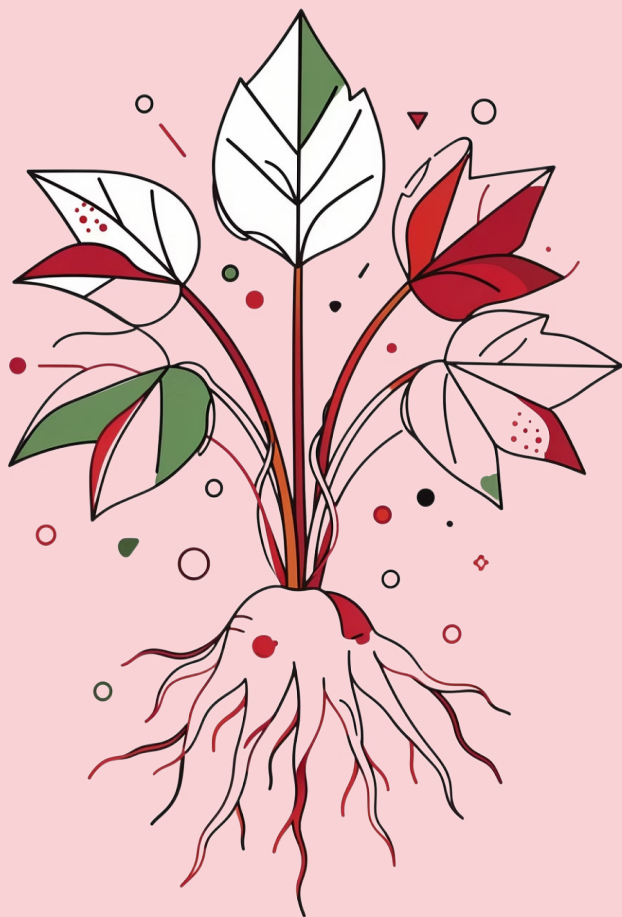




Biorrefinería de Yuca: Transformando Raíces en Valor

Una visión técnica integral para ingenieros de procesos sobre el aprovechamiento de *Manihot esculenta* como plataforma de biorrefinería moderna.



La Yuca: Un Tesoro Subutilizado

Producción Global

Más de **200 millones de toneladas** anuales. Tercer cultivo tropical más importante del mundo.

Composición Clave

Almidón hasta **80% en base seca**, fibra, proteínas y humedad (~65% en fresco).

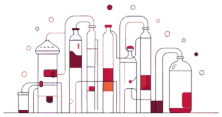
Uso Tradicional

Alimentación humana y animal. Potencial subutilizado para valorización industrial.

Oportunidad

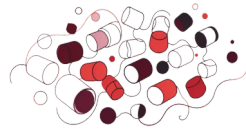
Materia prima versátil y de bajo costo para una **biorrefinería integrada** moderna.

Productos y Subproductos Clave



Etanol (Biocombustible)

Fermentación y destilación del almidón hidrolizado.
Principal producto de mayor valor de mercado.



Bioplásticos (PHB)

Polihidroxibutirato producido por fermentación bacteriana. Alternativa biodegradable a plásticos petroquímicos.



Biocarbón

Pirólisis lenta de cáscaras y ramas. Enmienda de suelos y captura de carbono.



Ácido Levulínico

Plataforma química derivada de azúcares C6. Base para solventes, combustibles y polímeros.

Los residuos de fibra y vinaza también se valorizan como **alimentos para animales** y **fertilizantes orgánicos**, cerrando el ciclo de materiales.

Diagrama de Flujo: Biorrefinería de Yuca



El enfoque de biorrefinería integrada maximiza el aprovechamiento de cada fracción de la yuca, generando múltiples corrientes de valor a partir de una sola materia prima.

Balances de Masa y Energía

Balance de Masa — Producción de Etanol

Corriente	Cantidad	Fracción
Yuca fresca (entrada)	1,000 kg	100%
Almidón disponible	250 kg	25%
Azúcares fermentables	225 kg	90% del almidón
Etanol teórico (0.51 kg/kg)	114.8 kg	~51%
Pérdidas (CO ₂ , agua)	110.2 kg	~49%
Residuos (fibra, vinaza)	750 kg	75%

Balance de Energía — Consideraciones Clave

Entradas de Energía

Vapor para hidrólisis (~120°C) y destilación (~80°C); energía eléctrica para molienda y bombeo.

Recuperación Energética

Combustión de biocarbón: ~18–22 MJ/kg. Biogás de vinaza via digestión anaerobia: ~0.35 m³ CH₄/kg DQO.

