

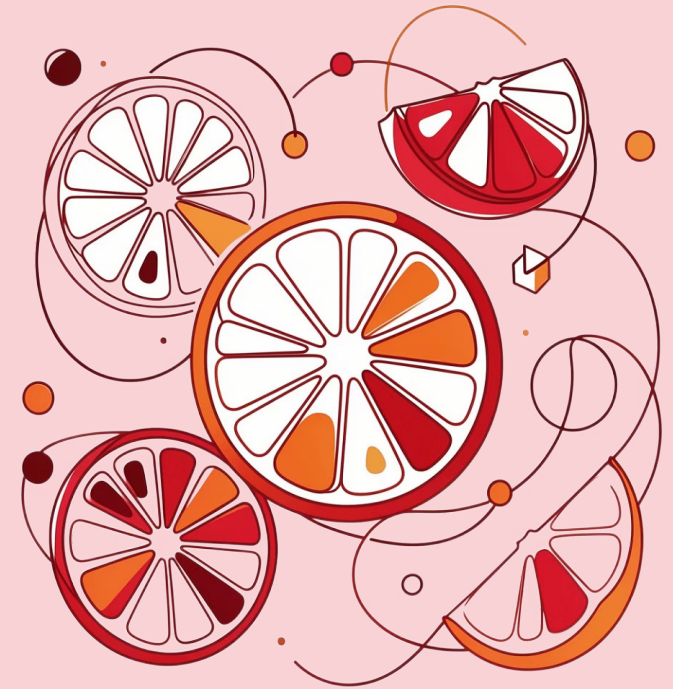
Biorrefinería de Mandarina

Valorización Integral de un Residuo Cítrico — Análisis técnico-económico para ingenieros de procesos industriales

INGENIERÍA DE PROCESOS

ANÁLISIS CAPEX / OPEX

BALANCES DE MASA Y ENERGÍA



La Oportunidad: Mandarina como Materia Prima de Alto Valor

Residuo Abundante

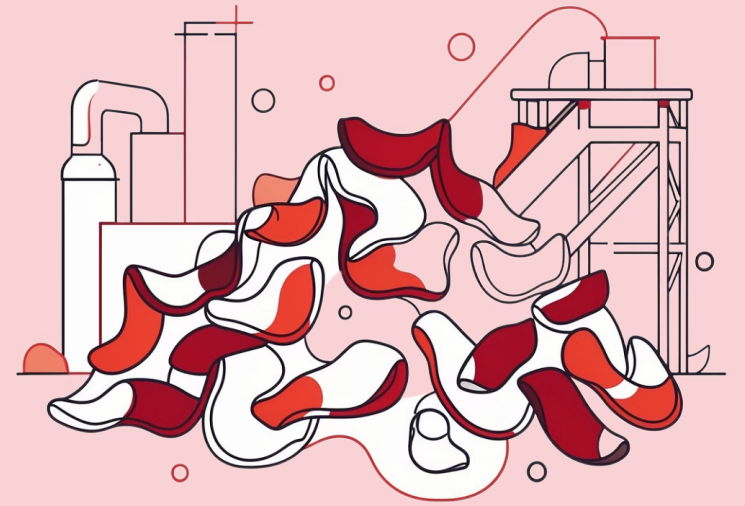
La cáscara representa hasta el 40% del peso del fruto. Regiones como Ecuador generan miles de toneladas anuales de este residuo orgánico.

Composición Rica

Aceites esenciales (1–3%), pectina (20–30% base seca), azúcares fermentables y flavonoides hacen de la cáscara una materia prima premium.

Valor Agregado

Transformar el residuo en productos comercializables genera beneficios económicos, reduce la carga ambiental y crea empleo local.



Productos y Subproductos Clave

La biorrefinería de mandarina permite extraer **múltiples corrientes de valor** a partir de un único residuo.



Aceite Esencial

Destilación por arrastre de vapor. Aplicaciones en perfumería, aromaterapia e industria alimentaria. Precio: US\$ 20–60/kg.



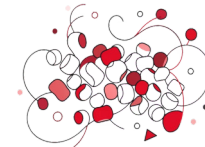
Pectina

Hidrólisis ácida + precipitación alcohólica. Gelificante y espesante en alimentos, farmacéutica y cosmética. Precio: US\$ 10–20/kg.



