



# Biorrefinería del Café

Análisis técnico-económico integral: productos, subproductos, balances de masa y energía, CAPEX/OPEX y casos de estudio. Orientado a ingenieros especialistas en procesos industriales.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

2024

# Agenda

01

---

## Fundamentos de la Biorrefinería del Café

Concepto, cadena de valor y rutas de procesamiento primario (vía húmeda y vía seca).

02

---

## Productos y Subproductos Principales

Pulpa, mucílago, pergamino, aceite de café, cascara, compost y biogás.

03

---

## Balances de Masa y Energía

Cuantificación de flujos, rendimientos y demanda energética por unidad operacional.

04

---

## Análisis Económico CAPEX / OPEX

Costos de inversión, operación y ejemplos de cálculo en dólares estadounidenses (US \$).

05

---

## Casos de Estudio y Bibliografía

Plantas industriales de referencia, lecciones aprendidas y fuentes técnicas.

# Concepto de Biorrefinería del Café

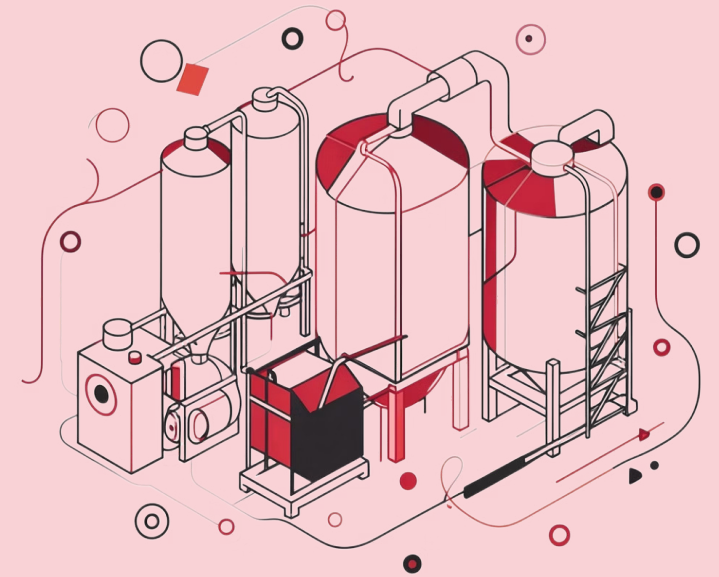
Una biorrefinería del café integra múltiples procesos de conversión física, química y biológica para extraer el máximo valor de **cada fracción del fruto**, minimizando residuos y maximizando ingresos. La cereza de café (~100 kg base húmeda) contiene solo un 20 % de café verde comercializable; el 80 % restante constituye una fuente crítica de biomasa valorizable.

## Fracción Aprovechable

Pulpa, mucílago, pergamino, piel plateada y borra de café representan flujos de materia prima para productos de alto valor añadido.

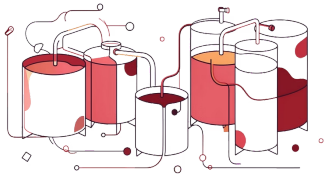
## Principio de Cascada

Los subproductos de una etapa se convierten en materia prima de la siguiente, siguiendo la jerarquía: producto alimentario → químico → energético → enmienda de suelo.



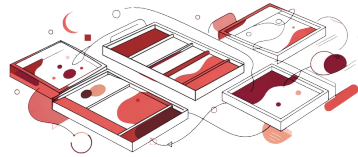
# Rutas de Procesamiento Primario

Existen dos rutas industriales predominantes que determinan la naturaleza y cantidad de subproductos generados:



## Vía Húmeda (Washed)

Despulpado mecánico → fermentación (24–48 h) → lavado → secado. Genera grandes volúmenes de **aguas mieles** (20–40 L/kg café pergamino). Alta calidad de taza. Implantada en Colombia, Centroamérica y Kenia.



