

# **DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS DOSA - 2024**

**Docente: Dr. Ing. Mauricio Passeggi**  
**Departamento de Ingeniería de Reactores**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de la República**



**BIOTECNOLOGÍA  
DE PROCESOS  
PARA EL AMBIENTE**

# BIBLIOGRAFÍA

Deublein, D. and Steinhauser, A. (2011)

Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction

ISBN 978-3-527-32798-0

Wellinger, A. , Murphy, J. and Baxter, D. (2013)

The biogas handbook. Science, production and applications

ISBN 978-0-85709-498-8

California Environmental Protection Agency (2008)

Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of  
Municipal Organic Solid Waste

Bioresource Technology. Volume 299 (2020)

Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational  
parameters and their impact on process performance

# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS

## OBJETIVOS DEL APRENDIZAJE

Una vez terminado el estudio de este tema deberá ser capaz de:

1. Comprender la relevancia de la DA en el contexto de la gestión de residuos y de la soberanía energética
2. Explicar las ventajas y las limitaciones de la DA, como tecnología para la gestión y valorización de residuos.
3. Describir los procesos de digestión anaerobia, sus etapas, los principales grupos tróficos involucrados, y las condiciones físicas y químicas requeridas.
4. Caracterizar un residuo sólido en vista a su digestión anaeróbica.
5. Dimensionar de manera preliminar digestores de mezcla completa.
6. Explicar la relevancia de las principales variables de control y de operación del proceso.
7. Evaluar el desempeño de un sistema digestión anaeróbica a partir del monitoreo del proceso y de la caracterización de los productos.

**RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS:  
INDUSTRIALES,  
AGROINDUSTRIALES,  
Y DOMÉSTICOS**

# PRINCIPALES RS ORGÁNICOS GENERADOS EN URUGUAY

Aptos para valorización mediante tratamiento biológico:

Fracción Orgánica de RSU

Estiércol de Tambos

Estiércol de Feed Lots

RS de Mataderos y Frigoríficos

Purines de Cerdo

Lodos de PT de aguas cloacales

RS de Curtiembres (sin curtir)

RS de Industria Vitivinícola (orujo, borras y escobajo)

RS de la industria del aceite de oliva (alperujo)

RS de Criadero de Aves

Residuos de cultivos

Residuos de las cadenas de distribución de alimentos

# CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS

Proyecto BIOVALOR: [www.biovalor.gub.uy](http://www.biovalor.gub.uy)

Parámetro	Unidad	Frigoríficos				Bodegas				Curtiembres				Oleag_olivo	
		Sólidos aguas verdes		Sólidos aguas rojas		Escobajos		Orujo		Pelos		Virutas y recortes		Alperujo	
		Rango	Mediana	Rango	Mediana	Rango	Mediana	Rango	Mediana	Rango	Mediana	Rango	Mediana	Rango	Mediana
MS	% BH	25 - 40	28,0	15 - 80	26,0	45 - 75	73,0	40 - 60	50	25 - 40	31	40 - 50	48	25 - 35	30
pH		5 - 6,5	5,7	4,5 - 6,8	6,2	4,0 - 7,2	7,0	3,8 - 4,2	4	8,5 -				4,5 - 5,5	5
CE	dS/m	0,5 - 2,5	1,7	0,8 - 6,7	5,2	0,5 - 2,0	1,7	1,2 - 2,3	1,8	12,0	9,9			4,0 - 8,5	5,8
Dens	ton/m <sup>3</sup>	0,4 - 0,8	0,5	0,6 - 1,0	0,9	s/d	s/d			2,5 - 5,5	4,9				
C	g/kg BS	400 - 510	483,0	400 - 650	490,0	415 - 480	420,0	375 - 425	394	0,4 - 1,0	0,7			1,0 - 1,1	1
SV	% BS	85 - 97	92,0	94 - 99	97,0	91 - 93	92,0	90 - 96	95	350 -				470 -	
N <sub>k</sub>	g/kg BS	14 - 26	19,0	25 - 140	88,0	9,5 - 12,5	11,2	20,5	18,4	500	406			570	504
P	g/kg BS	0,5 - 4,5	3,2	0,5 - 5,5	2,1	2,0 - 2,3	2,2	2,4 - 3,5	2,5	70 - 90	86			94 - 98	96
K	g/kg BS	0,4 - 1,4	1,0	0,1 - 5,0	0,7	24,5 - 27,5	24,9	10 - 40	19,2	16,5 -					
										60 - 120	98			7,5 - 17	11,8
										0,35 -				1,0 - 2,0	1,4
										0,45	0,4			10 - 25	15

# ¿CÓMO SE GESTIONAN LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN URUGUAY?

En la gestión actual de estos residuos:

- Son incipientes las prácticas de minimización de la generación de residuos
- Es escaso el conocimiento de los residuos generados e insuficiente la segregación de residuos de distinta naturaleza.
- Las prácticas de tratamiento y disposición final en muchos casos no son adecuadas desde el punto de vista ambiental.
- No hay suficientes empresas especializadas en tratamiento de RSI
- El primer decreto reglamentario para la Gestión de Residuos Industriales y Agroindustriales se promulgó recién en el año 2013 (Decreto 182/013) y la Ley de Gestión Integral de Residuos es de 2019.

