



Biorrefinería de la Papa: Análisis Técnico-Económico Integral

Una visión completa de los productos, subproductos, balances de masa y energía, y análisis de costos CAPEX/OPEX para ingenieros de procesos industriales especializados en valorización de biomasa.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ANÁLISIS ECONÓMICO

¿Qué es una Biorrefinería de Papa?

La biorrefinería de papa aplica el concepto de **valorización integral de biomasa** al procesamiento industrial del tubérculo *Solanum tuberosum*. A diferencia de una planta de procesamiento convencional —que genera grandes volúmenes de residuos— la biorrefinería convierte cada fracción en un producto de valor comercial.

La composición media de la papa fresca (base húmeda) es:

Componente	% masa húmeda	% masa seca
Agua	78–82	—
Almidón	14–18	65–75
Proteínas (patatin, inhibidores)	1.5–2.5	8–12
Fibra (celulosa + pectina)	1.0–2.0	5–9
Grasas y lípidos	0.1–0.2	0.5–1.0
Glucoalcaloides (solanina)	0.01–0.05	0.05–0.2
Minerales y vitaminas	0.8–1.2	3.5–5.5

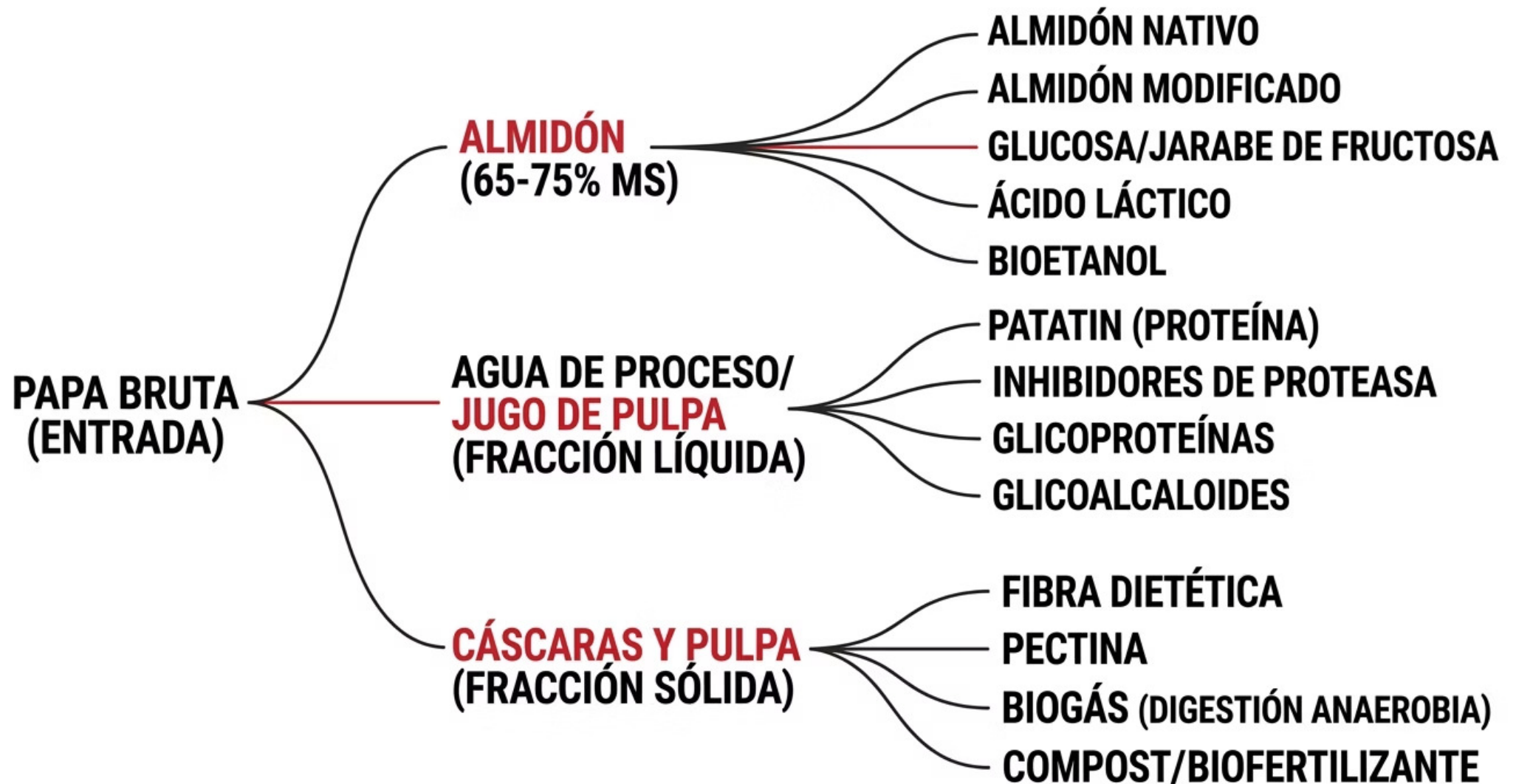
Cifras clave del sector

La producción mundial de papa supera **374 millones de toneladas/año** (FAO, 2022). Entre un **30–40 %** se destina a procesamiento industrial, generando residuos equivalentes a 50–80 kg por tonelada procesada. La biorrefinería permite capturar un valor adicional estimado de **\$80–120 USD/t** de materia prima.

Los sectores más relevantes son: almidón nativo/modificado, proteínas funcionales, biogás/bioenergía y compuestos bioactivos.

Árbol de Productos y Subproductos

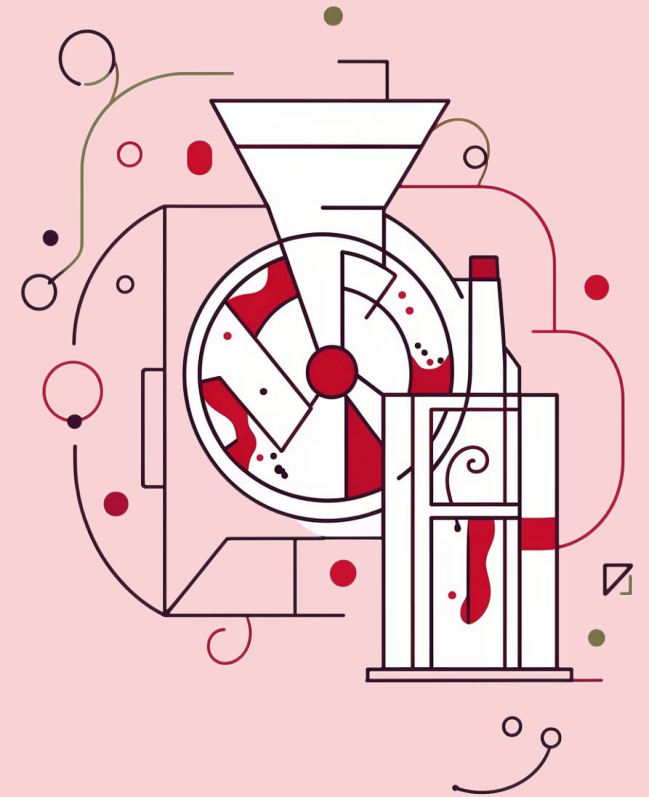
El siguiente esquema sintetiza la cascada de valorización desde la papa bruta hasta los productos finales de mayor valor añadido.