Bioetanol

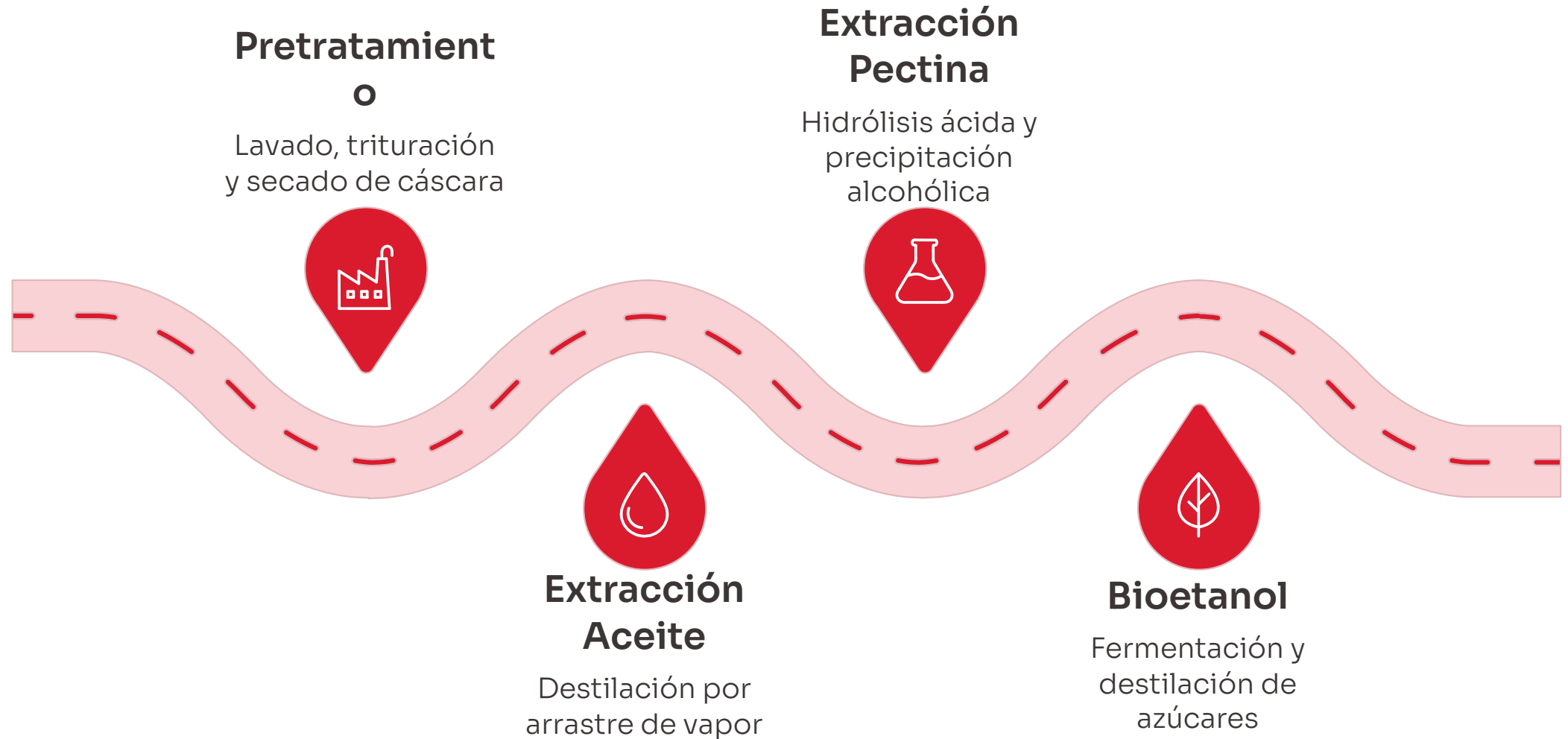
Fermentación de azúcares residuales. Combustible alternativo de bajo carbono. Precio: US\$ 0.5–1.0/L.



Pulpa y Residuos Secos

Subproducto proteico para alimentación animal o sustrato para compostaje y biogás (metanización).

Diagrama de Flujo del Proceso



Cada sección opera de forma semi-independiente, permitiendo ajustar la capacidad por línea de producto según demanda del mercado y disponibilidad de materia prima.