# DECRETO 182/013

## Actividades que abarca el decreto:

- ❖ Industria manufacturera (Clasificación Internacional Industrial Uniforme)
- ❖ Explotaciones mineras
- ❖ Fraccionamiento o almacenamiento de sustancias y productos peligrosos
- ❖ Cría intensiva de ganado vacuno y tambos
- ❖ Cría intensiva de porcinos.
- ❖ Cría intensiva de aves y avícolas en producción
- ❖ Servicios de potabilización de agua
- ❖ Tratamiento de efluentes
- ❖ Reciclado y tratamiento de residuos
- ❖ Generación, transmisión o distribución de energía eléctrica
- ❖ Servicios de telecomunicación con redes físicas de cableado
- ❖ Aeropuertos
- ❖ Puertos
- ❖ Zonas francas y parques industriales
- ❖ Comercialización de combustible

Todo generador de residuos cuya escala de producción supere el límite establecido por DINACEA para su rubro, deberá presentarle un Plan de gestión de Residuo Sólidos (PGRS) para su aprobación. El PGRS deberá comprender todas las etapas de manejo desde la generación hasta el destino final.

El decreto establece la información mínima que debe estar incluida en el PGRS y pautas para las distintas etapas de la gestión de los residuos.



# ACTIVIDADES COMPRENDIDAS POR EL DECRETO 182/013.

La resolución ministerial 1708/13 establece un corte por el nivel de actividad. Ej:

<b>Num. 1. INDUSTRIA MANUFACTURERA</b>			
<b>Código CIU</b>	<b>Grupo/Clase</b>	<b>Subgrupo/Subclase</b>	
<b>1011</b>	Matanza de ganado y otros animales (excepto aves) conservación y preparación de sus carnes	Matadero y frigoríficos (todos los animales excepto aves)	≥200 cabezas por semana <sup>1</sup>
		Tratamiento y transformación destinados a la fabricación de productos alimenticios en base a carne	≥10 ton/día de materia prima procesada <sup>1</sup>
		Procesamiento de subproductos de la industria cárnica (grasas, triperías, harinas de carne, etc.)	≥1 ton/día de materia prima procesada <sup>1</sup>
<b>1012</b>	Elaboración de fiambres y chacinados		≥5 ton/día de materia prima procesada <sup>1</sup>
<b>1013</b>	Matanza, preparación y conservación de pollos y gallinas		≥2.000 aves faenadas/día <sup>1</sup>

# DECRETO 182/013

Los PGRS deberán incluir:

Descripción de la actividad y de los procesos unitarios que generan RS  
Cuantificación y caracterización de los RS generados, incluidos riesgos  
Manejo interno para minimizar la generación, segregar y almacenar  
Actividades de transporte, reciclado, valorización o tratamiento  
Datos de otras empresas que participan en la gestión.  
Disposición final de los residuos no reciclados o valorizados.  
Plan de contingencias, sistema de control y seguimiento.

Los PGRS deberán priorizar:

- La minimización en la generación (peligrosidad y cantidad)
- Los procesos de reciclado o valorización

Anualmente se debe presentar ante el Ministerio de Ambiente una Declaración Jurada para el seguimiento del PGRS. (Formulario on line)

# DECRETO 182/013

CLASIFICA LOS RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES Y ASIMILADOS EN

## CATEGORÍA I :

- Inflamables, corrosivos o reactivos
- Los que contienen sustancias carcinogénicas, mutagénicas, tóxicas, nocivas o irritantes por encima de concentraciones establecidas en el decreto.
- Los que presentan riesgo biológico (declarados patógenos).
- Los que generen lixiviados con metales pesados o ecotoxicidad por encima de límites establecidos en el decreto.

## CATEGORÍA II :

- Los que no son categoría I

El decreto habilita a la DINAMA (ahora Ministerio de Ambiente) a publicar un catálogo (no taxativo) para facilitar la clasificación

# CATALOGO NACIONAL DE RESIDUOS



**MVOTMA**

Ministerio de Vivienda  
Ordenamiento Territorial  
y Medio Ambiente

**DINAMA**

Dirección Nacional  
de Medio Ambiente

**CATÁLOGO DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES  
Y ASIMILADOS**

CÓDIGO RESIDUO	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL RESIDUO
<b>0141</b>	<b>Cría de ganado vacuno (establecimientos de engorde a corral, tambos)</b>
14101	*Restos de roenticidas
14102	*Restos de productos zoterápicos (medicamentos)
14103	* Restos de productos químicos y reactivos
14104	Excretas (Estiércol y orina)
14105	Residuos de alimentos, camas
14106	Residuos generados durante el parto (placentas, etc.)
14107	*Residuos provenientes de atención veterinaria (jeringas, ampollas, agujas, etc.)
14108	Residuos sólidos provenientes de las unidades de retención de sólidos, sedimentadores, etc.
14109	Lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales
14110	Animales muertos
14111	*Animales muertos producto de enfermedades infecto-contagiosas

# DECRETO 182/013

## ALTERNATIVAS DE DESTINO FINAL para residuos CATEGORÍA II:

- Tratamiento y disposición final en el suelo (Landfarming)
- Disposición final en relleno sanitario o industrial
- Reciclado o valorización energética
- Compostaje y uso como mejorador se suelo
- Digestión anaerobia y uso como mejorador de suelo.

