


Proyectos de ingeniería aplicada

# Biocombustibles de segunda generación en Bolivia. Oportunidades y desafíos para una transición energética sostenible.

Second-generation biofuels in Bolivia. Opportunities and challenges for a sustainable energy transition

 Jaime Fernando Ochoa Figueroa

Especialista Ambiental. Consultora Nacional (CONNAL S.R.L.). La Paz-Bolivia. [fochoa.101@gmail.com](mailto:fochoa.101@gmail.com)

## RESUMEN

Los biocombustibles de segunda generación en Bolivia ofrecen la oportunidad de una transición energética sostenible al utilizar residuos agrícolas, forestales y urbanos, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de carbono. Los principales desafíos incluyen la inversión tecnológica, marcos regulatorios y altos costos iniciales. Casos exitosos en Latinoamérica destacan su potencial, sin embargo, Bolivia necesita incentivos fiscales, subsidios y apoyo a la investigación y desarrollo (I+D) para superar las barreras y poder posicionarse como líder regional en energía sostenible.

**Palabras clave:** Biocombustibles de segunda generación. Transición energética. Sostenibilidad.

## ABSTRACT

Second-generation biofuels in Bolivia offer the opportunity to a sustainable energy transition by using agricultural waste, forest, and urban waste, reducing fossil fuel dependence and carbon emissions. Key challenges include technological investment, regulatory frameworks, and high initial costs. Successful Latin American cases highlight potential, but Bolivia needs fiscal incentives, subsidies, and R&D support to overcome barriers and establish itself as a regional leader in sustainable energy.

**Keywords:** Second-generation biofuels, Energy transition, Sustainability.

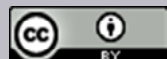
**Citar como:** Ochoa Figueroa, J.F. Biocombustibles de segunda generación en Bolivia. Oportunidades y desafíos para una transición energética sostenible. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 156-174 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1371>

**Recepción:** 07/07/2025

**Aceptado:** 21/10/2025

**Publicado:** 30/12/2025

**Declaración:** Derechos de autor 2025 Ochoa Figueroa, J.F. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



## 1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles exige alternativas innovadoras como los biocombustibles de segunda generación (2G), capaces de descarbonizar sectores difíciles de electrificar —como el transporte, la industria y la agricultura— a partir de materias primas no alimentarias: residuos agrícolas, forestales y plásticos posconsumo. Esta doble ventaja —reducción de emisiones y gestión de residuos— convierte a los biocombustibles 2G en una solución estratégica para países altamente dependientes de hidrocarburos, como Bolivia, donde el 78 % de la matriz energética primaria aún se basa en fuentes fósiles (IEA, 2023), a pesar de su rol como exportador de gas.

En Bolivia, recursos clave permanecen subutilizados. La agroindustria genera anualmente 3,2 millones de toneladas de residuos (MMAyA, 2021), mientras que el reciclaje de plásticos urbanos no supera el 5 %. Aprovechando estos flujos como insumos, las tecnologías 2G podrían sustituir hasta un 15 % del diésel fósil consumido en el país. Sin embargo, su implementación enfrenta importantes desafíos: altos costos de inversión (entre 50 y 100 millones de dólares por planta, según el tipo de proceso: termoquímico o bioquímico), ausencia de incentivos normativos claros y falta de información sistematizada sobre la disponibilidad de biomasa residual.

Esta investigación, realizada en el marco de la Maestría en Cambio Climático de la Universidad del Atlántico (España), aborda estas brechas a través de un análisis técnico-económico. Los resultados se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 —energía asequible y no contaminante— y 13 —acción por el clima—, así como con los lineamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025 de Bolivia.

### 1.1 ANTECEDENTES

Los biocombustibles (2G), producidos a partir de residuos agrícolas, forestales y plásticos posconsumo, se perfilan como una alternativa estratégica para reducir la dependencia de hidrocarburos en Bolivia y alinearse con las políticas climáticas globales, sin comprometer la seguridad alimentaria (MHE, 2022). Su adopción se formalizó en 2017 con un memorándum de entendimiento entre el Gobierno nacional y el sector agroempresarial cruceño, que derivó en la Ley 1098 de Aditivos de Origen Vegetal, orientada a promover su incorporación en la matriz energética (Fundación Tierra, 2024).

Los avances recientes incluyen la comercialización de gasolinas mezcladas con etanol (Súper Etanol 92 y Especial Plus), la construcción de dos megaplantillas de biodiésel con capacidad de 600.000 litros diarios —una de ellas ya en operación en Santa Cruz—, y el impulso a cultivos sostenibles de oleaginosas como palma aceitera y *Jatropha curcas* (MHE, 2022). Sin embargo, la drástica caída de las reservas probadas de gas natural —de 10,7 TCF<sup>1</sup> en 2017 a 2,13 TCF en 2023 (Fundación Milenio, 2024)— refuerza la urgencia de diversificar la matriz energética.

En foros recientes (MHE, 2022; 2024), se enfatizó la necesidad de escalar tecnologías B2G como la pirólisis de plásticos y el HVO, junto con medidas de política pública: actualizar la Ley 1098 para incorporar estándares de sostenibilidad, redirigir

1 Trillion Cubic Feet (TCF) = billones de pies cúbicos de gas natural

subsidios fósiles hacia biocombustibles, e impulsar investigación en materias primas alternativas como residuos orgánicos y aceites usados. La meta nacional para 2050 es reemplazar el 100 % de las importaciones de diésel y gasolinas, lo cual exige coordinación público-privada, inversión en I+D y un marco regulatorio alineado con la economía circular.

A pesar de los avances, persisten obstáculos críticos: la dependencia estructural de los hidrocarburos (67 % de los subsidios estatales), la limitada capacidad tecnológica para procesar residuos lignocelulósicos y plásticos, y los riesgos socioambientales asociados a la expansión de monocultivos de palma sin salvaguardas adecuadas. En este escenario, los biocombustibles 2G constituyen una vía viable, cuyo éxito dependerá de innovación tecnológica, políticas audaces y participación comunitaria efectiva, garantizando una transición energética inclusiva y ecológicamente responsable.

## 2. METODOLOGÍA

### Enfoque general del estudio

Este estudio evalúa el potencial de biocombustibles 2G en Bolivia mediante un enfoque interdisciplinario, integrando tecnología, economía, ambiente y políticas, alineado con prioridades nacionales y compromisos globales. La investigación se desarrolla en dos etapas:

### Primera etapa: Diagnóstico energético y revisión del estado del arte

Incluye una revisión crítica de literatura científica, informes técnicos (IEA, OLADE) y normativa nacional (Ley 1098, PNDES 2021–2025). Además, se evalúa la matriz energética, la dependencia de fósiles y el potencial de residuos, con datos del INE y ministerios.

