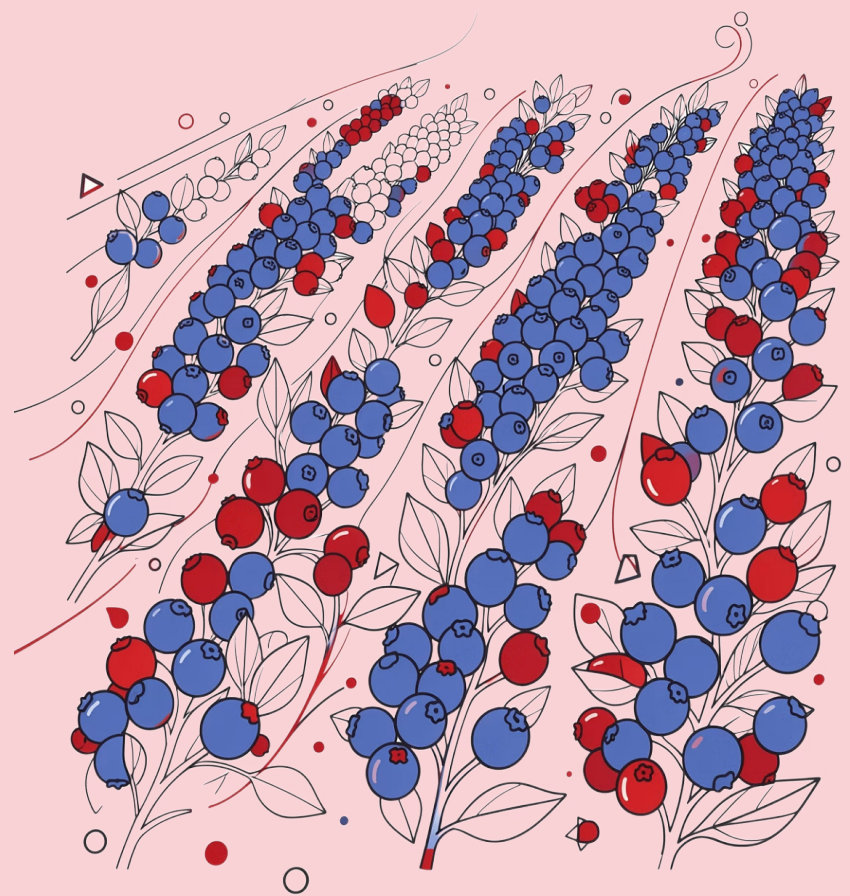




Biorrefinería del Arándano

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

Una guía técnica orientada a ingenieros especialistas en procesos industriales para la valorización completa del *Vaccinium corymbosum* y especies relacionadas en el marco de la economía circular.

INGENIERÍA DE PROCESOS

ECONOMÍA CIRCULAR

BIORREFINERÍA

¿Qué es una Biorrefinería de Arándano?

Una **biorrefinería de arándano** integra múltiples procesos de conversión para extraer el máximo valor de la biomasa del arándano (*Vaccinium corymbosum*, *V. angustifolium*, *V. myrtillus*). A diferencia de una planta de procesamiento convencional, aprovecha **el 100 % de la biomasa**, incluyendo fruta fresca, fruta de descarte, pulpa residual, semillas, hollejos y biomasa vegetal (hojas, tallos).

El concepto se alinea con los principios de la economía circular y permite generar simultáneamente productos de alto valor añadido: antocianinas, pectina, aceite de semillas, fibra dietética, extractos polifenólicos, bioetanol y biogás.

 La tasa de desperdicio en el procesamiento convencional del arándano supera el **30 %** en peso fresco. La biorrefinería reduce este índice a menos del **5 %**.