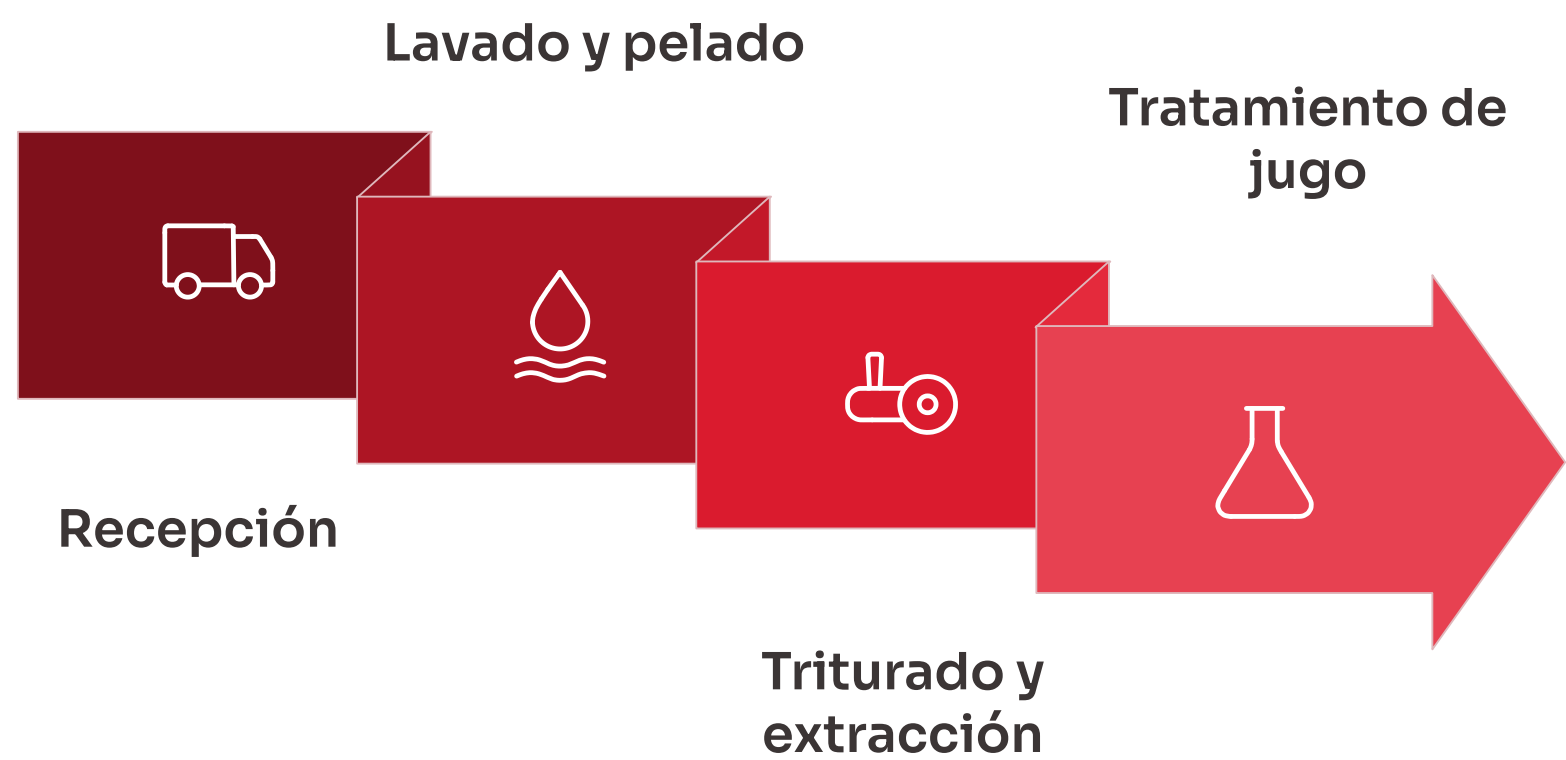
La jerarquía de valorización sigue el principio de **cascada de valor**: extraer primero los compuestos de mayor valor (proteínas, almidón) antes de dirigir los residuos a la bioenergía.

Flujo de Proceso Principal y Balance de Masa

Base de cálculo: **1.000 kg/h de papa fresca** (85 % humedad, 15 % materia seca). Los valores corresponden a condiciones típicas de planta industrial a escala media.



Balance de Masa Detallado — Base 1.000 kg/h



Etapa / Corriente		Flujo entrada (kg/h)	Flujo salida principal (kg/h)	Pérdidas / residuos (kg/h)	Humedad salida (%)
Papa bruta (entrada)		1.000	1.000	—	78–82
Lavado y pelado (abrasión)		1.000	920	80 (cáscara húmeda)	85
Trituración + extracción acuosa		920 + 800 H ₂ O	1.650 (suspensión)	70 (pulpa gruesa)	94
Tamizado / centrifugación		1.650	1.420 (lechada)	230 (pulpa fina)	90
Hidrociclones (lavado almidón)		1.420	145 (almidón húmedo)	1.275 (jugo proteico)	38–42
Secado spray / flash (almidón)		145	98 kg/h almidón seco	47 (vapor de agua)	12–14
Jugo proteico (ultrafiltración)		1.275	28 kg/h concentrado proteico	1.247 (permeado)	—

Rendimiento global: 98 kg almidón seco + 28 kg concentrado proteico + 300 kg equivalente biogás (digestión pulpas) por cada 1.000 kg de papa fresca procesada.