## Vía Seca (Natural)

Secado del fruto entero en camas africanas o patios (~3–6 semanas). Genera **cascarilla seca** (husk) con menor contenido de humedad. Predomina en Brasil, Etiopía y Yemen. Menor consumo de agua.

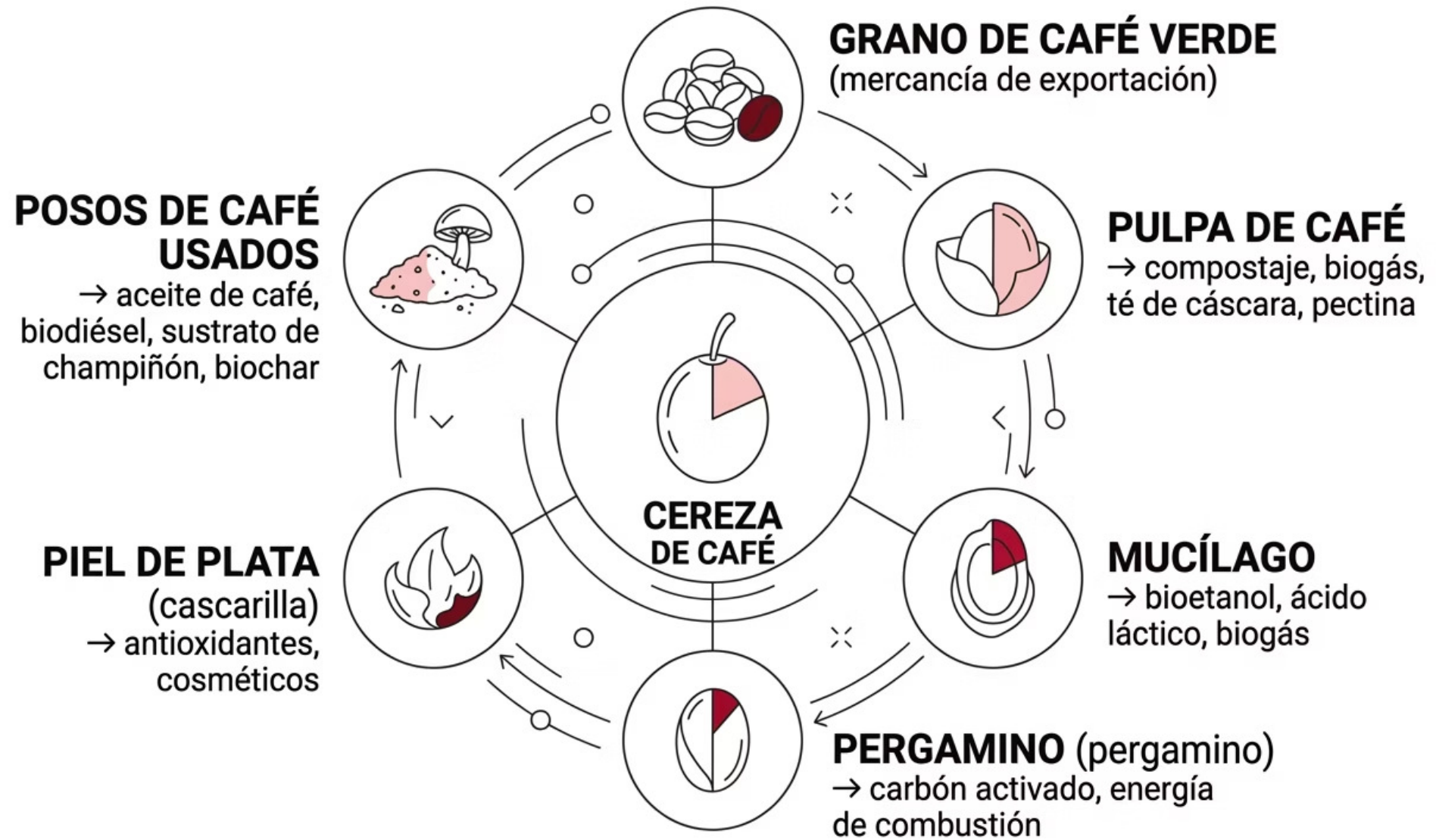


## Vía Semihúmeda (Honey)

Despulpado sin fermentación completa; se conserva parte del mucílago durante el secado. Balance intermedio en consumo de agua y perfil aromático. Creciente adopción en Costa Rica y Honduras.

