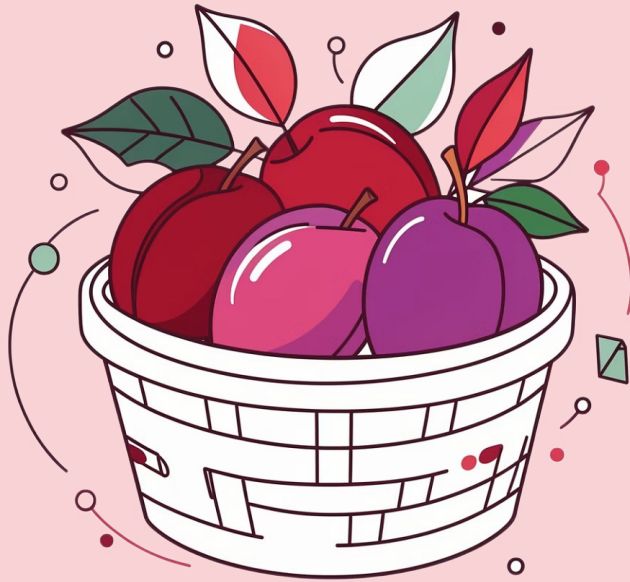




Biorrefinería de Ciruela

Valorización Integral y Sostenible de la Biomasa

Diseño de procesos · Balances de masa y energía · Análisis económico
(CAPEX/OPEX)



DIRIGIDO A INGENIEROS DE PROCESOS

Introducción: El Potencial Oculto de la Ciruela

¿Por qué la ciruela?

La ciruela (*Prunus domestica*) es una fruta ampliamente cultivada a nivel mundial, con una composición química diversa que la convierte en materia prima ideal para una biorrefinería. Su procesamiento industrial genera volúmenes significativos de residuos (pulpa, hueso, piel) con alto potencial de valorización.

Objetivos de la Presentación

→ Productos y subproductos

Identificar la cartera de productos de alto valor agregado.

→ Balances de ingeniería

Presentar balances de masa y energía con ejemplos de cálculo.

→ Viabilidad económica

Analizar CAPEX, OPEX y casos de estudio reales.



