

Biorrefinería de la Fresa

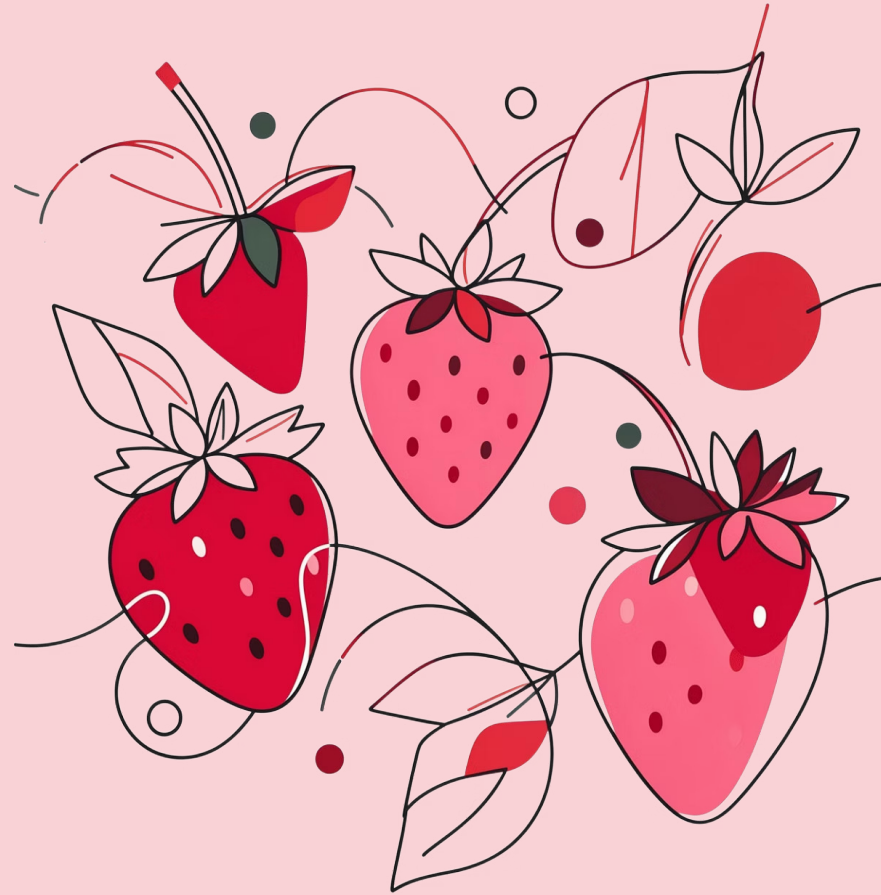
Valorización integral de *Fragaria* × *ananassa*: productos, subproductos, balances de masa y energía, y análisis económico

Presentación técnica orientada a ingenieros de procesos industriales. Aborda la transformación completa de la fresa en una cascada de productos de alto valor añadido, minimizando residuos y maximizando la eficiencia económica y energética del proceso.

BIORREFINERÍA

INGENIERÍA DE PROCESOS

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS



Agenda

01

Contexto y materia prima

Composición de la fresa y flujos de entrada al sistema de biorrefinería.

02

Mapa de productos y subproductos

Árbol de valorización: zumo, pulpa, pectinas, antocianinas, semillas y gases.

03

Balances de masa y energía

Cálculos detallados por línea de proceso con ejemplos numéricos.

04

Análisis económico CAPEX / OPEX

Estimación de inversión, costes operativos y análisis de rentabilidad.

05

Casos de estudio y bibliografía

Plantas industriales de referencia y fuentes técnico-científicas.