### Segunda etapa: Evaluación técnico-económica y ambiental

Se analizan tecnologías como pirólisis, gasificación y fermentación mediante modelado con ASPEN Plus, evaluando eficiencia, CAPEX/OPEX y TIR. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se realiza con SimaPro/OpenLCA siguiendo ISO 14040-44.

También se integran criterios de sostenibilidad (ODS<sup>2</sup> 7 y 13) y políticas nacionales.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 TIPOLOGÍA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

De acuerdo con Trejo Zamudio *et al.* (2019), los biocombustibles son carburantes producidos a partir de biomasa o residuos orgánicos mediante procesos físicos o químicos, y pueden encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso. Se distinguen tres generaciones:

- **Primera generación:** obtenidos de cultivos alimentarios (caña de azúcar, girasol), generan bioetanol y biodiésel, pero con efectos negativos sobre la seguridad alimentaria.
- **Segunda generación:** derivados de materias no comestibles (como jacinto de agua) y residuos agrícolas o urbanos, reducen la competencia con la producción de alimentos.
- **Tercera generación:** basados en microalgas y macroalgas con alta capacidad de captura de CO<sub>2</sub>, permiten producir biodiésel y bioturbosina sin requerir suelo agrícola.

Estas tecnologías contribuyen a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, al mantener un ciclo cerrado de carbono en el que el gas liberado en la combustión se reabsorbe durante el crecimiento de la biomasa. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la escalabilidad tecnológica, los costos de producción y los impactos socioambientales, que deben ser abordados para consolidar su potencial como una alternativa energética sostenible.

### 3.2 BENEFICIOS AMBIENTALES

Los biocombustibles (2G) son una alternativa estratégica para Bolivia, pues reducen la huella de carbono, aprovechan residuos agroforestales y no compiten con alimentos. Al usar insumos no comestibles, impulsan una transición energética sostenible que respeta biodiversidad y producción local. Su desarrollo requiere infraestructura, incentivos y políticas públicas, pero su potencial es significativo: diversifican la matriz energética, fortalecen la economía circular y mejoran la calidad ambiental.

#### 3.2.1 Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Los biocombustibles (2G) reducen significativamente la huella de carbono frente a los combustibles fósiles, gracias a su ciclo de carbono cerrado, donde el CO<sub>2</sub> emitido se compensa con el absorbido por la biomasa (Waldheim & Pettersson, 2021). En Bolivia, donde el transporte genera altas emisiones de GEI<sup>3</sup>, su uso podría disminuir hasta un 80 % las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, dependiendo del tipo de materia prima y el proceso de conversión utilizado (IEA Bioenergy, 2023).

#### 3.2.2 Valorización de residuos agrícolas y forestales

En Bolivia, los residuos agrícolas y forestales —como rastrojos, bagazo de caña y aserrín— suelen destinarse a la quema, generando emisiones contaminantes y liberación de CO<sub>2</sub> (Carbon Neutral Plus, 2024). La producción de biocombustibles (2G) ofrece una alternativa para valorizarlos como materia prima, favoreciendo una economía circular y reduciendo los impactos ambientales derivados de su acumulación o disposición inadecuada (Waldheim & Pettersson, 2021).

##### 3.2.2.1 Protección de ecosistemas

A diferencia de los biocombustibles de primera generación, los 2G no requieren ampliar la frontera agrícola. En Bolivia, la expansión de monocultivos como la

3 Gases de Efecto Invernadero. Regulados por el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París

soya ha sido uno de los principales motores de deforestación en regiones del Chaco y la Amazonía (Repsol, 2024). El uso de biomasa residual como insumo energético reduce esta presión, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (IEA Bioenergy, 2023).

### 3.2.2.2 Disminución de la contaminación

La quema de residuos agrícolas genera contaminación del aire y afecta la salud pública en comunidades rurales (Alvarez & García, 2022). Su aprovechamiento en biocombustibles disminuye las emisiones de partículas, NOx y CO, mejorando la calidad del aire. De igual forma, el uso de aceites de cocina y residuos orgánicos evita descargas inadecuadas en ríos y suelos, reduciendo riesgos de contaminación hídrica (Carbón Neutral Plus, 2024).

### 3.2.2.3 Economía circular y sostenibilidad

El aprovechamiento de residuos en biocombustibles fomenta la **economía circular**, al transformar desechos de un sector en insumos energéticos para otro. Esto contribuye a diversificar la matriz energética, avanzar hacia un modelo resiliente y sostenible, y cumplir compromisos internacionales de mitigación del cambio climático (IEA Bioenergy, 2023).

## 3.3 MATERIAS PRIMAS PARA BIOCOMBUSTIBLES 2G EN BOLIVIA

Los biocombustibles de Segunda Generación (2G) provienen de residuos agrícolas, forestales, agroindustriales, plásticos y biomasa no convencional, sin competir con alimentos (Trejo Zamudio *et al.*, 2019). Estos insumos procesados en plantas especializadas producen combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, además de subproductos valorizables como fertilizantes. Su viabilidad depende de la disponibilidad de biomasa, características físico-químicas, logística de transporte e integración al balance energético nacional (Manrique *et al.*, 2023). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas clave para planificar su aprovechamiento. Asimismo, los bosques energéticos complementan la oferta, fortaleciendo un modelo circular y sostenible en Bolivia.

### 3.3.1 Materias Primas para Biocombustibles 2G

La diversidad de materias primas en Bolivia se organiza según su origen Trejo Zamudio *et al.* (2019), su capacidad para generar biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos, agrupados según su origen:

- **Residuos agrícolas** (bagazo de caña, rastrojos, cascarilla de arroz, quinua, castaña): base para bioetanol lignocelulósico, biogás y biodiésel. Su valorización reduce la dependencia de oleaginosas y la quema a cielo abierto.
- **Residuos forestales** (aserrín, virutas, restos de poda): utilizados en pellets, syngas o diésel sintético (vía Fischer-Tropsch), favoreciendo el manejo sostenible y disminuyendo la presión sobre bosques.
- **Residuos plásticos**: mediante pirólisis catalítica o gasificación se transforman en diésel sintético y syngas, mitigando la contaminación ambiental.

- **Residuos orgánicos urbanos** (frutas, aceites usados, poda): representan más del 60 % de los residuos sólidos en ciudades como La Paz y Santa Cruz. Son aptos para biodiésel y biogás vía digestión anaerobia, reduciendo vertidos y emisiones de GEI.
- **Biomasa no convencional** (jacinto de agua, biomasa fluvial): insumos con doble beneficio, al producir biocombustibles (biodiésel, bioetanol, syngas) y controlar problemas ambientales como especies invasoras o acumulación de desechos en ríos.
- **Residuos agroindustriales amazónicos** (cáscaras de castaña): con potencial para gasificación, pirólisis y licuefacción hidrotermal, generando biocombustibles líquidos y sólidos, además de empleo local en la Amazonía.

