

Biorrefinería de la Maca

Transformando Raíces en Valor Sostenible — Una guía técnica para ingenieros de procesos sobre el aprovechamiento integral de *Lepidium meyenii* Walp.



El Potencial de la Maca como Materia Prima



Descripción y Variedades

Lepidium meyenii Walp. Se cultiva principalmente en Ayacucho y Junín, Perú. Variedades: **amarilla, roja y negra**, con perfiles fitoquímicos diferenciados.

Composición Nutricional

Exportaciones crecientes hacia **EE.UU., Japón y Europa**. Usos: alimento funcional, suplemento nutricional e insumo industrial.

Carbohidratos

~60% base seca

Proteínas

~10–14%

Fibra

~8–9%

Minerales

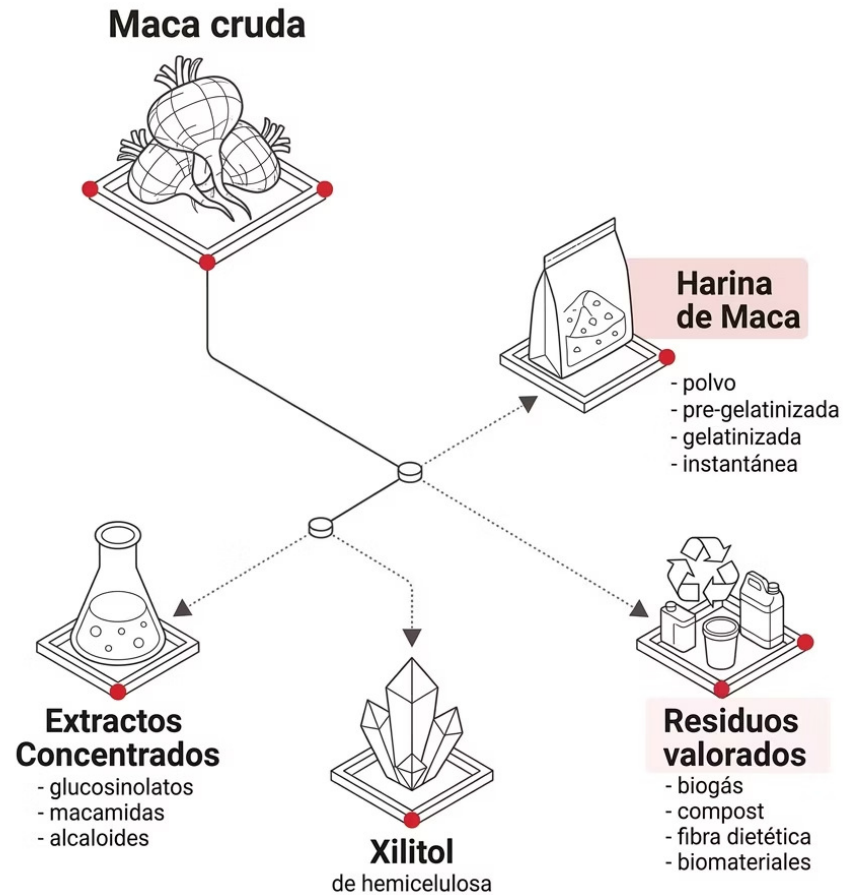
Ca, Zn, Fe

Procesos Clave en la Biorrefinería de Maca



La industrialización primaria cubre secado y molienda. La secundaria incorpora extrusión y extracción de compuestos bioactivos de alto valor. **Referencia:** Planta gelatinizada para EE.UU. con producción inicial de 12,841.7 kg/año (Camavilca, 2012).

Productos y Subproductos de Alto Valor



Productos Principales

- **Harina de Maca:** Pre-gelatinizada, gelatinizada e instantánea
- **Extractos fitoquímicos:** Glucosinolatos, macamidas, benzilglucosinolatos
- **Xilitol:** Edulcorante obtenido de la fracción hemicelulósica

Valorización de Subproductos

- **Residuos de molienda:** Biogás o compostaje
- **Pulpa post-extracción:** Fibra dietética o biomateriales
- **Aguas residuales:** Recuperación de nutrientes o biogás

Balances de Masa y Energía

Balance de Masa — Harina Gelatinizada (Base: 1,000 kg maca fresca)

Corriente	Cantidad (kg)	% Base
Maca fresca (entrada)	1,000	100%
Pérdidas limpieza/selección	50	5%
Maca seca (65%→10% hum.)	350	35%
Pérdidas gelatinización/secado	35	3.5%
Harina Gelatinizada (producto)	315	31.5%

i Rendimiento global: **31.5%** en base a maca fresca. El secado representa la mayor pérdida de masa por evaporación de agua (~650 kg de vapor/ton).

