

Biorrefinería del Cacao

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

Presentación técnica orientada a ingenieros especialistas en procesos industriales. Abarca desde la composición química de la materia prima hasta el análisis de viabilidad económica (CAPEX/OPEX), con casos de estudio y ejemplos de cálculo.

BIORREFINERÍA

INGENIERÍA DE PROCESOS

ECONOMÍA INDUSTRIAL



Agenda

01

Composición del grano de cacao

Fraccionamiento químico y potencial biorefinable de cada componente.

02

Árbol de productos y subproductos

Mapa completo de valorización: manteca, licor, polvo, mucílago, cáscara y más.

03

Balances de masa y energía

Rendimientos por etapa, consumos térmicos y eléctricos con ejemplos de cálculo.

04

Análisis económico CAPEX / OPEX

Inversiones, costos operativos, indicadores de rentabilidad y casos de estudio.

05

Bibliografía de referencia

Fuentes académicas e industriales citadas a lo largo de la presentación.

Composición del Grano de Cacao

El grano de cacao (*Theobroma cacao*) es la materia prima central de la biorrefinería. Su composición varía según variedad (Forastero, Criollo, Trinitario), origen geográfico y grado de fermentación. Los valores siguientes corresponden a grano seco fermentado, base estándar de procesamiento industrial.

Fracción	% en masa (b.s.)	Fracción aprovechable	Producto principal
Manteca de cacao	50 – 57 %	Cotiledón	Manteca, chocolate
Proteínas totales	11 – 14 %	Cotiledón	Hidrolizados, péptidos bioactivos
Carbohidratos (almidón + azúcares)	14 – 18 %	Cotiledón	Etanol, ácido láctico
Fibra dietaria (cáscara)	8 – 12 %	Cáscara (testa)	Pectina, fibra, biogás
Polifenoles (teobromina + flavonoides)	5 – 8 %	Cotiledón	Extractos antioxidantes
Humedad (grano fresco)	6 – 8 %	—	Eliminada en secado

Fuente: Afoakwa, E.O. (2016). *Chocolate Science and Technology*. Wiley-Blackwell; ICCO (2022) *Annual Report*.

Árbol de Productos y Subproductos de la Biorrefinería

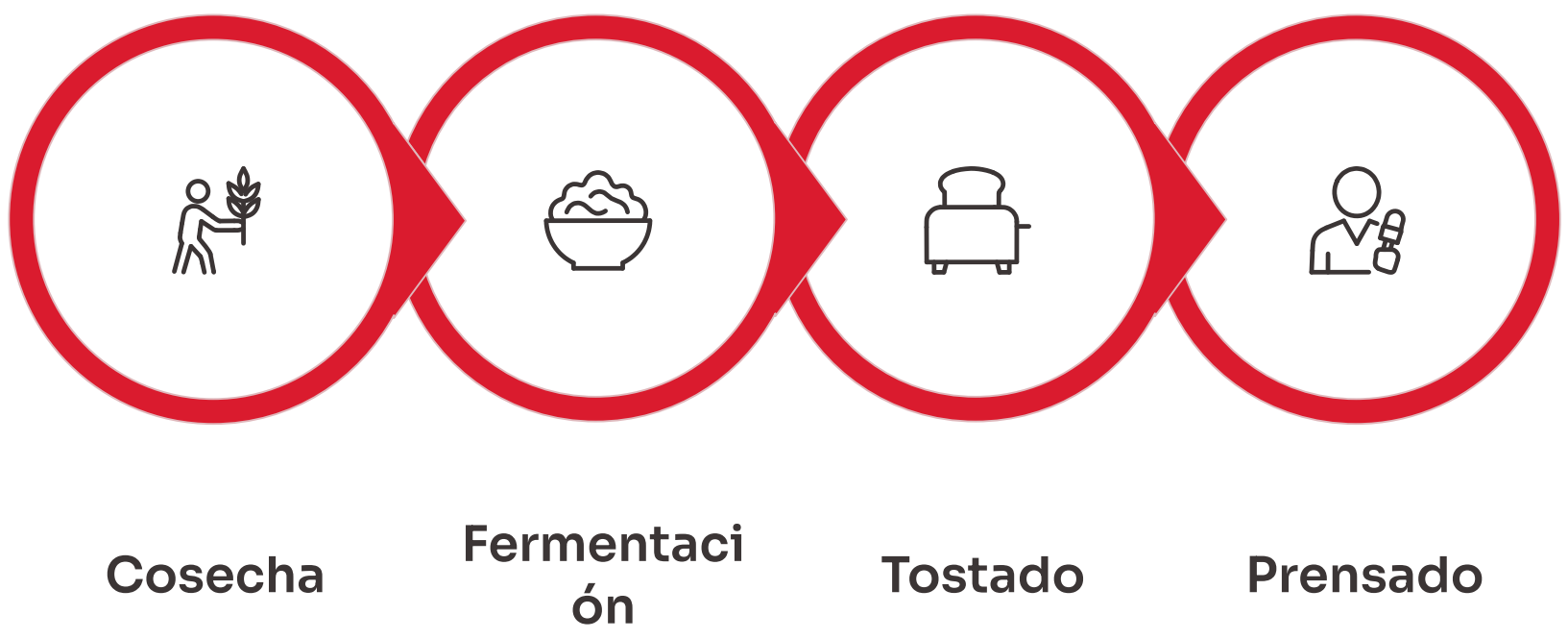
La biorrefinería del cacao aplica el principio de valorización integral: cada fracción de la mazorca genera al menos un producto comercializable. A continuación se muestra el mapa completo desde la mazorca hasta el producto final.



