de Estadísticas y Censos, 2022) (Figura 2). Como se aprecia en la Figura 2, en el eje de las Y se tiene los tipos de manejo de RSU en los municipios ecuatorianos, en tanto que en el eje de las X se establecen los porcentajes correspondientes a cada gestión del total de municipios. Este escenario es complejo y plantea muchas dudas en términos de salud pública, contaminación de suelos, cuerpos de agua, calidad del aire y sostenibilidad ecológica.

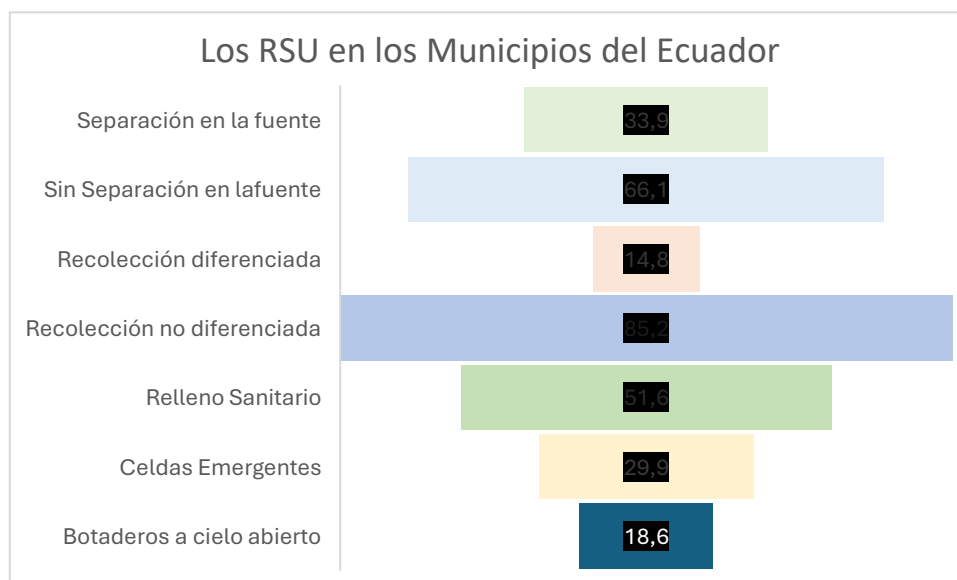


Figura 2. La situación de los residuos sólidos urbanos en el Ecuador (INEC, 2023a)

El Proyecto Gestión de Residuos y Economía Circular Inclusiva (GRECI), en su informe del 2024 destaca el impulso al tratamiento de residuos orgánicos como el compostaje, la lombricultura y el bokashi, asumidos principalmente en la provincia del Azuay. Sin embargo, a nivel nacional, estas prácticas aún no están consolidadas como estándar y dependen en gran medida de iniciativas locales aisladas, requiriéndose una política de incentivos más robusta para escalar estas prácticas, incluyendo subsidios verdes, financiamiento climático y alianzas público-comunitarias. (MAATE, 2024)

Debido a la situación socioeconómica y política ecuatoriana, la sostenibilidad financiera de la gestión integral de residuos es otro punto crítico. En 2021, los municipios ecuatorianos destinaron cerca de 19 millones de dólares a la gestión de residuos, de los cuales más de la mitad (55,2 %) fue cubierto mediante subsidios. Aunque el 52 % de los GADM (Gobiernos autónomos descentralizados municipales del Ecuador) implementan el cobro a través de la planilla de cobro asociada al consumo de electricidad de cada familia, un preocupante 6,8 % ni siquiera cuenta con ordenanzas para el cobro del servicio. Esta dependencia de subsidios y la falta de una cultura de pago por servicios ambientales pone en riesgo la continuidad y calidad de la prestación, y evidencia la necesidad urgente de reformas tarifarias y modelos de gestión público-privada que permitan asegurar ingresos estables y destinados específicamente a la implementación de mejores técnicas de gestión y aprovechamiento

El Ecuador se encuentra en una etapa de transición hacia un modelo de gestión de residuos más eficiente y sostenible, pero los datos revelan que aún existen brechas profundas en infraestructura, normativas, financiamiento y cultura ciudadana. El fortalecimiento de capacidades técnicas en los GADM, la promoción de la economía circular y el diseño de instrumentos económicos que premien la separación en la fuente y el reciclaje son acciones urgentes.

5.2. Gestión de residuos sólidos en el Ecuador

La gestión de residuos sólidos urbanos representa uno de los principales retos para los países en desarrollo, debido a la acelerada urbanización, el crecimiento poblacional y los patrones de consumo insostenibles, lo que dificulta su aprovechamiento, tratamiento y disposición final, especialmente por los volúmenes generados y las dificultades económicas que afrontan.(Coral-Carrillo & Oviedo-Costales, 2022). En Ecuador, el manejo de residuos sólidos se encuentra asignado a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM), (Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, 2019) ha sido objeto de diversos esfuerzos institucionales para lograr una gestión ambientalmente adecuada, técnicamente eficiente y financieramente sostenible. A pesar de ello, los datos más recientes publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en 2022, que analizan la situación durante el año 2021, revelan avances limitados y persistentes desafíos estructurales. (INEC Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos, 2022).

Desde la perspectiva de la Gestión Integral de Residuos Sólidos, se busca minimizar la generación de residuos y maximizar su aprovechamiento a través de estrategias como la reducción, reutilización, reciclaje y compostaje (Coral-Carrillo et al., 2021), alineándose con la Economía Circular que propone cerrar los ciclos de vida de los productos y materiales (Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, 2031). En el caso ecuatoriano, es necesario robustecer a la Autoridad Ambiental encargada de la vigilancia de la correcta Gestión Integral de Residuos Sólidos en los GADM, así como empoderar a los GADM para que, a su vez, gestionen y controles los residuos generados a lo largo y ancho del país. Un ejemplo de ello es el componente de Responsabilidad Extendida del Productor establecido en el COA y RCOA, que, si bien muestra avances significativos como el aumento progresivo en el número de productores regulados y la implementación de sistemas de gestión aprobados, no existen indicadores de cumplimiento o sanción (MAATE Ministerio de Ambiente & GRECI Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva, 2024); esto dificulta evaluar la efectividad real del control ambiental ejercido por la autoridad, autoridad extremadamente débil y sin capacidad operativa de control. Lo anterior es un claro indicativo de la necesidad de contar con marcos normativos robustos, infraestructura adecuada, participación ciudadana, mecanismos de financiamiento estables, y una Autoridad Ambiental robusta. Lamentablemente, en el caso ecuatoriano, estas condiciones aún se encuentran en proceso de construcción, aunque con avances significativos. Se evidencian esfuerzos por construir marcos normativos actualizados, tales como instructivos técnicos para la separación en la fuente, manejo de residuos eléctricos y electrónicos (RAEE), neumáticos fuera de uso, pilas usadas y plásticos agrícolas. Esta base legal es crucial para dar operatividad a la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), concepto que transfiere a los generadores la obligación de gestionar el ciclo completo de sus productos y que se encuentra reflejada en el Código orgánico del ambiente y su respectivo reglamento. (MAATE, 2018; Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, 2019).

Dentro de este fortalecimiento político-normativo es destacable el desarrollo del Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos No Peligrosos (PNGIRS), que incorpora criterios de sostenibilidad, participación multisectorial y enfoque territorial. Este instrumento intenta consolidar una visión estratégica para el tratamiento y aprovechamiento de residuos, con la integración explícita de principios de economía circular. (MAATE Ministerio de Ambiente & GRECI Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva, 2024). No obstante, a pesar del progreso en la formulación de normativa, persiste una desigualdad entre el diseño de políticas y su implementación territorial, especialmente en cantones pequeños o con baja capacidad institucional. A pesar de las voces optimistas en la Gestión de residuos sólidos como el Programa de Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva (GRECI) del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), se han levantado algunas voces que reclaman que el abordaje técnico y descontextualizado de esta problemática ha limitado su comprensión estructural, aduciendo que la basura no es un simple residuo, sino el reflejo de una crisis civilizatoria derivada del modelo capitalista de producción y consumo. En este sentido, los residuos no se entienden como una externalidad aislada, sino como el resultado inevitable de un metabolismo social desbalanceado, guiado por la lógica de la acumulación, el extractivismo y el descarte. (Solís et al., 2020). Si bien las dos visiones tienen su parte de razón, ninguna de las dos es independiente, sino más bien complementarias, y por tanto se deben abarcar conjuntamente.

5.3. Aprovechamiento energético de los Residuos Sólidos Urbanos en el Ecuador.

En lo que respecta al aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos (RSU) en Ecuador, se ha experimentado pequeños avances en los últimos años, destacando iniciativas en ciudades como Quito y estudios en otras regiones como Esmeraldas y la Amazonía, más específicamente Limoncocha.

Quito ha implementado un proyecto pionero en el país para generar energía eléctrica a partir del biogás producido por la descomposición de residuos orgánicos en el Relleno Sanitario El Inga. La Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP), en alianza con la empresa privada Gas Green, han venido desarrollando esta iniciativa en tres fases: (EMGIRS-EP, 2017, 2021, 2024b)



Primera fase (2016): Instalación de dos generadores con una capacidad de 2 MW.



Segunda fase (2017): Adición de tres generadores, alcanzando una capacidad total de 5 MW, suficiente para abastecer a más de 25.000 viviendas.



Tercera fase (2024): La capacidad de generación se amplió a 9 MW, beneficiando a aproximadamente 40.000 hogares.

Este proyecto en la Capital de los ecuatorianos, no solo proporciona energía renovable, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, evitando la liberación de aproximadamente 230.000 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) al ambiente. (EMGIRS-EP, 2017, 2021, 2024b)

En Esmeraldas, en la región costa, al norte del Ecuador, investigadores de la Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" han explorado la viabilidad de utilizar la metanización como alternativa tecnológica para la valorización energética de la fracción orgánica de los RSU en la provincia. El estudio propone el diseño de un Tratamiento Mecánico Biológico (TMB) utilizando tecnología de túneles de metanización, lo que permitiría transformar los residuos orgánicos en biogás, contribuyendo así a la generación de energía y a la reducción de la contaminación ambiental.(Jijón Solorzano et al., 2024)

En la parroquia Limoncocha, ubicada en la Amazonía ecuatoriana, investigadores de la Universidad Internacional SEK, evaluaron el potencial energético de los RSU mediante la incineración. El estudio determinó que el 92% en peso de los residuos presentan un poder calórico superior a 3100 kcal/kg, lo que indica una alta viabilidad para su aprovechamiento energético. Sin embargo, debido al bajo volumen de residuos (1,7 toneladas por día), se recomienda la formación de una mancomunidad con poblaciones aledañas para implementar un sistema de valorización energética eficiente.(Coral-Carrillo & Oviedo-Costales, 2022)

5.4. Residuos sólidos urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), la empresa encargada de gestionar los residuos sólidos urbanos es la Empresa Pública de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS-EP. Para ello cuenta con varias instalaciones: Relleno Sanitario El Inga, Estación de Transferencia Norte (ETN), Estación de Transferencia Sur (ETS), escombreras San Antonio y El Troje, Ecocentro y los Centros de Educación y Gestión Ambiental Tumbaco, La Delicia, Manuela Sáenz y Eloy Alfaro.(EMGIRS-EP, 2025)

La disposición final de los RSU del DMQ se realiza en cubetos construidos bajo parámetros técnico-ambientales. Cuentan con una cobertura de plástico de alta resistencia e impermeabilidad (geomembranas), que previenen la filtración de los lixiviados, con un sistema de tuberías que los transportan a piscinas de almacenamiento para su posterior

tratamiento. Además, cuenta con chimeneas que cumplen la función de captar y dispersar el biogás. Operan las 24 horas los 365 días del año.

Hasta finales del 2023, la producción del DMQ de RSU era de 2200 ton/día, a pesar de que se siguen manejando los mismos valores, actualmente seguramente se ha superado esa cifra, y, de hecho, EMGIRS-EP los sigue manteniendo en sus datos informativos. (EMGIRS-EP, 2024b, 2025)

A continuación, se presenta en la Tabla 9 los datos estimados sobre la generación de residuos sólidos en Quito, basados en información disponible hasta 2024, estimada como media de los valores obtenidos de diferentes fuentes y metodologías de cálculo. Si no es la media poner el rango mínimo, el máximo y el utilizado.

Tabla 7. Residuos en el DMQ

CATEGORÍA DEL RESIDUO	PORCENTAJE ESTIMADO (%)	GENERACIÓN DIARIA ESTIMADA (TON)
Residuos Sólidos Orgánicos RSO	60	1400
Plásticos	13	300
Papel y Cartón	10	200
Vidrio	4	100
Metales	3	60
Otros (textiles, electrónicos, etc.)	10	240
Total	100	2340

(Casco Argotty Estefanía et al., 2015; Coral- Carrillo et al., 2019, 2018; Coral-Carrillo & Oviedo-Costales, 2022; EMGIRS-EP, 2017, 2024b, 2025; Garcés Mauricio et al., 2016; Landázuri Xavier et al., 2017)

El Relleno Sanitario de El Inga, operado por EMGIRS-EP desde 2010, es la principal instalación para la disposición final de los residuos sólidos urbanos de Quito. Este sitio recibe residuos provenientes de las estaciones de transferencia y de municipios aledaños como Rumiñahui. La operación del relleno se realiza de manera técnica y controlada, con el objetivo de minimizar riesgos e impactos ambientales.(EMGIRS-EP, 2025; INEC Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos, 2022)

A pesar de los avances, la gestión de residuos en Quito enfrenta desafíos como la alta proporción de residuos orgánicos (aproximadamente 60%), la limitada separación en origen y la necesidad de fortalecer la educación ambiental. A lo anterior hay que sumar la importante rotación de personal técnico en la EMGIRS-EP, dado principalmente por los continuos cambios políticos y administrativos en el DMQ.