Materias primas principales

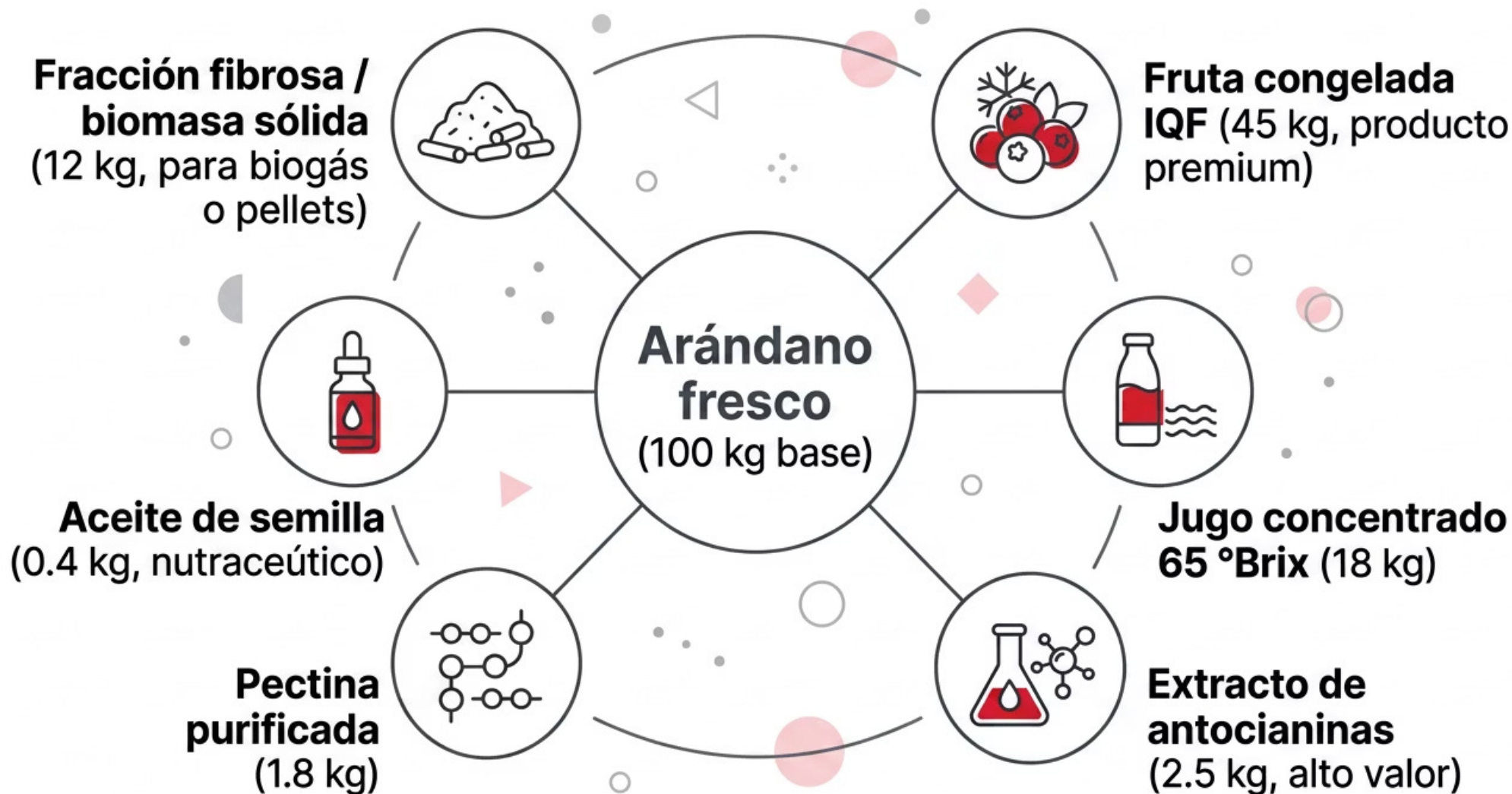
- Arándano fresco (grado comercial)
- Arándano de descarte (tamaño/color)
- Residuos de congelación IQF
- Torta de prensado (hollejo + semilla)
- Hojas y tallos podados
- Aguas de proceso (lixiviados)

Escala típica de operación

5 000 – 50 000 t/año de fruta fresca procesada

Mapa de Productos y Subproductos

La siguiente infografía muestra la jerarquía completa de valorización desde la fruta bruta hasta los productos finales de mayor valor de mercado.