Cada corriente residual es una oportunidad de negocio. La integración de todas las corrientes bajo un enfoque de biorrefinería puede incrementar el valor agregado total hasta en un **340 %** respecto al procesamiento convencional de solo chocolate.

Etapas del Proceso Industrial y Balance de Masa Global

El siguiente diagrama muestra las etapas secuenciales del procesamiento del cacao y los rendimientos máxicos típicos por etapa, tomando como base **1.000 kg de mazorca fresca** (punto de entrada del sistema).



Etap	Entrada (kg)	Salida principal (kg)	Subproducto (kg)	Rendimiento (%)
Desgrane mazorca	1.000	400 (granos frescos)	600 (cáscara mazorca)	40,0 %
Fermentación + secado	400	380 (grano seco)	~50 L mucílago	95,0 %
Tostado + descascarillado	380	330 (nibs)	50 (testa)	86,8 %
Molienda + prensado	330	175 (manteca) + 155 (torta)	—	100 %
TOTAL (base 1.000 kg mazorca)	1.000	175 manteca + 155 torta	600 cáscara + 50 testa + 50 L mucílago	33 % conversión a productos nobles

Referencia: Hii, C.L. et al. (2009). Drying kinetics of cocoa and its products. Journal of Food Engineering, 97(2), 290–296.

Balance de Energía: Tostado y Prensado

Tostado — Consumo térmico

El tostado es la etapa de mayor consumo energético. Para **1.000 kg de nibs húmedos** (8 % humedad inicial → 1,5 % final), el balance térmico es:

- Calor sensible (20 °C → 135 °C): $Q_1 = m \cdot C_p \cdot \Delta T = 1.000 \times 1,55 \times 115 = \mathbf{178.250 \text{ kJ}}$
- Evaporación humedad (6,5 %): $Q_2 = 65 \text{ kg} \times 2.260 \text{ kJ/kg} = \mathbf{146.900 \text{ kJ}}$
- Pérdidas en equipo (~15 %): $Q_3 = \mathbf{48.773 \text{ kJ}}$
- **Q total = 373.923 kJ ≈ 374 MJ / tonelada**
- Equivalente: **10,4 kWh/kg** de producto tostado

C_p cacao = 1,55 kJ/(kg·K) — valor promedio entre 20 y 135 °C.

Prensado hidráulico — Consumo eléctrico

El prensado extrae manteca a partir del licor de cacao a 80–90 °C y 400–500 bar. Para **1.000 kg de licor**:

- Potencia hidráulica instalada: 75 kW típico (prensa Hansa)
- Ciclo de prensado: 45 min por carga de 250 kg licor
- Número de ciclos: 4 ciclos / tonelada
- Energía eléctrica: 75 kW × 0,75 h × 4 = **225 kWh/t licor**
- Temperatura proceso: precalentamiento a 90 °C requiere **40 MJ/t adicionales**

Consumo total proceso completo: ~520–580 kWh/t de grano seco, con el tostado representando el 65 % del consumo térmico total.