Materia Prima: Composición Química de la Ciruela

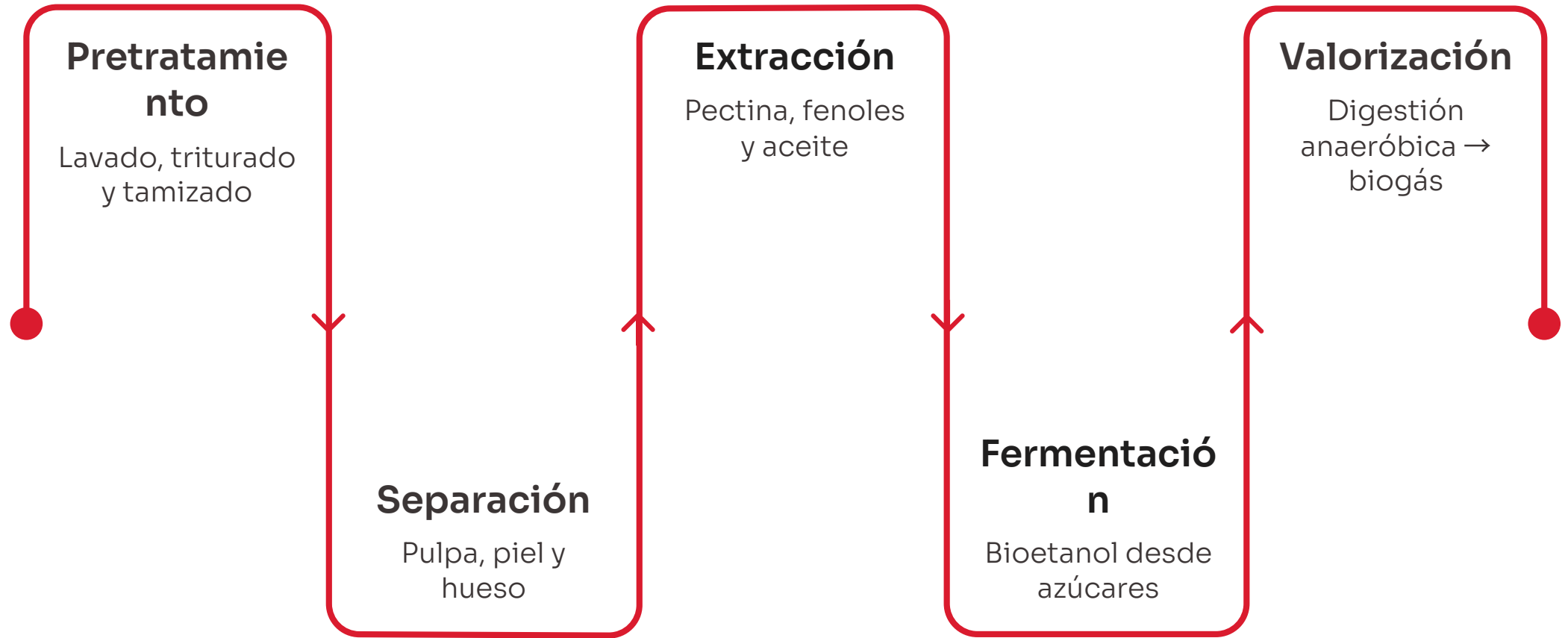


Fracción por componente (base húmeda, 1000 kg ciruela fresca)

Fracción	Masa (kg)	Componentes clave
Pulpa	780 – 820	Azúcares, pectina, ácidos orgánicos
Piel	60 – 80	Compuestos fenólicos, antocianinas
Hueso/semilla	100 – 130	Aceite (45–55 % p/p), proteína
Humedad total	820 – 870	~85 % en peso fresco

i El contenido de pectina en pulpa oscila entre 0.5–1.2 % (base seca). Los fenoles totales en piel alcanzan 800–1,200 mg GAE/100 g (base seca).

Diseño de la Biorrefinería: Flujo de Proceso



El flujo integrado maximiza la extracción de valor en cada fracción: los azúcares de pulpa alimentan la fermentación alcohólica; la piel provee antioxidantes; el hueso aporta aceite fino y carbón activado como subproducto; los residuos sólidos cierran el ciclo vía digestión anaeróbica.

Productos y Subproductos: Cartera de Valor



Bioetanol

Combustible renovable obtenido por fermentación alcohólica de los azúcares de pulpa. Rendimiento típico: **45–50 L/ton** de ciruela fresca.



Pectina

Agente gelificante para la industria alimentaria (mermeladas, yogures). Rendimiento: **5–10 % p/p** sobre pulpa seca. Precio de mercado: **US \$25–50/kg**.



Extracto Fenólico

Antioxidantes naturales (ácido clorogénico, antocianinas) para alimentos funcionales y cosméticos. Valor agregado: **US \$80–200/kg**.



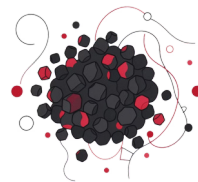
Aceite de Hueso

Rico en ácidos oleico y linoleico. Usos cosméticos y alimentarios. Rendimiento: **45–55 % p/p** sobre semilla seca.



Biogás / Biofertilizante

Digestión anaeróbica de pulpa residual. Producción estimada: **0.3–0.5 m³ CH₄/kg SV**. El digestato se aplica como biofertilizante.



Carbón Activado

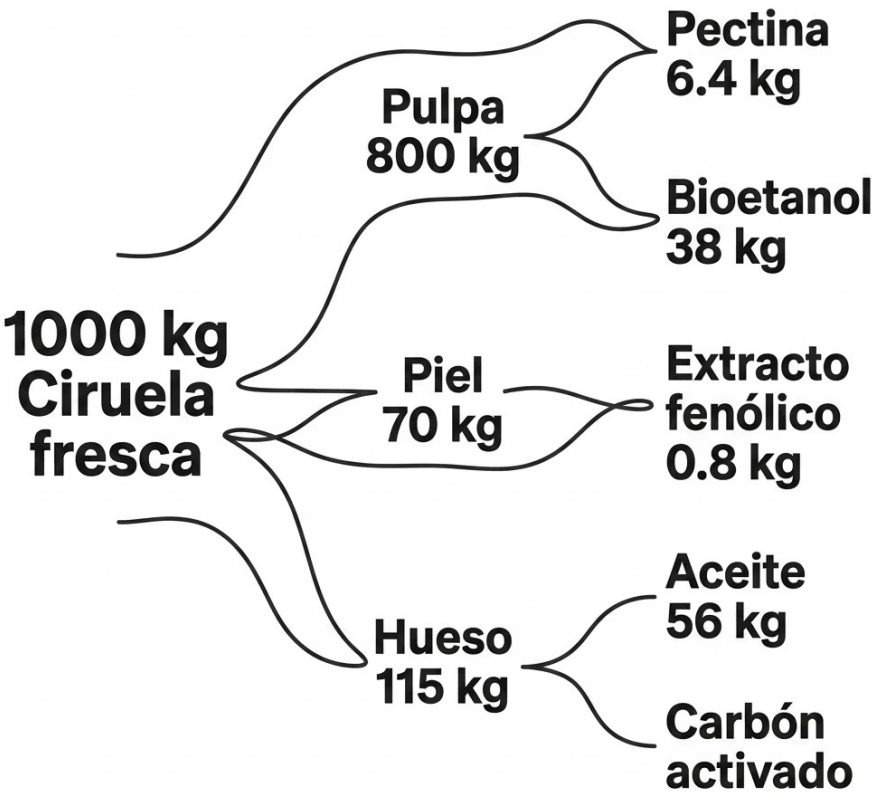
Obtenido por pirólisis y activación química del endocarpio (hueso). Área superficial: **800–1,200 m²/g**. Precio: **US \$1–3/kg**.