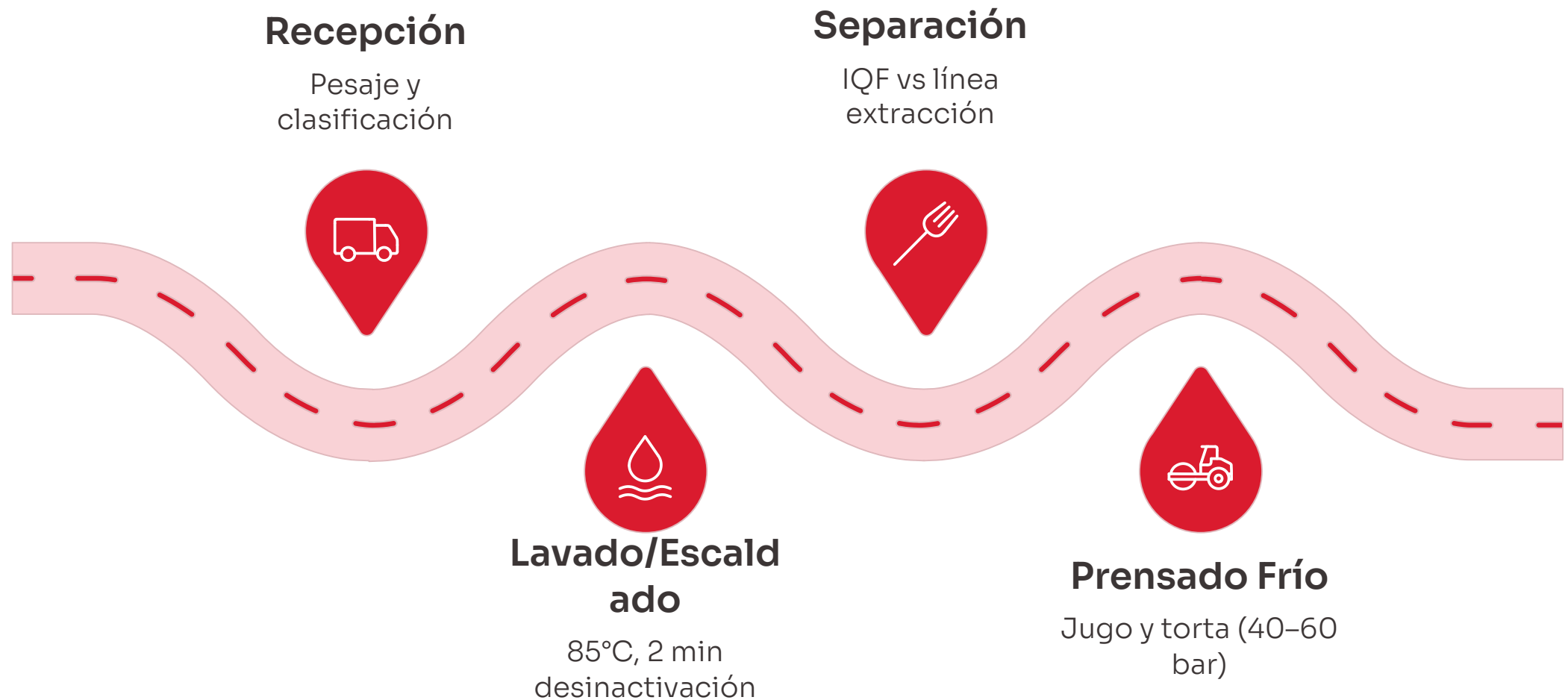
Balance de Masa Global — Base: 1 000 kg de Arándano Fresco

El siguiente balance de masa detalla las corrientes de proceso para una planta que procesa arándano fresco en tres líneas simultáneas: congelación IQF, extracción de jugo y extracción de antocianinas.

Corriente de proceso	Masa entrada (kg)	Masa salida (kg)	Pérdidas/agua evaporada (kg)	Rendimiento (%)
Recepción y clasificación	1 000	920	80	92,0 %
Lavado y escaldado	920	905	15	98,4 %
Línea IQF (45 % fruta)	414	410	4	99,0 %
Prensado en frío (jugo)	491	305 jugo + 186 torta	—	62,1 % jugo
Concentración jugo (EVA)	305	82 conc. 65 °Brix	223 vapor	26,9 % (s.s.)
Extracción antocianinas (EtOH/H ₂ O)	186 torta	14,5 extracto bruto	171,5 disolvente recup.	7,8 %
Prensado semillas	22 semillas	3,8 aceite + 18 torta	0,2	17,3 % aceite
Digestión anaerobia (residuos)	195 biomasa	28 m ³ biogás + 85 digestato	82 agua proceso	—
TOTAL salida productos	1 000	~623	~377	—

❏ Valores obtenidos de correlaciones experimentales (Kalt et al., 2020; Mikulic-Petkovsek et al., 2015) y ajustados a escala piloto de 1 000 kg. Las pérdidas de agua incluyen vapor de concentración y agua de lavado.

Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) Simplificado



Condiciones clave de operación

- Escaldado: 85 °C, 2 min (inactivación enzimática)
- Prensado: 40–60 bar, temperatura ambiente
- Evaporación: 55 °C bajo vacío (preservar antocianinas)
- Extracción: EtOH 60 % v/v, pH 2,0, 40 °C, 2 h

Equipos principales

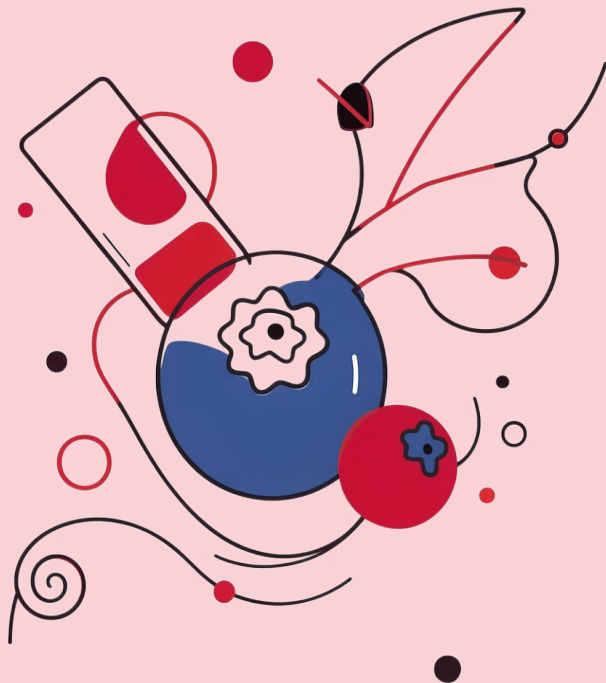
- Prensa de banda continua (capacidad: 5 t/h)
- Evaporador de película descendente (MVR)
- Extractor de columna pulsada o tanques en serie
- Digestor anaerobio UASB o CSTR

Balance de Energía — Análisis Térmico y Eléctrico

El balance de energía se calcula sobre base de **1 000 kg/h de arándano fresco procesado** en régimen continuo, considerando todos los equipos de la cadena de valor.

Unidad de proceso	Energía térmica (MJ/h)	Energía eléctrica (kWh/h)	Fuente energética	Recuperable (%)
Lavado/escaldado	+185	12	Vapor 3 bar	35 %
Congelación IQF (-35 °C)	-520 (refrigeración)	145	Eléctrica	10 %
Prensado en frío	+8 (calor friccional)	22	Eléctrica	0 %
Evaporación MVR	+310 (vapor generado)	85	MVR — autocompresión	82 %
Extracción EtOH + destilación	+430	38	Vapor 2 bar	60 %
Digestión anaerobia	-180 (biogás generado)	5	Biogás → cogeneración	90 %
Servicios generales + HVAC	+95	55	Mix	20 %
TOTAL NETO	+328 MJ/h	362 kWh/h	—	—

✓ El biogás generado por digestión anaerobia ($\approx 28 \text{ m}^3/\text{h}$ a 60 % CH_4) equivale a **168 kWh/h térmicos**, cubriendo el **51 %** de la demanda eléctrica mediante cogeneración con eficiencia del 35 %.



Productos de Alto Valor: Antocianinas y Polifenoles

Antocianinas totales

Rendimiento: 1,8–2,5 kg/t fruta fresca (base seca: 250–400 mg/100 g hollejo)

Precio mercado: \$800–\$1 200/kg extracto estandarizado (E3P $\geq$ 10 % antocianinas)

Aplicaciones: colorante natural E-163, nutraceutico, industria cosmética

Ácido clorogénico

Rendimiento: 0,4–0,8 kg/t fruta fresca

Precio mercado: \$2 500–\$4 000/kg grado farmacéutico

Aplicaciones: antioxidante premium, regulación glucémica, suplementos deportivos

Resveratrol + pterostilbeno

Rendimiento: 0,05–0,12 kg/t fruta fresca

Precio mercado: \$8 000–\$15 000/kg HPLC $\geq$ 98 %

Aplicaciones: farmacéutico, anti-aging, neuroprotección

Pectina de hollejo

Rendimiento: 1,2–2,0 kg/t fruta fresca (GE $\geq$ 65 %)