### Disposición final en terreno:

- Definir los criterios de admisión de los residuos
- Establecer las condiciones de diseño de los rellenos

### **Pautas técnicas para alternativas de gestión de residuos**

---

Pauta técnica para el uso de residuos como mejoradores de suelos

---

Especificación técnica para el uso de residuos como combustible alternativo

# PRINCIPALES ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN FINAL PARA RS ORGÁNICOS CAT II

1. RELLENO SANITARIO o RELLENO INDUSTRIAL : Terreno, impermeabilización, canalización de pluviales, lixiviados, vectores, maquinaria y consumo de energía.
2. TRATAMIENTO EN EL TERRENO (LANDFARMING) : Mucho terreno, maquinaria y energía, vectores, riesgo de contaminación de aguas.
3. USO COMO MEJORADOR DE SUELOS: Generalmente requiere un tratamiento biológico:
  - COMPOSTAJE : Terreno, impermeabilización, canalización de pluviales, lixiviados, vectores maquinaria y consumo de energía. Se debe asegurar la colocación del compost.
  - DIGESTIÓN ANAEROBIA: Inversión inicial, sobrenadante, se debe asegurar la colocación del digestado. A favor: energía
4. USO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO (incineración, pirólisis, gasificación térmica)

La necesidad de transporte puede ser un elemento determinante en la selección de la alternativa.

En todos los casos se deben considerar los aspectos ambientales, sociales y económicos.

# ¿Cómo valorizar los residuos orgánicos?

## ¿Enterrar, Incinerar/gasificar, Compostar o Digerir?

	Relleno Sanitario o Industrial	Incineración, pirólisis o gasificación térmica	Compostaje	Digestión Anaerobia
BALANCE ENERGÉTICO*	(-)	+	(-)	+
RECUPERACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES**	NO	No	SI	SI

\*El balance energético depende del PCI y de la humedad en la Incineración, y de la composición química y biodegradabilidad en la Digestión Anaeróbica.

\*\*La recuperación de materia orgánica y nutrientes requiere que haya demanda cercana y que se cumplan criterios de calidad

Valorar aspectos sociales, ambientales, logísticos y económicos.

# DECRETO 182/013

Uso de Residuos como mejoradores de suelo:  
Es una opción restringida a residuos de categoría II.  
La pauta técnica (2018) prevé dos alternativas:

## **Alternativa A**

Residuos que por sus características tienen un valor adecuado para ser aplicados como mejoradores de suelo y no presentan niveles de contaminación que requieran un control o restricciones sobre la aplicación. Para esta alternativa estarían fijados criterios de calidad con nivel de restricción A (los más exigentes). Un ejemplo de esta alternativa podría ser la producción de compostaje de calidad que pueda sustituir fertilizantes tradicionales.

## **Alternativa B**

Residuos que por sus características tienen un valor adecuado para ser aplicados como mejoradores de suelo pero presentan ciertas condiciones o características que requieren un control sobre la aplicación. Para esta alternativa sería fijados niveles de calidad con una restricción menor que para la alternativa A, dejando además condicionada la aplicación a ciertos criterios de tipo de suelo, composición, estableciéndose además la pauta de seguimiento en el suelo donde se realice la aplicación. Estos aspectos y otros deberán ser incluidos en el PGRSI que se presente para aprobación de DINAMA.



# Resolución Ministerial (MGAP) 141/2018

## Requisitos Técnicos y Registro de Enmiendas Orgánicas

Establece los requisitos sanitarios y físicoquímicos para el registro de enmiendas orgánicas para uso agrícola.

### **Requisitos sanitarios:**

limita recuento de patógenos y coliformes.

### **Requisitos físicoquímicos:**

Límites para materiales inertes y metales pesados.

Rangos aceptables para pH y humedad.

Valores mínimos aceptables para nitrógeno y materia orgánica

Indicadores de estabilidad y madurez.

Exigencias para registro corresponden a las especificaciones para categoría A de la DINACEA

# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS en el contexto internacional



Arranque: 1993

Capacidad: 30.000 ton/año

Sustratos: Fracción orgánica de Residuo Sólidos Urbanos



Volumen: 3 x 16.700m<sup>3</sup>

Producción de Biogás: 40.000 Nm<sup>3</sup>/d

Sustratos: Lodo de planta de tratamiento de efluentes domésticos



Arranque: 2007

Potencia instalada: 360 kWel

Sustratos: Estiércol vacuno, purines de cerdo, silo de maiz, silo de gramíneas



Arranque: 2006

Potencia instalada 4,6 MWel

Sustratos: Estiércol vacuno, purines de cerdo, silo de maíz, otros residuos orgánicos



Arranque: 2000

Capacidad: 50.000 ton/año

Sustrato: Fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos



Arranque: 2011

Potencia instalada 4,0 MWel

Sustratos: Sorgo dulce, estiércol, lodos, purines de cerdo, residuos de matadero y suero





Arranque: 2014

Potencia instalada 3,0 MWel (biogás + biodiesel)

Sustratos: Estiércol, glicerol, residuos de alimentación y otros.