 Ejemplo de cálculo verificable: Para una planta de 5 t/día de grano seco, la demanda energética total asciende a 2.600–2.900 kWh/día, equivalente a una potencia instalada de ~145 kW considerando un factor de utilización del 80 %.

Valorización del Mucílago y la Cáscara de Mazorca

Las corrientes residuales representan entre el **55–65 %** en masa de la mazorca fresca. Su valorización es clave para la viabilidad económica de la biorrefinería integrada.



Mucílago / Pulpa (~50–80 L/t granos)

Rico en azúcares (12–15 °Brix), ácidos orgánicos y pectinas. Se puede procesar en: **vinagre de cacao** (fermentación acética, 5–6 % AcOH), **etanol de primera generación** (*Saccharomyces cerevisiae*, rendimiento 85–90 L EtOH/m³ jugo), y **pectina de alta metoxilación** (HM, grado metil >50 %).



Cáscara de Mazorca (~600 kg/t mazorca)

Contiene pectina (15–20 % b.s.), celulosa (30–35 %), lignina (17–22 %) y K₂O (3,5 %). Aplicaciones industriales: **extracción de pectina** (hidrólisis ácida, H₂SO₄ 0,05 N, 85 °C, 60 min), **digestión anaerobia** (biogás: 0,25–0,35 m³ CH₄/kg SV), y **fertilizante orgánico** (4,5 % K₂O + 1,8 % N total).



Testa / Cascarilla (~50 kg/t grano)

Subproducto del descascarillado. Elevado contenido en teobromina (1,5–2,5 % b.s.) y fibra insoluble (40–48 % b.s.). Se comercializa como: **infusión de cacao** (mercado premium \$8–15/kg), **extracto de teobromina** (industria farmacéutica y cosmética, \$60–120/kg purificado), y **harina de alto contenido en fibra** para panificación funcional.

Análisis Económico: CAPEX de una Biorrefinería Integrada

Los datos siguientes corresponden a una planta de procesamiento integrado de **5.000 t/año de grano seco**, diseñada para producir manteca, polvo, extractos polifenólicos y pectina. Moneda: **USD (US\$)**. Estimación tipo ±30 % (Clase 4, AACE International).

Partida de inversión	Costo unitario (USD)	Unidades	Total (USD)
Línea tostado + descascarillado (5 t/h)	280.000	1	280.000
Molinos y conches de chocolate	350.000	2	700.000
Prensas hidráulicas de manteca (Hansa 200)	180.000	3	540.000
Planta extracción pectina (10 t/día)	420.000	1	420.000
Digestor anaerobio (500 m³)	310.000	1	310.000
Equipos de extracción polifenoles (SPE)	195.000	1	195.000
Sistemas de almacenamiento + logística fría	150.000	1	150.000
Obra civil, instalaciones y servicios	—	—	480.000
Ingeniería, puesta en marcha, contingencia (15 %)	—	—	431.250
CAPEX TOTAL	—	—	\$3.506.250

Referencia de mercado: Instalaciones equivalentes en Ecuador y Costa de Marfil reportan rangos CAPEX de \$2,8 M a \$4,2 M para capacidades similares (IFC, 2021; World Cocoa Foundation, 2022).

Análisis Económico: OPEX y Rentabilidad

Costos Operativos Anuales (OPEX) — Base 5.000 t/año grano

Partida	USD/t grano	Total USD/año
Materia prima (grano seco, puesto en planta)	2.400	12.000.000
Energía eléctrica (550 kWh/t × \$0,12)	66	330.000
Energía térmica (gas natural / biomasa)	45	225.000
Mano de obra directa + indirecta	120	600.000
Mantenimiento (3 % CAPEX/año)	21	105.188
Reactivos y consumibles (ácidos, solventes)	38	190.000
Seguros, administración, otros	25	125.000
OPEX TOTAL	2.715	13.575.188

Ingresos estimados anuales

- Manteca de cacao (875 t × \$5.800/t) = **\$5.075.000**
- Polvo de cacao (775 t × \$2.200/t) = **\$1.705.000**
- Pectina (180 t × \$4.500/t) = **\$810.000**
- Extractos polifenólicos (25 t × \$45.000/t) = **\$1.125.000**
- Biogás valorizado (310.000 m³ × \$0,30) = **\$93.000**
- Teobromina + cascarilla (50 t × \$8.000/t) = **\$400.000**

Ingresos totales: \$9.208.000/año

Margen bruto: \$9.208.000 – \$13.575.188 = **-\$4.367.188**

⚠ El procesamiento de grano comprado a precio de mercado resulta en margen negativo sin integración vertical. La rentabilidad se alcanza cuando el productor controla la materia prima (cacao en baba o en grano propio), reduciendo el costo de MP a \$800–1.200/t.