Calor Neto Estimado

Proceso destilación: ~8–12 MJ/L de etanol.
Cogeneración puede cubrir hasta 60% de la demanda térmica.

Estimaciones CAPEX y OPEX

CAPEX — Planta de Etanol (Escala Media)

Área	Costo (US \$)
Molienda y preparación	150,000 – 300,000
Hidrólisis y fermentación	200,000 – 400,000
Destilación y purificación	300,000 – 600,000
Infraestructura y servicios	250,000 – 500,000
Total Estimado	900,000 – 1,800,000

OPEX — Costos Anuales de Operación

Rubro	Costo Anual (US \$)
Energía (eléctrica + vapor)	100,000 – 250,000
Mano de obra	80,000 – 150,000
Mantenimiento y consumibles	50,000 – 100,000
Materia prima (yuca)	Variable por región
Total (sin materia prima)	230,000 – 500,000

 La cogeneración con biogás de vinaza puede reducir el OPEX energético hasta un 40%, mejorando significativamente la rentabilidad.

Ejemplo de Cálculo: Rendimiento de Etanol

Datos del Sistema

Concentración de azúcares	180 g/L
Volumen del fermentador	10,000 L
Tiempo de fermentación	48 horas
Rendimiento teórico (Gay-Lussac)	0.511 g EtOH/g azúcar
Eficiencia real	85% del teórico

❏ La reacción estequiométrica base es: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$ (rendimiento teórico = 0.511 g/g)

Desarrollo del Cálculo

1 Azúcar total en fermentador
 $180 \text{ g/L} \times 10,000 \text{ L} = \mathbf{1,800,000 \text{ g} = 1,800 \text{ kg}}$

2 Etanol teórico máximo
 $1,800 \text{ kg} \times 0.511 = \mathbf{919.8 \text{ kg de EtOH}}$

3 Etanol real producido
 $919.8 \text{ kg} \times 0.85 = \mathbf{781.8 \text{ kg} \approx 990 \text{ L de EtOH anhidro}}$ ($\rho = 0.789 \text{ kg/L}$)

Caso de Estudio 1: Biocarbón por Pirólisis de Residuos de Yuca

Parámetros del Proceso

Variable	Valor
Materia prima	Ramas y cáscaras de yuca
Tipo de pirólisis	Lenta (slow pyrolysis)
Temperatura	400 – 500 °C
Rendimiento biocarbón	Hasta 41.22% (base seca)
Poder calorífico	~18–22 MJ/kg

Resultados y Viabilidad

Aplicaciones

Enmienda de suelos agrícolas, captura de carbono estable (C recalcitrante), material de electrodo para supercapacitores.

Viabilidad Regional

Técnica y económicamente viable en zonas con alta producción de yuca como la **Orinoquía colombiana**.

Valorización

Residuos que de otro modo serían desechados o quemados a campo abierto generan **ingresos adicionales** significativos.

Fuente: Celis-Carmona et al., 2025.