Balance de Energía del Proceso

Consumos energéticos por etapa

Operación	Energía (kWh/t papa)	Tipo
Lavado y pelado	8–12	Eléctrica
Trituración	15–22	Eléctrica
Bombeo y tamizado	10–14	Eléctrica
Hidrociclones	6–9	Eléctrica
Secado spray/flash	180–250	Térmica
Ultrafiltración	12–18	Eléctrica
Digestión anaerobia	–80 (recuperada)	Biogás
Total neto	151–225	Mixta

- ✔ La digestión anaerobia de pulpas y permeados recupera ~80 kWh/t en equivalente biogás (0,6 m³ CH₄/kg SV; PCI = 8,9 kWh/m³), cubriendo hasta el **35 % de la demanda térmica** del secador.

Ejemplo de cálculo — Secador flash

Dato: secar 145 kg/h de almidón húmedo (38 % humedad) hasta 13 % humedad.

Agua a evaporar:

$W_{ev} = 145 \times (0,38 - 0,13) / (1 - 0,13) = \mathbf{33,0 \text{ kg H}_2\text{O/h}}$

Calor requerido ($\Delta H_{vap} = 2.260 \text{ kJ/kg}$; eficiencia secador $\eta = 0,65$):
 $Q = 33,0 \times 2.260 / 0,65 = \mathbf{114.800 \text{ kJ/h} \approx 31,9 \text{ kWh/h}}$

Consumo específico: 31,9 kWh / 1,0 t papa = **31,9 kWh/t** (coherente con rango tabla).

Vapor equivalente ($P = 4 \text{ bar}$; $H_{vap} = 2.738 \text{ kJ/kg}$):
 $m_{vapor} = 114.800 / 2.738 = \mathbf{41,9 \text{ kg/h}}$

Productos de Alta Valor: Almidón y Proteínas

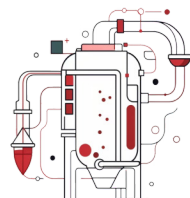


Almidón Nativo

Pureza $\geq 99,5$ % en base seca.
Temperatura de gelatinización:
59–68 °C. Viscosidad Brabender:
900–1.200 BU. Aplicaciones:
alimentos, papel, adhesivos.

Precio mercado: \$0,45–0,65

USD/kg (CIF Europa, 2023).



Almidón Modificado

Modificación química (acetilado, oxidado, entrecruzado) o física (pregelatinizado). Incremento de valor: 2–5× sobre almidón nativo. Aplicaciones: salsas retort, papel de alta gramaje, recubrimientos.

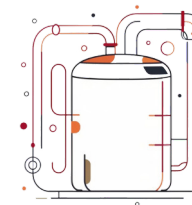
Precio: \$1,20–2,80 USD/kg.



Patatin (Proteína Nativa)

Contenido proteico ≥ 75 % (N $\times$ 6,25). Actividad lipásica intrínseca. Capacidad emulsificante superior a la proteína de soja. Estabilidad térmica limitada (desnaturalización > 55 °C).

Precio: \$8–25 USD/kg según pureza y funcionalidad.



Biogás y Biofertilizante

Digestión anaerobia de pulpa + permeado: rendimiento 0,45–0,55 m³ biogás/kg SV (65 % CH₄).

Digestato: 3,5–5,0 kg N/t, aplicación agrícola como biofertilizante. **Valor energético:**

\$0,03–0,05 USD/kWh equiv.

Análisis CAPEX — Inversión de Capital

Estimación para una planta procesando **10.000 t/año de papa fresca** (~1,25 t/h operación continua, 8.000 h/año). Precios en USD base 2023, factor de localización Europa Occidental = 1,0.