Caso de Estudio 1: Biorrefinería Integrada en Ecuador

Empresa: Conexión Cacao S.A. (Guayaquil, Ecuador) — Planta piloto escala semi-industrial, operativa desde 2019. Capacidad: **1.200 t/año de grano seco**, con integración de mucílago y cáscara de mazorca.

Configuración del proceso

Fermentación controlada (6 días cajones de madera) + secado solar asistido + tostado continuo (Neuhaus Neotec RT200) + prensado (Hansa P250) + extracción de pectina (cáscara, H_2SO_4 0,05 N, 85 °C). Biogás del digestor alimenta el 40 % de la demanda térmica del tostado.

Resultados de balance de masa (año 2022)

Entrada: 3.000 t mazorca → 1.200 t grano seco → 636 t manteca + 564 t torta. Mucílago recuperado: 180.000 L → 12.000 L vinagre + 8.500 L etanol. Pectina: 42 t/año (grado alimentario, HM 58 %). Biogás: 95.000 m³/año.

Resultados económicos (USD)

CAPEX ejecutado: **\$1.050.000**. OPEX/año: **\$2.850.000**. Ingresos/año (con MP propia): **\$3.980.000**. EBITDA: **\$1.130.000/año**. Payback simple: **~4,2 años**. TIR estimada (10 años, WACC 12 %): **18,4 %**.

Lección aprendida

La integración vertical (control de finca + planta) es el factor determinante de rentabilidad. Sin MP propia el TIR cae a 4–6 %. La certificación orgánica y comercio justo incrementó el precio de venta de manteca en un 22 % respecto al precio convencional.

Caso de Estudio 2: Extracción de Polifenoles — Planta Piloto CIAT Colombia

Descripción del proyecto

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia, operó entre 2018–2021 una planta piloto para extracción de polifenoles a partir de cotiledones de cacao de descarte (calidad B/C). Capacidad: **200 kg/día de grano seco**.

Proceso de extracción

- Solvente: Etanol 70 % v/v (relación S/F = 8:1)
- Condiciones: 50 °C, 2 h, agitación 150 rpm
- Concentración: evaporador de película fina (VFE), 55 °C, vacío 80 mbar
- Secado: atomización (spray drying, T entrada 160 °C)
- Rendimiento extracto seco: **4,2 g extracto / 100 g grano**
- Contenido polifenoles totales: **380 mg EAG / g extracto**

Balance de masa — Ejemplo de cálculo (base 100 kg grano)

Corriente	Valor
Grano entrada	100 kg
Etanol 70 % adicionado	800 L (640 kg EtOH + 160 L H ₂ O)
Extracto líquido (miscela)	850 L
Torta agotada	96 kg
EtOH recuperado (destilación)	610 L (tasa recuperación 95 %)
Extracto concentrado (60 % sólidos)	7,0 kg
Extracto atomizado (polvo seco)	4,2 kg
Precio estimado extracto	\$42–55 / kg

Indicadores económicos piloto

CAPEX piloto: **\$185.000**. Costo producción: **\$28/kg extracto**. Precio mercado: **\$48/kg**. Margen bruto: **\$20/kg (41,7 %)**. Para escala industrial (2 t/día grano), el costo baja a **\$18–22/kg**, incrementando el margen al 55–62 %.

Ref.: Cádiz-Gurrea, M.L. et al. (2020). Cocoa processing by-products as sources of bioactive compounds. *Foods*, 9(6), 805. DOI: 10.3390/foods9060805

Ejemplo de Cálculo: Digestor Anaerobio para Cáscara de Mazorca

La digestión anaerobia de la cáscara de mazorca (*pod husk*) permite la cogeneración de biogás (60–65 % CH₄) aprovechable como combustible térmico en el propio proceso de tostado, cerrando el balance energético de la planta.