Al momento, se está gestionando a nivel del DMQ el Proyecto: “Complejo Ambiental de Residuos Sólidos del DMQ” representa un compromiso hacia un futuro más limpio, saludable y sostenible para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Con fecha 7 de

diciembre de 2023 se firmó el Convenio con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, a través del cual se podrá contar con asistencia técnica para desarrollar e implementar un nuevo modelo de recolección, transporte y tratamiento de residuos enfocado en una estrategia de economía circular inclusiva; así mismo, contempla apoyar en la estructuración, licitación y adjudicación de un gestor privado a través de la modalidad de Alianza Estratégica en el marco del proyecto Complejo Ambiental. (EMGIRS-EP, 2024a). A pesar del tiempo transcurrido, a abril del 2025 el proyecto se encuentra en Etapa de Negociación con las empresas que presentaron Manifestaciones de interés. Se espera que la operación del complejo inicie en abril 2027.(EMGIRS-EP, 2024a)

6. ANÁLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN EL DMQ

Como ya se indicó en capítulos anteriores, la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión de residuos sólidos urbanos y la transición hacia fuentes de energía limpia son desafíos cruciales para las ciudades del siglo XXI, por lo que, el tema de este trabajo fin de máster: producción de hidrógeno verde a partir del aprovechamiento energético de residuos representa una oportunidad estratégica que conjuga la mitigación de impactos ambientales con el impulso a la economía circular y la descarbonización del sistema energético.

6.1. Cálculos de producción de hidrógeno verde en el DMQ

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), con una generación diaria superior a las 2.200 toneladas de residuos sólidos y una composición dominada por materia orgánica, plásticos y otros residuos valorizables (EMGIRS EP, 2024), posee un potencial significativo para la implementación de tecnologías que transformen estos desechos en vectores energéticos limpios.

En este trabajo fin de máster, se decidió estimar la cantidad teórica de hidrógeno verde que se puede generar en Quito, con el fin de establecer la viabilidad de las tecnologías estudiadas, previa su selección definitiva.

A continuación, se presenta un ejemplo del cálculo realizado con la tecnología de gasificación de residuos sólidos municipales (RSU), que es una de las más maduras (TRL 6.5) y directamente aplicables a la fracción orgánica. del DMQ.

Ejemplo de cálculo de teórico de producción de hidrógeno verde en el DMQ

Datos base

Tabla 8. Datos para Gasificación de RSU

Residuos generados por Quito = 2200 toneladas/día.
FO =Fracción orgánica: 60 % = 2200 toneladas/día*0.6= 1320 toneladas/día de residuos orgánicos.
Tecnología seleccionada para el ejemplo: Gasificación de RSU (Alouani et al., 2022).
REN = Rendimiento estimado de H ₂ para gasificación: 60 kg H ₂ /tonelada de materia orgánica (basado en literatura de gasificación con vapor a 800 °C, valores típicos 55–70 kg H ₂ /t).

Cálculo diario:

$$Producción\ Diaria = PD_{H_2} = FO * REN$$

Ecuación 1. Producción diaria de H₂

$$PD_{H_2} = 1320 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * 60 \frac{\text{kg}_{H_2}}{\text{ton}} = 79200 \frac{\text{kg}_{H_2}}{\text{día}} * \frac{1\text{ton}}{1000 \text{ kg}} = 79.2 \text{ ton } \frac{H_2}{\text{día}}$$

Cálculo anual:

$$\text{Producción Anual de Hidrógeno} = PA_{H_2} = PD_{H_2} * 365$$

Ecuación 2. Producción anual de H₂

$$PA_{H_2} = 79.2 \frac{\text{ton } H_2}{\text{día}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 28908 \frac{\text{ton } H_2}{\text{año}}$$

Tabla resumen de producción teórica de H₂ para el DMQ

En a Tabla 9 se muestran los valores teóricos base de rendimiento obtenidos de la investigación bibliográfica de cada una las tecnologías estudiadas, así como las cantidades estimadas producidas en DMQ (Tabla 9).

Tabla 9. Rangos de producción de H₂ estimados

N.º	Tecnología	TRL	RSO del DMQ ton/día	Rendimiento (kg H ₂ /ton)	Producción estimada (kg H ₂ /día) min	Producción estimada (kg H ₂ /día) max	Producción estimada promedio (kg H ₂ /día)	Promedio (ton H ₂ /día)	Promedio (ton H ₂ /año)
1	Gasificación de RSU	6–7	1320	60–70	79200	92400	85800	85,8	31317
2	Reformado con vapor de biometano	5–6	1320	70–80	92400	105600	99000	99	36135

N.º	Tecnología	TRL	RSO del DMQ ton/día	Rendimiento (kg H ₂ /ton)	Producción estimada (kg H ₂ /día) min	Producción estimada (kg H ₂ /día) max	Producción estimada promedio (kg H ₂ /día)	Promedio (ton H ₂ /día)	Promedio (ton H ₂ /año)
3	Fermentación oscura con reciclaje de efluente	4–5	1320	~30	39600	39600	39600	39,6	14454
4	Pirólisis catalítica de residuos compuestos	5–6	1320	55–65	72600	85800	79200	79,2	28908
5	Plasma no térmico a presión atmosférica	3–4	1320	~40	52800	52800	52800	52,8	19272
6	Fotoreformado de residuos plásticos	2–3	1320	20–30	26400	39600	33000	33	12045
7	Gasificación + electrólisis SOEC	4–5	1320	75–85	99000	112200	105600	105,6	38544
8	ORC + SOEC con solar y RSU	5–6	1320	90	118800	118800	118800	118,8	43362
9	Kalina + SOEC	5–6	1320	95	125400	125400	125400	125,4	45771
10	SOEC + HESS (CAES + ATES) + incinerador	4–5	1320	85	112200	112200	112200	112,2	40953
11	Fermentación oscura / foto fermentación / MEC	3–4	1320	12.5	16500	16500	16500	16,5	6023
12	Gasificación con vapor de MSW en lecho fijo	4–5	1320	70	92400	92400	92400	92,4	33726
13	Reformado de biometano de rellenos sanitarios	6–7	1320	85	112200	112200	112200	112,2	40953
14	Incineración de MSW con ORC-SOEC	4–5	1320	65–75	85800	99000	92400	92,4	33726

N.º	Tecnología	TRL	RSO del DMQ ton/día	Rendimiento (kg H ₂ /ton)	Producción estimada (kg H ₂ /día) min	Producción estimada (kg H ₂ /día) max	Producción estimada promedio (kg H ₂ /día)	Promedio (ton H ₂ /día)	Promedio (ton H ₂ /año)
15	Gasificación por plasma + electrólisis alcalina	3–4	1320	50–60	66000	79200	72600	72,6	26499

Los valores de rendimiento son estimaciones basadas en la literatura técnica analizada para este trabajo fin de máster, pudiendo variar dependiendo del diseño del reactor, eficiencia térmica y condiciones de operación con las que se trabaje, especialmente por la altura del DMQ, que se encuentra a 2850 msn aproximadamente (Casco et al., 2015).

De lo analizado, se puede establecer que Quito podría generar entre 6023 y 45771 toneladas de hidrógeno verde al año, dependiendo de la tecnología aplicada.

La opción más madura y viable hoy en día con alta TRL es la gasificación con vapor, que permite obtener aproximadamente 31317 toneladas/año. Otras tecnologías producen teóricamente mayor cantidad de hidrógeno, pero su grado de madurez es bajo en la actualidad.

La Figura 3 permite una mejor visualización de la producción estimada de H₂ en el DMQ aplicando las tecnologías descritas en la Tabla 7 en el punto 5.5 del presente trabajo fin de máster.

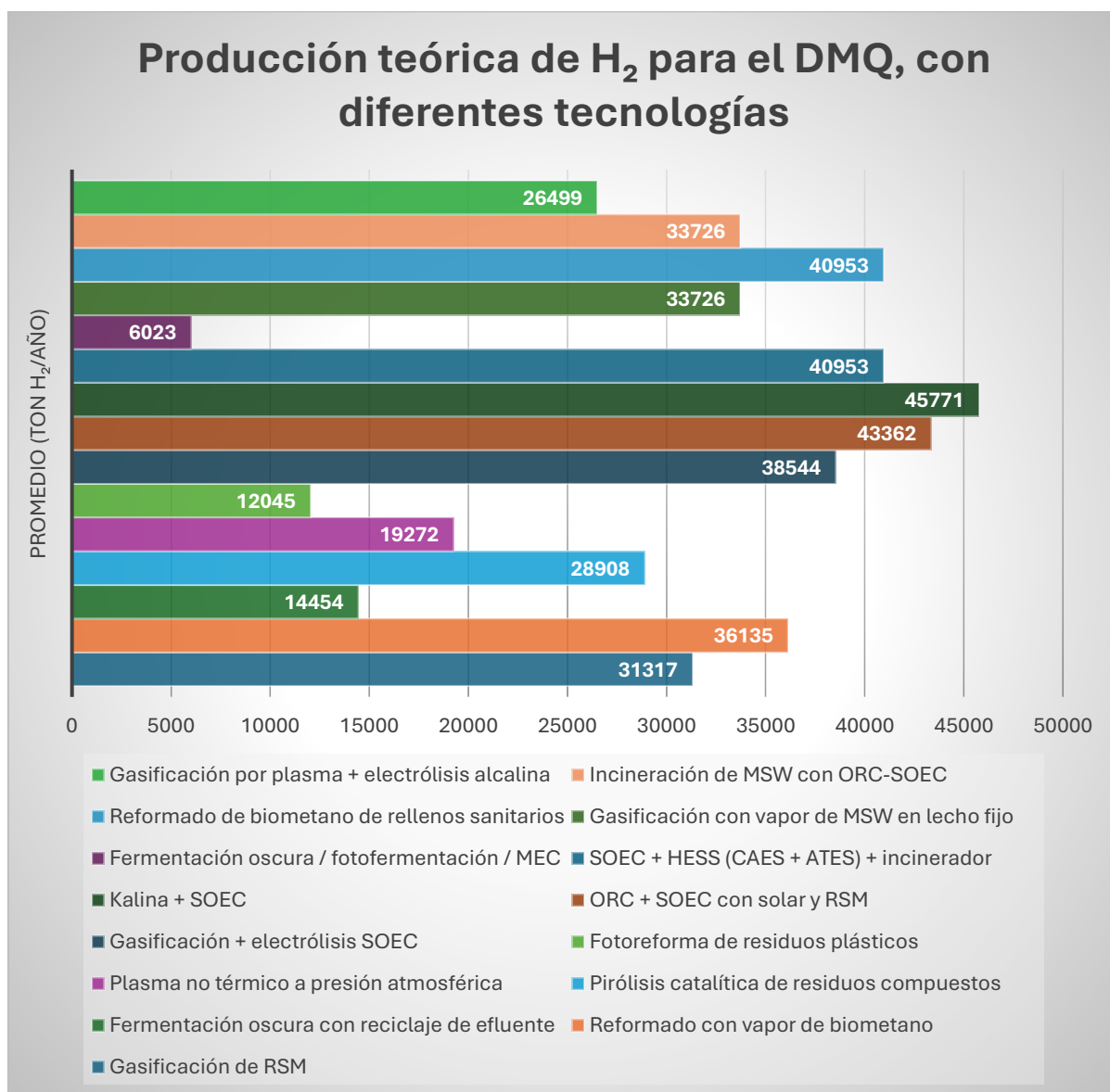


Figura 3. Producción teórica de Hidrógeno para el DMQ

6.2. Selección del método más adecuado utilizando la metodología de juicio de expertos

A pesar de la pertinencia del estudio, la elección de la tecnología más adecuada requiere un análisis riguroso que considere no solo el grado de madurez tecnológica, sino también su viabilidad económica, impacto ambiental, compatibilidad con la infraestructura existente y nivel de aceptación social. Con este propósito, en esta investigación se plantearon dos metodologías de análisis:

- 1) Juicio de Expertos a través de encuestas realizadas en la ciudad de Quito.
- 2) Una matriz de evaluación multicriterio, basada en el modelo de Evaluación de impactos ambientales de Conesa Fernández (Redin Juan Diego, 2019; Viracacha Murcia, 2025)

Percepción de expertos sobre tecnologías para la producción de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ.

Con el objetivo de fortalecer la selección de la tecnología más adecuada para la producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), se diseñó una encuesta dirigida a personas con experiencia comprobada en gestión de residuos y energías renovables. La encuesta (Tabla 13) se distribuyó a través de los grupos técnicos “Clima Red Ecuador” y “Actores de la Economía Circular en Ecuador”, alcanzando un total de 934 personas. No obstante, para asegurar la validez técnica de los resultados, se consideraron únicamente las respuestas de quienes confirmaron tener experiencia en el tema específico del hidrógeno verde.

Para la consulta se utilizó la Tabla 7 de referencia de las metodologías analizadas con su respectivo grado de madurez que se presentó en el capítulo 5 numeral 5.5.

A continuación, se presenta el análisis cualitativo y cuantitativo de las respuestas obtenidas, las cuales aportan criterios clave sobre la madurez tecnológica, viabilidad técnica, desafíos económicos, impacto ambiental y percepción social y política de las distintas rutas tecnológicas analizadas previamente. Los resultados permiten comprender la visión del sector experto sobre qué tecnologías podrían adaptarse mejor a las condiciones actuales y futuras del DMQ.

Encuesta

La encuesta planteada se diseñó con criterios genéricos y preguntas específicas dentro de estos criterios, utilizando preguntas abiertas y cerradas (Tabla 9).

Tabla 10. Criterios y preguntas de la encuesta realizada.

Criterio Genérico	Pregunta	Tipo
FORMACIÓN Y EXPERIENCIA PROFESIONAL	¿Cuál es su formación académica relacionada con la gestión de residuos y/o energías renovables?	abierta
	¿Ha participado en proyectos de investigación, valorización o gestión de RSU?	Cerrada

Criterio Genérico	Pregunta	Tipo
	¿Cuántos años de experiencia tiene en proyectos relacionados con la valorización, gestión o aprovechamiento de residuos?	Cerrada
	¿Con qué tecnologías está familiarizado en el contexto de la producción de hidrógeno verde a partir de RSU? (Seleccione todas las que apliquen)	Abierta
	Por favor, indique la institución, organización, empresa o entidad en la que ha trabajado en la valorización, gestión o aprovechamiento de residuos.	Abierta
ASPECTOS TÉCNICOS	¿Cuál considera que es la tecnología directa más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	Cerrada
	¿Cuál considera que es la tecnología indirecta más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	Cerrada
	¿Cuál considera que es la tecnología combinada más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	Cerrada
	¿Qué porcentaje de la fracción orgánica de los RSU en el DMQ estima que es aprovechable para la producción de hidrógeno verde?	Cerrada
	¿Qué nivel de madurez tecnológica atribuye a los procesos de producción de hidrógeno verde a partir de RSU?	Cerrada
ASPECTOS ECONÓMICOS	¿Cuál considera que es el principal desafío económico para implementar proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	Cerrada
	¿Qué modelo de financiamiento cree más adecuado para estos proyectos?	Cerrada
ASPECTOS AMBIENTALES	¿Qué impacto ambiental positivo considera más significativo al producir hidrógeno verde a partir de RSU?	Cerrada
	¿Cuál es el principal riesgo ambiental asociado a estos procesos?	Cerrada

Criterio Genérico	Pregunta	Tipo
	Desde el punto de vista energético, cree que el Hidrógeno verde a partir de residuos puede ser una opción para diversificar la matriz energética del Ecuador	Cerrada
ASPECTOS SOCIALES Y DE GOBERNANZA	¿Qué nivel de aceptación social anticipa para proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	Cerrada
	¿Qué barrera institucional considera más significativa para la implementación de estos proyectos?	Cerrada
	¿Qué estrategia considera más efectiva para fomentar la implementación de proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	Cerrada
	Si desea dejarnos otro comentario, lo recibiremos con gusto.	