**Tabla 1. Clasificación de las Materias Primas**

Clasificación	Materias Primas	Biocombustibles Potenciales	Aspectos Técnicos	Aspectos Socioambientales	Cantidades Probables*
<b>Residuos Agrícolas</b>	Bagazo de caña, rastrojos de maíz, cascarilla de arroz, quinua, residuos de castaña	Bioetanol lignocelulósico, biodiésel, biogás, gas de síntesis	- Gasificación: 85% syngas, 10% biochar, 5% líquidos - Pirólisis: 30-75% bioaceite, 12-35% biochar, 13-35% gases	Reducción de dependencia de cultivos alimentarios (soya, palma)	~2-3 millones t/año → 1.200 millones L bioetanol o 800 Mm³ biogás
<b>Residuos Forestales</b>	Aserrín, virutas, restos de poda	Pellets, syngas, diésel sintético (FT), bio-oil	- Gasificación + FT: diésel sintético - Pirólisis rápida: bio-oil (~35 MJ/kg)	Manejo forestal sostenible, reducción de deforestación	~0,8 millones t/año → 500 Mm³ syngas o 300.000 t pellets
<b>Residuos Plásticos</b>	Plásticos urbanos/ rurales	Diésel sintético, syngas	- Pirólisis catalítica: conversión a líquidos	Mitigación de contaminación por plásticos	~0,4 millones t/año → 300 millones L diésel sintético
<b>Residuos Orgánicos Urbanos</b>	Frutas, verduras, aceites usados, poda, residuos industriales	Biodiésel (aceites), biogás, pellets	- Digestión anaerobia: biogás (~60% CH <sub>4</sub> )	Reducción de emisiones en vertederos, gestión integral de residuos	~1,2 millones t/año → 700 Mm³ biogás o 90 millones L biodiésel
<b>Biomasa No Convencional</b>	Jacinto de agua, madera flotante	Biodiésel, bioetanol, syngas, biocrudo	- Licuefacción hidrotermal: biocrudo (20-50%, ~35 MJ/kg)	Control de especies invasoras, mejora de navegabilidad	~0,5 millones t/año → 150 millones L biocombustibles líquidos
<b>Residuos Agroindustrial Amazónicos</b>	Cáscaras de castaña	Syngas, bioaceite, biocrudo, biochar	- Gasificación: syngas - HTL: biocrudo (20-50%, ~35 MJ/kg)	Valorización de residuos, empleo local	~80.000 t/año → 40 Mm³ syngas o 25 millones L biocrudo

Fuente: Trejo Zamudio *et al.* (2019)

\*Notas:

Los valores son estimativos basados en promedios de disponibilidad de biomasa y rendimientos de conversión reportados en literatura técnica.

Se expresan en toneladas (t), millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) o millones de litros (L) por año, en base al potencial boliviano.

### 3.4 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES 2G

Según Trejo y otros (2019), los residuos orgánicos de la agroindustria, agricultura, ganadería y desechos municipales constituyen una fuente clave para producir biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos mediante distintas rutas de conversión. El sistema se organiza en cuatro fases: (1) recolección y clasificación de los residuos, (2) transporte hacia las plantas de procesamiento, (3) transformación a través de procesos bioquímicos, químicos o termoquímicos y (4) uso final como energía térmica o eléctrica.

Los procesos bioquímicos emplean microorganismos en fermentación para generar bioetanol u otros compuestos. Los procesos químicos, como la transesterificación, permiten obtener biodiésel a partir de lípidos y alcoholes, mientras que la hidrólisis descompone biomasa con soluciones ácidas, básicas o enzimáticas. Los procesos termoquímicos operan a altas temperaturas en atmósferas controladas: el pirólisis produce bioaceites y carbón vegetal, la gasificación genera gas de síntesis y la licuefacción obtiene biocombustibles líquidos.

La selección de la tecnología depende del tipo de biomasa, la infraestructura y el producto final buscado. Los métodos termoquímicos ofrecen mayor eficiencia energética y subproductos valorizables, mientras que los bioquímicos y químicos son óptimos para biocombustibles específicos. En conjunto, constituyen alternativas complementarias para impulsar una bioeconomía sostenible.

**Tabla 2. Clasificación de tecnologías para la producción de biocombustibles de segunda generación**

Categoría	Procesos	Mecanismo clave	Productos principales
<b>1. Termo conversión</b>	1.1 Pirólisis (rápida, catalítica, al vacío)	Descomposición térmica en atmósfera inerte (300-800°C).	Bioaceite, biochar, gases no condensables. Incluyen H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , etc.
	1.2 Gasificación (lecho fijo, fluido, plasma)	Oxidación parcial con agentes gasificantes (vapor, O <sub>2</sub> limitado; 700-1300°C).	Syngas (CO + H <sub>2</sub> ), alquitranes (subproductos no deseados), cenizas.
	1.3 Licuefacción hidrotermal	Conversión en fase acuosa bajo alta presión (250-400°C, 5-20 MPa).	Biocrudo, productos hidrotermales.
<b>2. Bio conversión</b>	2.1 Fermentación (etanol celulósico, ABE <sup>4</sup> )	Metabolismo microbiano de azúcares C5/ C6 (levaduras, bacterias).	Bioetanol, biobutanol, ácido butírico.
	2.2 Digestión anaerobia	Degradación por consorcios microbianos en condiciones anaerobias.	Biogás (CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> ), biol y biosol (fertilizantes).
	2.3 Hidrólisis enzimática	Ruptura de enlaces β-1,4-glucosídicos mediante celulasas/hemicelulasas <sup>5</sup> .	Glucosa, xilosa, oligómeros fermentables.

<sup>4</sup> Acetona-Butanol-Etanol, producto típico de *Clostridium* spp

<sup>5</sup> Etapa previa a la fermentación en muchos esquemas lignocelulósicos



Categoría	Procesos	Mecanismo clave	Productos principales
<b>3. Químico conversión</b>	3.1 Transesterificación (alcalina, ácida, enzimática)	Intercambio de grupos alquilo entre ésteres y alcoholes (metanol, etanol).	Biodiesel, glicerina.
	3.2 Procesos catalíticos (Fischer-Tropsch, HDO, HVO)	Reacciones de desoxigenación, craqueo o isomerización con catalizadores heterogéneos.	Hidrocarburos renovables (diésel verde, biojet).
	3.3 Síntesis electroquímica ( <i>e-fuels</i> )	Electrólisis de agua + conversión catalítica de CO <sub>2</sub> (metabolismo artificial).	Metanol sintético, e-queroseno, e-metano.

Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios

### 3.4.1 Tecnologías de termo conversión

La pirólisis y la gasificación son procesos termoquímicos esenciales para transformar biomasa en energía renovable. La pirólisis, realizada en ausencia de oxígeno a 300-600 °C, produce principalmente bioaceite (45-75%), acompañado de biochar (20-30%) y gases combustibles. El bioaceite requiere refinamiento por su acidez, mientras que el biochar mejora suelos agrícolas y captura carbono, aportando beneficios energéticos y ambientales (Mohan *et al.*, 2006). En contraste, la gasificación opera con oxígeno limitado a 700-1000 °C y genera syngas (CO+H<sub>2</sub>), aprovechable en electricidad, calor o síntesis de combustibles sintéticos. No obstante, demanda sistemas avanzados de limpieza de gases y mayor inversión en infraestructura (McKendry, 2002; Basu, 2010).

En Bolivia, donde aproximadamente 65% de los residuos corresponden a biomasa lignocelulósica (Marín *et al.*, 2023), la selección tecnológica depende del recurso y la escala. La pirólisis es adecuada para biomasa seca como bagazo de caña, mientras la gasificación se adapta a desechos heterogéneos como ramas o aserrín. Asimismo, la licuefacción hidrotermal (250-400 °C, alta presión) constituye una alternativa para biomasa húmeda, generando biocombustibles estables sin secado previo. La integración de estas tecnologías en biorrefinerías circulares permite optimizar eficiencia energética y económica mediante el uso combinado de biochar, syngas y biocrudo (Bridgwater & Peacocke, 2000).

#### 3.4.1.1 Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone biomasa en ausencia de oxígeno, generando bioaceite, biochar y gases no condensables. Sus rendimientos dependen de parámetros como temperatura (300–800 °C), velocidad de calentamiento y tiempo de residencia (Bridgwater, 2003). En el marco de los biocombustibles de segunda generación (B2G), se destaca por transformar biomasa lignocelulósica y residuos en combustibles líquidos y sólidos. Sin embargo, enfrenta limitaciones como la inestabilidad del bioaceite y la necesidad de refinamiento adicional para su uso energético eficiente (Mohan *et al.*, 2006).

#### *Pirólisis Rápida*

La pirólisis rápida opera entre 500–800°C, con velocidades de calentamiento extremas (100–1.000°C/s) y tiempos de residencia inferiores a 2 segundos, maximizando la producción de bioaceite (60–75% en peso seco). Este líquido,



con poder calorífico de 15–25 MJ/kg, presenta alta acidez (pH 2–3) y contenido de oxígeno (~35%), lo que limita su uso directo (Bridgwater, 2003). Para biocombustibles 2G, se requiere hidrodesoxigenación (HDO) catalítica para reducir su oxigenación y obtener diésel renovable o biojet. Un ejemplo exitoso es la conversión de bagazo de caña de azúcar, donde el bioaceite refinado alcanza estándares compatibles con motores de combustión (Mohan *et al.*, 2006).

### ***Pirólisis Catalítica***

Este proceso, realizado a 400–600°C con catalizadores como zeolitas o níquel, produce hidrocarburos líquidos similares a gasolina o diésel, con bajo contenido de oxígeno (<10%) (Zhang *et al.*, 2020). A diferencia de la pirólisis convencional, elimina la necesidad de etapas intensivas de refinación, permitiendo la obtención directa de combustibles compatibles con infraestructuras existentes. Un caso destacado es la co-conversión de residuos plásticos y lignocelulósicos, que bajo condiciones catalíticas genera diésel sintético con rendimientos del 40–50%, posicionándose como alternativa para la valorización de desechos urbanos (IEA, 2021).

### ***Pirólisis al Vacío***

Realizada a 300–500°C bajo presión reducida (0,1–1 kPa), la pirólisis al vacío produce bioaceites con menor oxigenación (<20%) y mayor estabilidad térmica que los obtenidos por métodos tradicionales (Butler *et al.*, 2011). Esta técnica es ideal para biomasa con alto contenido de humedad o lignina, como residuos forestales, donde se logran fracciones similares a gasolina con rendimientos del 50–60%. Su ventaja radica en la reducción de reacciones secundarias de oxidación, facilitando la integración del bioaceite en refinerías convencionales sin modificaciones mayores. Un estudio aplicado a desechos de poda urbana demostró la viabilidad de obtener combustibles de transporte con emisiones un 70% menores que los fósiles (Butler *et al.*, 2011).

### **3.4.1.2 Gasificación**

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte biomasa en syngas (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), aprovechable para producir combustibles líquidos, químicos y biopropano (BioGLP) (Bridgwater, 2012). Se desarrolla en cuatro etapas: secado (<150 °C), pirólisis (300–700 °C), oxidación (>700 °C) y reducción (850–1.200 °C), generando un syngas con poder calorífico de 4–20 MJ/Nm<sup>3</sup> (Milne *et al.*, 1998; IPCC, 2019). Entre sus aplicaciones destacan los combustibles líquidos vía síntesis Fischer-Tropsch (catalizadores Fe/Co, 150–300 °C) para obtener diésel o gasolina renovables, y el biopropano, derivado de metanol e hidrotratamiento, aunque más costoso (2–3 €/kg frente a 1,41–1,65 €/kg fósil) reduce hasta 80% las emisiones (Primagas, 2023). Sus ventajas incluyen eficiencia (~70%), flexibilidad en insumos y capacidad multiproducto (electricidad, H<sub>2</sub> verde). No obstante, enfrenta retos en costos, catalizadores y políticas de incentivo. A futuro, la integración con biorrefinerías y la captura de carbono consolidará al BioGLP como alternativa clave en la transición energética.

### 3.4.1.3 Licuefacción hidrotermal (HTL)

La licuefacción hidrotermal (HTL) es un proceso termoquímico que convierte biomasa húmeda, como microalgas, lodos y residuos alimentarios, en biocrudo, operando a 250–400 °C y 10–25 MPa en medio acuoso (Toor *et al.*, 2011). En estas condiciones, el agua subcrítica actúa como solvente y catalizador, promoviendo la descomposición de lípidos, proteínas y carbohidratos en un biocrudo con poder calorífico de 30–40 MJ/kg (Peterson *et al.*, 2008). Este producto, rico en hidrocarburos, requiere hidrot ratamiento catalítico (NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para disminuir oxígeno y nitrógeno, cumpliendo estándares de combustibles renovables (Jena *et al.*, 2011).

