



Biorrefinería de la Uva

Análisis técnico-económico integral: productos, subproductos, balances de masa y energía, costos CAPEX/OPEX y casos de estudio para ingenieros de procesos industriales.

INGENIERÍA DE PROCESOS

VALORIZACIÓN DE BIOMASA

Agenda

01

Marco conceptual de la biorrefinería

Definición, principios y flujos de valor en el procesamiento integral de la uva.

02

Productos y subproductos principales

Vino, jugo, aceite de semilla, orujo, tartrato, polifenoles y biogás.

03

Balances de masa y energía

Cuantificación de flujos, rendimientos y eficiencias energéticas por etapa.

04

Análisis económico CAPEX / OPEX

Estimación de inversiones, costos operativos y rentabilidad del proceso.

05

Casos de estudio y ejemplos de cálculo

Instalaciones reales, modelos de cálculo y bibliografía de referencia.

Marco Conceptual: La Biorrefinería de la Uva

Una biorrefinería de la uva aplica el principio de valorización integral de la biomasa (*zero waste*), transformando cada fracción del racimo —pulpa, piel, semilla, raspón y efluentes— en productos de alto valor añadido.

Materia prima

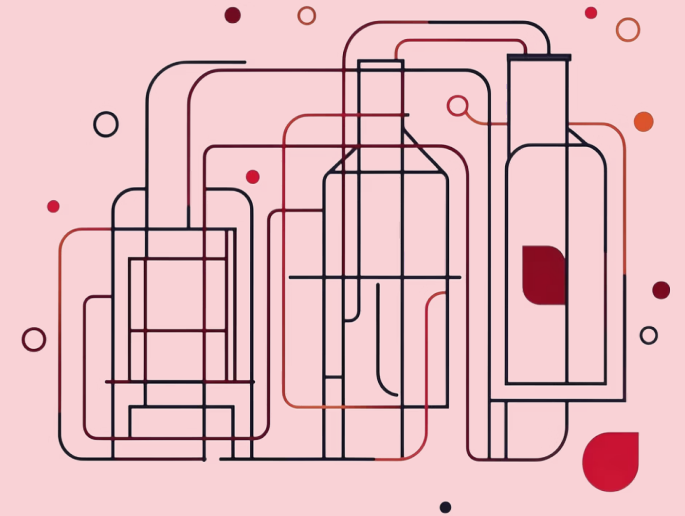
Uva vinífera (*Vitis vinifera*) y variedades de mesa. Composición media: 75–85 % pulpa, 5–12 % piel, 3–6 % semillas, 2–5 % raspón.

Jerarquía de valor

Bebidas alcohólicas → zumos → ingredientes funcionales → biocombustibles → compost. Cada escalón recupera valor residual del anterior.