# Mapa de Productos y Subproductos

El siguiente diagrama muestra los flujos principales de biomasa desde la cereza fresca hasta los productos finales de la biorrefinería integrada.



Cada fracción posee composición bioquímica diferenciada: la pulpa es rica en azúcares fermentables (~50 % bH), el pergamino en celulosa/lignina (~85 % combinados, base seca) y la piel plateada en antioxidantes clorogénicos.

# Balance de Masa — Vía Húmeda

Base de cálculo: **1 000 kg de cerezas frescas** (humedad 65 %). Rendimientos basados en datos de planta piloto (Murthy & Naidu, 2012; Bonilla-Hermosa et al., 2014).

| Fracción                | Masa (kg) | % Base Fresca | Humedad (%) | Masa Seca (kg) |
|-------------------------|-----------|---------------|-------------|----------------|
| Cerezas entrada         | 1 000     | 100,0         | 65          | 350            |
| Pulpa húmeda            | 430       | 43,0          | 80          | 86             |
| Mucílago (aguas mieles) | 150       | 15,0          | 95          | 7,5            |
| Café pergamino húmedo   | 220       | 22,0          | 55          | 99             |
| Café pergamino seco     | 165       | 16,5          | 12          | 145            |
| Café verde (trilla)     | 125       | 12,5          | 11          | 111            |
| Pergamino (cascarilla)  | 40        | 4,0           | 10          | 36             |
| Agua proceso (total)    | ~3 500    | —             | —           | —              |

 Pérdidas de proceso (evaporación, finos): ~2 % de la masa sólida total. El balance cumple cierre ≥ 98 % en base seca.

# Ejemplo de Cálculo — Balance de Masa Detallado

Verificación del cierre del balance para la etapa de despulpado + fermentación (base: 1 000 kg cerezas):

## Planteamiento

**Entradas:** 1 000 kg cerezas + 3 000 kg agua lavado.

**Salidas:** 430 kg pulpa + 150 kg aguas mieles + 220 kg café pergamino húmedo + 3 200 kg efluente.

**Cierre:**  $(430 + 150 + 220 + 3\,200) = 4\,000 \text{ kg} \approx 4\,000 \text{ kg entrada} \checkmark$

$$\text{Rendimiento}_{\text{café verde}} = \frac{125}{1000} \times 100 = 12,5\%$$

$$\text{Factor conversión pulpa seca} = \frac{86}{1000} = 0,086 \text{ kg}_{\text{PS}}/\text{kg}_{\text{cereza}}$$

## Indicadores Clave de Proceso

**12,5 %**

Rendimiento café verde /  
cereza fresca

**3,5 L/kg**

Consumo específico de  
agua (vía húmeda)

**43 %**

Fracción másica de pulpa húmeda

# Balance de Energía — Proceso Integrado

Base de cálculo: planta procesando **10 ton/h de cerezas frescas**. Datos de referencia: Pulgarin et al. (2019), Nopharatana et al. (2015).