Una ventaja clave de la HTL es procesar biomasa con >70 % de humedad sin secado previo, alcanzando eficiencias de carbono superiores al 60 % y co-producendo biochar (5–25 %) y una fase acuosa rica en nutrientes (Biller & Ross, 2011). No obstante, persisten desafíos técnicos, como la corrosión de reactores, tratamiento de efluentes y escalado industrial, lo que impulsa el desarrollo de catalizadores avanzados y biorrefinerías integradas (Zhang *et al.*, 2020).

Sus aplicaciones emergentes abarcan la valorización de aguas residuales y la obtención de precursores químicos (ácidos grasos, fenoles), consolidando a la HTL como una tecnología estratégica en la economía circular (Elliott *et al.*, 2015).

### 3.4.2 Tecnologías de Bioconversión

La bioconversión, mediante procesos biológicos como la **digestión anaerobia**, **fermentación oscura** y **fermentación en estado sólido**, transforma residuos orgánicos urbanos (1,6 millones de ton/año, MMAyA, 2023) y biomasa lignocelulósica en biocombustibles 2G, como biogás o bioetanol, aprovechando microorganismos y enzimas. En Bolivia, esta tecnología ofrece una solución dual: gestionar desechos (ej.: mercados generan 18,7 millones de m<sup>3</sup> de biogás/año, equivalente al 12% del GLP nacional; Cámara de Hidrocarburos, 2022) y diversificar la matriz energética

#### 3.4.2.1 Fermentación de Biomasa

La fermentación de biomasa es un proceso bioquímico mediante el cual microorganismos transforman materia orgánica en alcoholes, ácidos orgánicos o gases. Dos rutas destacan en biocombustibles de segunda generación: la fermentación para etanol celulósico y la fermentación ABE (acetona–butanol–etanol). El etanol celulósico requiere pretratamientos físico-químicos e hidrólisis enzimática para liberar azúcares fermentables a partir de residuos agrícolas o forestales (IEA Bioenergy, 2022). La fermentación ABE, realizada con bacterias del género *Clostridium*, convierte azúcares o almidones en solventes, incluido el butanol, un biocombustible avanzado con elevado poder energético (Bastos *et al.*, 2020).

Ambos procesos pueden integrarse en biorrefinerías circulares, combinándose con tecnologías termoquímicas como la gasificación. Un estudio del TEC<sup>6</sup> en Costa Rica (2018) evidenció que el uso de carbón residual de la gasificación como aditivo en digestión anaerobia mejora la producción de biogás. Esta sinergia entre fermentación y termoquímica optimiza el aprovechamiento de biomasa, disminuye residuos y fortalece la sostenibilidad de los sistemas energéticos locales.

### 3.4.2.2 Otros Procesos de bioconversión

Diversas técnicas de bioconversión son claves en la producción de biocombustibles de segunda generación. La fermentación alcohólica, con *Saccharomyces cerevisiae*, transforma azúcares en bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos como bagazo o paja, previa hidrólisis enzimática, con eficiencias de 0,4–0,5 L/kg de biomasa (Taherzadeh & Karimi, 2007). La fermentación oscura, mediante bacterias como *Clostridium* y *Enterobacter*, genera hidrógeno sin requerir luz ni pretratamientos costosos (Levin *et al.*, 2004). La fermentación en estado sólido (FES) emplea hongos como *Aspergillus* y *Trichoderma* para degradar residuos agrícolas (café, cítricos), obteniendo bioetanol, ácidos orgánicos o enzimas (Pandey *et al.*, 2000). La hidrólisis enzimática, usando celulasas y hemicelulasas, descompone celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables, etapa esencial para biocombustibles 2G (Kumar *et al.*, 2009). Finalmente, las Microbial Fuel Cells (MFC) utilizan bacterias electrogénicas para oxidar materia orgánica y producir electricidad, alcanzando 0,5–1 W/m<sup>3</sup> (Logan *et al.*, 2006). Estas tecnologías son complementarias y favorecen sistemas circulares de energía sostenible.

### 3.4.3 Tecnologías de Químio conversión

Las tecnologías de químio conversión transforman biomasa y residuos urbanos o industriales en energía limpia, biocombustibles avanzados y productos químicos de alto valor. A diferencia de los procesos térmicos, emplean reacciones químicas o catalíticas que mejoran la eficiencia y reducen impactos ambientales. Entre ellas destacan la transesterificación, la hidrólisis y la electrólisis, capaces de generar hidrógeno verde e insumos industriales. Estas tecnologías fortalecen la economía circular, descarbonizan sectores estratégicos y contribuyen a un modelo energético sostenible, aunque aún enfrentan desafíos técnicos, económicos y logísticos para su escalabilidad.

#### 3.4.3.1 Transesterificación

La transesterificación es un proceso químico fundamental para obtener biodiésel a partir de aceites vegetales, grasas animales o residuos lipídicos. Consiste en la reacción de triglicéridos con metanol o etanol en presencia de un catalizador, generando ésteres alquílicos (biodiésel) y glicerol como subproducto (Knothe *et al.*, 2010). Los catalizadores pueden ser homogéneos (NaOH, KOH), heterogéneos (óxidos de calcio, zeolitas) o enzimáticos (lipasas), con ventajas y limitaciones. Los alcalinos homogéneos son muy eficientes (>98 % de conversión en 1–2 h a 60 °C), pero sensibles a ácidos grasos libres (FFA >1 %), que generan jabones y complican la purificación (Ma & Hanna, 1999).

En cambio, los catalizadores ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) toleran altos FFA (>20 %), aunque requieren condiciones severas (100 °C, 3–6 h) y presentan problemas de corrosión (López Granados *et al.*, 2007). Los enzimáticos ofrecen selectividad y menor impacto ambiental, pero su alto costo y baja estabilidad térmica limitan su aplicación (Tan *et al.*, 2020). Avances recientes incluyen catalizadores heterogéneos magnéticos (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> funcionalizado), que facilitan separación y reutilización, reduciendo residuos (Zhang *et al.*, 2019).

El proceso comprende pretratamiento (remoción de humedad y FFA), reacción principal y purificación (lavado y secado). El biodiésel resultante debe cumplir normas ASTM D6751 o EN 14214, que regulan viscosidad (3,5–5,0 mm<sup>2</sup>/s) y

glicerol libre (<0,02 %). Integrada en biorrefinerías circulares, la transesterificación valoriza residuos agroindustriales y reduce emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un 80 % respecto al diésel fósil (NREL, 2021).