Balances de Masa: Base de Cálculo 1,000 kg/h de Cáscara Fresca

Corriente	Flujo (kg/h)	% del total
Cáscara fresca (entrada)	1,000	100%
Humedad evaporada (secado)	550	55%
Cáscara seca (base cálculo)	450	45%
Aceite esencial extraído	9–13.5	2–3%
Pectina producida	90–135	20–30%
Azúcares → Bioetanol	36–54	8–12%
Pulpa / residuos sólidos	~250	~55% restante

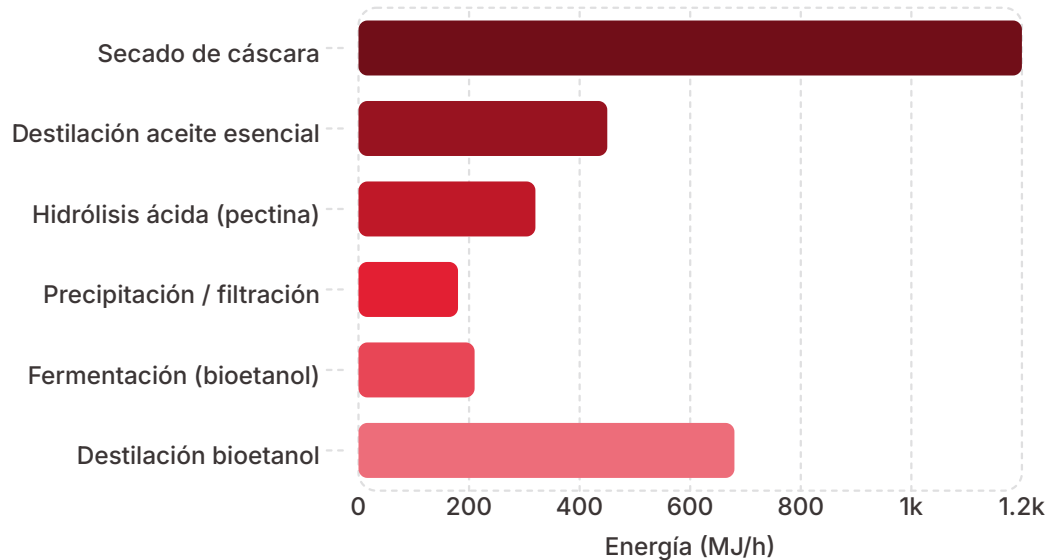
Supuesto clave: Cáscara fresca con 55% de humedad. Rendimiento de pectina: 20–30% sobre base seca. Rendimiento de aceite: 2–3% sobre base seca. Conversión de azúcares a etanol: 90% eficiencia fermentativa (Ley de Gay-Lussac).

Ejemplo de Cálculo — Pectina

Para producir **1,000 kg/día de pectina** con rendimiento del 25%:
Cáscara seca requerida = $1,000 / 0.25 = 4,000 \text{ kg/día}$
Cáscara fresca (55% humedad) = $4,000 / 0.45 = 8,889 \text{ kg/día}$

Balance de Energía: Requerimientos por Etapa

Etapa del Proceso



Oportunidades de Integración Energética

- Los vapores de destilación del aceite esencial pueden precalentar la corriente de hidrólisis (**ahorro ~15%**)
- El calor residual del secador alimenta el precalentamiento de agua de proceso (**ahorro ~10%**)
- La recirculación de etanol de precipitación reduce consumo de vapor en destilación (**ahorro ~20%**)

✅ La integración energética puede reducir el consumo total en **hasta un 35%**, mejorando significativamente el OPEX.

Equipamiento Clave y Dimensionamiento



Reactores de Hidrólisis

Tanques agitados 316L, pH 1.5–2.5, $T = 85\text{--}95^{\circ}\text{C}$. Volumen típico: 5–20 m³ para planta piloto.



Columnas de Destilación

Destilación azeotrópica para bioetanol (>99.5%). Columna de arrastre de vapor para aceite esencial.



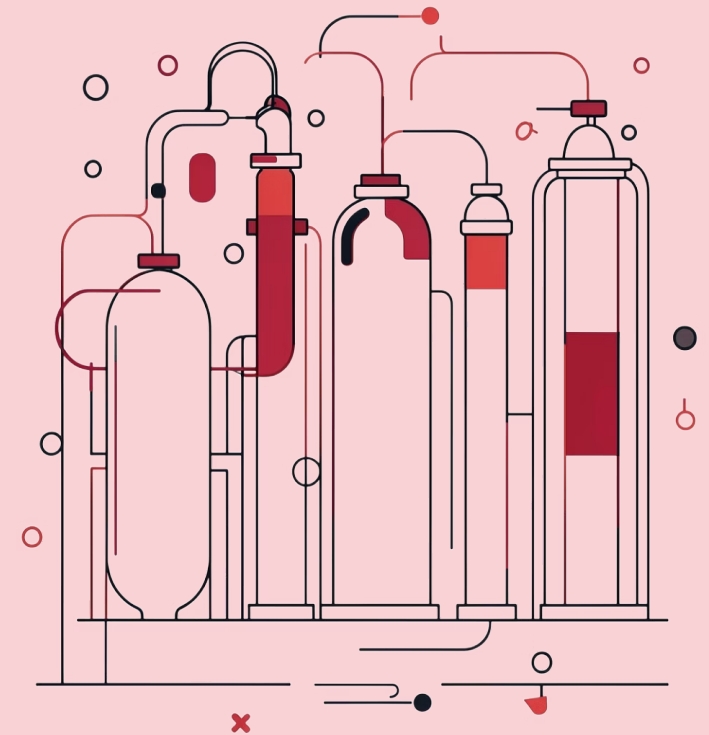
Secadores

Rotatorios o de lecho fluidizado. Temperatura de operación: 80–120°C. Humedad final <10%.