| Unidad Operacional          | Energía Entrada (kWh/t) | Energía Salida (kWh/t) | Eficiencia (%) | Fuente     |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------|------------|
| Despulpado mecánico         | 8,5                     | —                      | —              | Eléctrica  |
| Fermentación (anaeróbica)   | 0,5                     | 2,1 (biogás)           | ~420 %*        | Bioquímica |
| Lavado y clasificación      | 3,2                     | —                      | —              | Eléctrica  |
| Secado mecánico (guardiola) | 85,0                    | —                      | 65             | Térmica    |
| Secado solar (camas)        | 0 (solar)               | —                      | —              | Solar      |
| Trilla y clasificación      | 12,0                    | —                      | —              | Eléctrica  |
| Cogeneración (cascarilla)   | —                       | 120 (vapor)            | 72             | Combustión |
| <b>TOTAL RED (neto)</b>     | <b>109,2</b>            | <b>122,1</b>           | <b>—</b>       | <b>—</b>   |

✓ \*La fermentación genera más energía útil (biogás) que la energía eléctrica consumida por agitación. La combustión de cascarilla puede autoabastecer ~65 % de la demanda térmica del secado.

# Valorización de Subproductos: Productos Clave

1

## Biogás de Aguas Mieles

Digestión anaerobia de aguas de lavado (DQO: 20–80 g/L).  
Producción: 0,35–0,45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminado. Potencial eléctrico: 1,5–2,5 kWh/kg DQO. Reduce carga contaminante en ~85 %.

2

## Aceite de Café (Spent Grounds)

Extracción con hexano o CO<sub>2</sub> supercrítico. Rendimiento: 10–15 % base seca. Composición: ~45 % ácido linoleico, ~38 % ácido palmítico. Aplicaciones: cosmética, biodiesel (índice de yodo: 85–90).

3

## Compost y Lombricompost

Compostaje aeróbico de pulpa: relación C/N inicial = 20–24.  
Tiempo: 60–90 días. Producto final: 3–4 % N, 1–2 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 3–5 % K<sub>2</sub>O.  
Valor de mercado: US \$ 80–120/t.

4

## Cascara Tea (Cáscara)

Secado de pulpa a <55 °C para preservar polifenoles. Contenido de cafeína: 0,9–1,5 g/100 g. Precio mercado especialidad: US \$ 5–12/kg. Mercado creciente en Europa y EE. UU.

# Composición Bioquímica de Fracciones

La composición determina directamente la ruta de valorización óptima para cada fracción del fruto.

| Fracción       | Humedad (%) | Celulosa (%bS) | Lignina (%bS) | Azúcares (%bS) | Proteína (%bS) | Lípidos (%bS) |
|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| Pulpa fresca   | 80          | 18,5           | 4,2           | 49,0           | 11,3           | 2,1           |
| Mucílago       | 95          | 2,0            | —             | 72,0           | 8,5            | 0,5           |
| Pergamino seco | 10          | 43,2           | 38,0          | 8,5            | 3,1            | 0,8           |
| Piel plateada  | 8           | 28,0           | 17,0          | 12,0           | 18,5           | 3,2           |
| Borra de café  | 60          | 36,0           | 22,0          | 5,5            | 14,5           | 12,5          |
| Café verde     | 11          | —              | —             | 8,0            | 12,0           | 15,5          |

❏ %bS = porcentaje en base seca. Fuentes: Murthy & Naidu (2012); Ramirez-Martinez (1988); Mussatto et al. (2011).

# Análisis CAPEX — Inversión de Capital

Estimación para planta de biorrefinería de café integrada. Capacidad: **5 ton/h de cerezas frescas** (~5 000 t/año operando 1 000 h/año).  
Estimación Clase III (AACE ±30 %). Año base: 2023. Moneda: US \$.