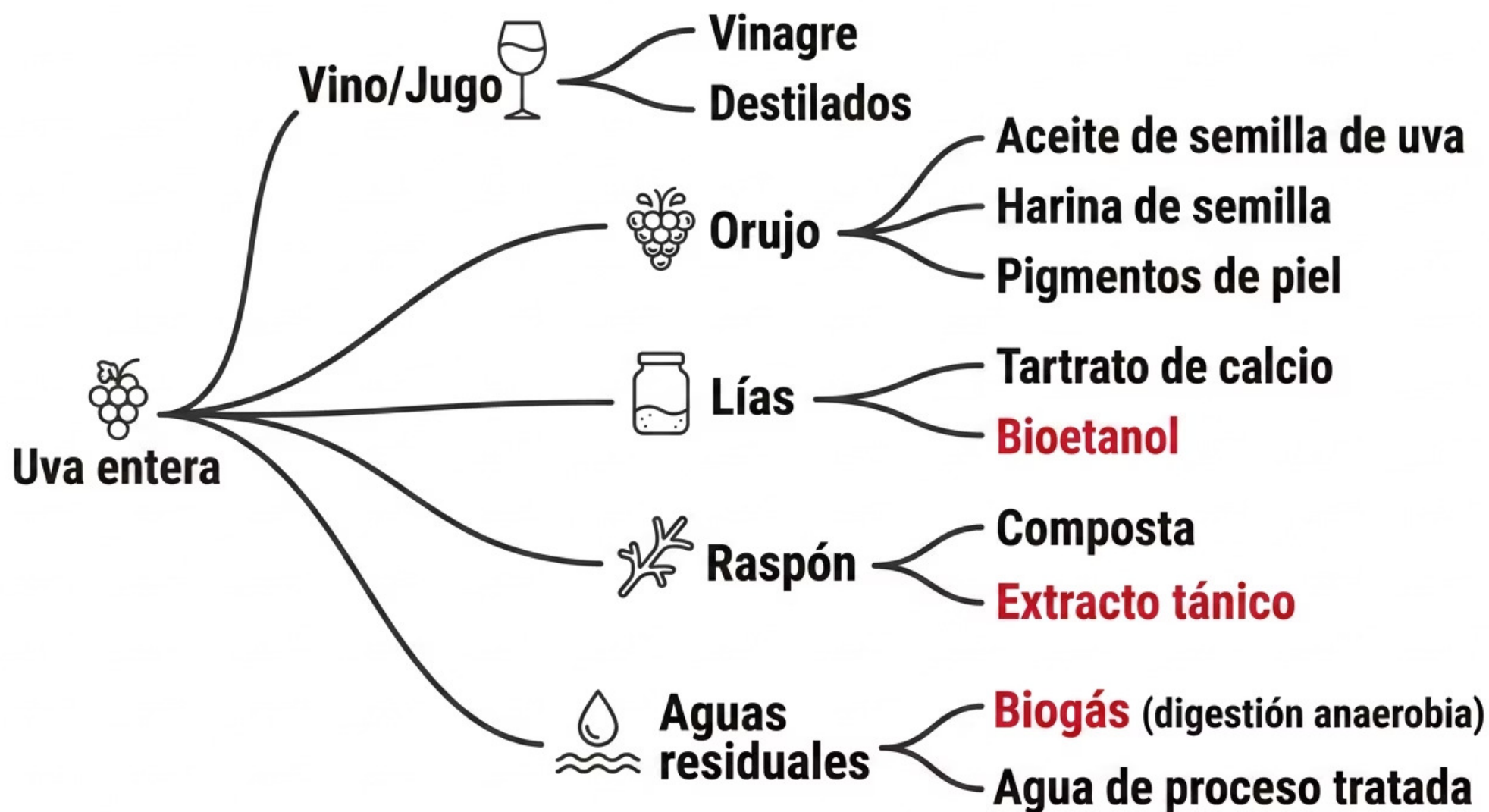
Drivers industriales

Regulación ambiental (Directiva UE 2018/2001), economía circular y demanda de ingredientes bioactivos para nutraceutica y cosmética.



Mapa de Productos y Subproductos

El procesamiento integral genera una cadena de valor ramificada. A continuación se presenta la taxonomía completa de salidas del proceso.



 Según la OIV (2022), la industria vitivinícola mundial genera aprox. 20–25 millones de toneladas/año de subproductos susceptibles de valorización.

Balance de Masa Global: Base 1.000 kg de Uva Procesada

El balance de masa se plantea sobre **1.000 kg de uva entera** como base de cálculo, aplicando factores de rendimiento promedio de la literatura técnica (Beres et al., 2017; Fontana et al., 2020).

Fracción / Corriente	Masa entrada (kg)	Masa salida (kg)	Rendimiento (%)	Producto principal
Uva entera (base)	1.000	—	100	—
Mosto / Zumo	750	720	96,0	Vino / jugo
Orujo (piel + semilla)	180	175	97,2	Aceite, polifenoles
Raspón	40	38	95,0	Compost, taninos
Lías (borras)	30	28	93,3	Tartrato Ca, etanol
Aguas residuales	—	850	—	Biogás (DAA)
Pérdidas (evap., purgas)	—	17	1,7	—

❏ DAA = Digestión Anaerobia en Alta carga. El balance hídrico incluye agua de proceso añadida en lavado y enfriamiento.

