



# Biorrefinería del Maíz

**Análisis técnico-económico integral: productos, balances de masa y energía, CAPEX/OPEX y casos de estudio**

Una visión completa del procesamiento industrial del maíz orientada a ingenieros especialistas en procesos industriales. Esta presentación cubre la cadena de valor completa, desde el grano hasta los productos de mayor valor añadido, incluyendo metodologías de cálculo y análisis económico.

INGENIERÍA DE PROCESOS

ANÁLISIS ECONÓMICO

CASOS DE ESTUDIO

# Agenda

01

---

## Concepto de Biorrefinería

Definición, principios y posicionamiento del maíz en la industria

02

---

## Productos y Subproductos

Mapa completo de la cadena de valor: almidón, glucosa, etanol, gluten y más

03

---

## Balances de Masa y Energía

Cuantificación de flujos, eficiencias y ejemplos de cálculo detallados

04

---

## Análisis CAPEX / OPEX

Estructura de costes de capital y operación, benchmarks industriales

05

---

## Casos de Estudio y Bibliografía

Plantas reales, resultados publicados y referencias académicas clave

# ¿Qué es una Biorrefinería de Maíz?

Una **biorrefinería de maíz** es una instalación industrial que fracciona el grano en sus componentes principales —almidón, proteínas, aceite y fibra— para transformarlos en múltiples productos de alto valor mediante procesos físicos, químicos y biotecnológicos integrados. Se basa en el principio de **cero residuos**: cada corriente generada en un proceso es materia prima del siguiente.

El maíz (*Zea mays*) es el cultivo energético más producido del mundo con más de **1.200 millones de toneladas métricas/año** (FAO, 2023), lo que lo convierte en el sustrato ideal para la industria biorrefinera a gran escala.

## Composición media del grano seco

- **Almidón:** 62–72 %
- **Proteína:** 8–11 %
- **Aceite (germen):** 3–6 %
- **Fibra (pericarpio):** 5–8 %
- **Humedad:** 12–14 %
- **Cenizas:** 1–2 %

# Mapa de Productos y Subproductos

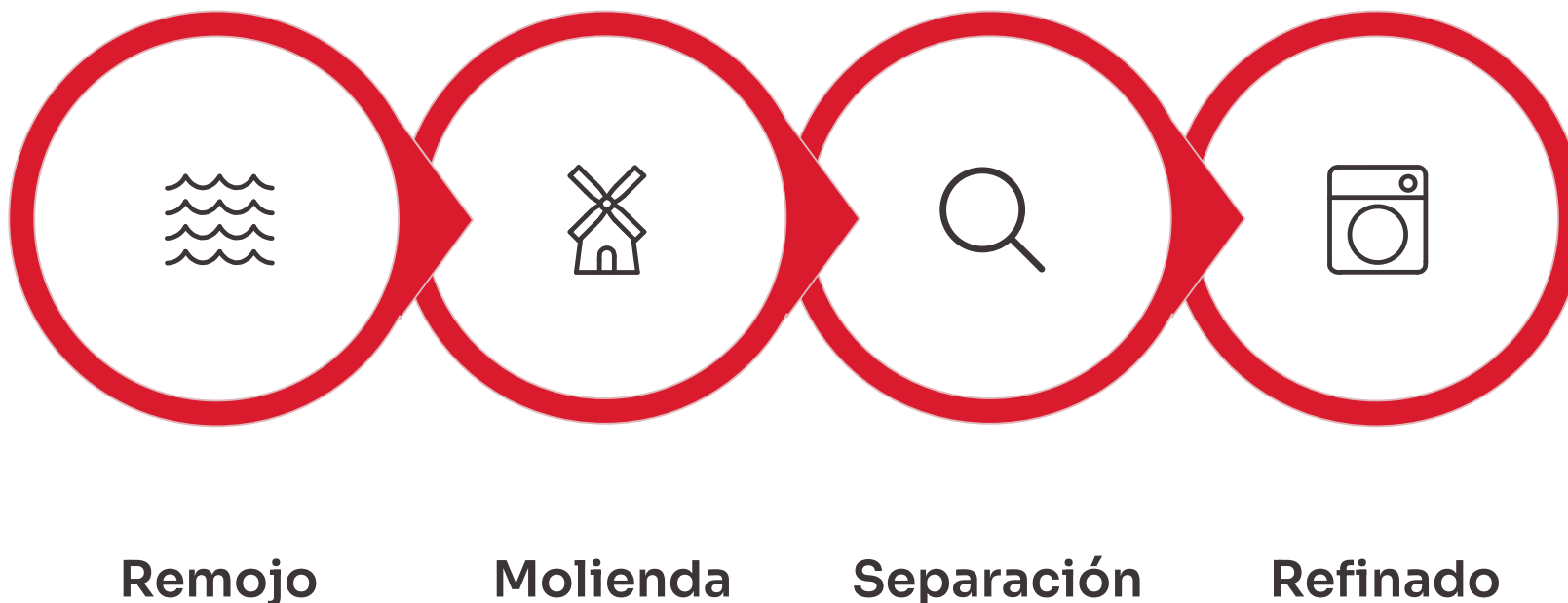
El procesamiento industrial del maíz genera una amplia cartera de productos con diferentes mercados y valores. A continuación se detallan las principales rutas de la vía húmeda (*wet milling*), que es la tecnología dominante a escala industrial.