Balance de Masa: Ejemplo de Cálculo

Base de cálculo: 1,000 kg de ciruela fresca

Corriente	Masa entrada (kg)	Masa salida (kg)	Pérdidas / Agua evap. (kg)
Ciruela fresca	1,000	—	—
Pulpa (fresca)	—	800	—
Piel	—	70	—
Hueso + semilla	—	115	—
Pérdidas proceso	—	—	15
Pectina (seca)	—	6.4	~54 (agua extracción)
Bioetanol (96°GL)	—	38	—
Aceite semilla	—	56	—
Extracto fenólico	—	0.8	—

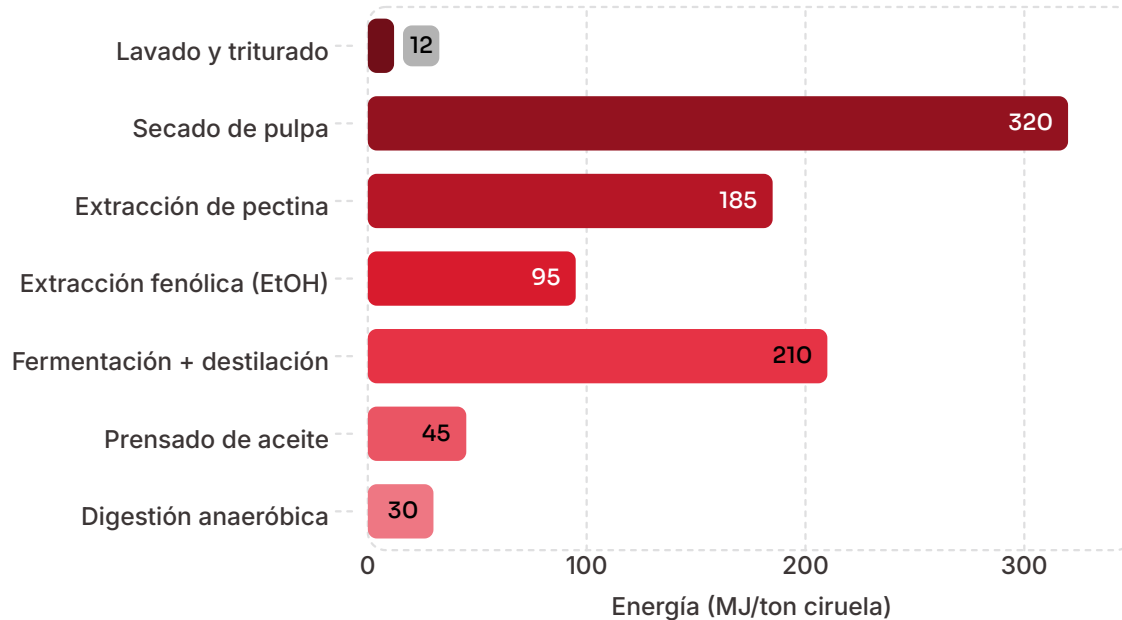
Diagrama de Sankey (flujos de masa, kg)



❏ Verificación: Σ entradas = Σ salidas + pérdidas (incluye humedad evaporada en secado y agua de proceso). El balance cierra con un error $\leq 2 \%$.