8 digestores x 4200m<sup>3</sup> para procesar 1250m<sup>3</sup>/día de residuos al 6%MS.

Producción de biogás 1100Nm<sup>3</sup>/h con un 54%CH<sub>4</sub>

(Estancias del Lago – Durazno)



Arranque: 2019

Potencia instalada 75 kW

Sustratos: Efluente de tambo.

Laguna cubierta de 2250 m<sup>3</sup>., para procesar 75 m<sup>3</sup> de efluente con 1% de MS

Producción de biogás 125 Nm<sup>3</sup>/d con un 70%CH<sub>4</sub>

(Rincón de Albano – San José)

## Principales sustratos:

Residuos agropecuarios.  
Lodos de efluentes domésticos  
Residuos sólidos municipales  
Residuos industriales  
Cultivos energéticos

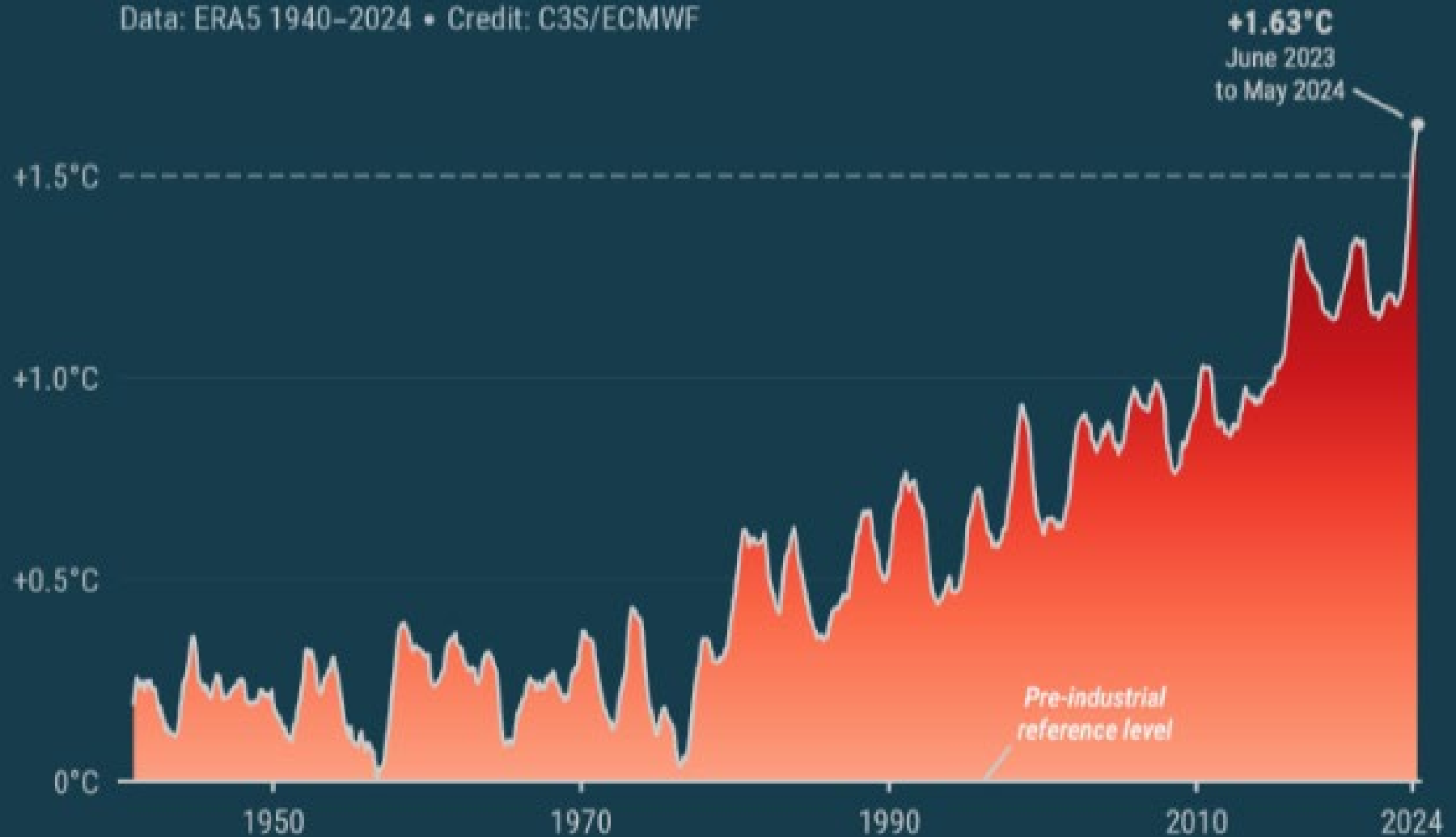
## Beneficios de la DA:

- Estabilización de residuos  
(reducción de olores, vectores, emisiones GEI y otros)
- Generación de energía renovable:  
(eléctrica, térmica y biometano p/transporte y distribución)
- Obtención de enmiendas orgánicas o bioabonos.  
(complemento o sustitución de fertilizantes)

# Global surface temperature increase above pre-industrial

12-month running mean anomalies relative to the 1850–1900 average

Data: ERA5 1940–2024 • Credit: C3S/ECMWF



PROGRAMME OF THE  
EUROPEAN UNION



# Emisiones de CO<sub>2</sub> de principales potencias económicas

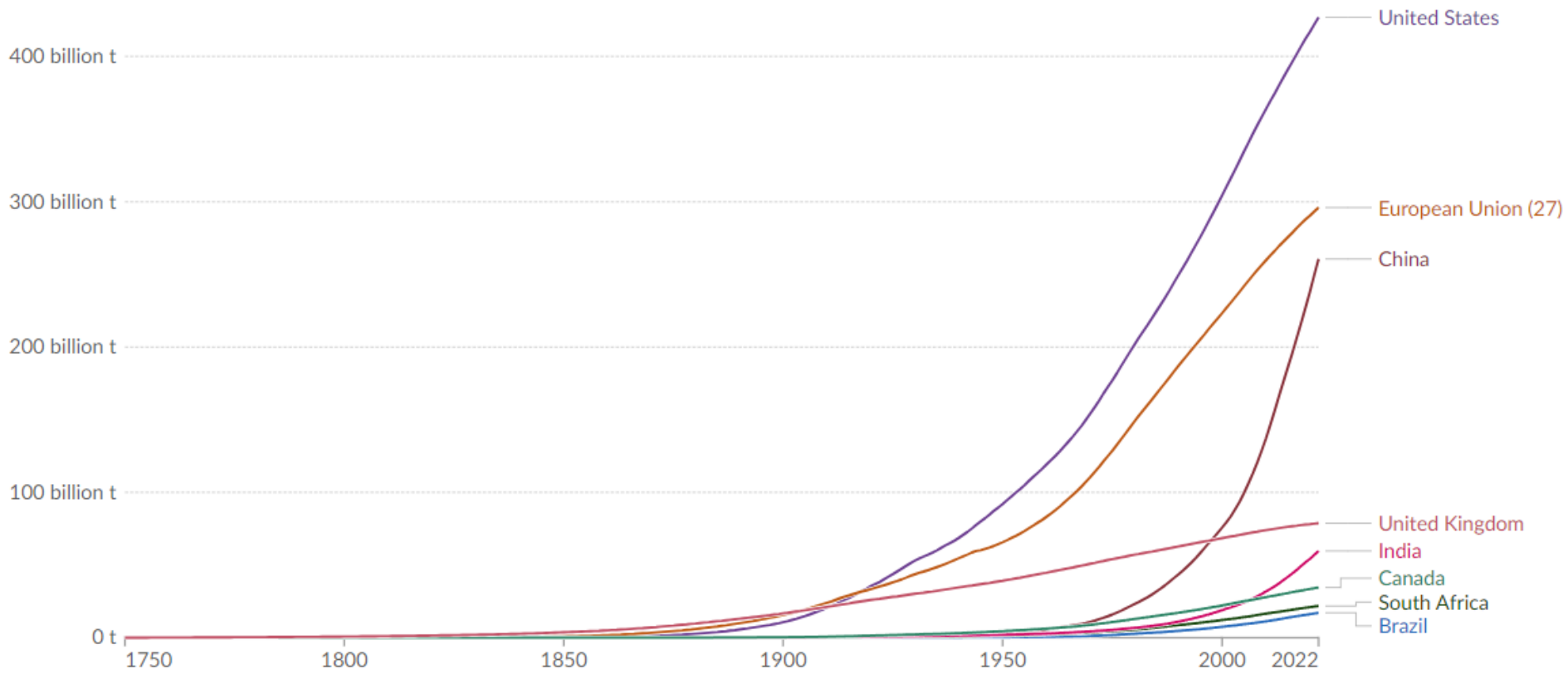
## Cumulative CO<sub>2</sub> emissions

Running sum of CO<sub>2</sub> emissions produced from fossil fuels and industry since the first year of recording, measured in tonnes. Land-use change is not included.