❶ La vía seca (*dry milling*) se orienta principalmente a etanol y DDGS (Distillers Dried Grains with Solubles), con menor inversión pero menor diversificación de productos.

# Proceso de Molienda Húmeda: Flujo Principal

La molienda húmeda es el proceso central de la biorrefinería de maíz. Separa físicamente los componentes del grano mediante remojo controlado, molienda y centrifugación en cascada, maximizando la pureza de cada fracción.



El agua de remojo (*steep water*) contiene ácido láctico, minerales y proteínas solubles; se concentra y vende como **licor de maceración de maíz (CSL)**, un medio de fermentación industrial de alto valor.

# Balance de Masa: Molienda Húmeda

Base de cálculo: 1.000 kg de maíz seco (14 % humedad = 862 kg MS)

| Fracción / Producto        | Rendimiento (kg/1.000 kg maíz) | Contenido (%MS) | Componente principal | Valor ref. (€/t) |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Almidón húmedo (38% MS)    | 460–520                        | 62–72           | Amilosa/Amilopectina | 280–350          |
| Gluten meal (60% proteína) | 55–70                          | 6–8             | Zeína + glutelina    | 550–700          |
| Gluten feed (21% proteína) | 190–220                        | 22–25           | Fibra + proteína     | 140–180          |
| Aceite crudo de germen     | 30–45                          | 3–5             | Ácido linoleico      | 900–1.200        |
| Licor de maceración (CSL)  | 40–55                          | 5–6             | Proteínas + aa       | 200–280          |
| Agua evaporada / pérdidas  | ~150                           | —               | —                    | —                |

❏ **Cierre de balance:** La suma de sólidos secos recuperados  $\approx$  95–97 % de los sólidos del grano. Las pérdidas  $\leq$  3–5 % se distribuyen en aguas residuales y emisiones de secado.

# Ejemplo de Cálculo: Producción de Almidón y Etanol

## Paso 1 — Almidón disponible

Planta: 1.000 t/día de maíz (14% H<sub>2</sub>O) → **860 t MS/día**

Contenido almidón: 67% MS → **576 t almidón/día**

Eficiencia extracción húmeda: 95% → **547 t almidón recuperado/día**

---

## Paso 2 — Conversión a etanol

Sacarificación + fermentación: 1 kg glucosa → 0,511 kg EtOH  
(estequiometría Gay-Lussac)

547 t almidón × 1,111 (factor glucosa) × 0,511 ×  $\eta_{\text{ferm}}$  (0,92) = **285 t EtOH/día**

Equivalente: **360.000 L/día** ( $\rho = 0,789 \text{ kg/L}$ )