Al tratarse de una encuesta anonimizada, no se requirió el nombre de los encuestados, sin embargo, una última pregunta solicitaba a los mismos autorización para el uso de los datos obtenidos.

Resultados obtenidos en la encuesta

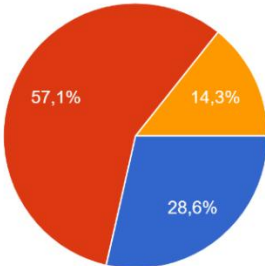
De las 934 personas encuestadas, se validaron 7 respuestas provenientes de profesionales con más de cinco años de experiencia en proyectos relacionados con RSU y energías renovables, lo que equivale a un 0.75 % de expertos válidos. La muestra incluye perfiles de ingenierías, ciencias ambientales y ciencias sociales, con vinculación a entidades clave como la EMGIRS EP, UISEK, Industrias ALES, Municipio de Quito, entre otros.

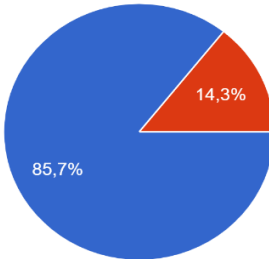
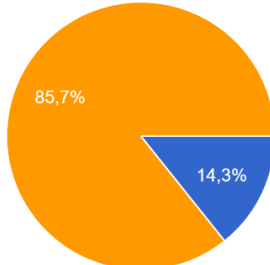
Los resultados muestran una clara preferencia por tecnologías directas y combinadas basadas en gasificación de residuos, destacando la gasificación de residuos sólidos municipales (RSU) como la alternativa más recomendada. Le siguen el reformado de biometano en rellenos sanitarios y la gasificación integrada con electrólisis (SOEC) como opciones combinadas. En tecnologías indirectas, destaca el reformado de biometano y el sistema de incineración con ORC-SOEC.

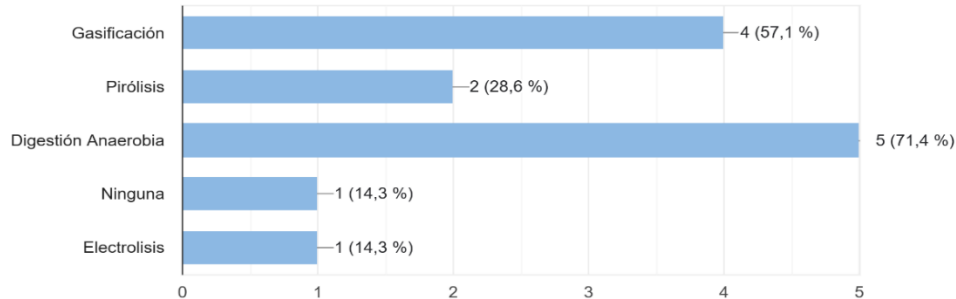
Respecto al aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos, la mayoría de los expertos estima un potencial entre el 40 % y el 60 %. Las principales barreras identificadas fueron los altos costos operativos, la escasa capacitación técnica en el sector público y la falta de políticas públicas específicas. Asimismo, se advierte sobre el riesgo de generar incentivos perversos que perpetúen la generación de residuos, en caso de que no se prioricen adecuadamente las estrategias de reducción, reutilización y reciclaje.

En la tabla 10 se reportan los datos obtenidos con las gráficas proporcionadas por el GOOGLE FORMS, herramienta con la que se realizó la encuesta.

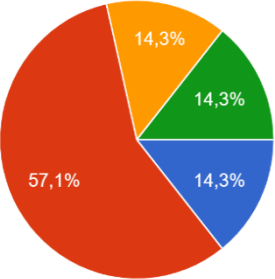
Tabla 11. Resultados de la encuesta a expertos

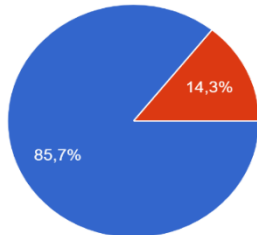
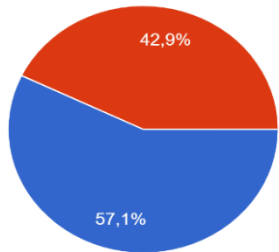
Criterio Genérico	Pregunta	Resultado										
FORMACIÓN Y EXPERIENCIA PROFESIONAL	¿Cuál es su formación académica relacionada con la gestión de residuos y/o energías renovables?	¿Cuál es su formación académica relacionada con la gestión de residuos o energías renovables? 7 respuestas  Ciencias Ambientales Ingenierías Ciencias Sociales Otro <table><tr><th>Categoría</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Ingenierías</td><td>57,1%</td></tr><tr><td>Ciencias Ambientales</td><td>28,6%</td></tr><tr><td>Ciencias Sociales</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Otro</td><td>0%</td></tr></table>	Categoría	Porcentaje	Ingenierías	57,1%	Ciencias Ambientales	28,6%	Ciencias Sociales	14,3%	Otro	0%
Categoría	Porcentaje											
Ingenierías	57,1%											
Ciencias Ambientales	28,6%											
Ciencias Sociales	14,3%											
Otro	0%											

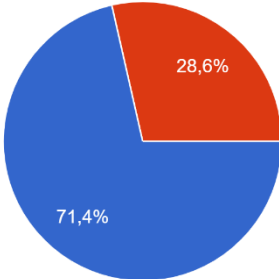
Criterio Genérico	Pregunta	Resultado						
	¿Ha participado en proyectos de investigación, valorización o gestión de RSU?	¿Ha participado en proyectos de investigación, valorización o gestión de RSU? 7 respuestas  ● Si ● No <table><thead><tr><th>Respuesta</th><th>Porcentaje</th></tr></thead><tbody><tr><td>Si</td><td>85,7%</td></tr><tr><td>No</td><td>14,3%</td></tr></tbody></table>	Respuesta	Porcentaje	Si	85,7%	No	14,3%
	Respuesta	Porcentaje						
Si	85,7%							
No	14,3%							
	¿Cuántos años de experiencia tiene en proyectos relacionados con la valorización, gestión o aprovechamiento de residuos?	¿Cuántos años de experiencia tiene en proyectos relacionados con la valorización, gestión o aprovechamiento de residuos? 7 respuestas  ● Menos de 2 años ● Entre 2 y 5 años ● Más de 5 años <table><thead><tr><th>Experiencia</th><th>Porcentaje</th></tr></thead><tbody><tr><td>Menos de 2 años</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Más de 5 años</td><td>85,7%</td></tr></tbody></table>	Experiencia	Porcentaje	Menos de 2 años	14,3%	Más de 5 años	85,7%
Experiencia	Porcentaje							
Menos de 2 años	14,3%							
Más de 5 años	85,7%							

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado																		
	¿Con qué tecnologías está familiarizado en el contexto de la producción de hidrógeno verde a partir de RSU? (Seleccione todas las que apliquen)	¿Con qué tecnologías está familiarizado en el contexto de la producción de hidrógeno verde a partir de RSU? (Seleccione todas las que apliquen) 7 respuestas  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tecnología</th> <th>Respuestas</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gasificación</td> <td>4</td> <td>57,1 %</td> </tr> <tr> <td>Pirólisis</td> <td>2</td> <td>28,6 %</td> </tr> <tr> <td>Digestión Anaerobia</td> <td>5</td> <td>71,4 %</td> </tr> <tr> <td>Ninguna</td> <td>1</td> <td>14,3 %</td> </tr> <tr> <td>Electrolisis</td> <td>1</td> <td>14,3 %</td> </tr> </tbody> </table>	Tecnología	Respuestas	Porcentaje	Gasificación	4	57,1 %	Pirólisis	2	28,6 %	Digestión Anaerobia	5	71,4 %	Ninguna	1	14,3 %	Electrolisis	1	14,3 %
Tecnología	Respuestas	Porcentaje																		
Gasificación	4	57,1 %																		
Pirólisis	2	28,6 %																		
Digestión Anaerobia	5	71,4 %																		
Ninguna	1	14,3 %																		
Electrolisis	1	14,3 %																		
	Por favor, indique la institución, organización, empresa o entidad en la que ha trabajado en la valorización, gestión o aprovechamiento de residuos.	EMGIRS EP - Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Quito Municipio de Quito Industrias ALES C.A. Secretaría de Ambiente Empresa Pública de Gestión de Residuos Sólidos de Quito RTI Internacional UISEK, UTE, UCE, entre otras																		

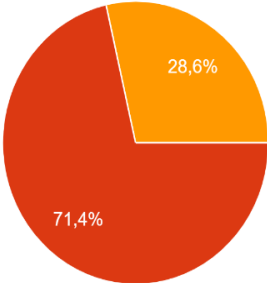
Criterio Genérico	Pregunta	Resultado										
ASPECTOS TÉCNICOS	¿Cuál considera que es la tecnología directa más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	¿Cuál considera que es la tecnología directa más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ? 7 respuestas <table><tr><th>Tecnología</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Gasificación de residuos sólidos municipales (RSM)</td><td>57,1%</td></tr><tr><td>Fermentación oscura con reciclaje de...</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Pirólisis catalítica de residuos compue...</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Ciclo Rankine Orgánico (ORC) + SOE...</td><td>14,3%</td></tr></table> - Gasificación de residuos sólidos municipales (RSM) - Fermentación oscura con reciclaje de... - Pirólisis catalítica de residuos compue... - Plasma no térmico a presión atmosférica - Fotoreforma de residuos plásticos - Ciclo Rankine Orgánico (ORC) + SOE... - Kalina + Electrólisis de alta temperatura - Fermentación oscura / fotofermentación - Gasificación con vapor de MSW en le...	Tecnología	Porcentaje	Gasificación de residuos sólidos municipales (RSM)	57,1%	Fermentación oscura con reciclaje de...	14,3%	Pirólisis catalítica de residuos compue...	14,3%	Ciclo Rankine Orgánico (ORC) + SOE...	14,3%
Tecnología	Porcentaje											
Gasificación de residuos sólidos municipales (RSM)	57,1%											
Fermentación oscura con reciclaje de...	14,3%											
Pirólisis catalítica de residuos compue...	14,3%											
Ciclo Rankine Orgánico (ORC) + SOE...	14,3%											

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado
	¿Cuál considera que es la tecnología indirecta más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	¿Cuál considera que es la tecnología indirecta más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ? 7 respuestas  - SOEC + HESS (CAES + ATEs) integrado con incinerador - Reformado de biometano de rellenos sanitarios - Producción de H₂ mediante incineración de MSW con sistema ORC-SOEC - Gasificación por plasma integrada con electrólisis alcalina

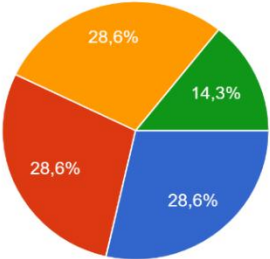
Criterio Genérico	Pregunta	Resultado
	¿Cuál considera que es la tecnología combinada más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	¿Cuál considera que es la tecnología combinada más adecuada para producir hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ? 7 respuestas  - Gasificación de RSM integrada con electrólisis - Reformado con vapor de biometano
	¿Qué porcentaje de la fracción orgánica de los RSU en el DMQ estima que es aprovechable para la producción de hidrógeno verde?	¿Qué porcentaje de la fracción orgánica de los RSU en el DMQ estima que es aprovechable para la producción de hidrógeno verde? 7 respuestas  - Menos del 40 % - Entre 40 y el 60 % - Entre 60 y el 80 % - Más del 80 %

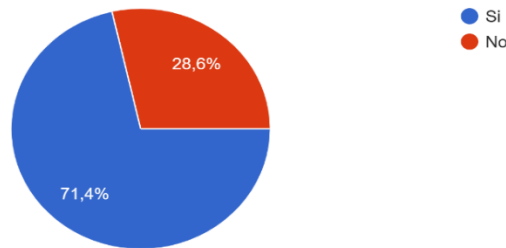
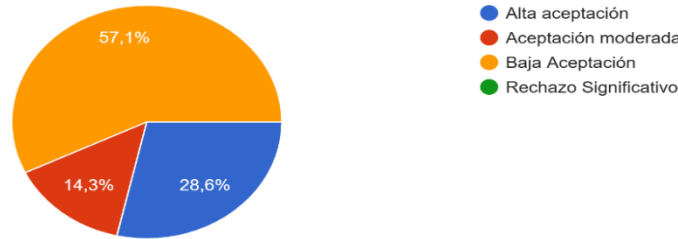
Criterio Genérico	Pregunta	Resultado										
	¿Qué nivel de madurez tecnológica atribuye a los procesos de producción de hidrógeno verde a partir de RSU?	¿Qué nivel de madurez tecnológica atribuye a los procesos de producción de hidrógeno verde a partir de RSU? 7 respuestas  Tecnologías en Etapa experimental Tecnologías en Desarrollo con pruebas piloto Tecnologías maduras, listas para implementación Tecnologías obsoletas <table><tr><th>Nivel de madurez</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Tecnologías en Etapa experimental</td><td>71,4%</td></tr><tr><td>Tecnologías en Desarrollo con pruebas piloto</td><td>28,6%</td></tr><tr><td>Tecnologías maduras, listas para implementación</td><td>0%</td></tr><tr><td>Tecnologías obsoletas</td><td>0%</td></tr></table>	Nivel de madurez	Porcentaje	Tecnologías en Etapa experimental	71,4%	Tecnologías en Desarrollo con pruebas piloto	28,6%	Tecnologías maduras, listas para implementación	0%	Tecnologías obsoletas	0%
Nivel de madurez	Porcentaje											
Tecnologías en Etapa experimental	71,4%											
Tecnologías en Desarrollo con pruebas piloto	28,6%											
Tecnologías maduras, listas para implementación	0%											
Tecnologías obsoletas	0%											