Composición de la Fresa y Materia Prima de Entrada

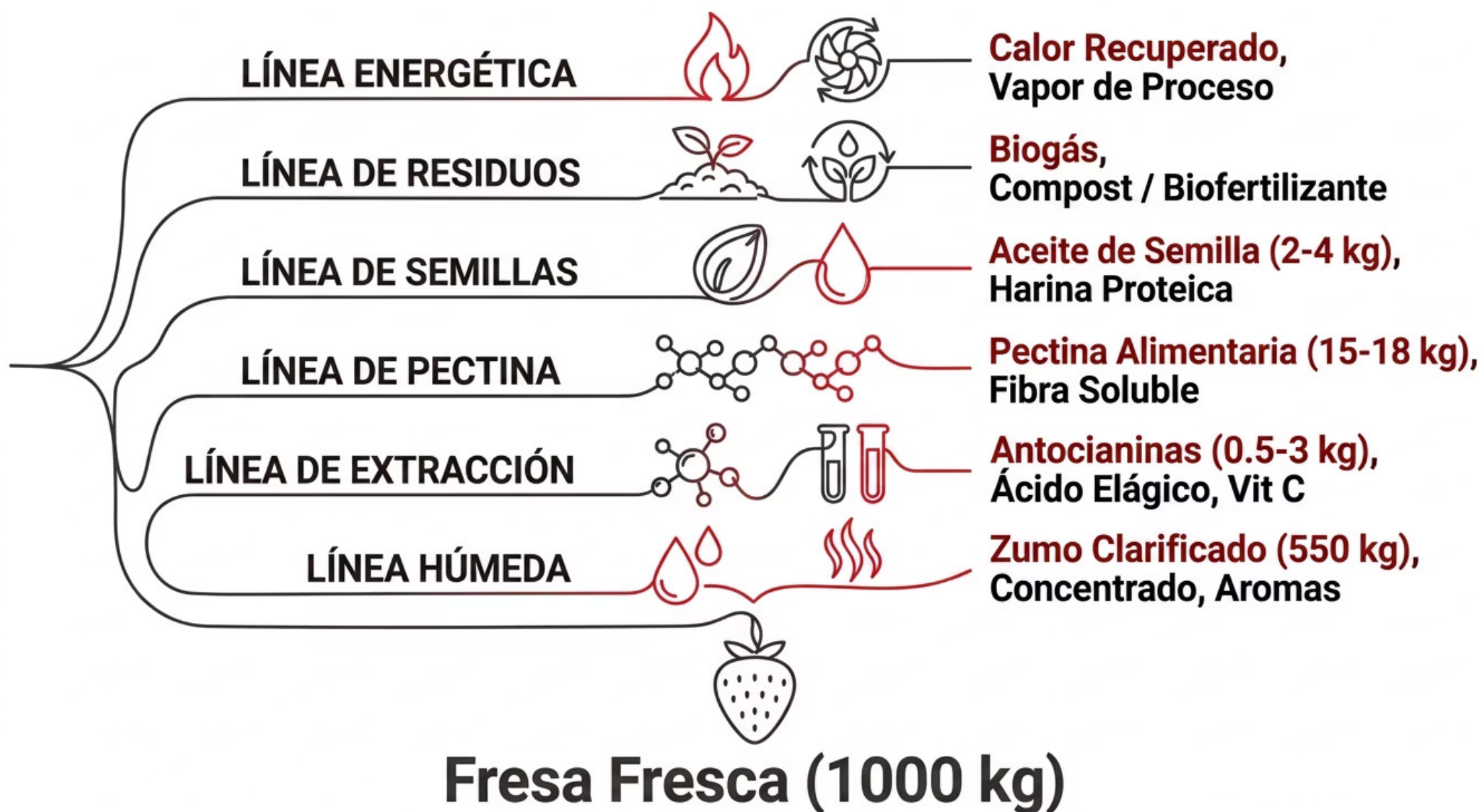
La fresa (*Fragaria × ananassa*) presenta una composición rica en compuestos funcionales que justifican su tratamiento como materia prima multiproducto. En una biorrefinería de escala industrial se consideran tanto fruta fresca de primera categoría como residuos del sector agroalimentario (recortes, fruta rechazada, bagazo).

Componente	% Peso fresco	% Peso seco	Valor de referencia
Agua	90,0 – 91,5	—	Base del solvente proceso
Carbohidratos totales	7,0 – 8,5	72 – 80	Fuente de azúcares fermentables
Fibra dietética (pectina)	1,8 – 2,2	18 – 22	Extracción industrial de pectina
Proteínas	0,6 – 0,9	6 – 9	Nutrición animal / fertilizante
Lípidos (aceite de semilla)	0,2 – 0,4	2 – 4	Aceite rico en ω -3 y ω -6
Antocianinas (mg/100 g fw)	15 – 65 mg	—	Pigmento funcional de alto valor
Ácido elágico (mg/100 g fw)	10 – 30 mg	—	Nutracéutico / farmacéutico
Vitamina C (mg/100 g fw)	50 – 90 mg	—	Suplemento alimenticio

 Fuentes: USDA FoodData Central (2023); Giampieri et al., *Food Chemistry* 2012; Basu et al., *J. Agric. Food Chem.* 2014.

