



Biorrefinería del Plátano

Análisis integral de productos, subproductos, balances de masa y energía, y evaluación económica

Una visión técnica y económica para ingenieros especialistas en procesos industriales — desde la composición de la biomasa hasta la valorización completa de cada fracción del plátano.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIOECONOMÍA CIRCULAR

ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO

Agenda

01

Composición de la biomasa del plátano

Caracterización fisicoquímica de racimo, cáscara, pseudotallo y pulpa.

02

Productos y subproductos de la biorrefinería

Mapa completo de corrientes de valorización: almidón, fibra, pectina, biogás, bioetanol y más.

03

Balances de masa y energía

Cálculos detallados por fracción con ejemplos numéricos y diagramas de flujo.

04

Análisis de costos CAPEX y OPEX

Estimación de inversión y costos operativos en USD para una planta de referencia de 10 t/h.

05

Casos de estudio y bibliografía

Plantas piloto y comerciales en América Latina, África y Asia con resultados documentados.

Composición de la Biomasa del Plátano

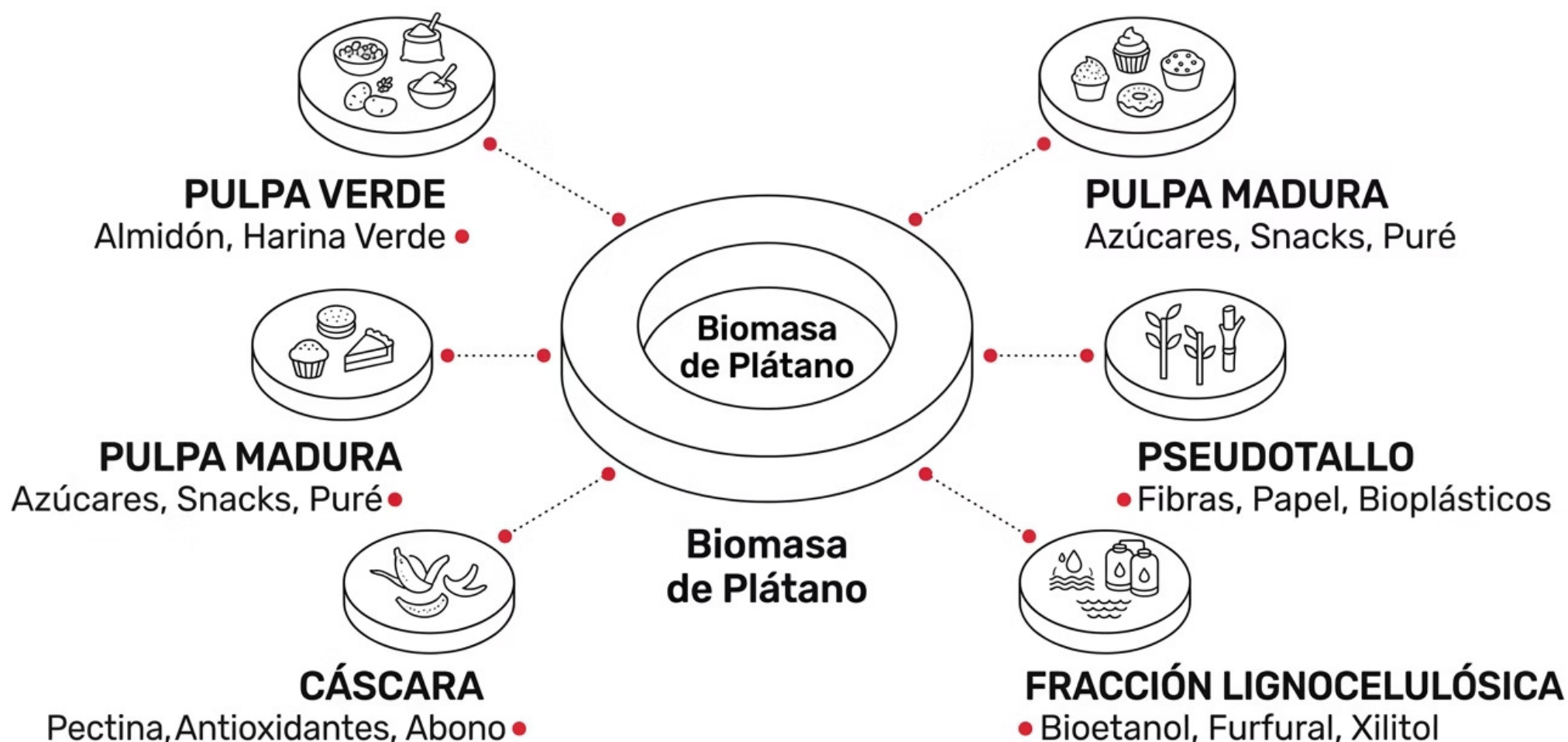
El plátano (*Musa* spp.) genera una biomasa compleja distribuida en cuatro fracciones principales. Entender su composición fisicoquímica es el punto de partida para diseñar una biorrefinería eficiente. Los datos siguientes corresponden a base húmeda y seca según fracción.