Balance de Energía — Estimaciones por Etapa

Secado

~2,500–3,000 kJ/kg
agua evaporada.
Mayor consumo
energético del
proceso.

Extrusión

~150–400 kWh/ton.
Calor + trabajo
mecánico en
gelatinización.

Molienda

~20–50 kWh/ton
según
granulometría final
deseada.

Extracción

~100–200 kWh/ton.
Calefacción de
solvente + bombeo.

Análisis Económico: CAPEX y OPEX

CAPEX — Inversión de Capital

Componente	Rango (US\$)
Secador Rotatorio	50,000 – 150,000
Extrusora Doble Tornillo	80,000 – 250,000
Molino Coloidal	20,000 – 60,000
Sistema de Extracción	100,000 – 300,000
Infraestructura y Montaje	150,000 – 500,000
TOTAL ESTIMADO	400,000 – 1,260,000

OPEX — Costos Operativos Anuales

Rubro	Rango (US\$/año)
Materia Prima (Maca Fresca)	100,000 – 300,000
Energía (Electricidad, Vapor)	50,000 – 150,000
Mano de Obra	80,000 – 200,000
Mantenimiento y Repuestos	30,000 – 80,000
TOTAL ESTIMADO	260,000 – 730,000

Referencia base: Planta de harina gelatinizada para EE.UU. requirió **US\$ 233,217.73** de inversión total (Camavilca, 2012).

Casos de Estudio y Viabilidad Económica

1

Harina Pretostada — Japón (Junín, 2006)

Estudio de factibilidad técnica y económica para procesamiento de subproductos de maca para exportación al mercado japonés. (Puris Luna & Yali Chagua, 2006).

2

Harina Gelatinizada — EE.UU. (Junín, 2012)

Inversión: US\$ 233,217.73 |
Financiamiento: 60% préstamo,
40% capital social
TIRE: 49.21% | **TIRF:** 85.43% | **VAN E:**
US\$ 170,452 | **VAN F:** US\$ 233,529
Proyecto de alta rentabilidad y
viabilidad comprobada.

3

Biorrefinería Lignocelulósica — Argentina (2019)

Escala: 15,000 ton/año | **Productos:**
Xilitol + Energía / MDF
Inversión: US\$ 32.6 – 47.6 millones |
TIR: 11.2%
Demuestra la complejidad y
rentabilidad de biorrefinerías a gran
escala. (Clauser, 2019).

Diagramas y Figuras Clave

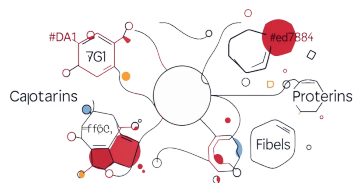


Figura 1: Composición de la Maca

Carbohidratos (~60%), proteínas (~12%), fibra (~8%), lípidos (~2%), vitaminas (C, B6), minerales y fitoquímicos bioactivos.