Centrífugas y Filtros

Separación sólido-líquido post-hidrólisis. Filtros de banda para pectina húmeda. G-force: 3,000–5,000.



Análisis Económico: CAPEX y OPEX

CAPEX — Inversión Inicial

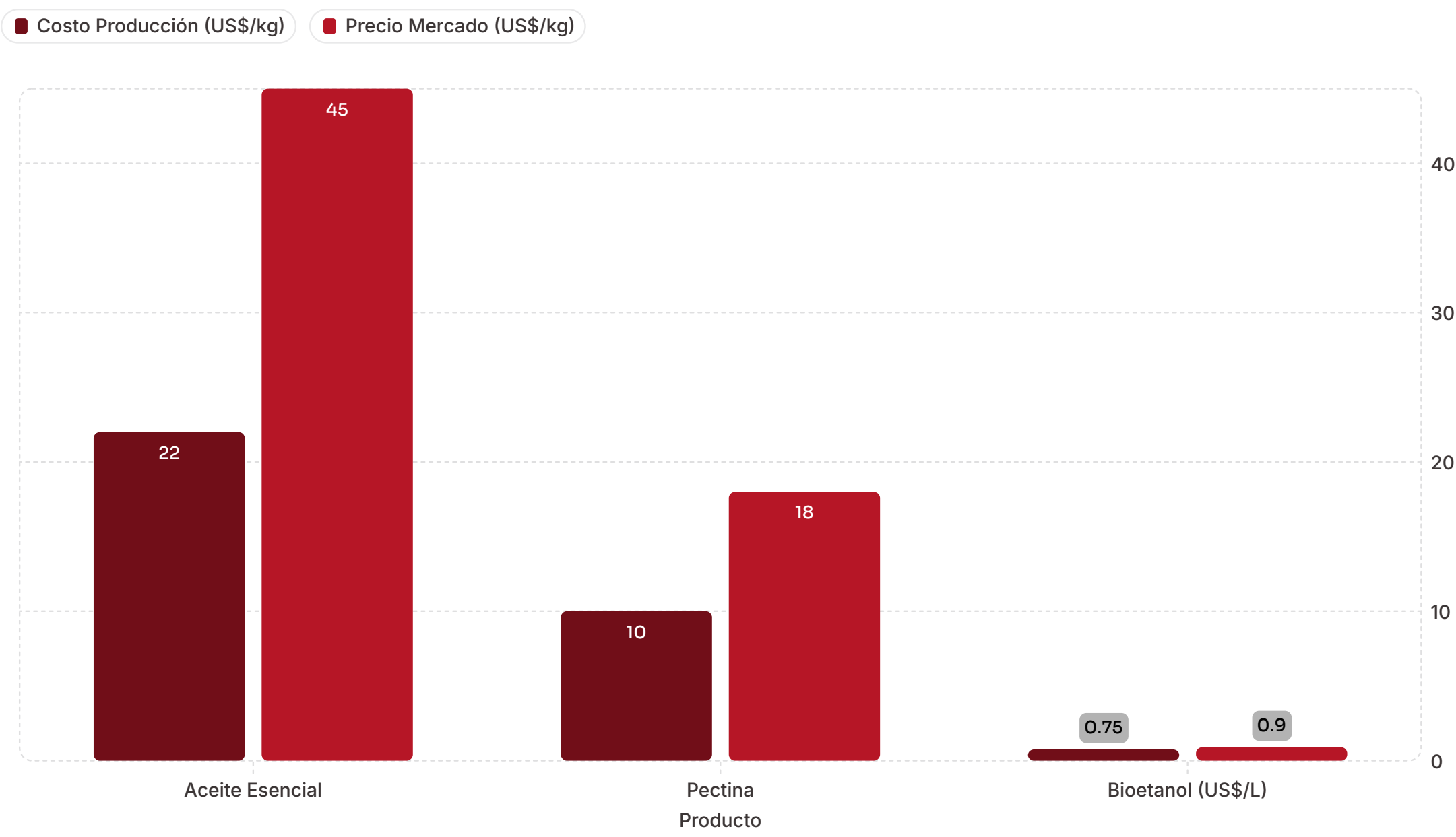
Planta aceite esencial + pectina (escala media):