Fracción	Humedad (%)	Almidón (%bs)	Celulosa (%bs)	Hemicelulosa (%bs)	Lignina (%bs)	Cenizas (%bs)
Pulpa verde	65–70	60–70	3–5	2–4	1–2	2–3
Pulpa madura	72–78	1–5	2–3	1–2	0.5–1	1–2
Cáscara	85–90	5–10	10–14	8–12	6–10	8–12
Pseudotallo	92–95	1–3	34–40	18–22	8–12	10–15
Raquis/Vástago	88–92	2–5	28–35	15–20	7–10	6–9

Fuente: FAO (2022); Ramos-Ramírez et al. (2020); Vázquez-Flores & Ortiz (2019). bs = base seca.

Mapa de Productos y Subproductos de la Biorrefinería

Una biorrefinería integral del plátano transforma la totalidad de la biomasa disponible en productos de alto valor agregado, minimizando los residuos al mínimo termodinámico posible.



Cada fracción tiene una ruta preferencial determinada por su composición química, el valor de mercado del producto objetivo y la complejidad tecnológica del proceso de transformación.

Balance de Masa — Planta de Referencia (10 t/h de Racimo Fresco)

El siguiente balance de masa se calcula sobre una alimentación de **10 toneladas por hora de racimo fresco entero (RFE)**. Se asumen rendimientos medios de proceso documentados en literatura especializada.

Corriente	Fracción de RFE (%)	Flujo másico (t/h)	Humedad (%)	Flujo seco (t/h)	Producto principal
Pulpa verde	32	3.20	68	1.024	Almidón nativo
Cáscara	40	4.00	87	0.520	Pectina / compost
Pseudotallo	22	2.20	93	0.154	Fibra celulósica
Raquis	6	0.60	90	0.060	Biogás (AD)
TOTAL	100	10.00	—	1.758	—

Ejemplo de cálculo — Rendimiento de almidón: Pulpa seca = 1.024 t/h × 0.65 (fracción almidón) = **0.666 t/h de almidón bruto**. Con eficiencia de extracción húmeda del 88%: **0.586 t/h de almidón nativo seco** (≈ 14.1 t/día a 24 h/día de operación).

Balance de Energía — Proceso de Extracción de Almidón y Secado

Entradas y salidas energéticas clave (base: 1 t de pulpa húmeda)

Operación	Tipo	Energía (MJ/t pulpa)
Lavado y rallado	Eléctrica	18–25
Tamizado húmedo	Eléctrica	8–12
Centrifugación	Eléctrica	30–45
Secado por aspersión	Térmica (vapor)	1 800–2 200
Secado flash	Térmica (gas)	900–1 100
Refrigeración almacén	Eléctrica	15–20
TOTAL (secado aspersión)	—	~2 100

La etapa de secado concentra el 85–88% del consumo energético total. La integración de calor con la planta de biogás puede reducir este consumo hasta un **35%**.