| Área de Proceso                    | Equipo Principal                          | US \$ (miles) | Factor Instalación | CAPEX Total (US \$ miles) |
|------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------------------|
| Recepción y despulpado             | Despulpadoras, tolvas, cribas             | 85            | 2,1                | 178                       |
| Fermentación / digestión anaerobia | Reactores UASB, agitadores                | 210           | 2,3                | 483                       |
| Secado (guardiola + solar)         | Secador rotatorio, camas, ventiladores    | 320           | 1,9                | 608                       |
| Trilla y clasificación             | Trilladora, densimétrica, color sorter    | 195           | 1,8                | 351                       |
| Extracción de aceite (SCE)         | Extractor CO <sub>2</sub> sc, separadores | 480           | 2,5                | 1 200                     |
| Cogeneración (cascarilla)          | Caldera, turbina, generador               | 350           | 2,2                | 770                       |
| Instrumentación y control          | DCS, sensores, SCADA                      | —             | —                  | 240                       |
| Obra civil e infraestructura       | —                                         | —             | —                  | 520                       |
| TOTAL CAPEX                        |                                           |               |                    | 4 350                     |

# Análisis OPEX — Costos Operativos Anuales

Base: planta 5 ton/h, operación 1 000 h/año (~300 días × 3,3 h/día campaña, o producción continua en planta central). Moneda: US \$.

| Rubro OPEX                  | US \$/año | % OPEX |
|-----------------------------|-----------|--------|
| Materia prima (cerezas)     | 625 000   | 36,2   |
| Mano de obra directa        | 180 000   | 10,4   |
| Energía eléctrica           | 95 000    | 5,5    |
| Agua de proceso             | 18 000    | 1,0    |
| Reactivos y químicos        | 42 000    | 2,4    |
| Mantenimiento (2 % CAPEX)   | 87 000    | 5,0    |
| Seguros y administración    | 65 000    | 3,8    |
| Amortización CAPEX (10 a)   | 435 000   | 25,2   |
| Otros (embalaje, logística) | 180 000   | 10,5   |
| TOTAL OPEX                  | 1 727 000 | 100    |

## Ingresos Estimados Anuales

| Producto             | US \$/año |
|----------------------|-----------|
| Café verde specialty | 1 250 000 |
| Aceite de café       | 185 000   |
| Biogás / energía     | 62 000    |
| Compost/fertilizante | 78 000    |
| Cascara tea          | 95 000    |
| TOTAL INGRESOS       | 1 670 000 |



EBITDA estimado: US \$ -57 000/año en escenario base. La viabilidad mejora significativamente con integración de co-productos de mayor valor (extractos funcionales, pectina).

# Ejemplo de Cálculo — CAPEX y Período de Retorno

Escenario de sensibilidad incorporando venta de extracto de ácido clorogénico (precio de mercado: US \$ 45/kg):

## Escenario Base

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{EBITDA}} = \frac{4\,350\,000}{378\,000} \approx 11,5 \text{ años}$$

EBITDA base = Ingresos – OPEX (sin amortización) = 1 670 000 – 1 292 000 = **US \$ 378 000/año**

## Escenario Optimizado (+ Extractos)

$$\text{Payback} = \frac{4\,350\,000}{812\,000} \approx 5,4 \text{ años}$$

Producción extracto: ~9,5 t/año × US \$ 45/kg = **US \$ 427 500** adicionales.

EBITDA optimizado = 378 000 + 427 500 = **US \$ 805 500/año**

**TIR ≈ 18,2%** (descuento 10%, horizonte 15 a)

- ✓ La producción de extractos de alto valor (ácido clorogénico, antioxidantes) reduce el período de retorno de ~11,5 a ~5,4 años, haciendo el proyecto financieramente atractivo para inversores industriales.