Ejemplo de Cálculo: Balance de Masa Detallado — Extracción de Aceite de Semilla

Datos de entrada (base 1.000 kg uva)

Parámetro	Valor
Masa de orujo húmedo	175 kg
Humedad del orujo	62 %
Masa de orujo seco	66,5 kg
Fracción semilla en orujo seco	38 %
Masa de semillas	25,3 kg
Contenido lípido en semilla (b.s.)	14 %
Aceite crudo teórico	3,54 kg
Eficiencia extracción (prensado frío)	72 %
Aceite obtenido	2,55 kg

Ecuaciones clave

msemilla = morujo seco × fsemilla

25,3 kg = 66,5 × 0,38

maceite teórico = msemilla × Clípido

3,54 kg = 25,3 × 0,14

maceite real = mteórico × ηext

2,55 kg = 3,54 × 0,72

Rendimiento global aceite: **0,255 % sobre uva fresca**

Escala industrial (10.000 t/año): **≈ 25,5 t aceite/año**

Balance de Energía: Consumos y Generación por Etapa

El balance energético integra consumos térmicos, eléctricos y el potencial de generación de biogás mediante digestión anaerobia. Referencia: Hospido et al. (2005), Neto et al. (2021).

Operación unitaria	Energía eléctrica (kWh/t uva)	Energía térmica (MJ/t uva)	Observaciones
Recepción y despalillado	3,5	—	Motor 7,5 kW, 2 h/t
Estrujado / prensado	8,2	—	Prensa neumática 30 kW
Fermentación (control T°)	12,0	—	Refrigeración a 18–22 °C
Destilación / rectificación	4,5	620	Columna a vapor directo
Secado de orujo	5,0	850	Secadero rotativo 90 °C
Extracción polifenoles (ASE)	18,0	180	Solvente + calor moderado
Digestión anaerobia (DAA)	2,0	—	Genera 35 m³ CH₄/t DQO
TOTAL CONSUMO	53,2	1.650	—
Generación biogás (eléc.)	-22,0	-310	Motor cogeneración $\eta=35\%$
Balance neto	31,2	1.340	Déficit cubierto por red

✔ La cogeneración con biogás puede cubrir hasta el 41 % de la demanda eléctrica de la planta, reduciendo significativamente el costo energético operativo.

Análisis Económico: CAPEX de la Biorrefinería

Estimación de inversión de capital para una planta de procesamiento integral de **10.000 t/año de uva**. Costos base en dólares US\$ (año 2023, índice CEPCI 800). Metodología: factorial de Lang (f=4,5 para planta fluido-sólido).

Equipo principal	Costo equipo (US\$)	% del total
Línea despalillado/prensado	380.000	12,1
Tanques fermentación (acero inox.)	520.000	16,6
Columna destilación	290.000	9,2
Secadero rotativo orujo	210.000	6,7
Extractor polifenoles (ASE/CO ₂ SC)	480.000	15,3
Digestor anaerobio (UASB)	350.000	11,1
Motor cogeneración 250 kWe	180.000	5,7
Utilidades, servicios, civil	730.000	23,3
TOTAL CAPEX estimado	3.140.000	100

\$3,14M

CAPEX Total

Inversión total estimada planta 10.000 t/año

\$314

CAPEX específico

US\$ por tonelada de uva procesada anualmente

4,5

Factor de Lang

Multiplicador instalación (fluido-sólido mixto)

Análisis Económico: OPEX y Rentabilidad

Costos operativos anuales para la misma planta base (10.000 t/año). Los ingresos se estiman a partir de precios de mercado 2023 para cada corriente de producto (Shahidi & Ambigaipalan, 2015; ICEX, 2023).

Desglose OPEX anual (US\$/año)

Partida	US\$/año
Materias primas y suministros	420.000
Energía eléctrica (neta)	185.000
Energía térmica (vapor/gas)	210.000
Mano de obra (12 operarios)	360.000
Mantenimiento (3 % CAPEX)	94.200
Tratamiento de efluentes	65.000
Seguros y administración	80.000
Depreciación (15 años lineal)	209.300
OPEX TOTAL	1.623.500

Ingresos estimados (US\$/año)

Producto	US\$/kg	US\$/año
Vino a granel	0,85	612.000
Aceite semilla de uva	8,50	216.750
Extracto polifenoles (OPC)	45,00	540.000
Tartrato de calcio	3,20	89.600
Biogás / electricidad	—	132.000
Harina de orujo (pienso)	0,35	28.875
INGRESO TOTAL	—	1.619.225

⚠ El margen neto antes de impuestos es prácticamente en equilibrio en el primer escenario. La rentabilidad óptima requiere maximizar la fracción de extractos polifenólicos de alta pureza.