## Paso 3 — Balance energético destilación

Vapor requerido:  $\approx 3,2 \text{ kg vapor/L EtOH}$  → **1.152 t vapor/día**

Calor latente: 2.257 kJ/kg → **2.600 GJ/día  $\approx 30 \text{ MW térmicos}$**

---

## Paso 4 — Verificación rendimiento global

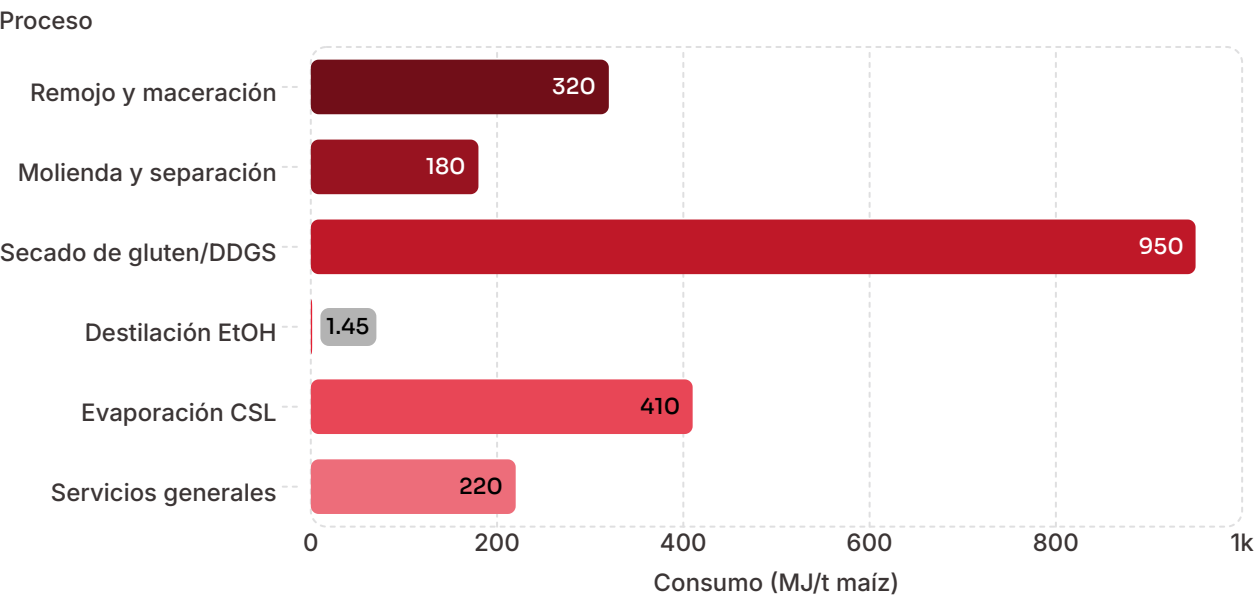
Rendimiento volumétrico: 360 L EtOH / 1.000 kg maíz = **360 L/t maíz**

Valor bibliográfico típico: 340–380 L/t ✓

✓ El resultado está dentro del rango industrial validado (Rausch & Belyea, 2006).

# Balance Energético Global de la Planta

Una biorrefinería de maíz es una gran consumidora de energía térmica y eléctrica. La integración energética mediante intercambiadores de calor y cogeneración es clave para la viabilidad económica.



## Índices energéticos clave

3.530

MJ/t maíz

Consumo total típico de energía primaria

1,6

EROEI

Ratio energía producida / energía invertida (etanol)

35%

Ahorro cogeneración

Reducción de consumo con CHP integrado

# Análisis CAPEX: Inversión de Capital

La estructura de inversión de una planta de molienda húmeda de maíz varía significativamente en función de la capacidad instalada, el nivel de automatización y la diversidad de productos. Los siguientes datos corresponden a plantas de **500–1.500 t/día** de capacidad.



### Equipos principales

Tanques de remojo, molinos, separadores centrífugos, hidrociclones, intercambiadores. **45–55% del CAPEX total.**



### Instalación y montaje

Tuberías, instrumentación, electricidad, civil y estructura. **25–30% del CAPEX.**



### Ingeniería y Comisionado

FEED, ingeniería de detalle, gestión de proyecto, arranque y pruebas. **12–18% del CAPEX.**



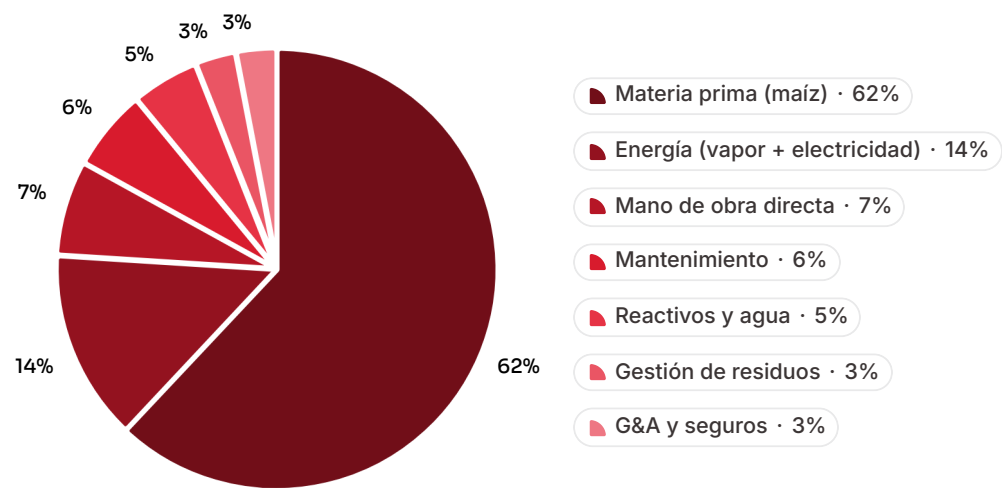
### Contingencias y capital circulante

Reserva de contingencias (10%) + capital circulante inicial (inventarios, cuentas). **8–12% del CAPEX.**