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado														
ASPECTOS ECONÓMICOS	¿Cuál considera que es el principal desafío económico para implementar proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	¿Cuál considera que es el principal desafío económico para implementar proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ? 7 respuestas <table><tr><th>Desafío</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Altos costos de inversión inicial</td><td>28,6%</td></tr><tr><td>Falta de incentivos gubernamentales</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Costos operativos y de mantenimiento elevados</td><td>28,6%</td></tr><tr><td>Mercado limitado para el hidrógeno verde</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Considerando que es necesario que el enfoque de ciudad sea a la reducción...</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Todas las anteriores y varias más. Falta de capacidad técnica y política por ej</td><td>14,3%</td></tr></table>	Desafío	Porcentaje	Altos costos de inversión inicial	28,6%	Falta de incentivos gubernamentales	14,3%	Costos operativos y de mantenimiento elevados	28,6%	Mercado limitado para el hidrógeno verde	14,3%	Considerando que es necesario que el enfoque de ciudad sea a la reducción...	14,3%	Todas las anteriores y varias más. Falta de capacidad técnica y política por ej	14,3%
Desafío	Porcentaje															
Altos costos de inversión inicial	28,6%															
Falta de incentivos gubernamentales	14,3%															
Costos operativos y de mantenimiento elevados	28,6%															
Mercado limitado para el hidrógeno verde	14,3%															
Considerando que es necesario que el enfoque de ciudad sea a la reducción...	14,3%															
Todas las anteriores y varias más. Falta de capacidad técnica y política por ej	14,3%															

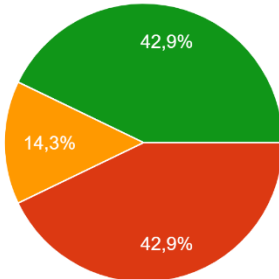
Criterio Genérico	Pregunta	Resultado						
	¿Qué modelo de financiamiento cree más adecuado para estos proyectos?	¿Qué modelo de financiamiento cree más adecuado para estos proyectos? 7 respuestas  Inversión Pública Alianzas público-privadas Inversión privada con subsidios Cooperación internacional y donaciones <table><tr><th>Modelo de financiamiento</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Alianzas público-privadas</td><td>71,4%</td></tr><tr><td>Inversión privada con subsidios</td><td>28,6%</td></tr></table>	Modelo de financiamiento	Porcentaje	Alianzas público-privadas	71,4%	Inversión privada con subsidios	28,6%
Modelo de financiamiento	Porcentaje							
Alianzas público-privadas	71,4%							
Inversión privada con subsidios	28,6%							

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado								
ASPECTOS AMBIENTALES	¿Qué impacto ambiental positivo considera más significativo al producir hidrógeno verde a partir de RSU?	¿Qué impacto ambiental positivo considera más significativo al producir hidrógeno verde a partir de RSU? 7 respuestas <table><tr><th>Impacto Ambiental</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Producción de energía Limpia y Renovable</td><td>57,1%</td></tr><tr><td>Reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero</td><td>28,6%</td></tr><tr><td>Disminución del volumen de residuos en vertederos</td><td>14,3%</td></tr></table> - Reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero - Disminución del volumen de residuos en vertederos - Producción de energía Limpia y Renovable - Reducción de la contaminación de agua y suelo	Impacto Ambiental	Porcentaje	Producción de energía Limpia y Renovable	57,1%	Reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero	28,6%	Disminución del volumen de residuos en vertederos	14,3%
Impacto Ambiental	Porcentaje									
Producción de energía Limpia y Renovable	57,1%									
Reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero	28,6%									
Disminución del volumen de residuos en vertederos	14,3%									

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado
	¿Cuál es el principal riesgo ambiental asociado a estos procesos?	¿Cuál es el principal riesgo ambiental asociado a estos procesos? 7 respuestas  Emisiones contaminantes durante la conversión Manejo inadecuado de residuos peligrosos Consumo excesivo de agua Generación de subproductos tóxicos

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado										
	Desde el punto de vista energético, cree que el Hidrógeno verde a partir de residuos puede ser una opción para diversificar la matriz energética del Ecuador	Desde el punto de vista energético, cree que el Hidrógeno verde a partir de residuos puede ser una opción para diversificar la matriz energética del Ecuador 7 respuestas  <table><tr><th>Respuesta</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Si</td><td>71,4%</td></tr><tr><td>No</td><td>28,6%</td></tr></table>	Respuesta	Porcentaje	Si	71,4%	No	28,6%				
Respuesta	Porcentaje											
Si	71,4%											
No	28,6%											
ASPECTOS SOCIALES Y DE GOBERNANZA	¿Qué nivel de aceptación social anticipa para proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	¿Qué nivel de aceptación social anticipa para proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ? 7 respuestas  <table><tr><th>Nivel de Aceptación</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Alta aceptación</td><td>28,6%</td></tr><tr><td>Aceptación moderada</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Baja Aceptación</td><td>57,1%</td></tr><tr><td>Rechazo Significativo</td><td>0%</td></tr></table>	Nivel de Aceptación	Porcentaje	Alta aceptación	28,6%	Aceptación moderada	14,3%	Baja Aceptación	57,1%	Rechazo Significativo	0%
Nivel de Aceptación	Porcentaje											
Alta aceptación	28,6%											
Aceptación moderada	14,3%											
Baja Aceptación	57,1%											
Rechazo Significativo	0%											

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado										
	¿Qué barrera institucional considera más significativa para la implementación de estos proyectos?	¿Qué barrera institucional considera más significativa para la implementación de estos proyectos? 7 respuestas <table border="1"> <thead> <tr> <th>Barrera</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Escasa capacitación técnica en el sector público</td> <td>57,1%</td> </tr> <tr> <td>Limitaciones Legales y normativas</td> <td>14,3%</td> </tr> <tr> <td>Falta de políticas públicas específicas</td> <td>14,3%</td> </tr> <tr> <td>Debil coordinación interinstitucional</td> <td>14,3%</td> </tr> </tbody> </table>	Barrera	Porcentaje	Escasa capacitación técnica en el sector público	57,1%	Limitaciones Legales y normativas	14,3%	Falta de políticas públicas específicas	14,3%	Debil coordinación interinstitucional	14,3%
Barrera	Porcentaje											
Escasa capacitación técnica en el sector público	57,1%											
Limitaciones Legales y normativas	14,3%											
Falta de políticas públicas específicas	14,3%											
Debil coordinación interinstitucional	14,3%											

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado										
	¿Qué estrategia considera más efectiva para fomentar la implementación de proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ?	¿Qué estrategia considera más efectiva para fomentar la implementación de proyectos de hidrógeno verde a partir de RSU en el DMQ? 7 respuestas  <table><tr><th>Estrategia</th><th>Porcentaje</th></tr><tr><td>Campañas de concienciación ciudadana</td><td>0%</td></tr><tr><td>Incentivos Fiscales y Económicos</td><td>42,9%</td></tr><tr><td>Desarrollo de marcos regulatorios claros</td><td>14,3%</td></tr><tr><td>Alianzas con instituciones académicas y de investigación</td><td>42,9%</td></tr></table>	Estrategia	Porcentaje	Campañas de concienciación ciudadana	0%	Incentivos Fiscales y Económicos	42,9%	Desarrollo de marcos regulatorios claros	14,3%	Alianzas con instituciones académicas y de investigación	42,9%
	Estrategia	Porcentaje										
Campañas de concienciación ciudadana	0%											
Incentivos Fiscales y Económicos	42,9%											
Desarrollo de marcos regulatorios claros	14,3%											
Alianzas con instituciones académicas y de investigación	42,9%											
Si desea dejarnos otro comentario, lo recibiremos con gusto.	Actualmente en el DMQ, lo que llega al relleno sanitario es: es 51% de Orgánicos y el 49% de inorgánicos, tomando en cuenta una baja separación en la fuente y dentro de los inorgánicos se tienen algunos residuos peligrosos domiciliarios como pilas y medicinas caducadas. Suerte en la tesis. Se deberá convencer a las autoridades, las ventajas de producir y consumir el Hidrógeno verde como un combustible alternativo y promulgar su uso a nivel industrial primero. Proyectos como el planteado, hasta que no tengan un suficiente período de pruebas que demuestren su viabilidad técnica, económica, financiera, ambiental y social, se convierten simplemente en muy buenas ideas, además, si hablamos de combustibles alternativos, habría que compararlos con los provenientes del petróleo, tomando en											

Criterio Genérico	Pregunta	Resultado
		cuenta que el país es productor de petróleo. Promover la producción de hidrógeno verde a partir de residuos puede generar un incentivo perverso, lo que llevaría a mantener altos niveles de generación de basura para alimentar la tecnología. Esto claro este si no se regula adecuadamente, tema no menor considerando como se implementa las cosas en Ecuador, adicional esta práctica podría frenar la transición hacia una economía verdaderamente circular. Es crucial que se priorice la reducción y reutilización, evidenciando con toda la claridad técnica de que la valorización energética no es la primera opción.

Análisis de los resultados obtenidos de la encuesta

La encuesta fue enviada a un total de 934 personas pertenecientes a redes especializadas en hidrógeno verde y economía circular en Ecuador, de las cuales solo 7 respuestas fueron válidas y utilizadas en el análisis. Esta baja tasa de respuesta (aproximadamente 0,75%) plantea importantes reflexiones sobre la validez estadística y el uso de estos datos en la investigación.

En lo que respecta a la Representatividad y validez estadística, el tamaño muestral es insuficiente para realizar generalizaciones confiables con un nivel de confianza y margen de error aceptables. Para tener representatividad estadística con un margen de error del 5% y un 95% de confianza, se requeriría una muestra de al menos 270 personas (asumiendo una población de 934). Por tanto, los resultados no pueden considerarse representativos del total de expertos en el país. Esto se debe probablemente a que esta tecnología es incipiente en el Ecuador, sin experiencias previas y por lo tanto con escasos expertos en el tema. Ampliar la población no tendría mayor influencia en los resultados, por la limitada afinidad o conocimiento sobre el tema específico de tecnologías de hidrógeno a partir de residuos.

A pesar de la baja participación, la información proporcionada por los 7 encuestados puede ser valiosa desde una perspectiva cualitativa. Se trata de personas con experiencia directa en proyectos relacionados con hidrógeno verde y residuos sólidos, por lo que sus percepciones permiten identificar criterios técnicos, sociales y ambientales relevantes en la selección de tecnologías, ayudando a validar o complementar los criterios utilizados en el análisis multicriterio que sigue.

Aunque los datos no son estadísticamente robustos, permitirán apoyar la selección o priorización de criterios en el análisis multicriterio de la matriz para el cálculo de desempeño global de las tecnologías estudiadas; adicionalmente, son un insumo cualitativo para discutir percepciones de viabilidad de tecnologías, y son criterios presentados de forma transparente para las metodologías, explicando sus limitaciones y su valor complementario.

Conclusiones de la encuesta

- La gasificación predomina como tecnología clave entre los encuestados, la gasificación de RSU es percibida como la opción más robusta y madura en el contexto del DMQ, siendo mencionada por todos los encuestados como una alternativa viable, tanto de forma directa como combinada con electrólisis.
- Las tecnologías combinadas como gasificación + SOEC permiten integrar aprovechamientos térmicos y eléctricos, ofreciendo flexibilidad frente a la variabilidad de los RSU y la escasa infraestructura local disponible.
- Todos los expertos coincidieron en que la implementación de estas tecnologías requiere alianzas público-privadas, subsidios específicos y un marco regulatorio claro que garantice sostenibilidad económica y ambiental.
- Aunque se valora la reducción de emisiones y la generación de energía limpia como beneficios clave, también se identifican riesgos asociados a la generación de subproductos tóxicos, emisiones contaminantes y uso intensivo de agua, lo cual, en las actuales condiciones ambientales, no solo del DMQ sino del Ecuador, son por decir lo menos, trascendentales.
- Predomina la percepción de baja a moderada aceptación social, lo que indica la necesidad de campañas de educación, participación ciudadana y transparencia en la toma de decisiones.
- Los expertos recomiendan que cualquier implementación de tecnologías de hidrógeno verde desde RSU esté alineada con los principios de economía circular, evitando enfoques que perpetúen la lógica de “más residuos, más energía”.

Matriz de evaluación multicriterio

La primera herramienta para la evaluación de la mejor tecnología de obtención de hidrógeno verde del DMQ que se desarrolló, consiste en una metodología de evaluación multicriterio para la selección de tecnologías de producción de hidrógeno verde a partir de residuos, adaptada del modelo de evaluación de impactos propuesto por Conesa Fernández (Redin Juan Diego, 2019). Con los datos de la caracterización de los residuos sólidos en Quito y de una revisión detallada de tecnologías emergentes y en desarrollo, se construyó una matriz de evaluación que permite comparar diversas alternativas bajo un enfoque integral. Esta herramienta contribuirá a la toma de decisiones informadas con base en datos técnicos, pudiendo también ser replicada para la evaluación de otras tecnologías de aprovechamiento de residuos en contextos urbanos similares. Las tecnologías evaluadas a través de esta matriz fueron las establecidas en el apartado 5.5 del presente trabajo fin de máster: Nivel de Madurez tecnológica

Matriz de Evaluación de Tecnologías para Hidrógeno Verde

Para seleccionar la alternativa tecnológica más adecuada para la producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos municipales (RSU) en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), se diseñó una matriz de evaluación multicriterio (EMC) que integra criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, adaptada de la matriz de evaluación de impactos ambientales de Conesa Fernández, descrita por Redin y Coral (2019). El diseño, aunque sencillo, permite una comparación sistemática, objetiva y transparente entre distintas opciones tecnológicas, considerando múltiples dimensiones del desarrollo sostenible.(García, 2023; PNUD, 2023)

Para la evaluación se utilizaron los métodos previamente identificados con sus respectivas rutas tecnológicas relevantes, seleccionadas en función de su aplicabilidad en el contexto local, madurez tecnológica y disponibilidad de recursos. Las alternativas evaluadas incluyeron las enunciadas en la Tabla 7 del apartado 5.5 del presente trabajo fin de máster.