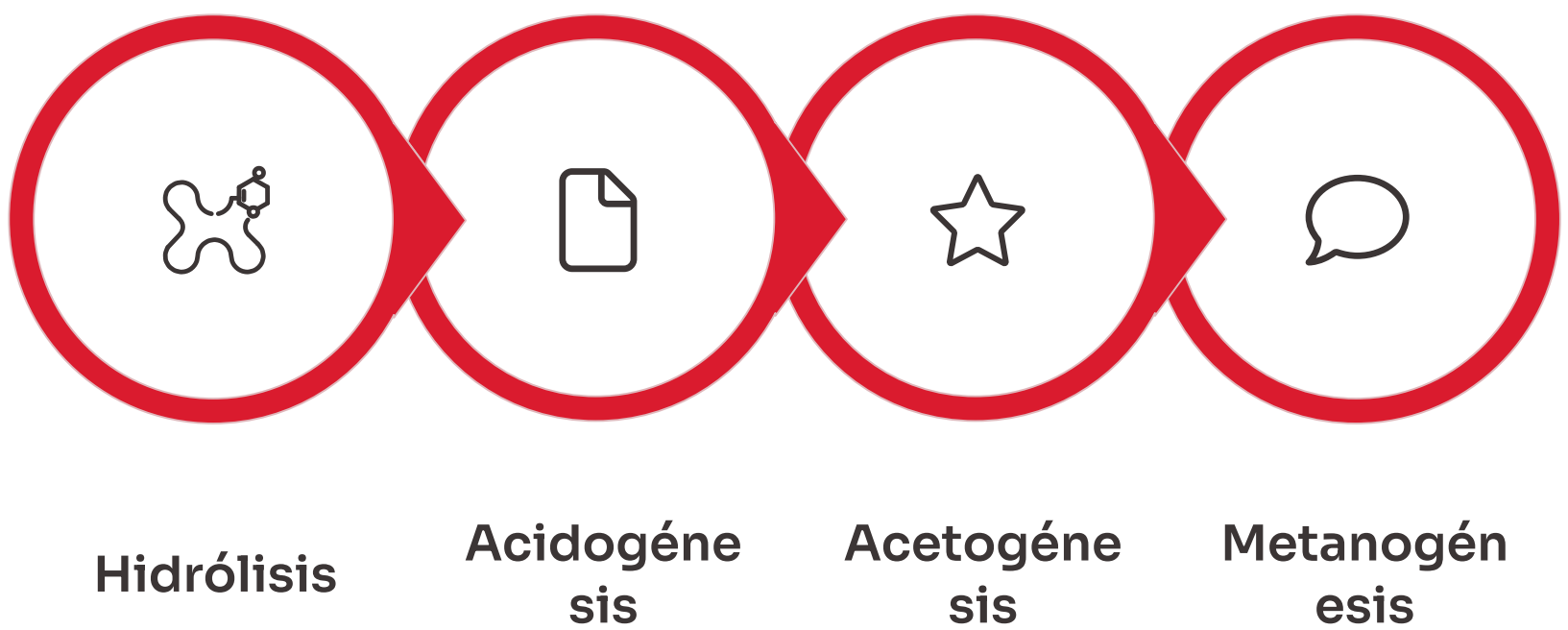
Indicadores de intensidad energética

Energía específica: ~2 100 MJ por tonelada de pulpa húmeda procesada.

Energía por kg de almidón: ~3.2 MJ/kg de almidón seco (secado flash) vs. ~5.8 MJ/kg (secado por aspersión).

Potencial de recuperación: La digestión anaerobia del raquis y aguas residuales genera ~180–220 m³ CH₄/t sólidos volátiles, equivalente a ~6.5 GJ/t, cubriendo hasta el 40% de la demanda térmica del secado.

Proceso de Digestión Anaerobia — Balance de Masa y Energía



Parámetros de diseño del reactor CSTR

Alimentación (SV)	0.614 t SV/h
TRH (Tiempo Retención Hidráulico)	20–25 días
Temperatura mesofílica	35–38 °C
Producción de biogás	200 m³/t SV
Contenido CH ₄	62%
Potencia eléctrica (CHP)	~0.85 MWe
Potencia térmica recuperable	~1.10 MWt

Ejemplo de cálculo — Potencia eléctrica

Biogás generado: $0.614 \text{ t SV/h} \times 200 \text{ m}^3/\text{t} = \mathbf{122.8 \text{ m}^3/\text{h}}$

Caudal CH₄: $122.8 \times 0.62 = \mathbf{76.1 \text{ m}^3/\text{h}} = 0.030 \text{ GJ/h} \times 76.1 = \mathbf{2.28 \text{ GJ/h}}$

Motor CHP ($\eta_e = 38\%$): $P_e = 2.28 \times 0.38 = \mathbf{0.867 \text{ GJ/h} \approx 0.85 \text{ MWe}}$

Calor recuperado ($\eta_t = 48\%$): $P_t = 2.28 \times 0.48 = \mathbf{1.09 \text{ GJ/h} \approx 1.10 \text{ MWt}}$

Análisis Económico — CAPEX

Estimación de inversión en capital para una biorrefinería integral de plátano con capacidad de **10 t/h de racimo fresco** (operación continua, 7 200 h/año). Precios en dólares estadounidenses (USD), año base 2023. Factor de instalación Lang = 4.74 (fluidos-sólidos mixtos).