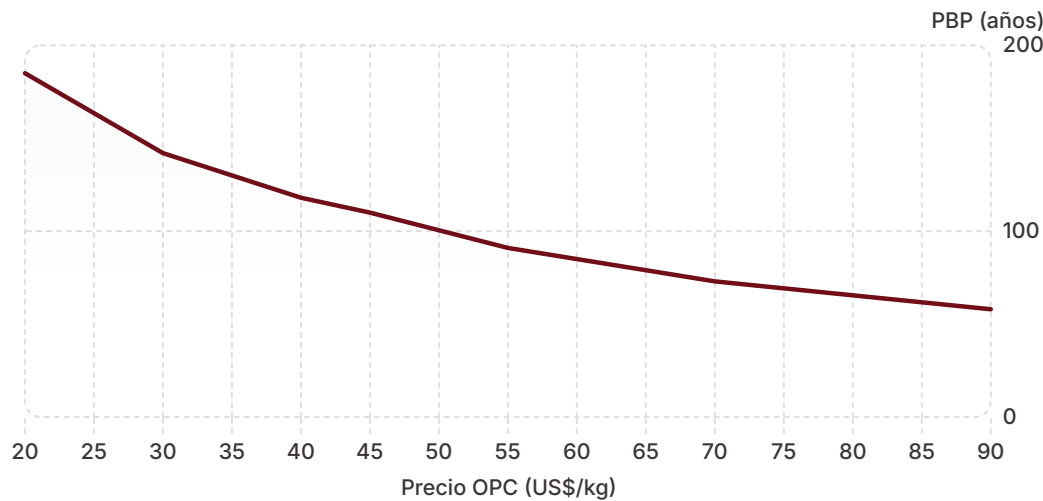
Ejemplo de Cálculo: Período de Retorno (PBP) y VAN

Parámetros del análisis financiero

CAPEX total	US\$ 3.140.000
OPEX anual	US\$ 1.623.500
Ingreso bruto anual	US\$ 1.619.225
Margen operativo bruto	US\$ -4.275 (año base)
Escenario optimizado (+OPC)	US\$ +285.000/año
Tasa de descuento (WACC)	8 %
Horizonte evaluación	15 años
VAN (escenario optimizado)	US\$ +1.242.000
TIR	11,4 %
PBP simple	11,0 años

i El escenario optimizado asume incrementar la producción de extractos OPC al 60 % de la fracción piel, con precio de venta de US\$ 45/kg (grado alimentario).

Sensibilidad: PBP vs. precio extracto polifenólico



El PBP es altamente sensible al precio de los extractos OPC. A US\$ 90/kg (grado cosmético), el retorno se reduce a menos de 6 años.

Productos de Alto Valor: Extractos Polifenólicos

Los polifenoles de la uva (proantocianidinas oligoméricas, OPC; resveratrol; antocianinas) constituyen la corriente de mayor valor económico de la biorrefinería. Su extracción eficiente es crítica para la viabilidad del proyecto.



Extracto de semilla (OPC)

Contenido típico: 60–70 mg GAE/g b.s. Método: extracción con etanol 70 % a 60 °C, 30 min. Precio mercado: US\$ 35–90/kg según pureza (alimentario / cosmético).



Resveratrol (trans)

Concentración en piel: 0,1–0,8 mg/g b.s. Extracción preferida: CO₂ supercrítico (40–50 °C, 300 bar). Precio: US\$ 500–1.500/kg (HPLC ≥98 %).



Antocianinas de piel (variedades tintas)

Rendimiento: 2,8–4,5 mg/g piel fresca. Aplicaciones: colorante natural E163, nutraceutica. Precio: US\$ 120–350/kg (extracto estandarizado).



Aceite de semilla de uva

Composición: 68–78 % ácido linoleico (Ω -6). Extracción por prensado en frío o hexano. Precio: US\$ 6–12/kg (prensado frío, calidad cosmética).

Caso de Estudio 1: Planta Biorrefinería Vitivinícola — Mendoza, Argentina



Fuente: Fontana et al. (2020), Journal of Cleaner Production, Vol. 272.