### 3.4.3.2 Procesos catalíticos (Fischer-Tropsch, HDO, HVO)

Los procesos catalíticos son esenciales para mejorar la calidad y estabilidad de los biocombustibles avanzados. La síntesis Fischer-Tropsch (FT) convierte syngas (CO + H<sub>2</sub>) en hidrocarburos líquidos como diésel y jet fuel, utilizando catalizadores de hierro o cobalto a 200–350 °C y 20–40 bar, con selectividad controlada mediante soportes mesoporosos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Dry, 2002). Este método, aplicado por Sasol, produce combustibles libres de azufre y aromáticos, adecuados para aviación sostenible (IEA, 2020).

La hidrodesoxigenación (HDO) elimina oxígeno de bioaceites obtenidos por pirólisis o licuefacción, mediante catalizadores sulfurados (NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoMo/SBA-15) a 300–400 °C y 50–150 bar. El resultado son hidrocarburos estables, con menor acidez y mejor estabilidad oxidativa, aunque la necesidad de hidrógeno externo eleva los costos (Wang *et al.*, 2017).

El hidrotratamiento de aceites vegetales (HVO) transforma triglicéridos de aceites usados y grasas animales en diésel renovable, mediante hidrogenación catalítica (Pt, Pd) a 300–450 °C y 30–90 bar. No genera glicerol y cumple la norma EN 15940, ofreciendo mayor poder calorífico que el biodiésel convencional y plena compatibilidad con motores diésel (Neste, 2022).

Aunque demandan energía e insumos, estos procesos son pilares para biocombustibles de alta densidad energética y bajas emisiones, contribuyendo a la descarbonización global (Huber *et al.*, 2006).

## 3.5 MODELADO DE UNA BIORREFINERÍA EN SANTA CRUZ

Este capítulo desarrolla un modelo tecno-económico de una biorrefinería integrada ubicada en el Departamento Santa Cruz con dos líneas productivas complementarias:

1. Co-combustión 70 % Gas Natural (GN) / 30 % Biogás en ciclo combinado para generación eléctrica, y
2. Producción de diésel sintético mediante dos rutas alternativas: Gasificación + Fischer-Tropsch (FT) y Pirólisis + HVO (con foco en fracciones aptas para SAF<sup>7</sup>).

### 3.5.1 Diseño de proceso e integración de sitio

El análisis compara CAPEX/OPEX, eficiencia, riesgos de activos y creación de valor (TIR, payback, resiliencia regulatoria), considerando las condiciones de oferta de biomasa/residuos del oriente boliviano, la infraestructura gasífera existente y los incentivos de descarbonización aplicables en Bolivia.

La biorrefinería se concibe como un hub multi-feedstock con utilidades compartidas (vapor, agua de enfriamiento, aire de servicio, tratamiento de efluentes) y sinergias energéticas entre líneas:

- Biogás (digestión anaerobia de residuos agroindustriales/ROU8) → acondicionamiento → mezcla 70/30 con GN → ciclo combinado (CCGT9).
- Sólidos lignocelulósicos/plásticos → Ruta A: Gasificación → Syngas → FT → diésel sintético / nafta / ceras.
- Sólidos secos → Ruta B: Pirólisis rápida/catalítica → bio-oil → hidrotratamiento (HDO/HVO) → diésel renovable/SAF.

**Integraciones clave:** recuperación de calor del CCGT para precalentamientos, uso de H<sub>2</sub> (de reformado/FT o electrolítico) en hidrotratamiento, y gestión de CO<sub>2</sub> biogénico (recirculación a upgrading, créditos de carbono o síntesis de e-combustibles).

### 3.5.2 Supuestos y datos de entrada (síntesis)

- **Biogás crudo:** CH<sub>4</sub> 55–65 %, CO<sub>2</sub> 35–45 %, H<sub>2</sub>S variable (decenas–miles ppmv), humedad saturada; presencia potencial de siloxanos.
- **Acondicionamiento estándar:** desulfurización (biotrickling/carbono activado), deshumidificación (chiller/adsorción), pulido de siloxanos.
- **CCGT:** mezcla en poder calorífico equivalente (base LHV), respetando límites del OEM para H<sub>2</sub>S total y contaminantes.
- Rutas diésel sintético:
  - **Gasificación + FT:** syngas acondicionado (H<sub>2</sub>/CO), FT (Co/Fe), hidro-craqueo/isomerización.
  - **Pirólisis + HVO:** bio-oil estabilizado → HDO/HVO (NiMo/CoMo o metales nobles) con requerimientos de H<sub>2</sub> y gestión de N/S/O.
- **Análisis financiero:** horizonte 15–20 años; TIR/NPV; sensibilidad en costo de feedstock, precio de GN/diésel, capacidad, precio del carbono y factores de disponibilidad.

### 3.5.3 Eje 1: Generación eléctrica 70 % GN / 30 % Biogás (CCGT)

La integración de biogás en la Planta Termoeléctrica de Warnes (70 % gas natural / 30 % biogás) puede abordarse mediante dos esquemas de acondicionamiento.

La Alternativa 1 (biogás crudo) presenta un CAPEX bajo, pero conlleva mayores costos operativos por corrosión, incrustaciones y fallas frecuentes en turbinas, además de un perfil ambiental más complejo por las emisiones de SO<sub>x</sub> y partículas. En contraste, la Alternativa 2 (biogás tratado: desulfurado y deshumificado) exige una inversión inicial más alta, pero asegura menores OPEX, mayor eficiencia térmica, prolongada vida útil de los equipos y cumplimiento ambiental más seguro.

En una planta de ciclo combinado de operación continua y estratégica, la opción más recomendable es la del biogás tratado, ya que, aunque incrementa el CAPEX, optimiza el desempeño técnico, reduce riesgos de indisponibilidad y maximiza la sostenibilidad del proyecto en el largo plazo.

8 Residuos Orgánicos Urbanos (ROU)

9 Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) o en español Central de Ciclo Combinado a Gas

### 3.5.4 Eje 2: Producción de diésel sintético

La biorefinería puede optar por dos rutas tecnológicas. La **Gasificación + Fischer-Tropsch (FT)** produce un diésel paraafínico de alta calidad, con bajo azufre y alto número de cetanos, además de coproductos valiosos (nafta, ceras). Su principal limitante es el alto CAPEX requerido para gasificación, limpieza de syngas y upgrading; sin embargo, logra una rentabilidad competitiva (TIR  $\approx 15\%$ ) en escenarios de logística optimizada y contratos de venta asegurados. La complejidad técnica es elevada, con riesgos asociados al control de alquitranes, ajuste de la relación  $H_2/CO$  y manejo de catalizadores.