Precio mercado: \$12–\$25/kg grado alimentario

Aplicaciones: gelificante E-440, encapsulación, films activos

Ejemplo de Cálculo: Rendimiento de Extracción de Antocianinas

Datos de entrada

Alimentación: **1 000 kg/h** de torta de prensado (hollejo + semilla, 35 % humedad)

- Contenido antocianinas hollejo: 350 mg/100 g base seca (bs)
- Relación sólido:disolvente = 1:8 (kg/kg)
- Disolvente: EtOH 60 % v/v, pH 2,0 (HCl)
- Temperatura: 40 °C | Tiempo: 120 min
- Eficiencia extracción: 78 % (2 etapas contracorriente)

Paso 1 — Masa hollejo base seca

Humedad torta = 35 % → masa seca = $1\,000 \times (1 - 0,35) = \mathbf{650\text{ kg bs/h}}$

Paso 2 — Antocianinas teóricas

Antoc. = $650\text{ kg} \times 350\text{ mg/100 g} = 650\,000\text{ g} \times 3,5\text{ g/kg} = \mathbf{2\,275\text{ g/h} = 2,275\text{ kg/h}}$

Paso 3 — Antocianinas extraídas

Antoc. extraídas = $2,275\text{ kg/h} \times 0,78 = \mathbf{1,775\text{ kg/h extracto bruto}}$

Paso 4 — Volumen de disolvente requerido

Disolvente = $650\text{ kg bs} \times 8 = \mathbf{5\,200\text{ kg/h}}$ de mezcla EtOH/agua ($\rho \approx 0,89\text{ kg/L} \rightarrow 5\,843\text{ L/h}$)

Paso 5 — Balance en el evaporador de recuperación

Concentración inicial extracto: $1,775\text{ kg} / 5\,200\text{ kg} = \mathbf{341\text{ ppm (mg/kg)}}$

Objetivo concentrado: 10 % antocianinas → factor concentración = 293×

Masa extracto final = $1,775 / 0,10 = \mathbf{17,75\text{ kg/h de extracto estandarizado}}$

Resultado económico por hora

Ingreso bruto = $17,75\text{ kg/h} \times \$1\,000/\text{kg} = \mathbf{\$17\,750 /h}$

✓ A 8 000 h/año → **\$142 M /año** solo en antocianinas (planta 1 000 kg/h fruta fresca).

Referencia cálculo

Metodología: Giusti & Wrolstad (2001); factor de corrección cinético: Cacace & Mazza (2003).

Análisis CAPEX — Inversión de Capital

Estimación CAPEX para una planta biorrefinería de arándano de capacidad **10 000 t/año** de fruta fresca procesada (escala semi-industrial).
Todos los valores en **USD** (CEPCI 2023 = 820).

Ítem de inversión	Costo directo (USD)	Factor instalación	Costo instalado (USD)	% CAPEX total
Equipos de recepción, lavado y clasificación	\$320 000	2,1	\$672 000	4,8 %
Línea IQF (túnel espiral, -35 °C, 2 t/h)	\$1 850 000	1,8	\$3 330 000	23,6 %
Prensas de banda y decantadores	\$480 000	2,0	\$960 000	6,8 %
Evaporador MVR (jugo concentrado)	\$750 000	2,2	\$1 650 000	11,7 %
Planta de extracción EtOH (tanques + columnas)	\$920 000	2,5	\$2 300 000	16,3 %
Purificación antocianinas (cromatografía prep.)	\$680 000	2,3	\$1 564 000	11,1 %
Digestor anaerobio + cogeneración	\$540 000	2,4	\$1 296 000	9,2 %
Servicios: vapor, refrigeración, HVAC, WWT	\$620 000	1,9	\$1 178 000	8,3 %
Obra civil, electricidad, instrumentación	\$850 000	1,3	\$1 105 000	7,8 %
Ingeniería, puesta en marcha, contingencias (15 %)	—	\$1 275 000	9,0 % aprox.	
CAPEX TOTAL	—	—	\$15 330 000	100 %

❏ Factor de instalación según método de Hand (Peters & Timmerhaus, 2018). Se recomienda contingencia del 15–20 % para proyectos greenfield en Sudamérica.