Mapa de Productos y Subproductos de la Biorrefinería

El enfoque de biorrefinería en cascada permite aprovechar sucesivamente cada fracción de la fresa, siguiendo el principio de jerarquía de valorización: **primero productos de alto valor (bioactivos), después alimentos, después materiales, y por último energía**. El diagrama siguiente ilustra las corrientes principales.



❑ El rendimiento de cada corriente depende de la variedad de fresa, madurez, condiciones de almacenamiento y tecnología de extracción empleada.

Balance de Masa: Línea Principal de Proceso

Se presenta el balance de masa para una **base de cálculo de 1.000 kg/h de fresa fresca entera** (humedad 90,5 %, materia seca 9,5 %). Los flujos se expresan en kg/h. Las pérdidas mecánicas en recepción y limpieza se estiman en el 2–3 %.

Etapas / Corrientes	Entrada (kg/h)	Salida principal (kg/h)	Residuo / Subproducto (kg/h)	Rendimiento másico (%)
Recepción y limpieza	1.000	975	25 (tierra, hojas)	97,5
Trituración / Prensado	975	Zumo: 560 · Bagazo: 395	20 (pérdidas)	97,9
Centrifugación (zumo)	560	Zumo clarif.: 532	28 (lodos)	95,0
Extracción bioactivos (bagazo)	395	Extracto: 45 · Bagazo extr.: 340	10 (pérdidas)	97,5
Extracción pectina (bagazo)	340	Pectina húmeda: 85 · Residuo: 245	10	97,1
Prensado semillas	245	Aceite: 8 · Harina: 220	17	93,1
Digestión anaerobia (residuo)	220	Biogás: ~35 Nm³/h · Digestato: 180	5	97,7

✔ **Balance global:** De 1.000 kg/h de materia prima, se recupera en productos comercializables el equivalente a ~97,5 % en masa (incluyendo digestato como biofertilizante). Las pérdidas irrecuperables son inferiores al 2,5 %.

Balance de Energía: Consumos y Recuperación

El balance energético contempla todos los equipos de la línea de proceso para la **base de cálculo de 1.000 kg/h**. La energía de entrada incluye electricidad, vapor de calentamiento y la energía recuperada del biogás generado en la digestión anaerobia.

Equipo / Subsistema	Consumo (kW)	Tipo
Triturador / Prensa de banda	22	Eléctrico
Centrifugadora decantadora	18	Eléctrico
Intercambiador de calor (zumo)	35	Térmico
Evaporador de múltiple efecto	85	Térmico (vapor)
Extractor sólido-líquido	12	Eléctrico
Secador spray (pectina)	55	Térmico
Prensa expulsora (semillas)	8	Eléctrico
Sistema de frío (almacén)	30	Eléctrico
Agitadores, bombas, auxiliares	15	Eléctrico
TOTAL CONSUMO	280	—
Recuperación biogás (35 Nm³/h × 6,5 kWh/Nm³ × η=0,38)	-86	Eléctrico recuperado
Recuperación calor (condensados evaporador)	-32	Térmico recuperado
CONSUMO NETO	162	—

Indicadores Energéticos Clave

0,162 kWh/kg

Consumo neto específico por kg de fresa procesada

30,7 %

Fracción de energía total recuperada internamente

35 Nm³/h

Producción de biogás (CH₄ ~60%) en digestión anaerobia

i Referencia: Evaporador de triple efecto reduce consumo térmico un 60% vs. evaporador simple (Perry's Chemical Engineers' Handbook, 9ª ed.).