Equipamiento / Área	CAPEX (USD)	% del total
Recepción, lavado y pelado	120.000	4,8 %
Trituración y extracción	280.000	11,2 %
Tamizado y centrifugación	350.000	14,0 %
Sistema de hidrociclones	420.000	16,8 %
Secador flash / spray	480.000	19,2 %
Planta de ultrafiltración	310.000	12,4 %
Digestor anaerobio + cogeneración	290.000	11,6 %
Instrumentación y control (DCS)	150.000	6,0 %
Civil, obra e instalación	100.000	4,0 %
CAPEX Directo Total	2.500.000	100 %
Ingeniería + contingencia (20 %)	500.000	—
CAPEX Total Instalado (TIC)	3.000.000	—

Factores de escalado

Para estimar CAPEX a otra capacidad se aplica la regla de los seis décimos (*six-tenths rule*):

CAPEX₂ = CAPEX₁ × (Q₂/Q₁)^{0,6}
Ejemplo: escalar de 10.000 a 25.000 t/año:
CAPEX₂ = \$3M × (25.000/10.000)^{0,6} = \$3M × 2,5^{0,6} = \$3M × 1,82 = **\$5,46M USD**

El coste específico decrece de **\$300 USD/t·año** a 10.000 t hasta **\$218 USD/t·año** a 25.000 t, evidenciando significativas **economías de escala**.

Análisis OPEX — Costes Operativos Anuales

Partida OPEX	USD/año	USD/t papa
Materia prima (papa fresca, \$120/t)	1.200.000	120,00
Energía eléctrica (0,09 \$/kWh)	115.200	11,52
Energía térmica / vapor	86.400	8,64
Agua de proceso (1,5 \$/m³)	54.000	5,40
Reactivos químicos (NaOH, SO₂, etc.)	28.000	2,80
Mano de obra directa (8 operarios)	320.000	32,00
Mantenimiento (3 % CAPEX directo)	75.000	7,50
Gestión de residuos / efluentes	42.000	4,20
Seguros y administración	60.000	6,00
Amortización (TIC / 15 años)	200.000	20,00
OPEX Total	2.180.600	218,06

Ingresos estimados y margen bruto

Producto	Producción (t/año)	Ingresos (USD/año)
Almidón nativo (0,55 \$/kg)	784	431.200
Almidón modificado (1,80 \$/kg)	196	352.800
Concentrado proteico (12 \$/kg)	224	2.688.000
Biogás/energía (0,04 \$/kWh)	—	128.000
Fibra dietética (0,80 \$/kg)	200	160.000
Ingresos Totales	—	3.760.000

✔ **Margen operativo bruto:** \$3.760.000 – \$2.180.600 = **\$1.579.400 USD/año**
EBITDA margin ≈ 42 %
Payback simple ≈ 1,9 años

Caso de Estudio 1 — AVEBE, Países Bajos

Descripción de la instalación

AVEBE es la cooperativa de almidón de papa más grande de Europa, con capacidad de procesamiento de **~3,5 millones de toneladas/año** de papa de fécula en sus plantas de Ter Apelkanaal y Foxhol (Groningen). Opera bajo el modelo de biorrefinería desde los años 1990, valorando todas las fracciones del tubérculo.

- Almidón nativo y modificado: > 500.000 t/año para industrias papelera y alimentaria
- Proteína SOLANIC® (patatin > 80 % pureza): grado alimentario y farmacéutico
- Fibra PERFECTAMYL®: uso en panificación y alimentos funcionales
- Biogas interno: planta de cogeneración de 12 MW_e cubre ~30 % demanda energética

Resultados e indicadores clave

\$0,38

Coste almidón

USD/kg almidón producido (eficiencia escala)

98%

Valorización

De la biomasa entrante convertida en producto comercial

12MW

Cogeneración

Potencia eléctrica generada internamente con biogás

 La clave del éxito de AVEBE reside en la **integración vertical** (cooperativa de agricultores + procesamiento + I+D) y en la escala, que reduce el coste específico de producción a niveles inalcanzables para plantas menores.