La matriz de evaluación multicriterio fue desarrollada considerando siete variables clave, cada una evaluada en una escala de 1 a 4, con el objetivo de facilitar su aplicación en el contexto nacional. La elección de las siete variables propuestas para la matriz de evaluación de tecnologías de producción de hidrógeno verde responde a su relevancia estratégica, operativa y contextual, especialmente en países en desarrollo como Ecuador. La evaluación comparativa de tecnologías energéticas en contextos reales suele enfrentar limitaciones de datos técnicos y económicos consistentes, especialmente para tecnologías no comerciales. En estos casos, la aplicación de métodos multicriterio con variables cualitativas o semicuantitativas permite mantener el rigor comparativo sin exigir información que no está disponible o es muy específica del contexto.(Romero & Linares, 2021)

Las variables seleccionadas permiten evaluar los tres pilares del desarrollo sostenible, (Estévez et al., 2021; IEA, 2022; IRENA, 2020)más la variable técnica propia del presente trabajo fin de máster.

A continuación, en la tabla 11 se describe la justificación para la elección de estas variables.

Tabla 12. Criterio de selección de las variables utilizadas

Variable	Justificación	Referencias	Dimensión
Madurez Tecnológica (TRL)	Permite evaluar el grado de desarrollo y despliegue de una tecnología. Facilita comparar soluciones emergentes y comerciales.	(IEA, 2023; IEA, 2022; Rosati et al., 2022; RWE, 2025b)	Tecnológica
Aprovechamiento de Residuos Locales (ARL)	Promueve la economía circular, reduce costos logísticos y minimiza impactos ambientales asociados a la disposición de residuos.	(Lopez et al., 2022; Zabaniotou & Kamaterou, 2019)	Ambiental
Impacto Ambiental (IA)	Evalúa la contribución a la sostenibilidad ambiental mediante el análisis de ciclo de vida y reducción de emisiones.	(ISO, 2006; Reiter & Lindorfer, 2015)	Ambiental
Viabilidad Económica (VE)	Permite valorar la relación costo-beneficio sin necesidad de cifras exactas, facilitando la priorización tecnológica.	(IRENA, 2020)	Económica
Compatibilidad con Infraestructura Existente (CIE)	Evalúa los requerimientos de adaptación o construcción de infraestructura para la implementación tecnológica.	(Dincer & Acar, 2015; Hydrogen Council, 2021)	Tecnológica
Generación de Empleo Local (EL)	Mide el potencial de dinamización económica y fortalecimiento de capacidades locales mediante la generación de empleo.	(De Sisternes & Jackson, 2020; IRENA, 2020)	Económica

Variable	Justificación	Referencias	Dimensión
Aceptación Social y Política (SP)	Esencial para la implementación efectiva de tecnologías, considerando percepciones, seguridad y apoyo institucional.	(Sovacool & Lakshmi Ratan, 2012; Wüstenhagen et al., 2007)	Social

Estas variables permiten realizar una evaluación comparativa cualitativa o semicuantitativa entre alternativas tecnológicas, incluso con información limitada o heterogénea, a diferencia de otras variables que pueden ser más difíciles de medir o demasiado específicas, como: (Kumar et al., 2017)

- Eficiencia energética específica (%): aunque útil, varía ampliamente según las condiciones operativas, escalas y procesos integrados.
- Tiempo de retorno de inversión: requiere datos precisos de Gastos de capital y operacional, que no siempre están disponibles.
- Escalabilidad industrial: ya está implícita en el TRL y la compatibilidad con infraestructura.

Estas variables fueron elegidas por ser:

- Relevantes, contrastables y medibles
- Suficientemente amplias para adaptarse a diversos tipos de tecnologías
- Específicas para el contexto de aplicación (residuos, territorio, desarrollo sostenible)
- Avaladas por literatura técnica y marcos de decisión reconocidos

Esta herramienta permite calificar y comparar distintas tecnologías de producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos municipales, considerando aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales, donde cada variable seleccionada representa una dimensión distinta. Las variables seleccionadas abarcan dimensiones técnicas, ambientales, económicas y sociales, detalladas de la siguiente forma:

1. Madurez Tecnológica (TRL)

- 1: $TRL \leq 3$ (Investigación básica)
- 2: TRL 4–5 (Validación en laboratorio)
- 3: TRL 6–7 (Demostración en entorno relevante)
- 4: $TRL \geq 8$ (Implementación comercial)

2. Aprovechamiento de Residuos Locales (ARL)

- 1: No utiliza residuos locales
- 2: Uso limitado de residuos locales
- 3: Uso significativo de residuos locales
- 4: Uso óptimo de residuos locales (e.g., orgánicos, plásticos)

3. Impacto Ambiental (IA)

- 1: Alto impacto negativo
- 2: Moderado impacto negativo
- 3: Bajo impacto negativo
- 4: Impacto positivo (e.g., reducción de emisiones)

4. Viabilidad Económica (VE)

- 1: Costos muy altos, sin retorno claro
- 2: Costos altos, retorno incierto
- 3: Costos moderados, retorno probable
- 4: Costos bajos, retorno claro y rápido

5. Compatibilidad con Infraestructura Existente (CIE)

- 1: Requiere infraestructura completamente nueva
- 2: Requiere modificaciones significativas
- 3: Requiere adaptaciones menores
- 4: Integración directa con infraestructura existente

6. Generación de Empleo Local (EL)

- 1: Generación mínima de empleo
- 2: Generación moderada de empleo
- 3: Generación significativa de empleo
- 4: Generación muy significativa de empleo local

7. Aceptación Social y Política (SP)

- 1: Baja aceptación, posibles resistencias
- 2: Aceptación moderada
- 3: Alta aceptación
- 4: Muy alta aceptación y apoyo institucional

Valoración de alternativas

Cada tecnología fue evaluada contra los siete criterios utilizando la escala de 1 a 4. Las calificaciones se asignaron en función de:

- Datos disponibles en la literatura científica y técnica reciente
- Estudios de caso y análisis de ciclo de vida
- Opiniones de expertos consultados en el marco de este estudio

Se asignó el mismo peso a todas las variables de evaluación.

Cálculo del índice de desempeño global

El resultado del cálculo de la matriz proporciona un índice de desempeño global (IDG) para cada alternativa tecnológica, permitiendo identificar de manera objetiva y sistemática la tecnología más adecuada para su implementación en el país, de acuerdo con las condiciones locales y los criterios establecidos.

Para cada alternativa, se sumaron los puntajes obtenidos en las siete variables, generando un Índice de Desempeño Global (IDG) con un valor máximo posible de 28 puntos. Este índice permite comparar de forma directa las alternativas y establecer un ranking relativo.

La Ecuación que se utilizó para el cálculo del IDG es:

$$IDG = TRL + ARL + IA + VE + CIE + EL + SP$$

Ecuación 3. Cálculo de IDG

Con base en la distribución de los resultados obtenidos, se definieron los siguientes rangos para interpretar el desempeño de las tecnologías evaluadas:

- A. **IDG de 26 a 28 puntos: Desempeño Muy Alto:** La tecnología presenta una alta viabilidad técnica, económica, ambiental y social.
- B. **IDG de 17 a 25 puntos: Desempeño Alto:** La alternativa es sólida y presenta ventajas significativas, aunque con algunas limitaciones menores.
- C. **IDG de 9 a 16 puntos: Desempeño Medio:** La tecnología tiene un desempeño aceptable, pero presenta limitaciones importantes en una o más variables.
- D. **IDG de 0 a 8 puntos: Desempeño Bajo:** La alternativa es poco viable o presenta debilidades significativas, no es recomendable bajo las condiciones evaluadas.

Esta metodología permitiría, opcionalmente, aplicar ponderaciones diferenciadas si se desearía priorizar ciertos criterios, dando mayor peso a una o más variables. Esto se pretendía con la consulta a expertos, aunque lamentablemente por los resultados obtenidos no se aplicó la ponderación. Queda como posibilidad para otro tipo de tecnologías donde se disponga de parámetros de evaluación que faciliten la ponderación, recomendándose realizar un estudio de sensibilidad si se va a usar una ecuación ponderada.

La alternativa con mayor puntaje fue considerada como la más adecuada para implementar en el contexto del DMQ.

5.1.1.1. Aplicación de la Matriz

Con base a la información recopilada en el Distrito Metropolitano de Quito, las visitas técnicas realizadas al Relleno Sanitario y a las estaciones de transferencia del DMQ, así como con la consulta a expertos, de manera especial a los docentes investigadores de residuos de la Universidad Internacional SEK, UISEK, se estableció la siguiente evaluación (Tabla 13):

[illegible]

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 5						
Plasma no térmico a presión atmosférica.						
2	2	2	2	1	3	1
13,00						
MEDIO						

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 10						
SOEC + HESS (CAES + ATES) integrado con incinerador						
2	2	1	1	1	3	1
11,00						
MEDIO						

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 11						
Fermentación oscura / fotofermentación / MEC						
2	2	2	2	3	1	3
15,00						
MEDIO						

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 12						
Gasificación con vapor de RSM en lecho fijo						
2	3	2	1	2	2	2
14,00						
MEDIO						

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 13						
Reformado de biometano de rellenos sanitarios						
3	3	4	3	2	2	2
19,00						
ALTO						

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 14						
Producción de H ₂ mediante incineración de RSM con sistema ORC-SOEC						
1	2	1	1	1	1	1
8,00						
BAJO						

TRL	ARL	IA	VE	CIE	EL	SP
TECNOLOGÍA EVALUADA 15						
Gasificación por plasma integrada con electrólisis alcalina						
2	2	1	1	1	2	1
10,00						
MEDIO						

Con la matriz de evaluación se obtuvieron los siguientes resultados ordenados de mayor a menor IDG.

7. RESULTADOS

7.1. Consulta a expertos

Los principales resultados de la encuesta a expertos se pueden resumir en las Figuras 4-6:

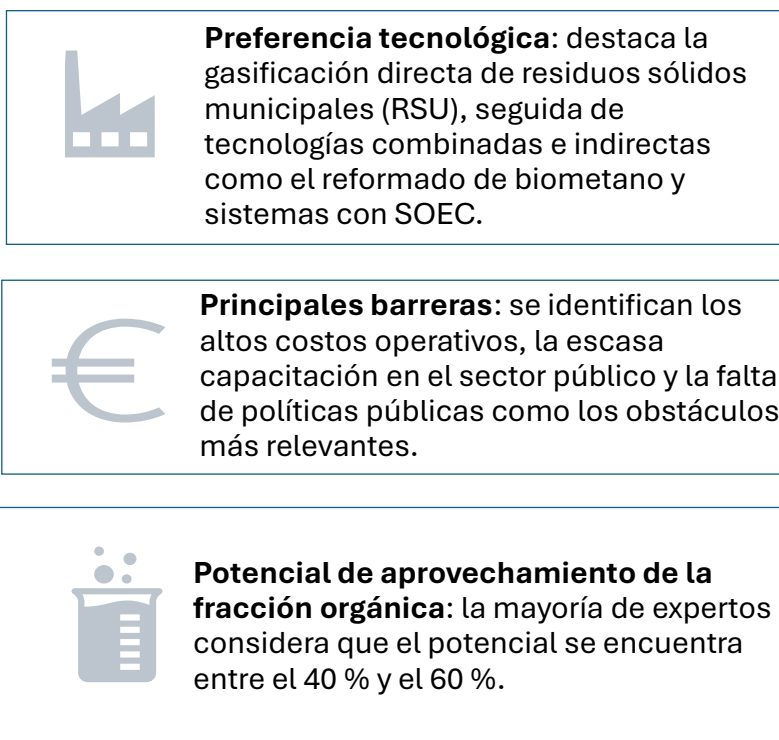


Figura 4. Tecnología preferida por expertos

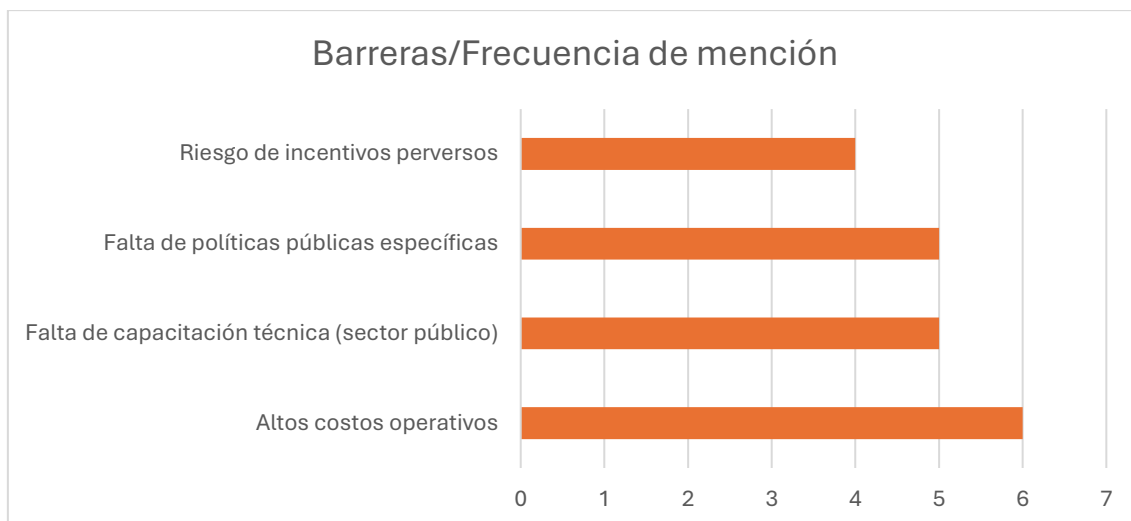


Figura 5. Barreras identificadas por los expertos

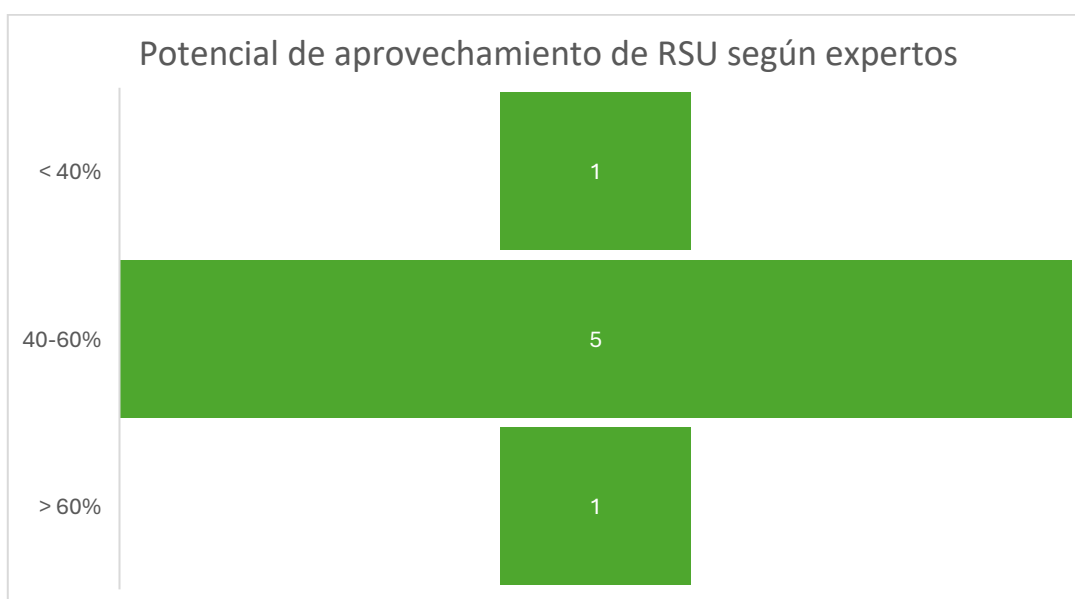


Figura 6. Potencial de aprovechamiento de RSU del DMQ identificado por los expertos en encuesta