Ejemplo de Cálculo: Extracción de Antocianinas

Se detalla a continuación el dimensionamiento del tren de extracción de antocianinas a partir del bagazo de fresa. Las antocianinas son el compuesto de mayor valor unitario de la biorrefinería (precio de mercado: **\$800–\$2.500 USD/kg** según pureza).

Datos de entrada (base de cálculo)

- Flujo de bagazo: **395 kg/h** (humedad 72 %)
- Contenido antocianinas en bagazo: **280 mg/kg peso fresco**
- Solvente: etanol 70 % v/v, relación S/F = 5 L/kg
- Temperatura extracción: 40 °C, tiempo: 30 min
- Rendimiento de extracción (η_{ext}): **82 %**
- Rendimiento purificación (cromatografía): **65 %**

Cálculo paso a paso

1. Antocianinas totales en bagazo: $395 \times 0,280 \text{ g/kg} = \mathbf{110,6 \text{ g/h}}$
2. Antocianinas extraídas: $110,6 \times 0,82 = \mathbf{90,7 \text{ g/h}}$
3. Antocianinas purificadas: $90,7 \times 0,65 = \mathbf{58,9 \text{ g/h} \approx 0,059 \text{ kg/h}}$
4. Producción anual (8.000 h): $0,059 \times 8.000 = \mathbf{472 \text{ kg/año}}$
5. Ingreso estimado: $472 \times \$1.200 \text{ USD/kg} = \mathbf{\$566.400 \text{ USD/año}}$

Solvente de extracción requerido

- Volumen solvente: $395 \times 5 \text{ L/kg} = \mathbf{1.975 \text{ L/h}}$
- Recuperación solvente (destilación): $\eta_{rec} = 92 \%$
- Solvente de reposición: $1.975 \times 0,08 = \mathbf{158 \text{ L/h}}$
- Coste solvente reposición: $158 \times \$0,65 \text{ USD/L} = \mathbf{\$102,7 \text{ USD/h}}$

Consumo energético de la etapa

- Calor extracción ($\Delta T = 20 \text{ °C}$): $Q = m' \times C_p \times \Delta T = 1.975 \times 3,8 \times 20 / 3.600 = \mathbf{41,8 \text{ kW}}$
- Destilación recuperación solvente: **28 kW**
- Total etapa antocianinas: **~70 kW**

✓ Margen bruto de la línea antocianinas: **\$566.400 – \$106.800 (OPEX solvente) = \$459.600 USD/año**

Análisis Económico: CAPEX de la Planta

El CAPEX (Capital Expenditure) se estima mediante el método de Lang modificado aplicado a una planta de capacidad **8.000 t/año de fresa fresca** (equivalente a ~1.000 kg/h en régimen continuo durante 8.000 h/año). Todos los valores en **USD (dólares estadounidenses)**.

Partida de inversión	Coste equipo (USD)	Factor instalación	Coste instalado (USD)
Línea recepción, limpieza y trituración	\$180.000	2,5	\$450.000
Prensa de banda + centrifugadora	\$220.000	2,5	\$550.000
Evaporador triple efecto (concentrado zumo)	\$380.000	2,8	\$1.064.000
Extractor sólido-líquido (antocianinas)	\$150.000	2,5	\$375.000
Cromatografía / ultrafiltración (purificación)	\$320.000	3,0	\$960.000
Reactor extracción pectina (ácido cítrico)	\$140.000	2,5	\$350.000
Secador spray (pectina y extractos)	\$260.000	2,8	\$728.000
Prensa expulsora + desgomado (aceite semilla)	\$95.000	2,5	\$237.500
Digestor anaerobio (biogás)	\$210.000	2,8	\$588.000
Sistema de frío y almacenamiento	\$180.000	2,0	\$360.000
Instrumentación, control y SCADA	\$200.000	2,0	\$400.000
Instalaciones civiles y obra	—	—	\$650.000
TOTAL CAPEX	\$2.335.000	—	\$6.712.500

❑ Factor de Lang global resultante: **2,87**. Se aplica una contingencia del 15 % sobre equipos → CAPEX total con contingencia: **~\$7.720.000 USD**. Fuente metodológica: Towler & Sinnott, *Chemical Engineering Design*, 3ª ed.