Análisis OPEX — Costos Operativos Anuales

Partida OPEX	USD/año	USD/t fruta
Materia prima (arándano fresco)	\$6 200 000	\$620
Mano de obra directa (32 operarios)	\$960 000	\$96
Energía eléctrica (0,085 \$/kWh)	\$246 000	\$24,6
Vapor y agua de proceso	\$185 000	\$18,5
EtOH y reactivos de extracción	\$312 000	\$31,2
Mantenimiento (3 % CAPEX/año)	\$460 000	\$46
Control de calidad y laboratorio	\$145 000	\$14,5
Tratamiento de efluentes	\$98 000	\$9,8
Seguros y administración	\$220 000	\$22
OPEX TOTAL	\$8 826 000	\$882,6

Indicadores económicos clave

\$15,3M

CAPEX total

Planta 10 000 t/año

\$8,8M

OPEX anual

Costo operativo total

4,2

Payback (años)

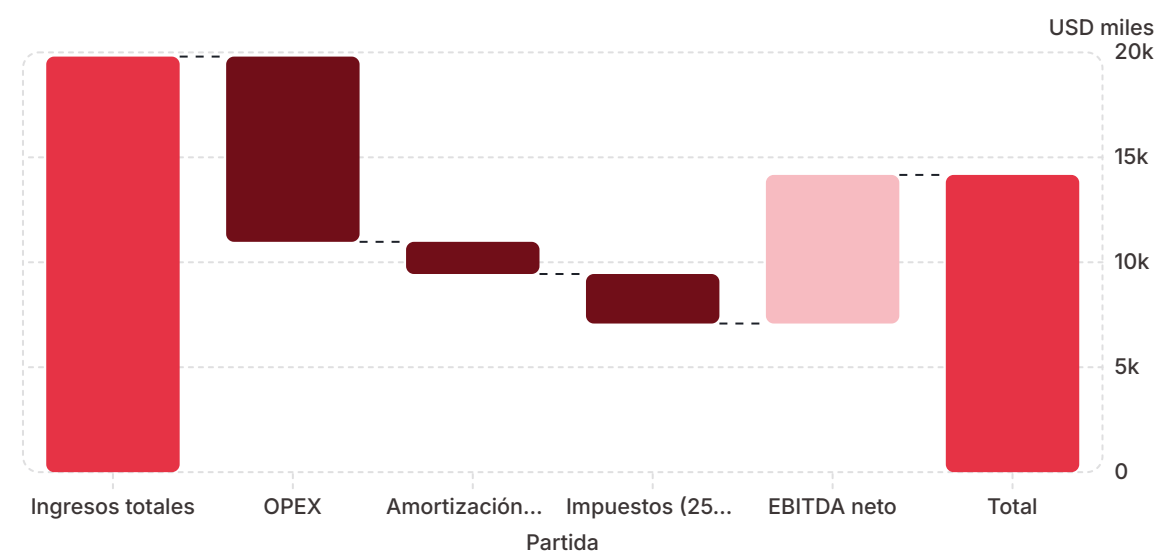
Con precio antocianinas \$1 000/kg

28%

TIR estimada

Escenario base a 10 años

Flujo de Caja y Rentabilidad del Proyecto



Estructura de ingresos (USD/año)

Fruta IQF (4 100 t × \$1 800/t)	\$7 380 000
Jugo concentrado (820 t × \$2 400/t)	\$1 968 000
Antocianinas (142 t × \$1 000/kg)	\$7 100 000
Pectina (18 t × \$18/kg)	\$324 000
Aceite semilla (4 t × \$12 000/t)	\$48 000
Biogás/cogeneración (crédito energético)	\$980 000
TOTAL INGRESOS	\$19 800 000

✔ EBITDA ≈ **\$9,0 M/año** antes de impuestos. Margen EBITDA: **45,5 %** sobre ingresos totales.

Casos de Estudio

Implementaciones reales de biorrefinerías de arándano a escala industrial



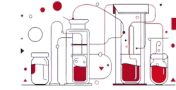
Caso 1 — Vital Berries S.A. (Chile, 2019)

Planta ubicada en la Región del Maule con capacidad de **18 000 t/año**. Integró una línea de extracción de antocianinas usando membranas de ultrafiltración acopladas a cromatografía de resinas. **CAPEX:** \$22,4 M USD. **Payback:** 5,1 años. Logró certificación FSSC 22000 y exporta extracto a mercados europeo y asiático. Reducción de residuos sólidos: del 28 % al 3,5 %.