Discusión

Los resultados de la encuesta reflejan percepciones valiosas de un grupo reducido, pero altamente especializado de expertos en gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) y energías renovables en Ecuador. A pesar del bajo porcentaje de respuestas válidas (0,75 % de un total de 934 personas encuestadas), la calidad de los perfiles consultados, vinculados a instituciones estratégicas como EMGIRS EP, UISEK, Industrias ALES y el Municipio de Quito, otorga relevancia técnica a los hallazgos.

Una de las principales observaciones es la preferencia por tecnologías directas y combinadas, particularmente aquellas basadas en gasificación de residuos sólidos

municipales. Esta opción fue identificada como la alternativa más viable, lo cual es coherente con su capacidad para transformar residuos en vectores energéticos de forma eficiente y con menor impacto ambiental cuando se aplican sistemas de control de emisiones. Las tecnologías combinadas, como la gasificación acoplada a electrólisis de alta temperatura (SOEC), también obtuvieron una valoración positiva, lo que evidencia un interés creciente en soluciones híbridas que optimicen el aprovechamiento energético de la biomasa residual.

En cuanto a las tecnologías indirectas, el reformado de biometano y la incineración con recuperación energética mediante ciclo ORC-SOEC fueron reconocidas, aunque con menor preferencia. Esto puede explicarse por las limitaciones que implican estos procesos, tanto por los riesgos asociados a las emisiones como por su dependencia de sistemas de captura y almacenamiento de carbono para ser compatibles con objetivos de sostenibilidad.

Respecto al potencial de aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos, la mayoría de los expertos (71 %) estima que se podría utilizar entre el 40 % y el 60 % de dicha fracción para la producción de hidrógeno u otros aprovechamientos energéticos. Esta percepción es consistente con estudios previos sobre la composición de los RSU en Ecuador, donde la materia orgánica representa el componente dominante. No obstante, alcanzar este potencial requiere una gestión diferenciada de los residuos y procesos adecuados de separación en la fuente.

En cuanto a las principales barreras identificadas, los expertos coinciden en señalar los altos costos operativos, la escasa capacitación técnica del sector público y la falta de políticas públicas específicas como los mayores desafíos para el desarrollo del hidrógeno verde en el país. Estos factores limitan no solo la implementación tecnológica, sino también la articulación institucional necesaria para una transición energética integral. Adicionalmente, se advierte sobre el riesgo de generar incentivos perversos, es decir, que una política de valorización energética de residuos podría desincentivar las acciones prioritarias de reducción, reutilización y reciclaje si no se enmarca adecuadamente en los principios de la economía circular.

Los resultados revelan una visión técnica orientada hacia soluciones avanzadas como la gasificación, pero también evidencian la necesidad urgente de fortalecer la gobernanza ambiental, las capacidades institucionales y los marcos regulatorios que permitan la implementación sostenible de estas tecnologías en el contexto ecuatoriano.

7.2. Matriz de evaluación multicriterio

Los resultados de la matriz de evaluación multicriterio (Tabla 13) indican que la mejor tecnología en las condiciones actuales del DMQ sitúan a la tecnología de Reformado de biometano de rellenos sanitarios con el mejor índice de desempeño con un valor de 19, seguida de la Gasificación de residuos sólidos municipales (RSU), esta última tecnología coincide con la percepción de los expertos encuestados que situaban a la Gasificación de residuos sólidos municipales (RSU) como la tecnología más adecuada por el DMQ. En el opuesto de la lista, se encuentran las tecnologías de Fotoreformado de residuos plásticos y Producción de H₂ mediante incineración de RSU con sistema ORC-SOEC.

Tabla 14. IDG de las tecnologías de mayor a menor

N°	Tecnología	IDG
13	Reformado de biometano de rellenos sanitarios	19
1	Gasificación de residuos sólidos municipales (RSU)	17
3	Fermentación oscura con reciclaje de efluente	17
2	Reformado con vapor de biometano	16
4	Pirólisis catalítico de residuos compuestos	16
7	Gasificación de RSU integrada con electrólisis	15
8	Ciclo Rankine Orgánico (ORC) + SOEC con solar y RSU	15
9	Kalina + Electrólisis de alta temperatura SOEC	15
11	Fermentación oscura / fotofermentación / MEC	15
12	Gasificación con vapor de MSW en lecho fijo	14
5	Plasma no térmico a presión atmosférica	13
10	SOEC + HESS (CAES + ATES) integrado con incinerador	11
15	Gasificación por plasma integrada con electrólisis alcalina	10
6	Fotoreformado de residuos plásticos	8
14	Producción de H ₂ mediante incineración de MSW con sistema ORC-SOEC	8

Discusión.

La evaluación multicriterio de las quince tecnologías consideradas para la producción de hidrógeno verde en el contexto ecuatoriano, y en especial con los RSU del DMQ, permitió establecer un ranking objetivo de alternativas, tomando en cuenta siete variables clave: grado de aprovechamiento de residuos locales, impacto ambiental, viabilidad económica,

compatibilidad con infraestructura existente, generación de empleo local y aceptación social y política. A partir de estas variables se calculó el Índice de Desempeño Global (IDG), con un valor máximo teórico de 28 puntos. Los resultados permiten categorizar las tecnologías según su viabilidad integral bajo condiciones locales.

De acuerdo con los valores obtenidos, ninguna tecnología alcanzó el rango de “Desempeño Muy Alto” (26–28 puntos). No obstante, se identificaron varias alternativas con desempeño alto (17–25 puntos), lo cual indica una sólida viabilidad técnica, económica y social, aunque con limitaciones específicas. En el primer lugar del ranking se posicionó el reformado de biometano generado en rellenos sanitarios, con un IDG de 19 puntos. Esta tecnología destaca por su capacidad de integrar residuos orgánicos urbanos con infraestructura existente en los rellenos, y su potencial de generación de hidrógeno con baja huella de carbono, especialmente si se combina con digestión anaerobia y captura de metano. Sin embargo, presenta desafíos económicos y de aceptación social, ya que el uso de biogás aún se percibe como una solución intermedia frente a opciones más limpias.

En segundo lugar, con 17 puntos, se ubicaron dos tecnologías: la gasificación de residuos sólidos municipales y la fermentación oscura con reciclaje de efluentes. La gasificación presenta ventajas en términos de aprovechamiento energético de residuos no reciclables, alta flexibilidad de insumos y generación de subproductos útiles como biochar. Además, es valorada positivamente en cuanto a su potencial de integración con infraestructura eléctrica. No obstante, enfrenta limitaciones en cuanto a costos de inversión inicial, requerimientos técnicos y percepción pública. Por su parte, la fermentación oscura representa una opción prometedora en el tratamiento biológico de la fracción orgánica de los RSU, aunque su eficiencia de conversión y desarrollo tecnológico aún son limitados.

Con 16 puntos, se encuentra el reformado con vapor de biometano que como se indicó en la Tabla 7, consiste en el proceso general en el que se toma biometano producido a partir de biogás de un relleno sanitario y se utiliza como insumo para la producción de hidrógeno, seguido por la pirólisis catalítica de residuos compuestos, ambas con desempeño medio-alto. Estas tecnologías podrían tener un rol complementario en territorios donde existan flujos consistentes de plásticos o residuos orgánicos estabilizados. A continuación, aparecen con puntuaciones entre 10 y 15 puntos un grupo de tecnologías combinadas que integran gasificación, electrólisis de alta temperatura (SOEC), ciclo ORC y sistemas de almacenamiento térmico o químico. Aunque conceptualmente innovadoras, estas tecnologías presentan limitaciones en su madurez tecnológica (TRL), costos elevados y dependencia de condiciones operativas especializadas, lo que reduce su aplicabilidad inmediata en el contexto ecuatoriano.

Finalmente, las tecnologías que obtuvieron menos de 10 puntos, como la fotoreformado de residuos plásticos y la incineración con sistema ORC-SOEC, fueron clasificadas como alternativas de bajo desempeño. Este grupo presenta debilidades significativas, ya sea por su bajo grado de aprovechamiento de residuos locales, su elevado impacto ambiental (como en el caso de la incineración) o su escasa aceptación social y política, debido a asociaciones negativas con tecnologías térmicas convencionales.

Los resultados reflejan la necesidad de priorizar tecnologías que maximicen el uso de residuos locales, reduzcan impactos ambientales y se integren fácilmente a la infraestructura y capacidades técnicas existentes. Adicionalmente, el análisis pone de relieve que la aceptación social, la viabilidad económica y la capacidad institucional son tan determinantes como la eficiencia técnica en la selección de alternativas sostenibles. Para el caso ecuatoriano, tecnologías como la gasificación de RSU, el reformado de

biometano y la fermentación oscura ofrecen un punto de partida viable para impulsar proyectos piloto de producción de hidrógeno verde, siempre que se acompañen de políticas públicas, incentivos económicos y programas de capacitación técnica que aseguren su implementación responsable y efectiva.

7.3. Discusión Integrada de los resultados.

El desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno verde a partir de residuos sólidos urbanos en el DMQ enfrenta múltiples desafíos, tanto técnicos como sociales, económicos e institucionales. A través de dos enfoques complementarios (una encuesta dirigida a expertos con trayectoria en proyectos de RSU y energías renovables, y una evaluación multicriterio con siete variables críticas) se ha obtenido una visión integral que permite identificar tecnologías prioritarias y barreras estructurales que deben ser abordadas para una implementación efectiva.

En primer lugar, la encuesta aplicada evidenció una clara preferencia de los expertos por tecnologías directas y combinadas, siendo la gasificación de RSU la opción más recomendada, seguida por el reformado de biometano en rellenos sanitarios y la gasificación integrada con electrólisis (SOEC). Esta tendencia coincide en buena medida con los resultados del análisis multicriterio, donde el reformado de biometano alcanzó el mayor Índice de Desempeño Global (IDG = 19), y la gasificación de RSU se ubicó en un segundo lugar con 17 puntos. Estos hallazgos reflejan una valoración técnica favorable hacia tecnologías que permiten una valorización energética eficiente de residuos de la ciudad y que, al mismo tiempo, pueden adaptarse con relativa facilidad a la infraestructura ya existente.

El análisis multicriterio aportó mayor profundidad al permitir identificar fortalezas y debilidades específicas de cada alternativa. Por ejemplo, si bien tecnologías innovadoras como la fermentación oscura con reciclaje de efluente o la gasificación con vapor en lecho fijo muestran desempeño aceptable (IDG entre 14 y 17), su escalabilidad y nivel de desarrollo aún presentan limitaciones. Del mismo modo, soluciones avanzadas como los sistemas ORC-SOEC integrados con incineración, aunque conceptualmente atractivos, presentan bajos puntajes (IDG = 8) debido a sus altos costos, requerimientos técnicos especializados y bajo nivel de aceptación social en el país.

La correlación de ambos enfoques también se refleja en las barreras identificadas. La encuesta destacó como principales obstáculos los altos costos operativos, la escasa capacitación técnica en el sector público y privado no solo de la ciudad sino del país, así como la ausencia de políticas públicas específicas. Estos factores se alinean con las variables que más limitaron el desempeño de muchas tecnologías en la matriz IDG, especialmente en lo relacionado con la viabilidad económica, la aceptación social y política y la compatibilidad con infraestructura existente. Además, tanto la encuesta como el análisis técnico coinciden en advertir sobre el riesgo de incentivos perversos, en caso de que la valorización energética se priorice sin considerar estrategias de reducción, reutilización y reciclaje.

Respecto al potencial de aprovechamiento de la fracción orgánica, la mayoría de los expertos consultados lo sitúa entre el 40 % y el 60 %, lo cual concuerda con estudios sobre la composición de los RSU en Quito y el país. Este potencial es clave para tecnologías biológicas como la fermentación o el reformado de biometano, que podrían integrarse de forma sinérgica con sistemas de separación en la fuente, compostaje o biodigestión anaerobia.

El análisis combinado permitió establecer que, bajo las condiciones actuales de Quito y de Ecuador, las tecnologías con mayor potencial de implementación son aquellas que:

- Aprovechan residuos locales de forma significativa;
- Presentan un impacto ambiental moderado o positivo;
- Son compatibles con la infraestructura existente (como rellenos sanitarios o redes térmicas);
- Generan empleo local y cuentan con niveles aceptables de aceptación institucional.