Unidad de Proceso	Equipo principal	Costo equipo (USD k)	Factor instalación	Costo instalado (USD k)
Recepción y lavado	Cintas, tolvas	180	2.5	450
Extracción de almidón	Rallador, hidrociclones, centrifugas	620	3.8	2 356
Secado de almidón (flash)	Secador flash + ciclón	480	3.2	1 536
Extracción de pectina	Reactores ácidos, filtros prensa	350	4.0	1 400
Digestión anaerobia (CSTR)	Reactor 1 200 m³ + CHP	900	3.5	3 150
Fibra / papel (pseudotallo)	Desfibrador, blanqueo, secado	420	3.6	1 512
Tratamiento de efluentes	Laguna, filtros, PTAR	280	3.0	840
Servicios e infraestructura	Vapor, agua, electricidad	550	2.8	1 540
TOTAL CAPEX	—	3 780	—	12 784

❑ **Contingencia e ingeniería:** Se añade un 15% sobre el costo instalado para contingencias (\$1 918 k) y un 10% para ingeniería y gestión de proyecto (\$1 278 k). **CAPEX total estimado: ~\$15.98 millones USD.**

Análisis Económico — OPEX y Rentabilidad

Costos Operativos Anuales (OPEX) — USD/año

Partida	USD/año
Materia prima (plátano, \$35/t)	2 520 000
Energía eléctrica neta comprada	420 000
Agua de proceso	95 000
Reactivos químicos (HCl, NaOH, etc.)	310 000
Mano de obra (25 operarios)	750 000
Mantenimiento (3% CAPEX)	479 400
Seguros y administración (2%)	319 600
OPEX TOTAL	4 894 000

Costo operativo unitario: **\$68.0 USD/t de RFE procesado** (base: 72 000 t/año).

Ingresos Anuales y Métricas de Rentabilidad

Producto	Ingreso (USD/año)
Almidón nativo (\$550/t)	2 748 000
Pectina (\$4 500/t)	1 350 000
Fibra celulósica (\$320/t)	480 000
Electricidad vendida (CHP)	410 000
Digestato fertilizante	185 000
INGRESOS TOTALES	5 173 000

EBITDA anual: \$5 173 k – \$4 894 k = **\$279 000 USD**

Con depreciación lineal 15 años: EBIT $\approx$ –\$786 k/año (años 1–5 críticos)

Punto de equilibrio: ~\$280/t RFE o recuperación a 12–14 años sin optimización. La integración de pectina de alta pureza farmacéutica (\$12 000/t) mejora el retorno a **7–8 años**.

Caso de Estudio 1 — Biorrefinería Tropicana (Ecuador, 2021)



Descripción del proyecto

Planta piloto-comercial ubicada en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Capacidad: **4 t/h de rechazo de exportación** (plátano no apto para exportación, ~18% de la producción total). Financiamiento mixto: BID Invest + capital privado nacional.

Productos y resultados documentados

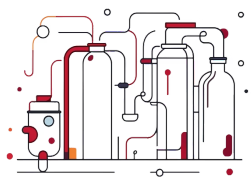
- Harina verde de plátano: 850 t/año a \$480/t → **\$408 k/año**
- Almidón nativo resistente (RS3): 320 t/año a \$920/t → **\$294 k/año**
- Vinagre de plátano (fermentación): 95 000 L/año → **\$47.5 k/año**
- Compost de cáscara: 600 t/año a \$65/t → **\$39 k/año**

Indicadores clave

- CAPEX ejecutado: **\$3.2 M USD**
- OPEX anual: **\$1.1 M USD**
- Tiempo de retorno simple: **~9.8 años** (con subsidio arancelario)
- Reducción de residuos orgánicos al vertedero: **92%**

Fuente: Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador (MIPRO), Informe Técnico No. 14-2022.

Caso de Estudio 2 — Planta Piloto CENIPALMA/SENA (Colombia, 2020)



Módulo de Digestión Anaerobia

Reactor UASB de 80 m³ alimentado con residuos del pseudotallo y aguas de lavado. Producción: 42 m³ CH₄/día → **145 kWe netos**. Autoabastecimiento energético del 78% de la planta piloto.