Análisis Económico: OPEX y Rentabilidad

OPEX Anual Estimado (8.000 h/año)

Partida operativa	USD/año
Materia prima (fresa fresca, \$0,18/kg)	\$1.440.000
Energía eléctrica (162 kW × 8.000 h × \$0,09/kWh)	\$116.640
Vapor / agua de proceso	\$48.000
Solventes y reactivos (ácido cítrico, etanol)	\$185.000
Mano de obra (12 operarios + 3 técnicos)	\$520.000
Mantenimiento (3 % CAPEX/año)	\$231.600
Seguros y gastos generales (1,5 %)	\$115.800
Amortización CAPEX (10 años, lineal)	\$772.000
TOTAL OPEX	\$3.429.040

📄 Coste unitario de producción: \$3.429.040 / 8.000 t = **\$428,6 USD/t de fresa procesada.**

Ingresos Estimados por Corrientes de Producto

Producto	Volumen (t/año)	Ingreso (USD/año)
Concentrado de zumo (65 °Brix)	480	\$1.440.000
Antocianinas purificadas	3,78	\$4.536.000
Pectina grado alimentario	120	\$1.680.000
Aceite de semilla (prensado frío)	64	\$576.000
Harina proteica (animal feed)	1.760	\$352.000
Biogás (equivalente eléctrico)	—	\$165.000
Biofertilizante (digestato)	1.440	\$144.000
TOTAL INGRESOS	—	\$8.893.000

\$5.46M

EBITDA Anual

Ingresos menos OPEX sin amortización

1,4

Años payback

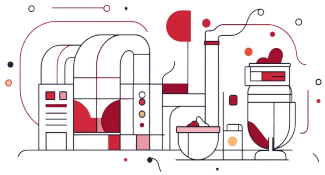
Retorno de inversión sobre CAPEX total

61,4%

Margen EBITDA

Sobre ingresos totales brutos

Casos de Estudio: Plantas de Referencia



Caso 1 — Huelva (España)

Operator: Consorcio cooperativas fresas Huelva · **Capacidad:** 12.000 t/año · **CAPEX:** ~\$9,8 M USD. Planta pionera en extracción de antocianinas y pectina para mercado europeo. Cofinanciada por Fondo FEDER (UE). Rendimiento antocianinas: 68 mg/100 g fw. Retorno de inversión: 18 meses.

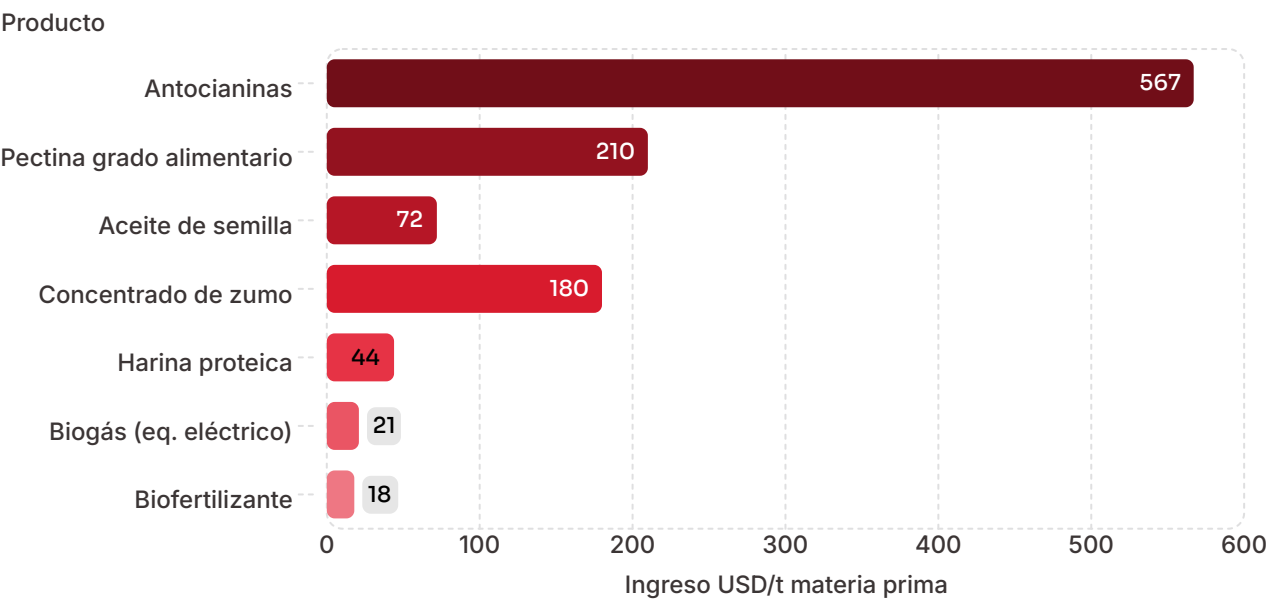
Caso 2 — Watsonville, CA (EE. UU.)