# Caso de Estudio 1 — Colombia: Biorrefinería Integrada en Eje Cafetero

## Descripción del Proyecto

**Operador:** Cooperativa Cafetera de Manizales (COOPCAFE)

**Capacidad:** 8 000 t cerezas/año

**Inversión:** US \$ 6,2 M (BID + capital propio)

**Tecnologías:** Digestores UASB, secado solar + guardiola, extracción aceite

## Resultados Operacionales (2022)

**-87 %**

Reducción DQO en efluentes

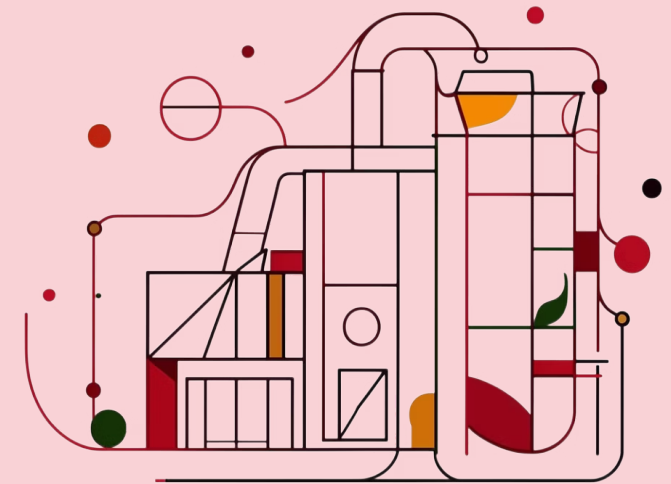
**US \$ 1,1 M**

Ingreso anual co-productos

**7,2 años**

Período de retorno real

**Lección clave:** La venta de biogás a la red local incrementó ingresos un 23 % respecto a la proyección inicial. El compost certificado orgánico logró precio premium de US \$ 145/t.



# Caso de Estudio 2 — Brasil: Planta de Borra de Café para Biodiesel

## Empresa: BioQavi Energia (São Paulo, 2021)

Primera planta industrial brasileña dedicada a la extracción de aceite de borra de café (spent grounds) para producción de biodiesel ASTM D6751.

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| Capacidad borra entrada | 12 000 t/año  |
| Rendimiento aceite      | 12,8 % b.s.   |
| Producción aceite       | ~920 t/año    |
| Producción biodiesel    | ~850 t/año    |
| Precio venta biodiesel  | US \$ 1,05/L  |
| CAPEX total             | US \$ 3,8 M   |
| OPEX anual              | US \$ 890 000 |
| Payback                 | 6,8 años      |