Las tecnologías mejor posicionadas bajo estos criterios —gasificación de RSU, reformado de biometano y soluciones híbridas con SOEC— ofrecen una base sólida para desarrollar proyectos piloto que integren la producción de hidrógeno verde dentro de un marco de economía circular. No obstante, su éxito dependerá de la formulación de políticas públicas estables, incentivos financieros adecuados, inversión en I+D y el fortalecimiento de capacidades institucionales y comunitarias para su implementación sostenible.

De la Tabla 14 comparativa de los dos métodos de análisis se deduce que los dos métodos identifican las mismas dos tecnologías como las más prometedoras, lo que muestra consistencia general en la priorización. No hay una tercera tecnología que las desplace, lo cual sugiere que existe una percepción compartida sobre su potencial en el contexto evaluado (Quito, residuos municipales, viabilidad tecnológica). La divergencia de los resultados obtenidos en el el orden de preferencia entre ambas tecnologías radica en que los expertos valoran más la gasificación de RSU en tanto que la matriz multicriterio favorece ligeramente el reformado de biometano de rellenos sanitarios. En las dos metodologías entre el primer y segundo lugar, coincide con los estudios de Hamid et al (2025) y Ji & Wang (2021). Hamid et al (2025) realizaron una revisión sistemática de 37 estudios entre 2018 y 2024, estudiando cinco métodos: Gasificación de Biomasa, Reformado Autotérmico, Fotodisociación del agua, Electrólisis del agua y Reformado con vapor, encontró que ningún método individual satisface todos los criterios de eficiencia, sostenibilidad y eficiencia económica, por lo que recomienda una hibridación contextual con energías renovables y tecnologías complementarias. Adicionalmente establecen la necesidad de priorizar el desarrollo de catalizadores avanzados, materiales rentables y diseños de sistemas escalables (Hamid et al., 2025)

Tabla 15. Resultados comparativos por los dos métodos de análisis

Método de valoración	Tecnología Mejor puntuada	Segunda Tecnología mejor puntuada
Juicio de Expertos	Gasificación de RSU	Reformado de Biometano de Rellenos Sanitarios
Matriz de evaluación multicriterio	Reformado de Biometano de Rellenos Sanitarios	Gasificación de RSU

Por su parte Ji & Wang en su estudio del 2021, compararon múltiples métodos de producción de hidrógeno con base en costos económicos y evaluaciones de impacto ambiental durante todo su ciclo de vida. Se analizaron tecnologías de producción de

hidrógeno a partir de recursos fósiles, biomasa, procesos biológicos, electrólisis y ciclos termoquímicos; producción a partir de gas natural y carbón sigue siendo la más utilizada a nivel mundial, pero con impactos ambientales significativos; electrólisis del agua, especialmente cuando se alimenta con energía limpia (solar, eólica, hidroeléctrica), y los ciclos termoquímicos muestran el mayor potencial a largo plazo en sostenibilidad ambiental; procesos biológicos (como fermentación oscura, fotofermentación) con baja eficiencia y aún limitados al laboratorio. Al realizar la comparación de costos y análisis del ciclo de vida (LCA) encontraron que los menores costos corresponden al reformado con vapor de gas natural (SMR), en tanto que los menores impactos ambientales se encontraban asociados a la electrólisis con electricidad renovable y ciclos termoquímicos. Finalmente, los autores concluyen que se necesita una transición progresiva desde tecnologías basadas en fósiles hacia métodos sostenibles, fomentando la investigación en tecnologías limpias y mejorando la infraestructura de energías renovables. (Ji & Wang, 2021)

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- Con respecto a la viabilidad tecnológica para el Distrito Metropolitano de Quito, ninguna de las tecnologías evaluadas alcanzó un desempeño muy alto ($IDG > 25$), lo que evidencia que, bajo las condiciones actuales del DMQ, aún existen limitaciones técnicas, económicas y sociales para una implementación óptima. No obstante, tres tecnologías mostraron un desempeño alto:
 - Reformado de biometano en rellenos sanitarios ($IDG = 19$)
 - Gasificación de RSU ($IDG = 17$)
 - Fermentación oscura con reciclaje de efluentes ($IDG = 17$)
- El Reformado de biometano se consolidó como la alternativa que destaca en los dos procesos de investigación realizados en este trabajo fin de máster. Esta tecnología se posicionó como la más viable al integrar el aprovechamiento de la fracción orgánica con la infraestructura de rellenos sanitarios, mostrando una baja huella de carbono. Sin embargo, enfrenta desafíos en aceptación social, principalmente por su desconocimiento a nivel de sociedad y sus costos operativos.
- La gasificación de RSU destaca por su capacidad de valorizar residuos no reciclables y por su compatibilidad con sistemas eléctricos existentes en la ciudad, aunque requiere inversión inicial elevada, lo que supone una gran limitación debido a la situación económica del país en la actualidad. En cuanto las barreras de percepción pública, se encuentra en igual situación que la tecnología anterior.
- La fermentación oscura si bien se trata de una tecnología biotecnológica que aún se encuentra en desarrollo, tiene un desempeño aceptable, aunque su principal limitante es su eficiencia de conversión y nivel de madurez tecnológica (TRL), lo que limitan su aplicación inmediata.
- Las limitaciones estructurales y contextuales de todas las metodologías, se han identificado como barreras complejas de salvar identificándose principalmente:
 - Altos costos operativos e inversión inicial
 - Falta de políticas públicas específicas
 - Escasa capacitación técnica e institucional
 - Aceptación social limitada de tecnologías térmicas
- Coincidiendo con estudios internacionales, se concluye que no existe una tecnología única que satisfaga simultáneamente todos los criterios de eficiencia, sostenibilidad y viabilidad económica. Esto implica una integración contextual de tecnologías complementarias y energía renovable.
- Uno de los resultados más complejos de este estudio es la debilidad de conocimiento en estas tecnologías de la mayoría de expertos consultados. Se detectó conocimiento limitado, poco interés en esta tecnología y escasa experiencia en el tema. Aunado a los problemas económicos existentes, la difusión de estas tecnologías y las acciones en I+D+i en estas tecnologías se hacen prioritarias, no solo en la ciudad de Quito, sino en la integralidad del país. Esto se considera una oportunidad para el avance en investigación y desarrollo del país.

8.2. Recomendaciones

- Es indispensable a nivel de la ciudad y el país, desarrollar proyectos piloto integradores, iniciando con experiencias con tecnologías de alto desempeño como

el reformado de biometano y la gasificación de RSU, priorizando zonas con infraestructura existente (rellenos, estaciones de transferencia, etc.), integrando sistemas de separación de residuos y biodigestión.

- Se necesita elaborar un marco regulatorio nacional para el hidrógeno verde, que incentive la investigación, la inversión y la participación multisectorial. Este marco debe incluir instrumentos económicos (subsidios, incentivos fiscales, tarifas preferenciales) y requisitos de intervención de las universidades ecuatorianas en proyectos de esta índole.
- Se deben fortalecer capacidades técnicas e institucionales, impulsando programas de formación técnica en universidades, gobiernos locales y empresas públicas/privadas para el manejo de tecnologías de hidrógeno y valorización de residuos. Se recomienda una alianza entre la academia, el sector público y privado para promover innovación y transferencia tecnológica.
- Se requiere desarrollar estrategias de comunicación y sensibilización sobre el hidrógeno verde, a través de la implementación de campañas de educación ambiental y social que expliquen el potencial del hidrógeno verde, su vínculo con la economía circular y la seguridad energética, buscando mejorar la aceptación social de tecnologías emergentes.
- Uno de los puntos fundamentales que se recomienda a la municipalidad quiteña es impulsar investigación aplicada en condiciones locales. Promover estudios técnicos y económicos en Quito y otras ciudades del Ecuador que permitan adaptar tecnologías de hidrógeno verde al contexto andino-urbano, considerando su altitud, clima, composición de RSU y características institucionales.
- Es urgente priorizar la gestión de RSU a través de un enfoque de economía circular, asegurando que las tecnologías seleccionadas estén alineadas con la jerarquía de gestión de residuos: reducción, reutilización, reciclaje y, en última instancia, valorización energética. Se debe evitar que incentivos mal diseñados desincentiven la separación y reciclaje.
- Una recomendación importante es la de explorar combinaciones tecnológicas con energías renovables, fomentando la investigación en soluciones híbridas, como gasificación + electrólisis con SOEC alimentada por energía solar o eólica, que podrían mejorar el desempeño ambiental y reducir la dependencia de fuentes fósiles, en línea con tendencias internacionales.

8. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

8.1. Conclusions

- Regarding technological feasibility for the Metropolitan District of Quito (DMQ), none of the evaluated technologies achieved a very high performance ($IDG > 25$), which shows that, under the current conditions of the DMQ, there are still technical, economic, and social limitations for optimal implementation. Nevertheless, three technologies showed high performance:
 - Biomethane reforming in sanitary landfills ($IDG = 19$)
 - MSW gasification ($IDG = 17$)
 - Dark fermentation with effluent recycling ($IDG = 17$)
- Biomethane reforming emerged as the alternative that stands out in the two research processes carried out in this master's thesis. This technology positioned itself as the most viable option by integrating the use of the organic fraction with

landfill infrastructure, showing a low carbon footprint. However, it faces challenges regarding social acceptance, mainly due to lack of public awareness and its operating costs.

- MSW gasification stands out for its ability to recover value from non-recyclable waste and its compatibility with existing electrical systems in the city, although it requires high initial investment, which is a major limitation given the current economic situation in the country. As for public perception barriers, it faces the same situation as the previous technology.
- Although dark fermentation is a biotechnological process still under development, it has an acceptable performance, but its main limitations are its conversion efficiency and its technology readiness level (TRL), which restrict its immediate application.
- Structural and contextual limitations of all the methodologies have been identified as complex barriers to overcome, mainly:
 - High operating costs and initial investment
 - Lack of specific public policies
 - Limited technical and institutional training
 - Restricted social acceptance of thermal technologies
- Consistent with international studies, it is concluded that there is no single technology that simultaneously meets all efficiency, sustainability, and economic feasibility criteria. This implies a contextual integration of complementary technologies and renewable energy.
- One of the most complex results of this study is the weakness in knowledge about these technologies among most of the experts consulted. Limited knowledge, little interest in this field, and scarce experience were detected. Together with existing economic problems, the dissemination of these technologies and R&D+i actions become a priority, not only in Quito but throughout the country. This is considered an opportunity for the advancement of research and development in Ecuador.

8.2. Recommendations

- At the city and national levels, it is essential to develop integrative pilot projects, starting with technologies with high performance such as biomethane reforming and MSW gasification, prioritizing areas with existing infrastructure (landfills, transfer stations, etc.), and integrating waste separation systems and biodigestion.
- A national regulatory framework for green hydrogen must be developed to encourage research, investment, and multisectoral participation. This framework should include economic instruments (subsidies, tax incentives, preferential tariffs) and require the involvement of Ecuadorian universities in projects of this nature.
- Technical and institutional capacities must be strengthened by promoting technical training programs in universities, local governments, and public/private companies for the management of hydrogen and waste recovery technologies. A

partnership between academia, the public sector, and the private sector is recommended to foster innovation and technology transfer.

- Communication and awareness strategies about green hydrogen need to be developed through environmental and social education campaigns explaining the potential of green hydrogen, its link with the circular economy, and energy security, aiming to improve social acceptance of emerging technologies.
- One of the fundamental points recommended to the municipality of Quito is to promote applied research under local conditions. Technical and economic studies should be encouraged in Quito and other Ecuadorian cities to adapt green hydrogen technologies to the Andean-urban context, considering altitude, climate, MSW composition, and institutional characteristics.
- It is urgent to prioritize MSW management through a circular economy approach, ensuring that selected technologies are aligned with the waste management hierarchy: reduction, reuse, recycling, and, ultimately, energy recovery. Poorly designed incentives that discourage separation and recycling should be avoided.
- An important recommendation is to explore technological combinations with renewable energies, promoting research into hybrid solutions such as gasification + SOEC electrolysis powered by solar or wind energy, which could improve environmental performance and reduce dependence on fossil sources, in line with international trends.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Amores, E., Sánchez, M., Rojas, N., & Sánchez-Molina, M. (2021). Renewable hydrogen production by water electrolysis. In *Sustainable Fuel Technologies Handbook* (pp. 271–313). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00010-X>
- ARC. (2023). *Estadística Anual y Multianual 2023 del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/EstadisticaAnual2023-WEB-2.pdf>
- Argelia, G., Vargas, R., Baquero, R., Yasuhiro, P., & Kuwabara, M. (2006). “El hidrógeno como fuente alterna de energía.”
- Artal Sevil, J., Bayod, A., Cortés, T., Carroquino, J., & Escriche Cristina. (2023). Utility-scale renewable hydrogen generation by wind turbines. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 21, 19–24.
- Boretti, A. (2023). Green hydrogen to address seasonal variability of wind and solar energy production in Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.120>
- Casco Argotty Estefanía, Oviedo Costales Jorge, Rodríguez Ana, & Coral Carrillo Katty. (2015). *DETERMINACIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. AÑO 2014-2015* [Tesis de Ingeniería]. UISEK.
- Chiong, M.-C., Chong, C. T., Ng, J.-H., Mashruk, S., Chong, W. W. F., Samiran, N. A., Mong, G. R., & Valera-Medina, A. (2021). Advancements of combustion technologies in the ammonia-fuelled engines. *Energy Conversion and Management*, 244, 114460. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114460>
- Cobos-Torres, J.-C., Idrovo-Ortiz, L.-H., Cobos-Mora, S. L., & Santillan, V. (2025). Renewable Energies and Biochar: A Green Alternative for Reducing Carbon Footprints Using Tree Species from the Southern Andean Region of Ecuador. *Energies*, 18(5), 1027. <https://doi.org/10.3390/en18051027>
- Coral-Carrillo Katty, Rodríguez Ana Lucía, & Oviedo Costales Jorge Esteban. (2021). Energía a partir de residuos sólidos urbanos, caso parroquia Limoncocha en la Amazonía ecuatoriana. *Estudios de La Gestión. Revista Internacional de Administración*, 9, 215–236. <https://doi.org/10.32719/25506641.2021.9.9>
- Coral- Carrillo, Katty., Rodríguez, Ana., & Oviedo, J. Esteban. (2018). Riesgo biológico en el aire respirable de los minadores de basura en la Et2 Zámiza en Quito-Ecuador. *Ambiente y Desarrollo*, 21(41), 79–92. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-41.rbar>
- Coral-Carrillo, K., & Oviedo-Costales, J. E. (2022). PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA PARROQUIA LIMONCOCHA EN LA AMAZONIA ECUATORIANA. In *Medio ambiente: Preservación, salud y sobrevivência* 2 (pp. 24–36). Atena Editora. <https://doi.org/10.22533/at.ed.7052222073>
- Coral- Carrillo, K., Oviedo, J. E., & Rodríguez, A. (2019). Evaluation of the chemical risk of the miners of the transfer station ET2 Zámiza by heavy metals in the breathable particulate material. *Espirales Revista Multidisciplinaria de Investigación*, 3(29), 106–128. <https://doi.org/10.31876/er.v3i29.595>