- Equipos principales: **US\$ 1.2–2.5 M**
- Construcción civil: **US\$ 0.5–1.0 M**
- Ingeniería y permisos: **US\$ 0.3–0.5 M**
- Total estimado: US\$ 2–5 M**

OPEX — Costos Operativos Anuales

Rubro	Costo Anual (US\$)
Materia prima (cáscara)	150,000–300,000
Energía (vapor, electricidad)	120,000–250,000
Mano de obra	100,000–200,000
Insumos (HCl, etanol, agua)	80,000–150,000
Mantenimiento (3% CAPEX)	60,000–150,000
Total OPEX	510,000–1,050,000

Costos de Producción y Rentabilidad Estimada



Margen Bruto Estimado

51%

Aceite Esencial

Mayor margen por unidad. Motor de rentabilidad del proyecto.

44%

Pectina

Alto volumen de producción. Mercado global en crecimiento.

17%

Bioetanol

Margen menor, pero valoriza el 100% de los azúcares residuales.

Valores estimados. Dependen de escala, eficiencia del proceso y mercado local.

Casos de Estudio: Biorrefinerías Exitosas

 ECUADOR

Pre-factibilidad Biorrefinería Cítrica (Muñoz-Briones et al.)

Planta de cáscara de naranja para aceite esencial y pectina.

Rentabilidad positiva con payback de 5–6 años. Modelo replicable directamente para mandarina con ajuste de rendimientos.

 ARGENTINA

Planta de Bioetanol de Maíz (Gelsumino et al., 2020)

Capacidad: 200,000 m³/año.

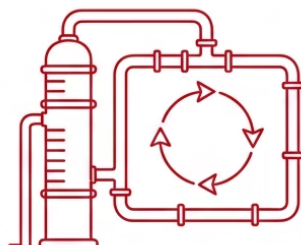
Inversión fija total: **US\$ 145 millones**. TIR: **22.72%**. Referencia de escala industrial para biorrefinerías de carbohidratos fermentables.

 CUBA

Biorrefinería de Biodiésel Multi-Producto (Galiano et al., 2022)

Esquema integrado con **9 plantas y 14 productos**. VAN: **US\$ 345 millones**. Período de recuperación: **2 años**. Demuestra el potencial de diversificación de corrientes en biorrefinerías complejas.

Viabilidad Técnica y Económica

 TECNOLOGÍA MADURA EXTRACCIÓN DE ACEITE Y PECTINA PROBADA A ESCALA INDUSTRIAL	 RECUPERACIÓN DE SOLVENTES RECIRCULACIÓN DE ETANOL CRÍTICA PARA OPEX
 DIVERSIFICACIÓN DE PRODUCTOS ACEITE + PECTINA + BIOETANOL MITIGA RIESGOS DE MERCADO	 MÉTRICAS POSITIVAS VAN, TIR Y PAYBACK FAVORABLES EN CASOS DE ESTUDIO ESTUDIO COMPARABLES

Factores Críticos de Éxito

01

Calidad de la materia prima: Cáscara fresca, bajo contenido de pesticidas, humedad controlada.

02

Integración de procesos: Secuencialidad óptima entre extracción de aceite → pectina → fermentación.

03

Recuperación de solventes: El etanol de precipitación debe recircularse (>95%) para mantener OPEX competitivo.

04

Mercado de destino: Definir si el aceite va a granel o especialidad (impacto directo en precio de venta).

Conclusiones y Próximos Pasos

Oportunidad Real

La biorrefinería de mandarina es técnica y económicamente viable. El aceite esencial y la pectina son los productos tructores de rentabilidad.

Estudio de Factibilidad

Se recomienda un estudio detallado con datos locales de materia prima, energía y mercado para ajustar CAPEX y OPEX a la escala deseada.

Optimización Energética

La integración térmica y la recirculación de solventes son palancas clave para reducir costos operativos hasta en un 35%.

Bibliografía

- Alvarez-Barreto, J. F. (2021). *Estudio de pre-factibilidad técnica y económica de la implementación de una biorrefinería para la conversión de residuos de cáscara de naranja*. Universidad del Ecuador.
- Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. (2020). *Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz*. UTN Argentina.
- Galiano Morell, D. D. A., et al. (2022). *Evaluación económica de la producción de biodiésel con un enfoque de biorrefinería*. Revista Cubana de Ingeniería.