Operator: Driscoll's Innovation Center · **Capacidad:** 5.000 t/año de residuos postproceso · **CAPEX:** ~\$4,2 M USD. Foco en extracción de ácido elágico y aceite de semilla prensado en frío. Precio realizado aceite: \$9 USD/kg. OPEX específico: \$385 USD/t. Modelo piloto escalado a partir de resultados de UC Davis.

Caso 3 — Bassa Padana (Italia)

Operator: Consorzio Fragola DOP · **Capacidad:** 8.500 t/año · **CAPEX:** ~\$7,1 M USD. Integración completa con digestión anaerobia: biogás cubre el 38 % de la demanda energética de planta. Producción biofertilizante: 2.200 t/año. ISO 50001 certificada. Referencia en economía circular regional.

Comparativa de Rentabilidad por Corriente de Producto



Jerarquía de Valor

Las **antocianinas** son el producto de mayor valor por tonelada de materia prima procesada, generando más del **51 % del ingreso total** con apenas el 0,047 % en masa del producto final.

La **pectina** representa el segundo vector de valor con un mercado global proyectado de **\$1.800 M USD en 2028** (CAGR 6,5 %, Mordor Intelligence, 2023).

La energía (biogás) y el biofertilizante, aunque de bajo valor unitario, son estratégicos para reducir el OPEX neto y cumplir objetivos de economía circular y huella de carbono.

📌 **Análisis de sensibilidad:** una variación del ± 20 % en precio de antocianinas altera el EBITDA en $\pm \$907.200$ USD/año.

Línea de Extracción de Pectina: Detalle Técnico

La pectina de fresa (grado de esterificación $\geq 65\%$, pectina de alto metóxilo) se extrae del bagazo acidificado. El proceso sigue la norma FAO/OMS JECFA y cumple los requisitos E440 del Reglamento (CE) 1333/2008 para aditivos alimentarios.

Parámetros de Proceso

Variable	Valor
Solvente de extracción	HCl diluido, pH 1,5–2,0
Temperatura	80–90 °C
Tiempo de extracción	60–90 min
Relación solvente/sólido	10–15 L/kg bagazo seco
Precipitación	Etanol 96 %, relación 1:2 v/v
Rendimiento base seca	12–18 % sobre bagazo seco
Pureza (ácido galacturónico)	$\geq 65\%$
Viscosidad (2 % sol. acuosa)	200–400 mPa·s

Ejemplo de Cálculo — Pectina

1. Bagazo seco entrada: $395 \times (1 - 0,72) = \mathbf{110,6\text{ kg/h}}$
2. Pectina extraída: $110,6 \times 0,15 = \mathbf{16,6\text{ kg/h}}$ (rendimiento 15 %)
3. Pectina seca (spray drying, humedad final 8 %): $16,6 / 1,08 \times 1,00 \approx \mathbf{15,4\text{ kg/h}}$
4. Producción anual: $15,4 \times 8.000 = \mathbf{123.200\text{ kg/año} \approx 123\text{ t/año}}$
5. Precio de mercado pectina: **\$14 USD/kg** (grado alimentario, Sigma-Aldrich / mercado industrial)
6. Ingreso línea pectina: $123 \times 1.000 \times \$14 = \mathbf{\$1.722.000\text{ USD/año}}$

✔ Coste precipitante (etanol recuperado 90 %): ~\$42.000 USD/año neto. **Margen línea pectina: ~\$1.680.000 USD/año.**

Proceso de Valorización del Aceite de Semilla de Fresa



i El aceite de semilla de fresa contiene entre un **20–30 % de ácido alfa-linolénico (ω -3)** y un **35–45 % de ácido linoleico (ω -6)**, posicionándolo en el segmento cosmético y nutracéutico premium.