Línea de Almidón Resistente

Extracción húmeda + ciclo de retrogradación controlada (4 °C, 24 h). Rendimiento: **58% almidón RS tipo 3** sobre base seca. Precio de venta obtenido: \$1 100 USD/t en mercado colombiano de alimentos funcionales.



Extracción de Pectina de Cáscara

Proceso con HCl 0.1 N a pH 2.0, 85 °C, 90 min. Rendimiento: **12.4% sobre peso seco de cáscara**. Grado de esterificación: 68% (pectina de alto metoxilo). Valor de mercado: \$3 800–4 200 USD/t.

Fuente: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria — AGROSAVIA, Boletín Técnico BT-2020-11; SENA Centro Agropecuario del Cauca.

Ejemplo de Cálculo Detallado — Extracción de Pectina

Se presenta el dimensionamiento de un reactor de extracción ácida para procesar **4.0 t/h de cáscara húmeda** (≈ 0.52 t/h base seca, 87% humedad).

Paso 1 — Masa de pectina extraíble

Cáscara seca: $0.52 \text{ t/h} \times 1\,000 = \mathbf{520 \text{ kg/h}}$

Rendimiento pectina: 12.4% $\rightarrow \mathbf{64.5 \text{ kg pectina cruda/h}}$

Pureza tras precipitación con etanol (85%): **54.8 kg pectina pura/h** = **394 t/año** (7 200 h/año)

Paso 2 — Volumen del reactor

Relación sólido:líquido = 1:20 (m/v) $\rightarrow$ Volumen de agua ácida = $520 \times 20 = \mathbf{10\,400 \text{ L/h}}$

Tiempo de residencia: 90 min $\rightarrow$ Volumen útil reactor: $10\,400 \times 1.5 = \mathbf{15\,600 \text{ L} = 15.6 \text{ m}^3}$

Con factor de llenado 0.75: **Volumen total reactor = 20.8 m³** $\rightarrow$ Se adoptan **2 reactores de 12 m³ en paralelo**.

Paso 3 — Consumo de HCl

pH objetivo = 2.0 $\rightarrow [\text{H}^+] = 0.01 \text{ mol/L}$

Vol. solución: $10\,400 \text{ L/h} \times 0.01 \text{ mol/L} = \mathbf{104 \text{ mol HCl/h}}$

Masa HCl (MM = 36.46 g/mol): $104 \times 36.46 = \mathbf{3\,792 \text{ g/h} = 3.79 \text{ kg HCl/h}}$

HCl comercial 32%: $3.79 / 0.32 = \mathbf{11.8 \text{ kg/h de solución ácida comercial}}$

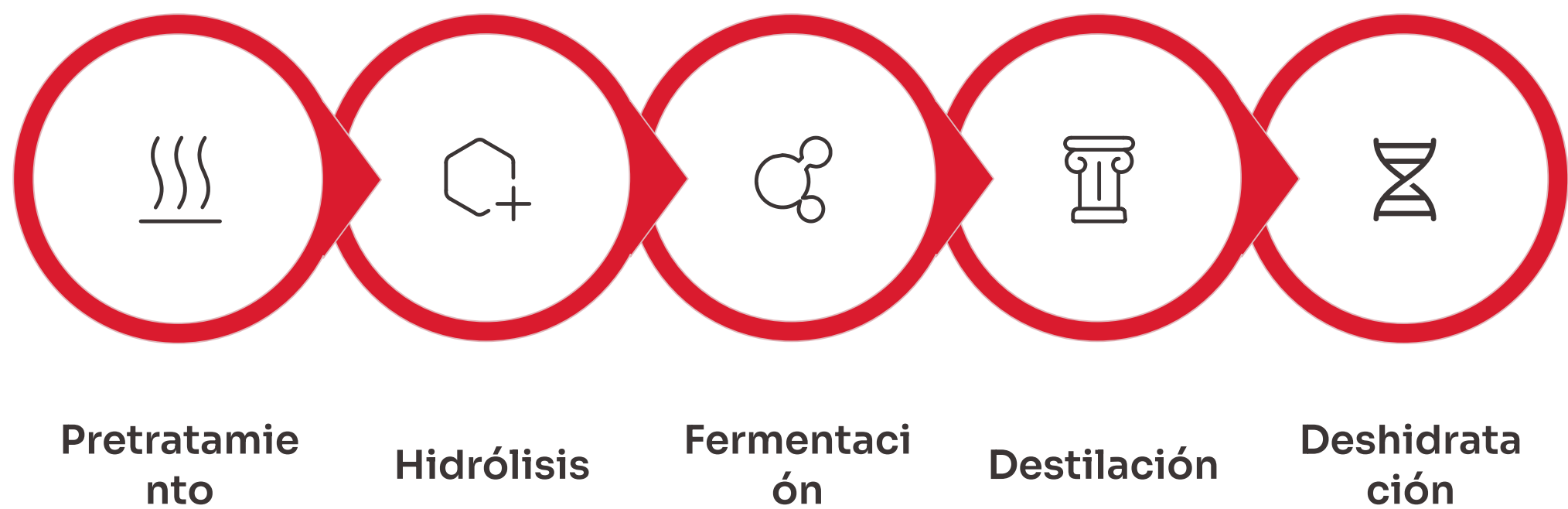
Paso 4 — Costo de reactivos (HCl)