Our World  
in Data

Table | Map | Chart

Settings



Play time-lapse

1750

2022

# Índices de Precios globales de combustibles fósiles

## Fossil fuel price index, 1976 to 2023

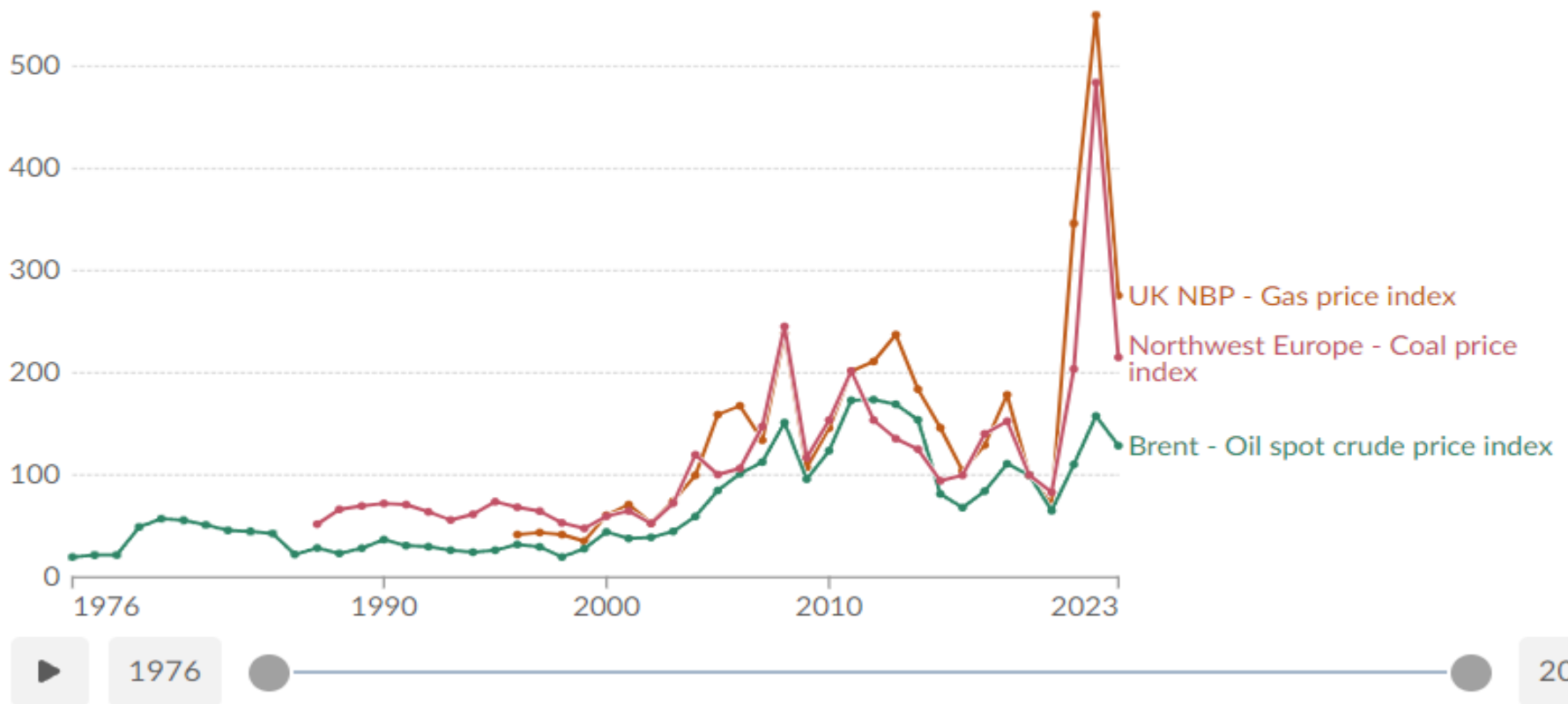
Our World  
in Data

Average global prices of oil, natural gas and coal, measured as an energy index where prices in 2019=100.