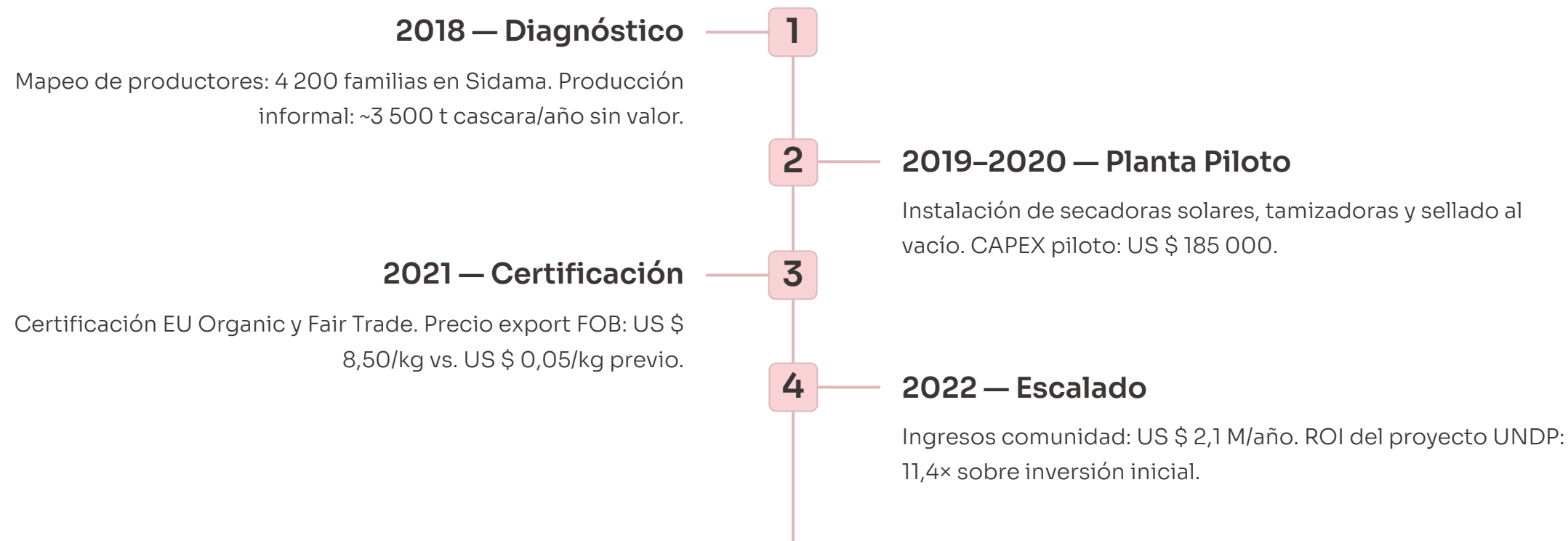
## Diagrama de Proceso Simplificado



**i** La torta residual post-extracción (~87 % de la borra seca) se comercializa como sustrato para cultivo de setas (*Pleurotus ostreatus*) a US \$ 55/t, generando US \$ 128 000/año adicionales.

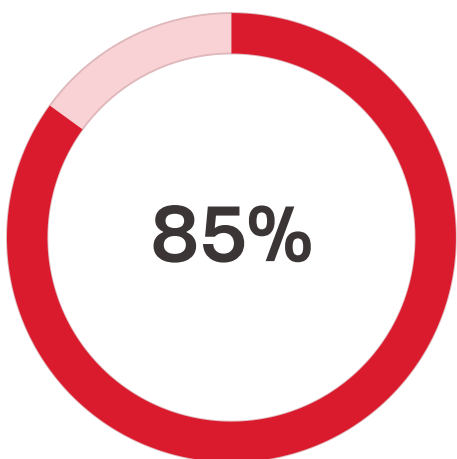
# Caso de Estudio 3 — Etiopía: Aprovechamiento de Cascara

En las regiones de Harar y Sidama (Etiopía), la cascara seca del café (*qishr*) constituye una bebida tradicional de alto valor cultural. El proyecto **UNDP-CFC Cascara Value Chain** (2018–2022) formalizó su cadena de valor industrial:



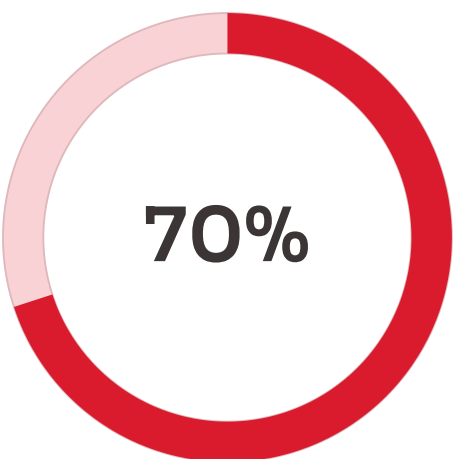
# Indicadores de Sostenibilidad y Huella Ambiental

La biorrefinería integrada reduce significativamente el impacto ambiental respecto al procesamiento convencional, donde los residuos se vierten sin tratamiento.



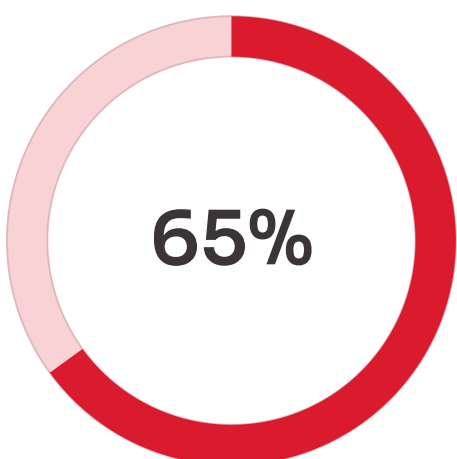
**Reducción DQO**

En efluentes líquidos mediante digestión anaerobia de aguas mieles.