HCl 32% precio: \$0.22 USD/kg

Costo anual: $11.8 \text{ kg/h} \times 7\,200 \text{ h} \times \$0.22 = \mathbf{\$18\,662 \text{ USD/año}}$

✓ Ingreso anual por pectina: $394 \text{ t} \times \$4\,000/\text{t} = \mathbf{\$1\,576\,000 \text{ USD/año}}$. Ratio ingreso/costo reactivo HCl: **84:1**.

Producción de Bioetanol de 2ª Generación — Fracción Lignocelulósica



Parámetro	Unidades	Valor típico	Base: 2.2 t/h pseudotallo
Celulosa disponible (37% bs)	kg/h bs	—	56.8
Glucosa tras hidrólisis (η =85%)	kg/h	—	48.3
Rendimiento fermentación (Y_i =0.46)	kg EtOH/kg glucosa	0.46	22.2
Bioetanol anhidro producido	L/h (p =0.789)	—	28.1
Producción anual (7 200 h)	m ³ /año	—	202.3
Precio de venta bioetanol	USD/L	0.65–0.85	\$131–172 k/año

Indicadores de Sostenibilidad y Huella de Carbono

92%

Valorización de residuos

Porcentaje de la biomasa total del plátano convertida en productos o energía en una biorrefinería integral optimizada.

-0.38

tCO₂eq/t RFE

Huella de carbono neta (emisiones menos créditos por bioenergía y desplazamiento de fertilizantes sintéticos), según análisis LCA (ISO 14040).

\$68

USD/t OPEX unitario

Costo operativo por tonelada de racimo fresco procesado en la planta de referencia de 10 t/h a 7 200 h/año.

7-9

Años payback

Período de retorno de la inversión con escenario optimizado (pectina farmacéutica + créditos de carbono a \$15 USD/tCO₂eq).

Nota LCA: El crédito de carbono por evitar la quema a campo abierto del pseudotallo (0.22 tCO₂eq/t pseudotallo) y por la generación de bioenergía (CHP) representa un beneficio ambiental y económico adicional bajo esquemas de mercado voluntario de carbono (VCS/Gold Standard).

Bibliografía y Referencias Técnicas

Publicaciones científicas

Ramos-Ramírez, E. et al. (2020). "Physicochemical characterization of banana (*Musa AAB*) starch from different maturity stages." *Carbohydrate Polymers*, 229, 115555. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115555>

Vázquez-Flores, A. & Ortiz, C. (2019). "Pectin extraction from banana peels: optimization of conditions." *LWT Food Science and Technology*, 112, 108236.

FAO (2022). *Banana Market Review 2021 — Preliminary results*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. ISBN 978-92-5-135844-3.

Gómez-Merino, A. et al. (2021). "Biorefinery approach for valorization of banana pseudostem lignocellulosic biomass." *Bioresource Technology*, 336, 125299.

Informes técnicos e institucionales

MIPRO Ecuador (2022). Informe Técnico No. 14-2022: "Proyecto Biorrefinería Tropicana — Evaluación de resultados año 1." Ministerio de Industrias y Productividad, Quito.

AGROSAVIA — SENA Colombia (2020). Boletín Técnico BT-2020-11: "Extracción y caracterización de almidón resistente y pectina de plátano Dominico-Hartón." Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Turton, R. et al. (2018). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*, 5th ed. Prentice Hall. [Base para estimación CAPEX/OPEX, factores Lang].

IEA Bioenergy Task 37 (2023). "Anaerobic digestion of agricultural residues in tropical countries: design guidelines." International Energy Agency, Paris.