Table Chart

Change index

Settings

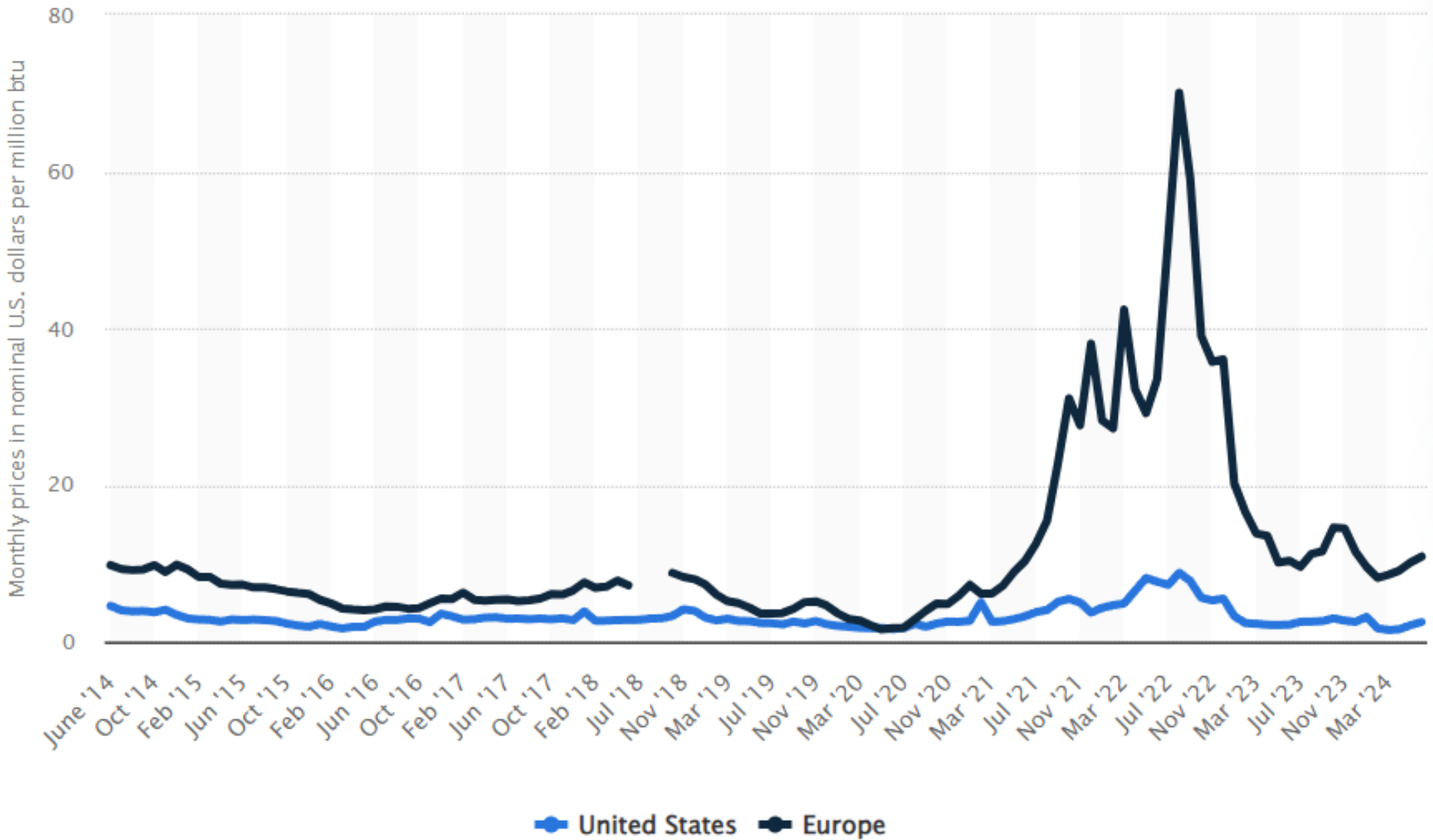


Data source: Energy Institute based on S&P Global Platts - Statistical Review of World Energy (2024) - [Learn more about this data](#)