Caso de Estudio 2 — Planta Piloto Colombia (Biorrefinería Rural)

Contexto y escala

Proyecto piloto financiado por COLCIENCIAS (2019–2022) en la región de Boyacá, Colombia. Capacidad: **500 kg/h de papa Pastusa-Suprema**. Objetivo: demostrar viabilidad técnica y económica a escala rural con inversión mínima.

Inversión total: \$380.000 USD (TIC)

Producción anual: ~800 t almidón, 45 t proteína

Empleo generado: 22 puestos directos

El proyecto demostró que incluso a escala pequeña, la integración de la línea proteica multiplica los ingresos por **3,2x** respecto a una planta solo de almidón.

Lecciones técnicas aprendidas

→ Control de temperatura crítico

La patatin se desnaturaliza irreversiblemente por encima de 55 °C. Se implementó un intercambiador de placas de acero inoxidable AISI-316 para mantener el jugo proteico a 8–12 °C durante todo el proceso.

→ Optimización del pH en extracción

Ajuste a pH 6,8–7,2 con NaOH 1N minimiza la oxidación enzimática (polifenol oxidasa). Reducción de color oscuro del concentrado proteico de grado 8 a grado 2 (escala Klett).

→ Secado por atomización vs. liofilización

Spray drying (T entrada = 170 °C; T salida = 75 °C): coste \$0,35/kg vs. liofilización \$8,50/kg. El spray drying reduce funcionalidad proteica un 15 % pero es económicamente superior para mercados no farmacéuticos.

Ejemplos de Cálculo Avanzados

Ejemplo 1: Rendimiento de extracción proteica por ultrafiltración

Datos: Jugo proteico: 1.275 kg/h; concentración proteína = 1,8 g/L; densidad jugo $\approx 1.010 \text{ kg/m}^3$.

Caudal volumétrico: $Q = 1.275 / 1.010 = \mathbf{1,262 \text{ m}^3/\text{h}}$

Masa proteína en jugo: $m_{\text{prot}} = 1,8 \text{ g/L} \times 1.262 \text{ L/h} = 2.272 \text{ g/h} = \mathbf{2,27 \text{ kg/h}}$

Factor de concentración membrana (UF, MWCO 10 kDa): $FC = 20\times$

Volumen concentrado: $V_{\text{conc}} = 1.262 / 20 = \mathbf{63,1 \text{ L/h}}$

Recuperación proteína ($\eta = 0,92$): $m_{\text{conc}} = 2,27 \times 0,92 = \mathbf{2,09 \text{ kg prot/h}}$

Concentrado final (proteína 7 % p/p): masa concentrado = $2,09 / 0,07 = \mathbf{29,8 \text{ kg/h} \approx 28 \text{ kg/h}}$ ✓ (coherente con balance de masa sección anterior)

Ejemplo 2: Dimensionamiento del digestor anaerobio

Datos: Pulpa + permeado = 1.547 kg/h; SV = 45 g/kg; producción específica biogás = $0,50 \text{ m}^3/\text{kg SV}$.

Carga de SV: $m_{\text{SV}} = 1.547 \times 0,045 = \mathbf{69,6 \text{ kg SV/h} = 557 \text{ kg SV/día}}$

Producción biogás diaria: $V_{\text{biogás}} = 557 \times 0,50 = \mathbf{279 \text{ m}^3/\text{día}}$

TRH (Tiempo de Retención Hidráulica) = 20 días (mesofílico, 37 °C):

Caudal afluente: $Q_{\text{af}} = 1.547 \times 24 / 1.000 = 37,1 \text{ m}^3/\text{día}$

Volumen digestor: $V_{\text{dig}} = Q_{\text{af}} \times \text{TRH} = 37,1 \times 20 = \mathbf{742 \text{ m}^3}$

Energía biogás (65 % CH_4 ; PCI = $8,9 \text{ kWh/m}^3 \text{ CH}_4$):

$E_{\text{biogás}} = 279 \times 0,65 \times 8,9 = \mathbf{1.614 \text{ kWh/día} \approx 67,3 \text{ kW medio}}$

Sensibilidad Económica y Riesgos

El análisis de sensibilidad evalúa el impacto de las principales variables sobre el **margen EBITDA** y el **periodo de retorno de la inversión (PRI)**.