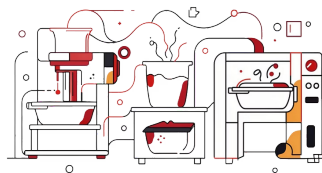


Figura 2: Gelatinización / Pre-gelatinización

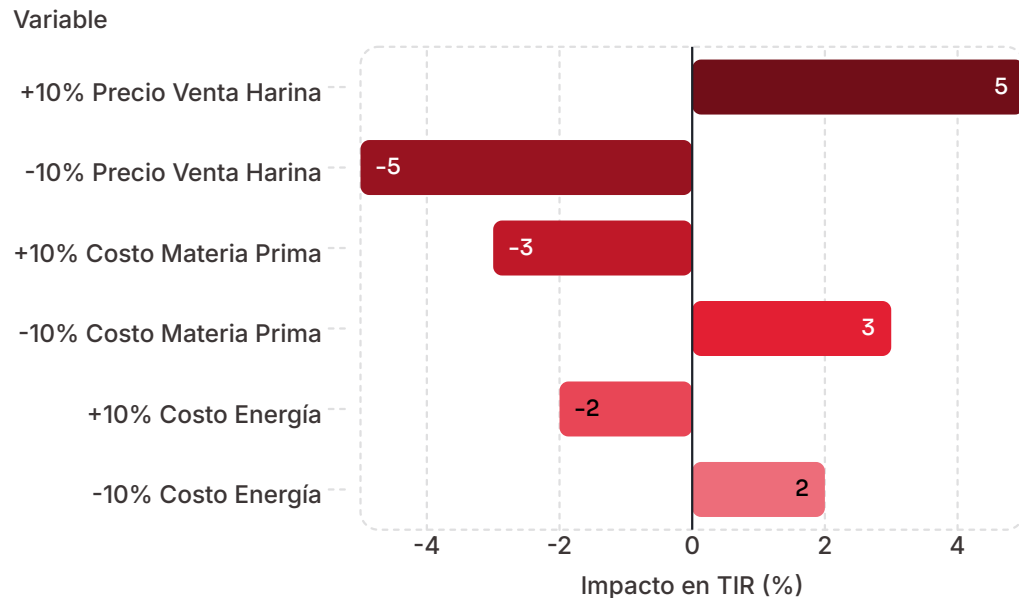
Proceso: cocción bajo presión → secado → molienda. La extrusión de doble tornillo mejora solubilidad y biodisponibilidad de nutrientes.



Figura 3: Rutas de Valorización de Subproductos

Residuos → biogás (digestión anaerobia), compost (fracción orgánica), biomateriales (fibra lignocelulósica), recuperación de nutrientes (efluentes).

Análisis de Sensibilidad



Interpretación para Ingenieros de Procesos

El precio de venta de la harina de maca es la **variable más crítica** del modelo económico. Una variación de $\pm 10\%$ en el precio de venta impacta la TIR en **± 5 puntos porcentuales**.

El costo de materia prima es el segundo factor de mayor sensibilidad ($\pm 3\%$), seguido por el costo energético ($\pm 2\%$), especialmente en las etapas de secado y extrusión.



Para proyectos nuevos, se recomienda un análisis de Monte Carlo con al menos 3 variables simultáneas para cuantificar el riesgo combinado.

Conclusiones, Próximos Pasos y Bibliografía

Conclusiones

- La maca tiene alto potencial como materia prima de biorrefinería, generando productos de **alto valor añadido**.
- Gelatinización y extracción fitoquímica son las etapas clave para maximizar ingresos.
- La viabilidad económica es sólida (TIRE ~49%), pero exige planificación rigurosa de CAPEX/OPEX.

Próximos Pasos

01

Optimización de balances

Modelado detallado por unidad operativa (Aspen Plus / ProSim).

02

Diseño P&ID

Selección de equipos y tuberías para escala piloto e industrial.

03

Simulación cinética

Modelos de extracción y gelatinización para escalar procesos.

Bibliografía

Alanya Tineo, J. P. (2018). <i>Estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta de producción de harina pre-gelatinizada de maca</i> . UNSCH.	Camavilca Ureta, B. M. & Camavilca Ureta, L. M. (2012). <i>Estudio de Factibilidad para la instalación de una planta procesadora de harina de maca gelatinizada</i> . UNCP.
Clauser, N. M. (2019). <i>Estudio técnico-económico de la biorrefinería de residuos de industrialización primaria de la madera y agroindustriales</i> . CONICET.	Puris Luna, R. R. & Yali Chagua, S. Á. (2006). <i>Estudio de Factibilidad para la instalación de una planta procesadora de harina de maca pretostada</i> . UNCP.
Gamboa Arauzo, C. M. (2015). <i>Propuesta de mejora en el proceso productivo de la harina de maca envasada</i> . USIL.	Castillo Aguirre, C. A. (2024). <i>Implementación de un planeamiento financiero para la industrialización de la maca</i> . Universidad de Lima.