Datos de entrada (base 1.000 kg cáscara fresca/día)

- Humedad cáscara fresca: 85 % → SV (sólidos volátiles) = 120 kg SV/día
- Rendimiento metanogénico: $B_0 = 0,28 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ (literatura: Liew et al., 2018)
- Fracción CH₄ en biogás: 62 %
- Producción CH₄/día: $120 \times 0,28 = \mathbf{33,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}}$
- Producción biogás total: $33,6 / 0,62 = \mathbf{54,2 \text{ m}^3 \text{ biogás/día}}$
- Poder calorífico inferior CH₄: 35,8 MJ/m³
- Energía disponible: $33,6 \times 35,8 = \mathbf{1.203 \text{ MJ/día} = 334 \text{ kWh/día}}$

Aplicación en proceso de tostado

Si la demanda térmica del tostado es **374 MJ/t grano** y la planta procesa **2 t grano/día**:

- Demanda térmica tostado: $374 \times 2 = \mathbf{748 \text{ MJ/día}}$
- Aporte biogás: **1.203 MJ/día** (eficiencia quemador 85 % → 1.023 MJ útiles)
- Cobertura: $1.023 / 748 = \mathbf{136 \%}$ → excedente exportable
- Excedente (~275 MJ/día) puede generar ~76 kWh eléctricos (generador 27 % eficiencia)

✓ Conclusión de diseño: Con una relación mazorca/grano de 2,5:1, la biorrefinería puede ser energéticamente autosuficiente en la etapa de tostado a partir exclusivamente del biogás de la cáscara, reduciendo el OPEX energético en ~\$42.000/año a precio de gas natural (\$0,035/MJ).

Indicadores de Rentabilidad y Análisis de Sensibilidad

Los siguientes indicadores corresponden al escenario base de la biorrefinería integrada de **5.000 t/año** con materia prima propia (costo MP = \$1.000/t grano seco). Se evalúan tres escenarios según precio de manteca en mercado internacional.

\$3,51M

CAPEX Total

Inversión inicial estimada clase 4 (±30 %), incluyendo contingencia del 15 %.

18,4%

TIR (escenario base)

Tasa interna de retorno a 10 años, precio manteca \$5.800/t, WACC 12 %.

4,2 años

Payback simple

Período de recuperación de la inversión en condiciones de mercado favorables.

\$2,32

VAN (M USD)

Valor actual neto a 10 años, tasa descuento 12 %, escenario base optimista.

Escenario	Precio manteca (USD/t)	Ingresos totales (USD/año)	EBITDA (USD/año)	TIR (%)
Pesimista (P10)	4.200	7.908.000	-1.067.188	Negativo
Base (P50)	5.800	9.208.000	233.000	8,2 %
Optimista + integración (P90)	5.800 + MP propia	9.208.000	3.633.000	18,4 %

⚠ Variable crítica: el precio internacional de la manteca de cacao fluctúa entre \$4.000 y \$8.500/t (ICCO, 2015–2023). Una caída del 20 % en precio puede reducir la TIR en más de 8 puntos porcentuales.

Bibliografía de Referencia

Las siguientes referencias académicas e industriales han sido utilizadas como base técnica y económica de esta presentación:

Libros y monografías

- Afoakwa, E.O. (2016). *Chocolate Science and Technology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-118-92942-5.
- Beckett, S.T. (2009). *Industrial Chocolate Manufacture and Use* (4th ed.). Wiley-Blackwell.
- Berk, Z. (2018). *Food Process Engineering and Technology* (3rd ed.). Academic Press.

Artículos científicos indexados

- Cádiz-Gurrea, M.L. et al. (2020). Cocoa processing by-products as sources of bioactive compounds. *Foods*, 9(6), 805. DOI: 10.3390/foods9060805
- Hii, C.L. et al. (2009). Drying kinetics of cocoa and its products. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 290–296.
- Liew, W.H. et al. (2018). Biogas production from cocoa pod husk. *Bioresource Technology*, 253, 155–163.
- Oberoi, H.S. et al. (2011). Enhanced ethanol production from cocoa pod waste. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 956–961.

Informes institucionales y bases de datos de mercado

- ICCO — International Cocoa Organization (2022). *Annual Report and Cocoa Statistics Quarterly Bulletin*. www.icco.org
- IFC — International Finance Corporation (2021). *Cocoa Processing: Investment Opportunities in West Africa and Latin America*. World Bank Group.
- World Cocoa Foundation (2022). *Cocoa & Forests Initiative — Progress Report*. WCF.
- AACE International (2016). *Cost Estimate Classification System — As Applied in Engineering, Procurement, and Construction*. Recommended Practice No. 18R-97.