La ruta de Pirólisis rápida + HVO presenta un CAPEX inferior y mayor flexibilidad tecnológica, destacando la posibilidad de orientar parte de la producción hacia combustibles sostenibles de aviación (SAF). Aunque su rentabilidad base es menor que la del FT en diésel terrestre, puede mejorar significativamente con incentivos climáticos, primas SAF y créditos de carbono. Sus desafíos técnicos se centran en la estabilidad del bio-oil, la elevada demanda de hidrógeno y el control de impurezas durante el hidrotreamiento.

En comparación, la gasificación-FT se perfilaría como una opción atractiva para el mercado de diésel sintético, gracias a su mayor TIR, escalabilidad y perfil de producto. En cambio, la pirólisis-HVO resulta estratégica en escenarios donde la prioridad es el SAF y se dispone de financiamiento climático.

## 4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La transición energética en Bolivia requiere un enfoque integral que combine seguridad energética, reducción de emisiones y desarrollo socioeconómico. Los Biocombustibles de Segunda Generación (B2G) constituyen una oportunidad estratégica para diversificar la matriz energética y avanzar hacia un modelo de **energía sostenible y baja en carbono**. A continuación, se plantean los ejes estratégicos que articulan la implementación de B2G en el país.

### 4.1 AGRICULTURA DEL CARBONO COMO BASE DE INSUMOS SOSTENIBLES

La **agricultura del carbono** se propone como un pilar para garantizar materia prima sostenible para biorrefinerías B2G. Mediante prácticas como la producción de biochar, agroforestería y cultivos de cobertura, se captura  $CO_2$  en suelos y biomasa, generando **residuos agrícolas y forestales** que alimentan procesos termoquímicos (pirólisis, gasificación) y biotecnológicos para producir bioetanol celulósico, biocrudo y syngas.

Esta estrategia convierte al sector agropecuario en **sumidero neto de carbono**, mejora la fertilidad de suelos y contribuye a la **resiliencia climática**, fortaleciendo la sinergia entre **producción agrícola sostenible y generación de bioenergía limpia**.

### 4.2 DESARROLLO DE UNA BIORREFINERÍA CIRCULAR INTEGRADA

Se plantea la construcción de Biorrefinerías Circulares Integradas de segunda generación, capaces de transformar residuos agrícolas, forestales, ganaderos y urbanos en biocombustibles avanzados (bioetanol, biodiésel 2G, bio-GLP), además de biofertilizantes y bioproductos de valor agregado.

El modelo se fundamenta en la economía circular, articulando cadenas de valor locales, sistemas de gestión de residuos y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Este enfoque promueve la descentralización energética, la generación de empleos verdes y la industrialización sostenible, en concordancia con la Ley Marco de la Madre Tierra (Ley N° 300) y el DS N° 3874.

#### **4.3 INTRODUCCIÓN PROGRESIVA DE MEZCLAS EN EL TRANSPORTE**

Como medida de corto y mediano plazo, se priorizará la introducción de mezclas de biodiésel, diésel fósil y diésel sintético (HVO, FT-diesel) en el transporte terrestre e industrial. Estas mezclas permiten una reducción inmediata de emisiones contaminantes y se adaptan a la infraestructura vehicular existente, dado que los combustibles sintéticos son drop-in y cumplen normas internacionales (EN 15940).

La estrategia contempla porcentajes de mezcla crecientes (B10 → B20 → B30) hasta lograr un mercado consolidado de diésel sostenible, garantizando compatibilidad técnica y seguridad energética en el país.

#### **4.4 INCLUSIÓN SOCIAL Y PARTICIPACIÓN COMUNITARIA**

La implementación de biocombustibles avanzados debe asegurar la inclusión de comunidades rurales e indígenas, priorizando modelos de producción descentralizada de bioenergía a partir de residuos locales (ej. yuca en el Chaco, castaña en la Amazonía, quinua en el Altiplano). Se promoverán esquemas de gobernanza participativa, consultas previas y beneficios equitativos, evitando conflictos por uso de tierras y generando valor compartido en territorios productivos.

#### **4.5 COOPERACIÓN INTERNACIONAL Y FINANCIAMIENTO CLIMÁTICO**

La estrategia nacional de B2G se vincularía con financiamiento climático (Green Climate Fund, Fondo de Adaptación), alianzas regionales (CELAC, OLADE) y programas como ProTransición (VMEEyER-GIZ). Esto permitirá crear marcos regulatorios, mecanismos financieros sostenibles, fortalecer la transferencia tecnológica en bioprocesos, eficiencia energética y movilidad sostenible, además de consolidar la capacidad institucional e investigativa nacional.

### **5. CONCLUSIONES**

Los biocombustibles de segunda generación (B2G) ofrecen a Bolivia una alternativa estratégica para diversificar su matriz energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y avanzar hacia una economía baja en carbono. A partir de residuos agrícolas, forestales, plásticos y biomasa acuática, el país dispone de un potencial bioenergético considerable, aún poco aprovechado. Tecnologías como la pirólisis, gasificación, fermentación y licuefacción hidrotermal permiten transformar esta biomasa en biocombustibles sostenibles, impulsando además la economía circular, el desarrollo rural y la inclusión energética.

Su implementación requiere desafíos importantes: generar regulación específica, superar elevados costos iniciales, barreras tecnológicas y ausencia de incentivos claros. También existen limitaciones en infraestructura, capacidades técnicas locales y gestión eficiente de residuos. Para avanzar, se requiere fortalecer la



gobernanza energética, fomentar alianzas público-privadas y actualizar el marco normativo, incluyendo criterios de sostenibilidad y mecanismos de financiamiento como créditos de carbono.

Si Bolivia logra articular innovación tecnológica, justicia social y sostenibilidad ambiental, podrá posicionarse como un referente regional en bioeconomía circular. La instalación de biorrefinerías integradas, junto con el acceso a cooperación internacional y redes científicas, permitirá transformar el modelo energético del país, alineándolo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París.

## 7. REFERENCIAS

Álvarez, C., & García, L. (2022). *\*Producción de biocombustibles y su impacto en la seguridad alimentaria\**. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <https://www.economia.unam.mx/publicaciones/econoinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>

Andrade Torres, F., et al. (2021). *A comparative study of biofuels and Fischer-Tropsch diesel blends on the engine combustion performance*. *Energies*, 14(6), 1538. <https://doi.org/10.3390/en14061538>

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.

Bridgwater, A.V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2-3), 87-102.

Bridgwater, A.V., & Peacocke, G.V.C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1-73.

Carbon Neutral Plus. (2024). *¿Qué son los biocombustibles?* Recuperado el 25 de febrero de 2025, Recuperado de <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-los-biocombustibles>

Dimitriadis, A., et al. (2018). *Evaluation of a hydrotreated vegetable oil (HVO) and effects on emissions of a passenger car diesel engine*. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 4, 7. <https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00007>

Estado Plurinacional de Bolivia. (2023). *Ley 1407 de Electricidad*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.