| Capacidad (t maíz/día) | CAPEX total (M€) | CAPEX específico (€/t·día) | Fuente              |
|------------------------|------------------|----------------------------|---------------------|
| 500                    | 80–110           | 160.000–220.000            | USDA ERS, 2022      |
| 1.000                  | 130–180          | 130.000–180.000            | IEA Bioenergy, 2021 |
| 2.000                  | 200–270          | 100.000–135.000            | Rausch et al., 2019 |

 La economía de escala es pronunciada: duplicar la capacidad reduce el CAPEX específico un 20–30%, siguiendo la regla de los 0,6 (*six-tenths rule*).

# Análisis OPEX: Costes Operacionales



## Referencias de coste unitario

| Partida                  | Coste ref.               |
|--------------------------|--------------------------|
| Maíz grano (UE, 2024)    | 185–220 €/t              |
| Vapor industrial         | 22–30 €/t                |
| Electricidad industrial  | 75–110 €/MWh             |
| SO <sub>2</sub> (remojo) | 180–220 €/t              |
| Agua de proceso          | 0,8–1,5 €/m <sup>3</sup> |
| Mano de obra operador    | 38–55 k€/año             |

📌 **Punto de equilibrio:** Con maíz a 200 €/t, el precio del almidón debe superar  $\approx$  290 €/t para margen operativo positivo en planta de 1.000 t/día.

# Caso de Estudio 1: Planta de Molienda Húmeda — ADM, Decatur (Illinois, EE.UU.)

## Descripción de la instalación

La planta de Archer Daniels Midland (ADM) en Decatur es una de las mayores biorrefinerías de maíz del mundo, con una capacidad de procesamiento de **~70.000 t/día de maíz**. Produce almidón, jarabes de glucosa y fructosa (JMAF-55), aceite refinado, gluten meal, gluten feed, etanol y CO<sub>2</sub> alimentario.

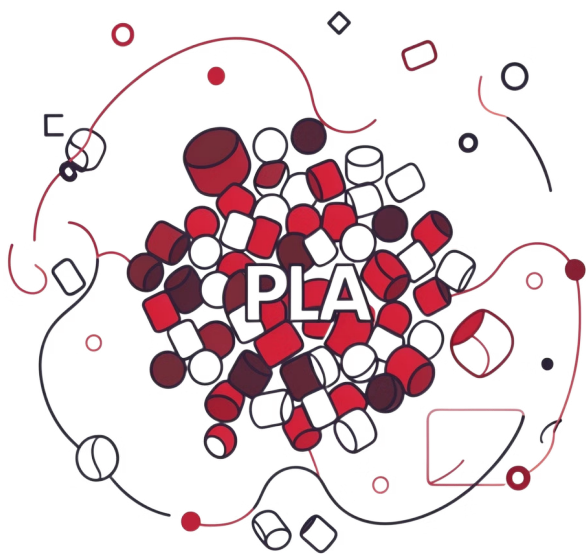
- Superficie: >400 ha de instalaciones integradas
- Empleo directo: >4.000 trabajadores
- CAPEX histórico estimado: >2.000 M\$ (múltiples expansiones)
- Cogeneración integrada: planta CHP de 350 MW

## Resultados operacionales publicados

| Indicador                           | Valor                          |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Rendimiento JMAF-55                 | ~300 kg/t maíz                 |
| Rendimiento etanol                  | ~355 L/t maíz                  |
| Eficiencia extracción almidón       | 96,2%                          |
| Consumo vapor destilación           | 3,0 kg/L EtOH                  |
| Emisiones CO <sub>2</sub> (Scope 1) | 1,8 kg CO <sub>2</sub> /L EtOH |

✓ ADM reporta una reducción del 12% en intensidad energética (2015–2023) gracias a la integración de calor y digitalización del proceso (ADM Sustainability Report, 2023).