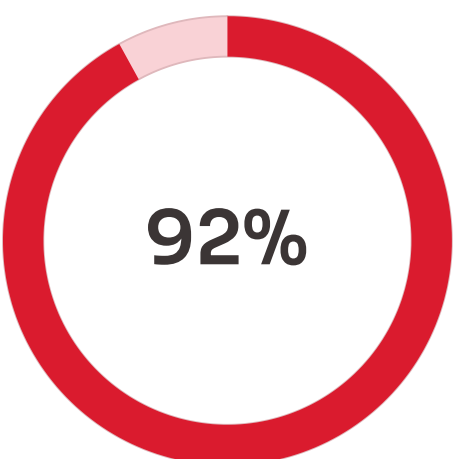
**Reducción GEI**

Emisiones de CO<sub>2</sub>eq respecto a procesamiento convencional sin valorización.



**Autosuficiencia Energética**

Del consumo térmico total cubierto por combustión de cascarilla y biogás.



**Valorización de Biomasa**

De la biomasa residual total convertida en productos o energía útil.

✔ Una planta de 5 000 t/año de cerezas con biorrefinería integrada puede evitar la emisión de ~1 850 t CO<sub>2</sub>eq/año respecto al escenario de vertido convencional (ITC, 2021).

# Conclusiones y Recomendaciones Técnicas

→ **La biorrefinería es técnicamente viable y necesaria**

El 87,5 % de la masa del fruto es subproducto; ignorarlo implica pérdida económica y riesgo ambiental severo. La integración de valorización es el estándar de la industria moderna.

→ **El diseño modular reduce el riesgo de inversión**

Arrancar con módulos de digestión anaerobia + compostaje (CAPEX < US \$ 800 000) y escalar progresivamente hacia extracción y productos especializados reduce riesgo financiero.

→ **Los co-productos de alto valor son el motor financiero**

Extractos funcionales (ácido clorogénico, cafeína), cascara tea y aceite para cosmética/biodiesel transforman proyectos marginales en inversiones con TIR > 18 %.

→ **Los balances de masa y energía son herramientas de diseño críticas**

Un cierre de balance  $\geq 98$  % en base seca es el criterio mínimo de aceptación para el diseño básico de ingeniería (FEED) de cualquier módulo de proceso.

# Bibliografía y Fuentes Técnicas

## Artículos Científicos

- Murthy, P.S. & Naidu, M.M. (2012).** Sustainable management of coffee industry by-products and value addition. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58.
- Mussatto, S.I. et al. (2011).** A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 368–374.
- Bonilla-Hermosa, V.A. et al. (2014).** Utilization of coffee by-products obtained from wet processing as a source of plant nutrients. *Bioresource Technology*, 165, 336–340.
- Pulgarin, J.A.M. et al. (2019).** Energy and mass balance of coffee processing in Andean cooperatives. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1052–1063.

## Informes Técnicos e Institucionales

- ICO — International Coffee Organization (2023).** *Coffee Report & Outlook: Sustainability and Value Chains*. Londres, UK.
- ITC — International Trade Centre (2021).** *The Coffee Guide, 4th Edition*. Ginebra, Suiza. ISBN: 978-92-9137-471-8.
- UNDP-CFC (2022).** *Cascara Value Chain Development in Ethiopia: Final Project Report*. Nueva York.
- Ramirez-Martinez, J.R. (1988).** Phenolic compounds in coffee pulp: Quantitative determination by HPLC. *Journal of Food Composition and Analysis*, 1(3), 232–241.

❏ Todos los datos de CAPEX/OPEX corresponden a estimaciones publicadas en literatura técnica peer-reviewed o informes de organismos internacionales. Se recomienda validar con cotizaciones actualizadas de proveedores OEM para proyectos específicos.