Balance de Energía: Consumo por Etapa

Etapa del proceso



Cogeneración y balance neto

El biogás producido ($0.4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$; $\text{PCI} = 35.8 \text{ MJ/m}^3$) permite cogeneración interna:

i El secado es la etapa más intensiva en energía (~36 % del total). La integración de calor residual del sistema de destilación puede reducir el consumo del secador en un 20–30 %.

Energía total consumida

~897 MJ/ton ciruela

Energía recuperada (biogás)

~215 MJ/ton ciruela

Balance neto

~682 MJ/ton ciruela ($\approx 76\%$)

Análisis Económico: CAPEX y OPEX

CAPEX — Planta 5,000 ton/año

Ítem	Costo estimado
Equipos principales (reactores, extractores, secadores, centrífugas)	US \$1.8–2.4 M
Instalación y montaje (30% equipo)	US \$0.54–0.72 M
Instrumentación y control	US \$0.18–0.24 M
Obra civil e infraestructura	US \$0.30–0.50 M
Ingeniería y puesta en marcha	US \$0.20–0.35 M
CAPEX Total	US \$3.0–4.2 M

OPEX — Costos operativos anuales

Ítem	Costo estimado
Materia prima (ciruela y residuos)	US \$180–220/ton
Energía (electricidad + vapor)	US \$45–65/ton
Mano de obra (15–20 operarios)	US \$0.25–0.40 M/año
Mantenimiento (3–5 % CAPEX)	US \$0.09–0.21 M/año
Químicos y solventes	US \$20–35/ton
OPEX Total	US \$290–380/ton ciruela

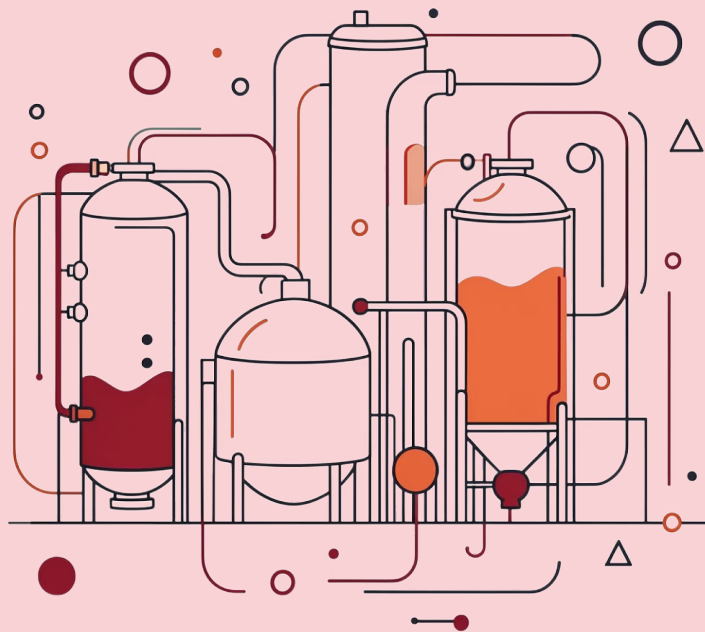
✔ Ingresos estimados: US \$520–680/ton de ciruela procesada (cartera completa de productos).
Margen bruto: 30–45 %.

Casos de Estudio y Ejemplos de Cálculo

Caso 1: Biorrefinería de Copoazú (referencia análoga)

Cerón, Higuita & Cardona (2015), Biomass Conv. Biorefinery

- Productos: pulpa, antioxidantes, biogás, aceite, etanol, PHB.
- Margen económico máximo: **13.21 %** con integración energética y cogeneración.
- La cogeneración redujo costos energéticos en un **28 %**.



Ejemplo de cálculo: Producción de Pectina

01

Entrada

1,000 kg pulpa de ciruela (base húmeda, 15 % MS)