Descripción del proyecto

Planta integrada a bodega existente. Capacidad: **8.500 t/año de orujo húmedo**. Inversión total: **US\$ 2,8M**. Productos generados: aceite de semilla (prensado frío), extracto polifenólico, tartrato de calcio, biogás.

Indicador	Resultado
Producción aceite	195 t/año
Extracto polifenólico	42 t/año (pureza 40%)
Tartrato de calcio	68 t/año
Energía biogás generada	1,8 GWh/año
Ingresos totales	US\$ 1,95M/año
PBP obtenido	9,2 años
Reducción DQO efluente	87 %

✅ El proyecto demostró viabilidad técnica y económica, con un PBP de 9,2 años y cumplimiento de normativa ambiental local (Ley 5961 Mendoza).

Caso de Estudio 2: Extracción Supercrítica de Resveratrol — Proyecto Piloto, España

Estudio de viabilidad para extracción con CO₂ supercrítico (SC-CO₂) a escala piloto (500 kg/día de orujo seco). Referencia: García-Marino et al. (2018), *Food Chemistry*, Vol. 264.

Condiciones de operación

Temperatura: 45 °C | Presión: 280–320 bar | Caudal CO₂: 12 kg/h | Co-solvente: EtOH 5 % (modificador). Tiempo de extracción: 90 min/ciclo. Pureza obtenida de resveratrol: 62–78 % (b.s.).

Rendimientos y producción

Rendimiento resveratrol: 0,38 mg/g orujo seco. Producción anual piloto: aprox. 57 kg resveratrol/año. Precio de venta estimado: US\$ 800/kg. Ingreso anual bruto: **US\$ 45.600**.

CAPEX / OPEX piloto

CAPEX equipo SC-CO₂ (500 L): US\$ 680.000. OPEX energético: 85 kWh/kg extracto. Costo CO₂ recuperado: US\$ 0,12/kg. Margen neto estimado: US\$ –18.000/año (escala piloto; positivo a escala de 5.000 kg/día).

Lecciones aprendidas

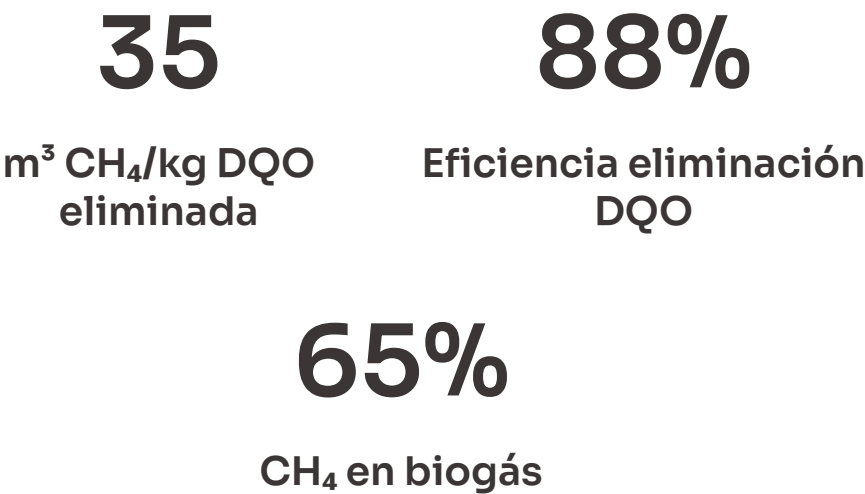
La escala mínima rentable para SC-CO₂ es ≥ 2.000 kg/día de materia prima. El secado previo del orujo (≤ 10 % humedad) es condición indispensable para la eficiencia extractiva.

Proceso de Digestión Anaerobia de Efluentes Vitivinícolas

Caracterización del efluente

Parámetro	Valor típico
DQO total	3.500–18.000 mg/L
DBO ₅	1.800–9.000 mg/L
pH	3,5–5,0
SST	200–1.200 mg/L
Polifenoles totales	150–800 mg/L
Volumen generado	1,8–3,5 m ³ /t uva

Producción de biogás (UASB)



A 10.000 t/año de uva procesada: generación estimada de ≈ **4.900 GJ/año** en poder calorífico inferior del biogás.
Cogeneración a η=35 % eléctrico: ≈ **477 MWh/año**.