- de Energía y Minas del Ecuador, M. (2023). *Hoja de ruta del hidrógeno verde en Ecuador* (pp. 17–74).
- De Sisternes, F. J., & Jackson, C. Paul. (2020). *Green Hydrogen in Developing Countries*. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/953571597951239276/green-hydrogen-in-developing-countries>
- Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Element Energy Limited. (2023). *Project Partners Gigastack Phase 2: Pioneering UK Renewable Hydrogen. Public Report*.
- EMGIRS-EP. (2017, October 16). *Quito se destaca en el Ecuador al producir energía eléctrica de la basura*. <https://Www.Quitoinforma.Gob.Ec/2017/10/16/Quito-Se-Destaca-En-El-Ecuador-al-Producir-Energia-Elctrica-de-La-Basura/>.
- EMGIRS-EP. (2021, July 22). *Quito genera energía eléctrica con el Biogás de su Basura*. <https://Www.Emgirs.Gob.Ec/Index.Php/Noticiasep/265-Quito-Genera-Energia-Elctrica-Con-El-Biogas-de-Su-Basura>.
- EMGIRS EP. (2024). *INFORME DE GESTIÓN 2023*. <https://emgirs.gob.ec/phocadownload/informe-rendicion-cuentas/2023/INFORME%20DE%20GESTION%20EMGIRS%20EP%202023.pdf>
- EMGIRS-EP. (2024a, June 22). *Complejo Ambiental de Gestión de Residuos Sólidos de Quito*. <https://Emgirs.Gob.Ec/Index.Php/Complejo-Ambiental-de-Gestion-de-Residuos-Solidos-de-Quito>.
- EMGIRS-EP. (2024b, October 17). *Manejo adecuado de residuos sólidos genera energía eléctrica para Quito*. <https://Www.Quitoinforma.Gob.Ec/2024/10/17/Manejo-Adecuado-de-Residuos-Solidos-Genera-Energia-Elctrica-Para-Quito/>.
- EMGIRS-EP. (2025, March 28). *Gestión Relleno Sanitario EMGIRS-EP*. <https://Emgirs.Gob.Ec/Index.Php/Zentools/2025>.
- Estévez, R. A., Espinoza, V., Ponce Oliva, R. D., Vásquez-Lavín, F., & Gelcich, S. (2021). Multi-Criteria Decision Analysis for Renewable Energies: Research Trends, Gaps and the Challenge of Improving Participation. *Sustainability*, 13(6), 3515. <https://doi.org/10.3390/su13063515>
- Federal Ministry of Research, T. and S. (2023). *How the H2Mare project intends to produce hydrogen offshore*. <https://Www.Wasserstoff-Leitprojekte.de/Projects/H2mare>.
- Feria, A., Cruz, D. D. La, Vidal, H., Pacheco, J., Torres, J., & López, I. (2022). Producción biológica de hidrógeno mediante fermentación oscura. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 45–56. <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
- Fuell Cells. (2016). HyBalance project in Denmark to demo green hydrogen energy. *Fuel Cells Bulletin*, 2016(3), 8–9. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(16\)30055-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-2859(16)30055-4)
- Garcés Mauricio, Oviedo Costales Jorge Esteban, Carrillo Ivonne, & Coral-Carrillo Katty. (2016). *“CUANTIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD Y CENIZAS CONTENIDOS EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL*

- DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO AÑO 2015-2016* [Tesis de Ingeniería]. Universidad Internacional SEK.
- Garcia, M. B. (2023). *¿En qué consiste el desarrollo sostenible?* Objetivos Del Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2023/08/what-is-sustainable-development/>
- GH2. (2025, May). *GH2 Country Portal – United Kingdom*. Green Hydrogen Organisation.
- Green Hydrogen Organisation. (2025). *Portal de campo de GH2 - España*. <https://Gh2.Org/Countries/Spain>. <https://gh2.org/countries/spain>
- H2 Chile. (2024). *Hidrógeno verde en Chile*. <https://h2chile.cl/>
- H2 Future Green Hydrogen. (2025). *H2FUTURE Green Hydrogen*. <https://Www.H2future-Project.Eu/En>.
- Hamid, A., Deris, R. R. R., Shaffee, S. N. A., Hin, T. Y. Y., Ametefe, D. S., & Ibrahim, M. L. (2025). A systematic review on environmentally friendly hydrogen production methods: comparative analysis of reactor technologies for optimal efficiency and sustainability. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 6, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100088>
- HY-5. The new initiative aims to make Northern Germany. (2022). *Westküste 100: HYDROGEN ECONOMY ON AN INDUSTRIAL SCALE*. <https://Www.Hy-5.Org/En/Cases/Westkueste-100-Hydrogen-Economy/>.
- HYdeal. (2025). *Green hydrogen: its extraordinary power to substitute fossil fuels*. <https://Www.Hydeal.Com/Green-Hydrogen-Its-Extraordinary-Power>.
- Hydrogen Council, M. & C. (2021). *Hydrogen Insights 2021*.
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. OECD. <https://doi.org/10.1787/827374a6-en>
- IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2022). *Global Hydrogen Review 2022*.
- INEC. (2023a). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos 2022*. <https://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/1023>
- INEC. (2023b). *POBLACIÓN POR ÁREA, SEGÚN PROVINCIA, CANTÓN Y PARROQUIA DE EMPADRONAMIENTO*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/?s=poblaci%C3%B3n>
- INEC Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos. (2022). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales: Gestión de Residuos Sólidos 2021*.
- INEC - Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2022). Estadística de información ambiental económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales: Gestión de Residuos Sólidos 2021. In *Estadística Gad Municipales*. http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Gestion_Integral_de_Residuos_Solidos/2016/Documento
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen: A guide to Policy Making*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Policies-for-green-hydrogen>

- ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
<https://www.cscses.com/uploads/2016328/20160328110518251825.pdf>
- Jijón Solorzano, V., Recio Recio, A. A., & Fernández Díaz, G. R. (2024). Metanización, una alternativa tecnológica para valorización energética de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en la provincia de Esmeraldas. *Revista de Investigaciones En Energía Medio Ambiente y Tecnología RIEMAT ISSN 2588-0721*, 8(2), 30–36. <https://doi.org/10.33936/riemat.v8i2.6405>
- Ji, M., & Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(78), 38612–38635. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- La french Fab. (2022). *Green hydrogen and cars: France puts the focus on giga factories*. <https://Lafrench-Fab.Com/News/Green-Hydro>.
- Lai, Q., Cai, T., Tsang, S. C. E., Chen, X., Ye, R., Xu, Z., Argyle, M. D., Ding, D., Chen, Y., Wang, J., Russell, A. G., Wu, Y., Liu, J., & Fan, M. (2022). Chemical looping-based ammonia production—A promising pathway for production of the noncarbon fuel. *Science Bulletin*, 67(20), 2124–2138. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.09.013>
- Landázuri Xavier, Rodríguez Ana, Oviedo Costales Jorge, & Coral-Carrillo Katty. (2017). “CUANTIFICACIÓN DEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: TEXTIL Y MIXTOS, GENERADOS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO EN LOS AÑOS 2015-2016” [Tesis de Ingeniería]. Universidad Internacional SEK.
- Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, Pub. L. No. Registro Oficial Suplemento 488, Registro Oficial 12 (2031).
- Lopez, G., Santamaria, L., Lemonidou, A., Zhang, S., Wu, C., Sipra, A. T., & Gao, N. (2022). Hydrogen generation from biomass by pyrolysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00097-8>
- MAATE. (2018). Código Orgánico del Ambiente. *Registro Oficial Suplemento*, 983.
- MAATE Ministerio de Ambiente, A. y T. E., & GRECI Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva. (2024). *Boletín 2024: Estadísticas del proyecto Gestión de Residuos Sólidos y Economía Circular inclusiva*.
- MEM Ministerio de Energía y Minas del Ecuador. (2024). *Balance energético Nacional 2023*. https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/BEN_2023-final_compressed.pdf
- Merino Alvaro. (2022). *El Pantone del Hidrógeno*. <https://Elordenmundial.Com/Mapas-y-Graficos/Tipos-Hidrogeno/>.
- Miguel Ibañez de Aldecoa Quintana, J. (2020). *NIVELES DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA. TECHNOLOGY READINESS LEVELS. TRLS*.

- Ministerio de Energía de Colombia, & BID. (2021). *Hoja de ruta del hidrógeno verde en Colombia*.
https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- Ministerio de Energía y Minas, E. (2023). Hoja De Ruta Del Hidrógeno Verde En Ecuador. In *Ministerio de Energía y Minas* (Vol. 1).
- MIT. (2023). *Hydrogen Energy California Project (HECA) Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project*.
<https://Sequestration.Mit.Edu/Tools/Projects/Heca.Html>.
- Moreira, S., & Laing, T. (2022). *CLIMATE-SMART MINING FACILITY Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen*.
www.worldbank.org
- NEDO. (2025, March). *The world's largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima*. . https://www.nedo.go.jp/english/news/aa5en_100422.html.
- NEOM Green Hydrogen Company: NGHC. (2025). *GREEN HYDROGEN The Future Of Carbon-Free Energy*. <https://nghc.com/the-plant/>.
- Pascualone, M. J. (2014). Producción de biohidrógeno por fermentación: efecto de la concentración de inóculo. *Físicas Y Naturales*, 6(2), 15–19.
- PNUD. (2023). *Impulsando el desarrollo sostenible en el Ecuador*.
https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-10/impulsando_el_desarrollo_sostenible_en_ecuador_pnud_2023_1.pdf
- Port of Amsterdam. (2023). *H2*. <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/making-logistics-chains-more-sustainable/condor-h2>.
- Rahimpour, H. R., Mokhtarani, B., Salehabadi, A., Zanganeh, J., & Moghtaderi, B. (2025). Sustainable ammonia production routes and barriers: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), 116397.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116397>
- Ramos Hernández, C. (2022). La Geopolítica Ecuatoriana Desde Los Inicios Como República Y La Importancia De Los Espacios Marítimos En La Actualidad. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 7(4), 12.
<https://doi.org/10.24133/rcsd.vol07.n04.2022.05>
- Redin Juan Diego, C.-C. K. (2019). *Implementación de técnicas de producción más limpia en el plan de manejo ambiental de la Empresa Autopartes Andina S.A.* [Ingeniería]. Universidad Internacional SEK.
- Refhyne. (2025, January). *Clean Refinery Hydrogen for Europe*.
<https://www.refhyne.eu/>.
- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, 752 Fielweb Evolución Jurídica 1 (2019).
- Reiter, G., & Lindorfer, J. (2015). Global warming potential of hydrogen and methane production from renewable electricity via power-to-gas technology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 477–489.
<https://doi.org/10.1007/s11367-015-0848-0>

- Rodríguez, C. F., Torres, E. J. M., Palao, A. M., & Barrios, X. G. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. *Revista ION*, 29(1), 47–62. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>
- Romero, J. C., & Linares, P. (2021). Multiple Criteria Decision-Making as an Operational Conceptualization of Energy Sustainability. *Sustainability*, 13(21), 11629. <https://doi.org/10.3390/su132111629>
- Rosati, G., Baiguini, M., Di Marcoberardino, G., Invernizzi, C. M., & Iora, P. G. (2022a). Integrated ORC-SOEC system for green hydrogen production from incineration of solid fuels. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385(1), 012108. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012108>
- Rosati, G., Baiguini, M., Di Marcoberardino, G., Invernizzi, C. M., & Iora, P. G. (2022b). Integrated ORC-SOEC system for green hydrogen production from incineration of solid fuels. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385(1), 012108. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012108>
- RWE. (2025a). *Hydrogen production in the North Sea AquaVentus*. <https://www.rwe.com/en/research-and-development/hydrogen-projects/aquaventus/>
- RWE. (2025b, April). *NorthH2 A green hydrogen hub in Northwest Europe*. Sustainability News. <https://www.rwe.com/en/research-and-development/hydrogen-projects/north2/>
- Solís, M. F., Durango, J., Solano, J., & Yépez, M. (2020). *Cartografía de los residuos sólidos en el Ecuador* (M. F. Solís, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.
- Sovacool, B. K., & Lakshmi Ratan, P. (2012). Conceptualizing the acceptance of wind and solar electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5268–5279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.048>
- Valera-Medina, A., Amer-Hatem, F., Azad, A. K., Dedoussi, I. C., de Joannon, M., Fernandes, R. X., Glarborg, P., Hashemi, H., He, X., Mashruk, S., McGowan, J., Mounaim-Rouselle, C., Ortiz-Prado, A., Ortiz-Valera, A., Rossetti, I., Shu, B., Yehia, M., Xiao, H., & Costa, M. (2021). Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics. *Energy & Fuels*, 35(9), 6964–7029. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03685>
- Viracacha Murcia, L. A. (2025). *Evaluación del aprovechamiento energético de residuos municipales e industriales por coprocesamiento en hornos cementeros: Caso de estudio Regenera*. <http://hdl.handle.net/11349/98343>
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5), 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>
- Yolanda, B., & Soria, M. (n.d.). *El hidrógeno y la energía*.
- Zabaniotou, A., & Kamaterou, P. (2019). Food waste valorization advocating Circular Bioeconomy - A critical review of potentialities and perspectives of spent coffee grounds biorefinery. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1553–1566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.230>

- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.002>
- Zhang, J., Liu, B., Zhang, X., Shen, H., Liu, J., & Zhang, S. (2022). Co-vitrification of municipal solid waste incinerator fly ash and bottom slag: Glass detoxifying characteristics and porous reformation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 113995. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113995>