Caso de Estudio 2: Etanol de Yuca como Biocombustible

Indicadores Económicos Clave

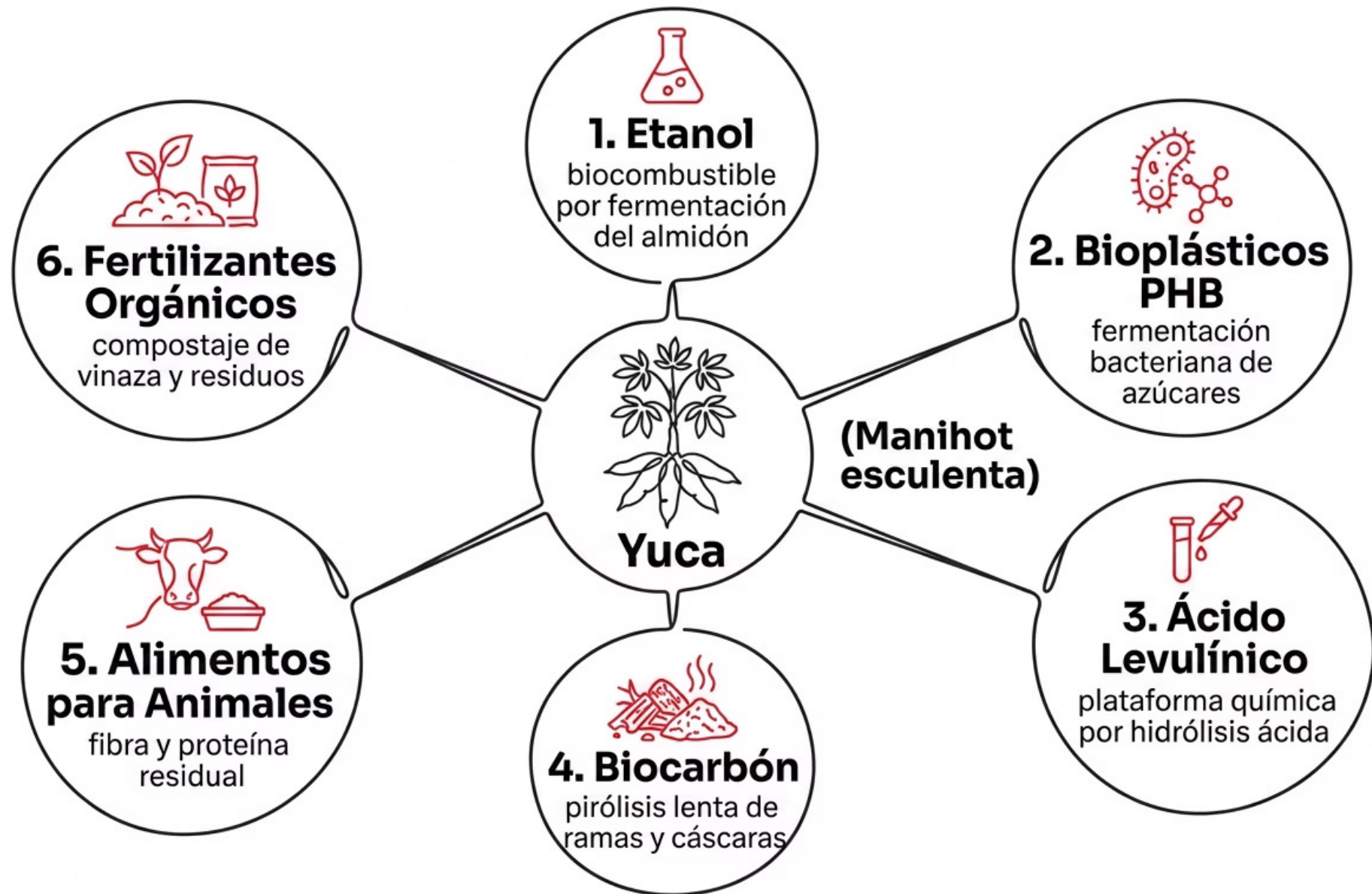
Indicador	Valor
Proceso aplicado	SFS (Sacarificación y Fermentación Simultánea)
TIR del proyecto	13.53%
VAN	Positiva (escenario base)
Mercado objetivo	Refinerías (ej. Petroperú)
Competencia	Etanol de caña de azúcar

Fuente: Rodriguez Yagui & Lazo Rodriguez, 2020.

Factores Críticos de Éxito

- **Optimización de la hidrólisis**
Selección de enzimas y condiciones óptimas de pH y temperatura (~55°C, pH 4.8).
- **Reducción de costos de MP**
Contratos directos con cultivadores locales. El costo de yuca representa ~40–50% del OPEX total.
- **Integración de subproductos**
Valorización de vinaza y CO₂ de fermentación mejora la rentabilidad global del proyecto.

Mapa de Productos: Biorrefinería de Yuca



La integración de estas corrientes de valor dentro de un esquema de biorrefinería maximiza el retorno económico y minimiza la generación de residuos, alineándose con los principios de economía circular.

Bibliografía y Referencias

Celis-Carmona et al. (2025)

Diseño conceptual de planta de pirólisis lenta para biocarbón de residuos de yuca. *Rev. Sistemas de Producción Agroecológicos*, 16(1), e-1170. DOI: 10.22579/22484817.1170

Clauser et al. (2023)

Process Design for Value-Added Products in a Biorefinery Platform from Agro and Forest Industrial Byproducts. *Polymers*, 15(2), 274. DOI: 10.3390/polym15020274

Gonzales & Ponce (2024)

Destilador automatizado para producción de etanol de yuca como biocombustible. Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Rodriguez Yagui & Lazo Rodriguez (2020)

Estudio de prefactibilidad para planta productora de etanol a partir de yuca. Repositorio Universidad de Lima. hdl.handle.net/20.500.12724/12024

Ramírez de León (2020)

Análisis de esquema de biorrefinería mediante criterios de sustentabilidad. Tesis de maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.