Ejemplo de Cálculo: Dimensionamiento del Digestor UASB

Datos de diseño

Caudal efluente	$Q = 80 \text{ m}^3/\text{día}$
DQO entrada	$S_0 = 8.000 \text{ mg/L}$
DQO salida objetivo	$S_e = 960 \text{ mg/L}$ (88 % remoción)
Carga orgánica volumétrica (COV)	$COV = 8 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{día}$
Temperatura operación	$T = 35 \text{ °C}$ (mesofílico)
TRH objetivo	$TRH = 1,0 \text{ día}$

Cálculo del volumen del reactor

Carga orgánica diaria:

$DQO_{\text{día}} = Q \times S_0 = 80 \text{ m}^3/\text{día} \times 8 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{640 \text{ kg DQO/día}}$

Volumen reactor UASB:

$V = DQO_{\text{día}} / COV = 640 / 8 = \mathbf{80 \text{ m}^3}$

Verificación TRH:

$TRH = V / Q = 80 / 80 = \mathbf{1,0 \text{ día}}$ ✓

Producción de biogás

DQO eliminada:

$\Delta S = (S_0 - S_e) \times Q = (8,0 - 0,96) \times 80 = \mathbf{563 \text{ kg DQO/día}}$

Volumen CH₄ producido:

$V_{CH_4} = \Delta S \times 0,35 \text{ m}^3/\text{kg} = \mathbf{197 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}}$

Biogás total (65 % CH₄):

$V_{\text{biogás}} = 197 / 0,65 = \mathbf{303 \text{ m}^3 \text{ biogás/día}}$

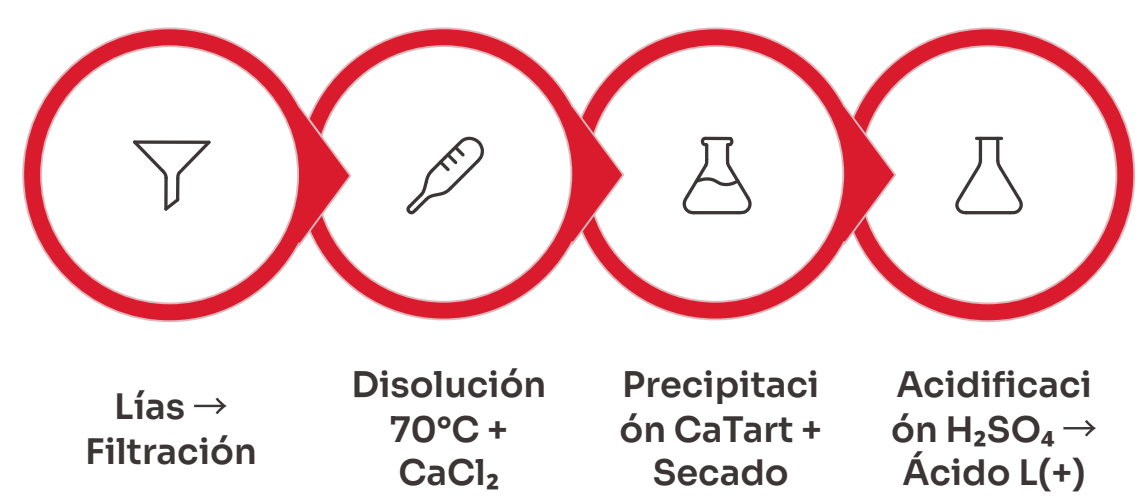
Potencia eléctrica (cogeneración $\eta=35\%$):

$P = (197 \times 35,8 \text{ MJ/m}^3 \times 0,35) / 86.400 \text{ s} = \mathbf{28,6 \text{ kWe}}$

✓ Ahorro energético anual estimado: **US\$ 36.000/año** (precio electricidad US\$ 0,14/kWh)