Estado Plurinacional de Bolivia. (2009). *Constitución Política del Estado*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. <https://www.lexivox.org/norms/BO-CPE/>

Estado Plurinacional de Bolivia. (2005). *Ley N° 3058 de Hidrocarburos*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.

Estado Plurinacional de Bolivia. (2012). *Ley N° 300 de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.

Estado Plurinacional de Bolivia. (2021). *Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social 2021-2025*. <https://www.planificacion.gob.bo>

Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). *Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación*. Madera y Bosques, 20(3), 11-24.

Fundación Milenio. (2024). Coy 497: ¿Cuál es el nivel de reservas de gas natural? Recuperado de <https://fundacion-milenio.org/coy-497-cual-es-el-nivel-de-reservas-de-gas-natural>

Fundación Tierra. (2024). *Biocombustibles: Falsas soluciones y riesgos para la seguridad alimentaria*. Fundación Tierra. <https://www.ftierra.org/index.php/publicacion/documentos-de-trabajo/252-biocombustibles-falsas-soluciones-y-riesgos-para-la-seguridad-alimentaria>

GAMLP Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2020). *Estudio de caracterización de residuos sólidos para una planta de industrialización de basura en la ciudad de La Paz, como posible fuente de generación de energía, en el marco de la promoción y atracción de inversiones*. Informe final, Producto 3 (4ta. versión corregida).

IEA Bioenergy. (2023). *Second-generation biofuels: Opportunities and challenges*. International Energy Agency. <https://www.ieabioenergy.com/publications/second-generation-biofuels>

Instituto Nacional de Estadística. (2022). *Anuario Estadístico Agropecuario 2021* (Publicación No. 245-2022). <https://www.ine.gob.bo>

International Energy Agency IEA. (2023). *\*Bolivia energy policy review\**. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/bolivia-2023>

International Energy Agency IEA. (2023). *Energy policy review: Bolivia*. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/bolivia-2023>

IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Johnson, K. A., et al. (2022). *Effects of HVO and HVO/biodiesel blends on the toxicological properties of emissions*. Fuel, 323, 124283. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124283>

Manrique, S.M., Salvo, A., Binda, C., Subelza, C., Mosconi, L., & Balderrama, B. (Eds.). (2023). *Conversión energética de la biomasa: bases para su aprovechamiento. Guía científico-técnica*. Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T), Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Ediciones CYTED. ISBN: 978-84-15413-60-8. Madrid, España. 355 páginas.

Marín, G. M., Surculento, R. V., & Lopez, L. (2023). Perspectivas en la utilización de residuos de la industria de la castaña: procesos termoquímicos, revisión bibliográfica. *Revista Boliviana de Química*, 40(4), 97-116.

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 55-63.

Milne, T. A., Evans, R. J., & Abatzoglou, N. (1998). Biomass gasifier “tars”: their nature, formation, and conversion. National Renewable Energy Laboratory.

Ministerio de Hidrocarburos y Energías MHE. (2022). *Memoria del Foro de Biocombustibles 2022*. La Paz, Bolivia.

Ministerio de Hidrocarburos y Energías - MHE. (2024, 30 de junio). Expertos identifican desafíos y estrategias para obtener financiamiento climático en proyectos energéticos. Recuperado de: <https://www.mhe.gob.bo>.

Ministerio de Hidrocarburos y Energías - MHE. (2024). *Bolivia y Alemania fortalecen alianza para la transición energética con un convenio de cooperación por 5 millones de euros*. Viceministerio de Electricidad y Energías Renovables – GIZ. Disponible en: <https://www.mhe.gob.bo> (Consultado el 28 de marzo de 2025).

Ministerio de Medio Ambiente y Agua - MMAyA. (2021). *Informe Nacional de Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia 2020*. <https://www.mmaya.gob.bo>

Mohan, D., Pittman Jr., C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels*, 20(3), 848-889.

Movimiento en Defensa de la Cuenca del Río Madera y de la Región Amazónica. (2008). *Represas sobre el río Madera: Energía para las transnacionales y destrucción de la Amazonia*. Foro Boliviano sobre Medio Ambiente y Desarrollo (FOBOMADE). <https://www.fobomade.org.bo>

Prabhakara Rao, T., Adusuri, M., & Donipati, J. V. (2024). Optimization of drying temperatures for enhanced biodiesel production from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(11), 996-1003. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i11m.3005>

Primagas. (2023). *Biopropano, un biogás como opción energética*. Recuperado de <https://www.primagas.es/blog/biopropano>

Primagas. (2023). *\*Producción de Biopropano a partir de Syngas\**. Recuperado de <https://www.primagas.es/gas/biopropano>

Propanogas. (2023). Precios de GLP en España. Recuperado de <https://propanogas.com/faq/evolucion-precio-mercados>

Repsol. (2024). *\*Biocombustibles: Alternativas sostenibles para el transporte\**. Recuperado de <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshtml>

Sánchez Bastardo, N. (2014). *Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel* [Tesis de grado, Universidad de Valladolid]. Escuela de Ingenierías Industriales.

Smigins, R., et al. (2023). *Studies of engine performance and emissions at full-load mode using HVO, diesel fuel, and HVO5*. *Energies*, 16(12), 4785. <https://doi.org/10.3390/en16124785>

TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). (2018). *Plantaciones dendroenergéticas y gasificación de biomasa: nuevos desarrollos con marca TEC*. Revista Kuru. Recuperado de: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/3848>

Trejo Zamudio, D., García Trejo, J. F., & Gutiérrez Antonio, C. (2019). *Conversión de residuos a biocombustibles*. Ciencia, 70(1), 65-71. Recuperado de [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70\\_1/PDF/ResiduosBiocombustibles.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70_1/PDF/ResiduosBiocombustibles.pdf)

Vargas Bautista, J. P. y Calvimontes, J. (2017). *Evaluación del Potencial de Biogás de Rellenos Sanitarios en Bolivia para Producir Electricidad*. Investigación & Desarrollo, No. 17, Vol. 1: 55-62. UPB.

Viera, J., et al. (2020). *Influence of fuel properties on performance and emissions of a Euro 6 diesel engine fueled with HVO, GTL, and FAME blends*. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 13(2), 108-118. <https://doi.org/10.4271/03-13-02-0007>

Waldheim, L., & Pettersson, K. (2021). *Advances in second-generation biofuel production technologies*. Biofuels, 12(3), 567-582. <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.1931200>

Waldheim, L., & Pettersson, K. (2021). *Advances in second-generation biofuel production technologies*. Biofuels, 12(3), 567-582. <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.1931200>