Parámetros de Extracción por Prensado en Frío

Parámetro	Valor
Contenido graso en semilla seca	20–26 % p/p
Temperatura de prensado	<40 °C (cold-press)
Presión aplicada	250–400 bar
Rendimiento de extracción	55–65 % del aceite total
Índice de peróxidos (calidad)	<5 mEq O ₂ /kg
Precio mercado cosmético	\$85–\$120 USD/kg
Precio mercado nutracéutico	\$45–\$80 USD/kg

Flujo de Cálculo

- Semillas en bagazo (estimado 2,5 % sobre fresa fresca): $1.000 \times 0,025 = \mathbf{25 \text{ kg/h}}$
- Semillas secas (humedad ~5 %): $25 \times 0,95 = \mathbf{23,75 \text{ kg/h}}$
- Aceite disponible: $23,75 \times 0,23 = \mathbf{5,46 \text{ kg/h}}$
- Aceite extraído (η =60 %): $5,46 \times 0,60 = \mathbf{3,28 \text{ kg/h}}$
- Producción anual: $3,28 \times 8.000 = \mathbf{26.240 \text{ kg/año}}$
- Ingreso (precio medio \$70 USD/kg): $\mathbf{\$1.836.800 \text{ USD/año}}$

Digestión Anaerobia e Integración Energética

Los residuos finales del proceso (bagazo exhausto, lodos de centrifugación, aguas residuales de proceso) se envían a un reactor de digestión anaerobia de mezcla completa (**CSTR**) para la producción de biogás y digestato fertilizante, cerrando el ciclo de materia y energía.



Parámetros del Digestor CSTR

Carga orgánica (DQO entrada)	35–42 g DQO/L·d
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	20–25 días
Temperatura operación	37 °C (mesofílico)
Producción biogás específica	0,35 Nm ³ CH ₄ /kg DQO
Contenido CH ₄ biogás	58–62 %
Eficiencia eliminación DQO	75–80 %

Balance Energético Digestión

DQO total residuos planta	~220 kg DQO/h
CH ₄ producido	220 × 0,35 × 0,60 = 46,2 Nm ³ /h
Energía bruta biogás	46,2 × 10 kWh/Nm ³ = 462 kWh/h
Energía eléctrica (η=38%)	175,6 kWh/h
Calor cogeneración (η=45%)	207,9 kWh/h
Autosuficiencia eléctrica planta	175,6 / 280 = 62,7 %

✔ Con cogeneración, la planta puede alcanzar una **autosuficiencia eléctrica superior al 60 %**, reduciendo drásticamente el OPEX energético.

Bibliografía y Referencias Técnicas

Artículos Científicos y Libros Técnicos

Giampieri, F. et al. (2012). The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. *Nutrition*, 28(1), 9–19.
<https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009>

Basu, A. et al. (2014). Strawberries decrease atherosclerotic markers. *J. Nutrition and Metabolism*. DOI:10.1155/2014/345205

Towler, G. & Sinnott, R. (2021). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, 3ª ed. Butterworth-Heinemann.

Perry, R.H. & Green, D.W. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9ª ed. McGraw-Hill.

Galanakis, C.M. (2015). Separation of functional macromolecules and micromolecules: From ultrafiltration to the border of nanofiltration. *Trends in Food Science & Technology*, 42(1), 44–63.

Normas, Bases de Datos e Informes de Mercado

USDA FoodData Central (2023). Strawberries, raw. FDC ID: 167762.
<https://fdc.nal.usda.gov>

FAO/OMS JECFA (2009). Monograph on Pectin. Compendium of Food Additive Specifications. FAO JECFA Monographs 5.

Reglamento (CE) 1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre aditivos alimentarios. E440 — Pectinas. DOUE L 354/16.

Mordor Intelligence (2023). *Pectin Market — Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2023–2028)*. Market Research Report.

Grand View Research (2023). *Anthocyanin Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2023–2030*. Report ID: GVR-4-68038-862-8.