Tartrato de Calcio y Ácido Tartárico: Recuperación desde Lías

Proceso de recuperación



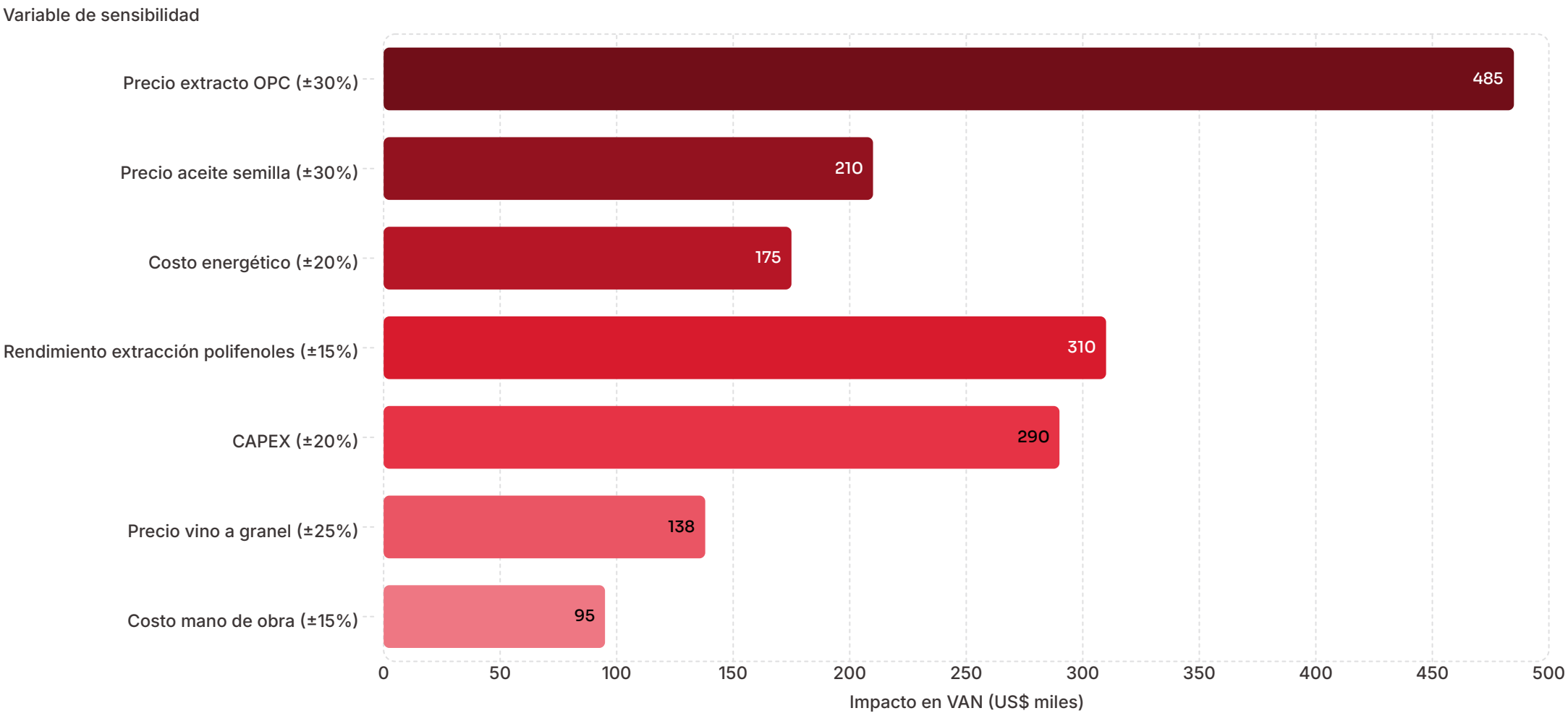
Economía de la recuperación

Parámetro	Valor
Lías generadas (base 1.000 t uva)	28 t/año
Tartrato de calcio obtenido	3,9 t/año
Precio tartrato de calcio	US\$ 3,00–3,50/kg
Ingreso bruto tartrato	US\$ 11.700–13.650
Ac. tartárico equivalente	2,5 t/año (rendimiento 64 %)
Precio ác. tartárico alim.	US\$ 7,50–9,00/kg
Ingreso bruto ác. tartárico	US\$ 18.750–22.500

i Europa es el mayor mercado de ácido tartárico (usos: vino, alimentos, farmacia). La UE reconoce el origen natural como diferenciador de precio frente al sintético.

Análisis de Sensibilidad CAPEX/OPEX y Drivers de Rentabilidad

Los siguientes factores son los más determinantes en la variabilidad del resultado económico de la biorrefinería. El análisis de tornado muestra el impacto relativo de cada variable sobre el VAN del proyecto.