Caso 2 — Nutberry Extracts (EE.UU. — Oregon, 2021)

Primera planta en EE.UU. con integración completa de digestión anaerobia UASB + cogeneración a gas. Capacidad: **8 500 t/año**. Autoabastecimiento energético del **67 %**. **CAPEX:** \$18,7 M USD. Ingresos antocianinas (año 3): \$6,2 M. Aplicó financiamiento USDA Value-Added Producer Grant (\$750 000) y créditos fiscales por energías renovables (ITC 30 %).

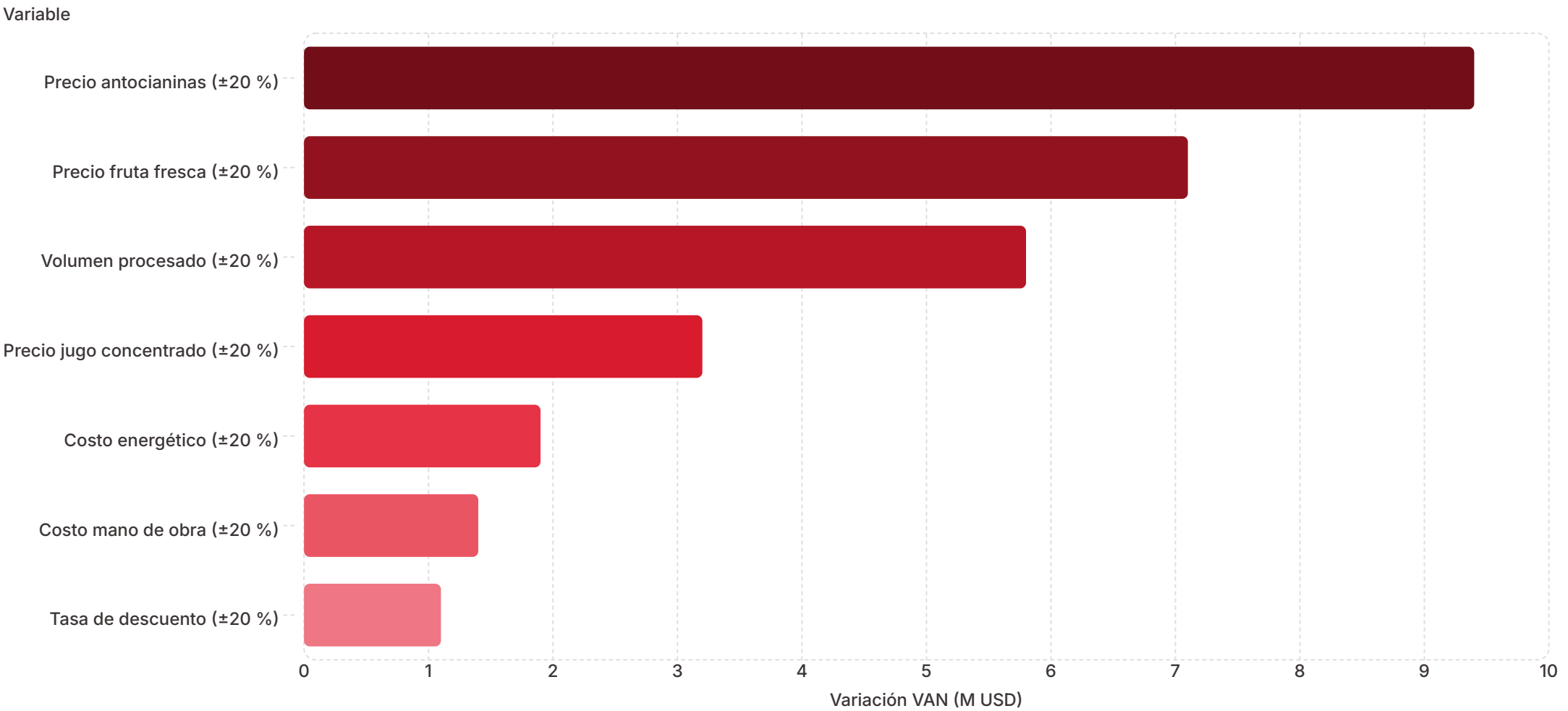


Caso 3 — BerryPharma GmbH (Alemania, 2022)

Planta orientada al mercado farmacéutico. Procesa **5 000 t/año** de arándano silvestre (*V. myrtillus*) con extracción supercrítica CO₂ para pterostilbeno de alta pureza (≥ 99 %). **CAPEX:** \$31,2 M USD por la tecnología SFE. Precio de venta del producto: \$14 500/kg. TIR: 34 % a 12 años. Obtuvo certificación GMP de la EMA en 2023.