02

Rendimiento

Pectina: 5–10 % sobre base seca →
7.5–15 kg pectina seca

03

Costo producción

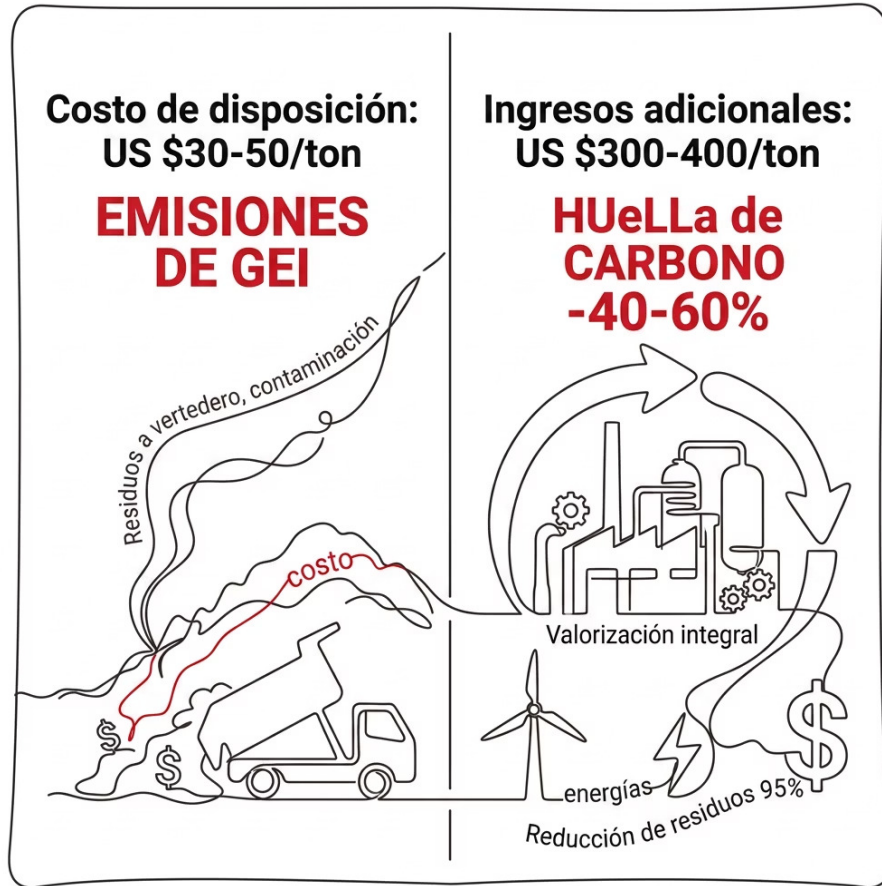
US \$10–20/kg (extracción ácida + secado spray)

04

Precio de mercado

US \$25–50/kg → **margen neto: US \$10–30/kg**

Viabilidad Técnica y Ambiental



Factores técnicos clave

Tecnología probada

Extracción sólido-líquido, fermentación y digestión anaeróbica son tecnologías maduras (TRL 8-9).

Escalabilidad

El diseño modular permite escalar de planta piloto (50 ton/día) a escala industrial (500+ ton/día).

ACV preliminar

La biorrefinería reduce las emisiones de GEI en un **40-60 %** vs. disposición convencional de residuos.

Conclusiones y Perspectivas Futuras

Valorización integral

La biorrefinería de ciruela permite convertir el 98 % de la biomasa en productos y subproductos de valor comercial, desde pectina y aceites hasta biocombustibles.

Viabilidad económica

Con un CAPEX de **US \$3–4.2 M** y márgenes brutos del **30–45 %**, el proyecto es atractivo para inversión agroindustrial a escala de 5,000 ton/año.

Integración energética

La cogeneración a partir de biogás cubre hasta el **24 %** de la demanda energética total, reduciendo el OPEX y la huella de carbono del proceso.

Líneas de investigación futuras

Optimización de rendimiento de pectina, caracterización de aceite de hueso, modelado riguroso (Aspen Plus), y análisis de mercado regional.

- ❑ Los ingenieros de procesos deben priorizar el diseño de la red de intercambio de calor (HEN) y la integración de solventes para maximizar la eficiencia global del sistema.

Bibliografía

1

Dávila Rincón & Cardona Alzate (2015)

Design of Biorefineries for High Value Added Products from Fruits. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

2

Cerón, Higuita & Cardona (2015)

Analysis of a biorefinery based on *Theobroma grandiflorum* (copoazú) fruit. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5(2), 183–194. DOI: 10.1007/s13399-014-0132-x

3

Muñoz-Briones et al. (2021)

Technical and economic pre-feasibility study of the implementation of a biorefinery for the conversion of orange peel waste. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 13(2), 14.

4

Sánchez Rendón et al. (2015)

Análisis tecno-económico de una biorefinería a partir de residuos del plátano. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 13, 32–39.

Presentación elaborada con fines académicos y profesionales para ingenieros de procesos en el campo de la agroindustria sostenible.