El precio y el rendimiento de extracción de polifenoles OPC son los drivers dominantes. Una estrategia de **upgrading hacia grados cosméticos y farmacéuticos** (US\$ 90–150/kg) puede mejorar el VAN en más del 60 %.

Huella Ambiental y ACV Simplificado



Emisiones de GEI

Escenario sin biorrefinería: 12,8 kg CO₂eq/hl vino. Con biorrefinería integral (biogás + evitar vertido): **7,3 kg CO₂eq/hl**. Reducción: **43 %**. (Hospido et al., 2005; Neto et al., 2021)



Gestión hídrica

Reutilización del agua de proceso tras tratamiento: hasta **60 % de retorno**. Reducción de vertido a red: de 3,2 m³/t uva a 1,3 m³/t uva.



Valorización de residuos sólidos

Tasa de valorización global: **94,5 %** en masa. Solo el 5,5 % va a vertedero (cenizas de caldera y rechazos de filtración).



Marco regulatorio

Cumplimiento Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), Reglamento CE 606/2009 (prácticas enológicas) y Directiva 2018/2001/UE (energías renovables).



Comparativa de Tecnologías de Extracción

La elección de la tecnología de extracción determina la pureza, el rendimiento y el perfil de costo. La tabla compara las opciones más relevantes para polifenoles y aceite de semilla.

Tecnología	Rendto. relativo	Pureza producto	CAPEX (US\$)	OPEX (US\$/kg)	Solventes	Escala mín.
Prensado en frío	Bajo (70–75%)	Media	150.000	0,45	Ninguno	500 kg/día
Extracción Solvente (hexano)	Alto (95%)	Media-baja	280.000	0,82	Hexano	1.000 kg/día
Etanol 70% (maceración)	Medio (80%)	Media-alta	220.000	1,10	EtOH	500 kg/día
Ultrasonidos (UAE)	Medio-alto (85%)	Alta	380.000	1,35	EtOH/agua	200 kg/día
Microondas (MAE)	Medio-alto (83%)	Alta	350.000	1,20	EtOH/agua	200 kg/día
CO ₂ Supercrítico (SC-CO ₂)	Alto (88%)	Muy alta	680.000	2,80	CO ₂ +EtOH	2.000 kg/día
Enzimática asistida	Muy alto (92%)	Muy alta	420.000	3,50	Acuoso	300 kg/día

❑ La selección final debe equilibrar CAPEX, escala disponible y requisito de pureza para el mercado destino (alimentario vs. cosmético vs. farmacéutico).

Bibliografía y Referencias Técnicas

Balances de masa y energía

- Beres, C. et al. (2017). *Towards integral utilization of grape pomace from winemaking process: A review*. Waste Management, 68, 581–594.
- Hospido, A. et al. (2005). *Environmental evaluation of winemaking activities*. Int. J. LCA, 10(6), 381–388.
- Neto, B. et al. (2021). *Life Cycle Assessment of wine production*. Journal of Cleaner Production, 293, 126083.

Extracción y valorización

- García-Marino, M. et al. (2018). *Supercritical CO₂ extraction of resveratrol from grape by-products*. Food Chemistry, 264, 1–9.
- Fontana, A.R. et al. (2020). *Biorefinery approach for grape pomace valorization*. Journal of Cleaner Production, 272, 122586.
- Shahidi, F. & Ambigaipalan, P. (2015). *Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices*. Journal of Functional Foods, 18, 820–897.

Economía de proceso y diseño

- Turton, R. et al. (2018). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*. 5ª ed. Prentice Hall.
- Peters, M.S. & Timmerhaus, K.D. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5ª ed. McGraw-Hill.
- OIV (2022). *World Vitiviniculture Situation Report*. Organisation Internationale de la Vigne et du Vin.

Normativa y mercado

- Directiva 2018/2001/UE. *Fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. Parlamento Europeo.
- Reglamento (CE) 606/2009. *Normas de aplicación del Reglamento (CE) nº 479/2008 en lo relativo a las categorías de productos vitivinícolas*.
- ICEX España (2023). *El mercado de ingredientes funcionales y extractos de plantas en la UE*. Informes de mercado.