Variable	Caso base	Variación ±20 %	Impacto EBITDA
Precio papa (\$/t)	\$120	\$96 – \$144	± \$240K/año
Precio proteína (\$/kg)	\$12,00	\$9,60 – \$14,40	±\$537K/año
Precio almidón (\$/kg)	\$0,55	\$0,44 – \$0,66	±\$78K/año
Coste energía (\$/kWh)	\$0,09	\$0,072 – \$0,108	±\$40K/año
Rendimiento proteína (%)	85 %	68 % – 100 %	±\$456K/año

 **Variable crítica:** El precio del concentrado proteico (patatin) es el factor de mayor impacto. Una caída del 20 % en el precio proteico reduce el EBITDA un **34 %**, elevando el PRI de 1,9 a 2,9 años.

Matriz de riesgos

Riesgo Alto

Volatilidad precio proteína;
desnaturalización proteica en proceso;
cambios regulatorios en aditivos alimentarios

Riesgo Medio

Variabilidad en composición de materia prima; costes energéticos;
disponibilidad y precio de papa de fécula

Riesgo Bajo

Demanda de almidón (mercado establecido); tecnología de proceso (madura); gestión de digestato (marco regulatorio estable)

Conclusiones y Hoja de Ruta

01

Valorización integral es económicamente superior

La biorrefinería de papa supera en rentabilidad a la planta de almidón convencional. El concentrado proteico (patatin) representa el **71 % de los ingresos** con solo el 2,8 % de la masa de producto. El modelo de cascada de valor es esencial para la viabilidad económica a escala media.

03

Economías de escala determinantes

El coste específico cae de **\$300 USD/t-año** a 10.000 t hasta **\$218 USD/t-año** a 25.000 t. Para nuevas plantas, se recomienda una capacidad mínima de 15.000 t/año para asegurar retornos competitivos frente a operadores establecidos como AVEBE.

02

El balance energético es favorable con biogás

La integración del digestor anaerobio reduce el OPEX energético un **15–25 %** y elimina el pasivo ambiental del vertido de pulpas. A escala de 10.000 t/año, la autosuficiencia energética parcial es técnica y económicamente alcanzable.

04

Próximos pasos recomendados

1) Estudio de mercado para concentrado proteico en región objetivo. 2) Ingeniería básica (FEED) con simulación en Aspen Plus o SuperPro Designer. 3) Análisis financiero detallado (VAN, TIR, análisis Monte Carlo). 4) Evaluación de incentivos fiscales para biorrefinería en la jurisdicción aplicable.

Bibliografía y Referencias Técnicas

Normas y bases de datos

FAO (2022). *FAOSTAT — Production data: Potatoes*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. fao.org/faostat

Grommers, H.E. & van der Krogt, D.A. (2009). Potato Starch: Production, Modifications and Uses. En: *Starch: Chemistry and Technology*, 3rd Ed., pp. 511–539. Academic Press.

Ralet, M.C. & Guéguen, J. (2000). Fractionation of potato proteins: solubility, thermal coagulation and emulsifying properties. *LWT – Food Science and Technology*, 33(5), 380–387.

Wageningen University & Research (2020). *Potato Protein: Functionality and Applications*. Report WUR-FBR 2020-012.

AVEBE (2023). *Annual Report 2022–2023: Sustainability and Innovation*. AVEBE U.A., Veendam, Netherlands.

Ingeniería de proceso y economía

Seider, W.D., Seader, J.D. & Lewin, D.R. (2009). *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*, 3rd Ed. Wiley. [Capítulo 16: Estimación de costes]

Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. & West, R.E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th Ed. McGraw-Hill. [Regla de los 6/10, índices CEPCI]

Schieber, A. & Saldaña, M.D.A. (2009). Potato peels: a source of nutritionally and pharmacologically interesting compounds. *Food, Nutrition and Agriculture*, 23, 23–29.

COLCIENCIAS – MinCiencias Colombia (2022). *Informe Final Proyecto Biorrefinería Rural de Papa, Boyacá*. Código 111577757369.

Murthy, G.S. (2011). Overview and assessment of algal biofuels production technologies. En: *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. Academic Press. [Metodología de balance de masa y energía aplicable a biorrefinerías de almidón]