Análisis de Sensibilidad — Variables Críticas

El modelo económico muestra alta sensibilidad al precio de las antocianinas y al costo de la materia prima. El siguiente gráfico tipo tornado ilustra el impacto de $\pm 20\%$ en cada variable sobre el VAN del proyecto (base: \$28 M USD, tasa descuento 10 %, horizonte 10 años).



⚠ El precio de las antocianinas puede fluctuar entre \$600 y \$2 000/kg según pureza y mercado destino. Se recomienda asegurar contratos off-take previos al inicio de operaciones para mitigar este riesgo.

Tecnologías Emergentes en la Biorrefinería del Arándano

Extracción supercrítica (SFE-CO₂)

Permite obtener aceite de semilla y pterostilbeno con pureza >99 % sin residuos de disolvente. Condiciones: 350 bar, 45 °C, co-solvente EtOH 5 %. Costo operativo 2,3× superior a extracción convencional, pero el precio del producto es 8–12× mayor. Ideal para aplicaciones farmacéuticas (GMP).

Membranas de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO)

Concentración del extracto polifenólico sin calor, preservando bioactividad. Recuperación de agua >90 % para recirculación. Flujo permeado típico: 15–25 L/m²·h a 20–40 bar. Reduce consumo energético de concentración en un **60 %** frente a la evaporación convencional.

Fermentación láctica de subproductos

Conversión de azúcares residuales de la torta por *Lactobacillus plantarum* para producción de ácido láctico (PLA precursor). Rendimiento: 0,85 g ácido láctico/g glucosa. A escala 10 000 t/año genera ~85 t/año de ácido láctico puro, valor de mercado: \$1 600/t.

Pirólisis de biomasa vegetal (hojas/tallos)

Tratamiento termoquímico a 450–550 °C en atmósfera inerte. Genera biocarbón (≈35 % masa), bio-oil (≈45 %) y syngas (≈20 %). El biocarbón tiene aplicación como enmienda de suelo agrícola (secuestro de carbono: 1,5 t CO₂-eq/t biocarbón), generando créditos de carbono a ~\$35–\$55/t CO₂.

Bibliografía y Referencias Técnicas

Referencias científicas principales

- **Giusti, M.M. & Wrolstad, R.E. (2001).** Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, F1.2.1–F1.2.13. DOI: 10.1002/0471142913.faf0102s00
- **Kalt, W. et al. (2020).** Recent research on the health benefits of blueberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(12), 3557–3592. DOI: 10.1021/acs.jafc.9b02981
- **Cacace, J.E. & Mazza, G. (2003).** Mass transfer process during extraction of phenolic compounds from milled berries. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 379–389.
- **Mikulic-Petkovsek, M. et al. (2015).** Phenolic content and antioxidant properties of blueberry. *Food Chemistry*, 174, 400–408.
- **Peters, M.S. & Timmerhaus, K.D. (2018).** *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5ª ed. McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-239266-1

Normas, bases de datos y fuentes técnicas

- **ICIS Chemical Pricing (2023).** Anthocyanins and polyphenol market reports. *icis.com* [consultado: oct. 2024]
- **Turton, R. et al. (2018).** *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*, 5ª ed. Prentice Hall. (Factor de instalación — método de Hand, Cap. 7)
- **FAO/IDF (2022).** Fruit processing and waste valorization guidelines. *Food and Agriculture Organization, Roma*.
- **European Medicines Agency (2023).** GMP guidelines for botanical extracts. EMA/CHMP/CVMP/QWP/393800/2023.
- **USDA ERS (2023).** Blueberry industry statistics and value-added processing. *Economic Research Service*, *ers.usda.gov*

❏ Todos los precios de productos y equipos corresponden a valores de mercado **2023–2024** en USD. Se recomienda actualizar con CEPCI vigente al momento de la evaluación del proyecto.