# Caso de Estudio 2: Biorrefinería de Maíz para Ácido Láctico — NatureWorks (Blair, Nebraska)



## Concepto y diferenciación

NatureWorks produce **ácido poliláctico (PLA)**, un bioplástico de base biológica, a partir de dextrosa (glucosa) obtenida por hidrólisis enzimática del almidón de maíz. Con una capacidad de **150.000 t/año de PLA**, es la mayor planta del mundo de este tipo.

| Parámetro                 | Valor           |
|---------------------------|-----------------|
| Maíz procesado            | ~500.000 t/año  |
| Dextrosa requerida        | ~2,4 kg/kg PLA  |
| CAPEX inversión inicial   | ~750 M\$ (2002) |
| Precio PLA mercado (2024) | 1.500–2.200 €/t |
| Reducción GEI vs. PE      | 75–80%          |

La fermentación aeróbica produce ácido L-láctico que se policondensa para obtener PLA. El proceso ilustra cómo la biorrefinería puede escalar hacia productos de mayor valor añadido que el etanol o el almidón.

# Ejemplo de Cálculo: Análisis de Rentabilidad (TIR / VAN)

Planta de referencia: 1.000 t maíz/día — vía húmeda con producción de almidón, JMAF y etanol

## Hipótesis de cálculo

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Días de operación/año    | 330 días |
| Precio maíz entrada      | 200 €/t  |
| Precio almidón seco      | 310 €/t  |
| Precio JMAF-55           | 420 €/t  |
| Precio etanol (95%)      | 0,65 €/L |
| Precio gluten meal       | 620 €/t  |
| CAPEX total              | 155 M€   |
| OPEX anual               | 72 M€    |
| Vida útil planta         | 25 años  |
| Tasa de descuento (WACC) | 8%       |

## Resultados económicos

96M€

Ingresos anuales

Suma ponderada de todos los productos

24M€

EBITDA anual

Margen EBITDA: ~25%

14,2%

TIR del proyecto

Superior al WACC → proyecto viable

8,5

Años payback

Período de recuperación simple

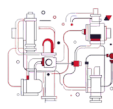
 La rentabilidad es muy sensible al precio del maíz: una variación de ±20 €/t modifica el EBITDA en  $\approx \pm 6,6$  M€/año. El análisis de sensibilidad es imprescindible.

# Estrategias de Optimización y Tendencias



## Enzimas de nueva generación

El uso de  $\alpha$ -amilasas y glucoamilasas termostables de tercera generación (Novozymes Spirizyme Ultra, DuPont Accellerase) permite reducir el tiempo de sacarificación de 72h a menos de 48h, con conversiones superiores al 98% y reducción del consumo energético de agitación en un 15%.



## Integración de Calor (Pinch Technology)

La aplicación del análisis Pinch en biorrefinerías de maíz ha demostrado reducciones del consumo de vapor del 20–30%. El calor de condensación de la destilación se recupera para el precalentamiento del agua de remojo y la concentración del CSL (Linnhoff & Hindmarsh, 1983; aplicado por PSI, 2021).



## Digitalización y Proceso 4.0

Los modelos de Machine Learning aplicados al control predictivo de la fermentación (pH, temperatura, glucosa residual) incrementan el rendimiento medio en etanol un 2–4% y reducen las batches fallidas en un 60%. Plataformas como AspenPlus Digital Twin permiten optimización en tiempo real.

# Bibliografía y Referencias Técnicas

## Referencias académicas y técnicas

**Rausch, K.D. & Belyea, R.L. (2006).** The future of coproducts from corn processing. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 128(1–3), 47–86.

**Hohmann, N. & Rendleman, C.M. (1993).** Emerging technologies in ethanol production. USDA Economic Research Service, Agriculture Information Bulletin No. 663.

**Lynd, L.R. et al. (2017).** Cellulosic ethanol: Status and innovation. *Current Opinion in Biotechnology*, 45, 202–211.

**Linnhoff, B. & Hindmarsh, E. (1983).** The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 38(5), 745–763.

**IEA Bioenergy Task 39 (2021).** Status of advanced biofuels demonstration facilities in 2021. International Energy Agency.

## Informes industriales y bases de datos

**USDA Economic Research Service (2022–2024).** Feed Grains: Yearbook Tables. Datos de producción, precios y utilización del maíz en EE.UU. Disponible en: [ers.usda.gov](https://ers.usda.gov)

**FAO (2023).** World Food and Agriculture — Statistical Yearbook 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.

**NatureWorks LLC (2023).** Ingeo Biopolymer Technical Data Sheets & Life Cycle Assessment. Blair, Nebraska.

**ADM (2023).** 2023 Sustainability Report. Archer Daniels Midland Company, Chicago.

**Green, D.W. & Perry, R.H. (Eds.) (2008).** *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8th ed. McGraw-Hill. (Secciones de evaporación, destilación y secado).

 Todas las cifras de costes y rendimientos deben validarse con datos de planta específicos. Los valores presentados son rangos industriales representativos para evaluaciones de prefactibilidad ( $\pm 30\%$ ).