OurWorldInData.org/fossil-fuels | CC BY

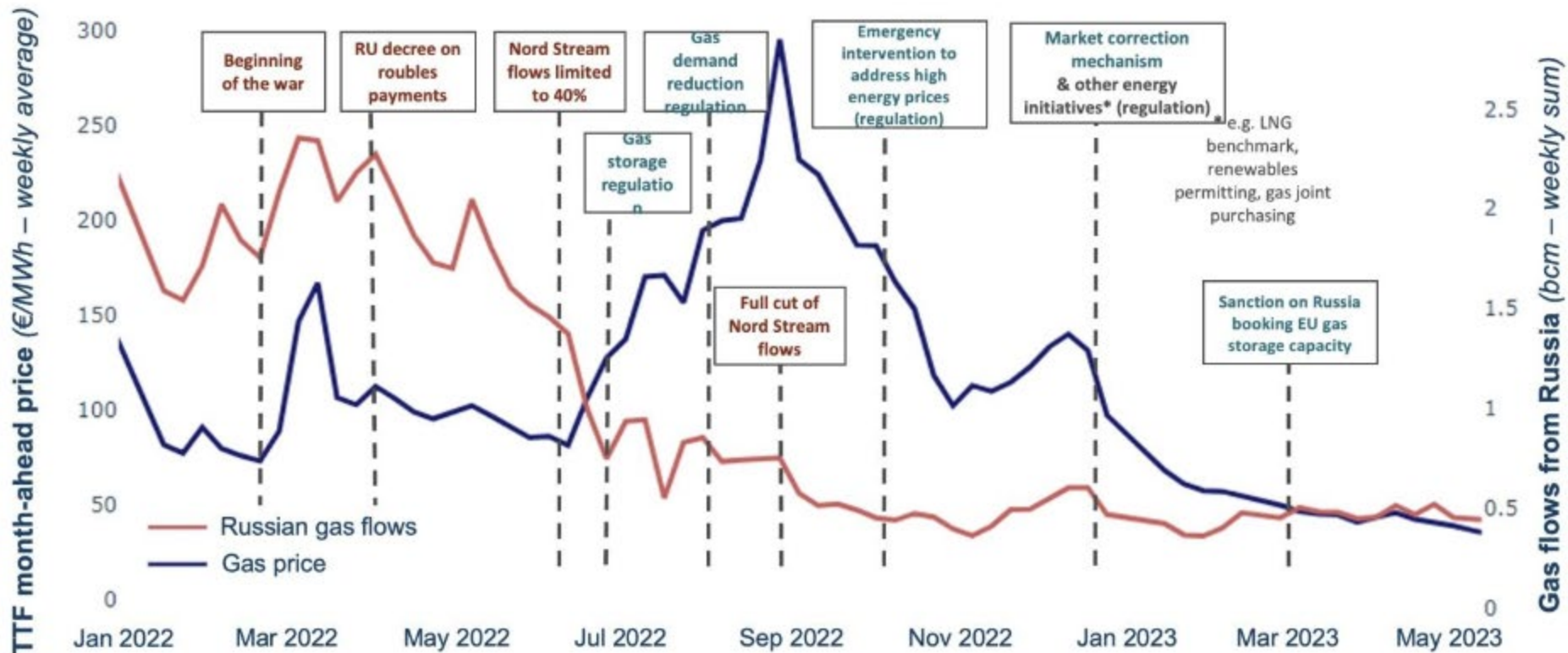


# Precio del Gas Natural en Estados Unidos y Europa



# Precio del Gas Natural en Europa

**Figure 1** Russian weaponisation of gas supply and EU energy policies



Sources: DG ENER Chief Economist Team based on ENTSO-G and Platts

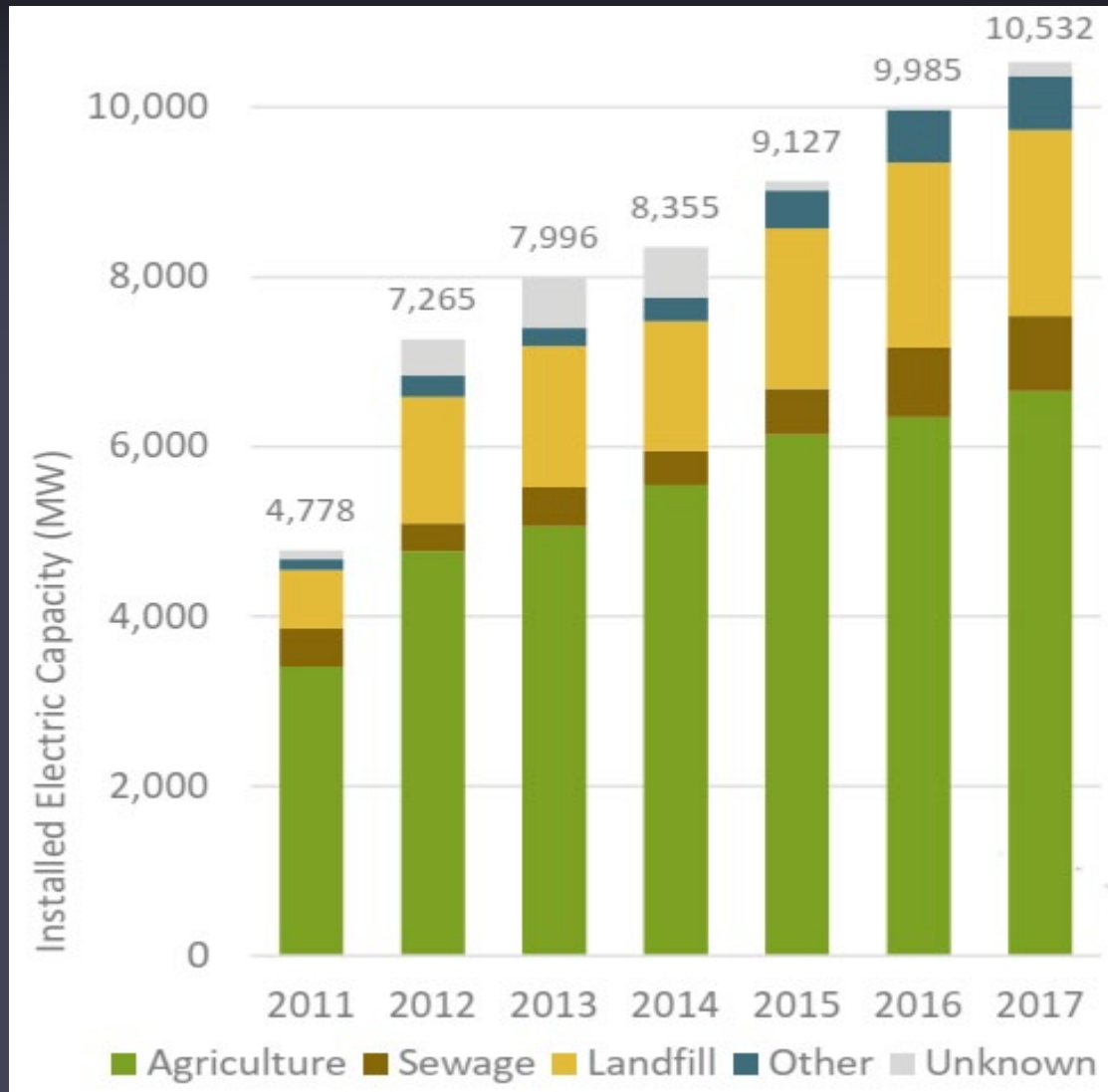


# Producción de Biogás y Biometano en Europa



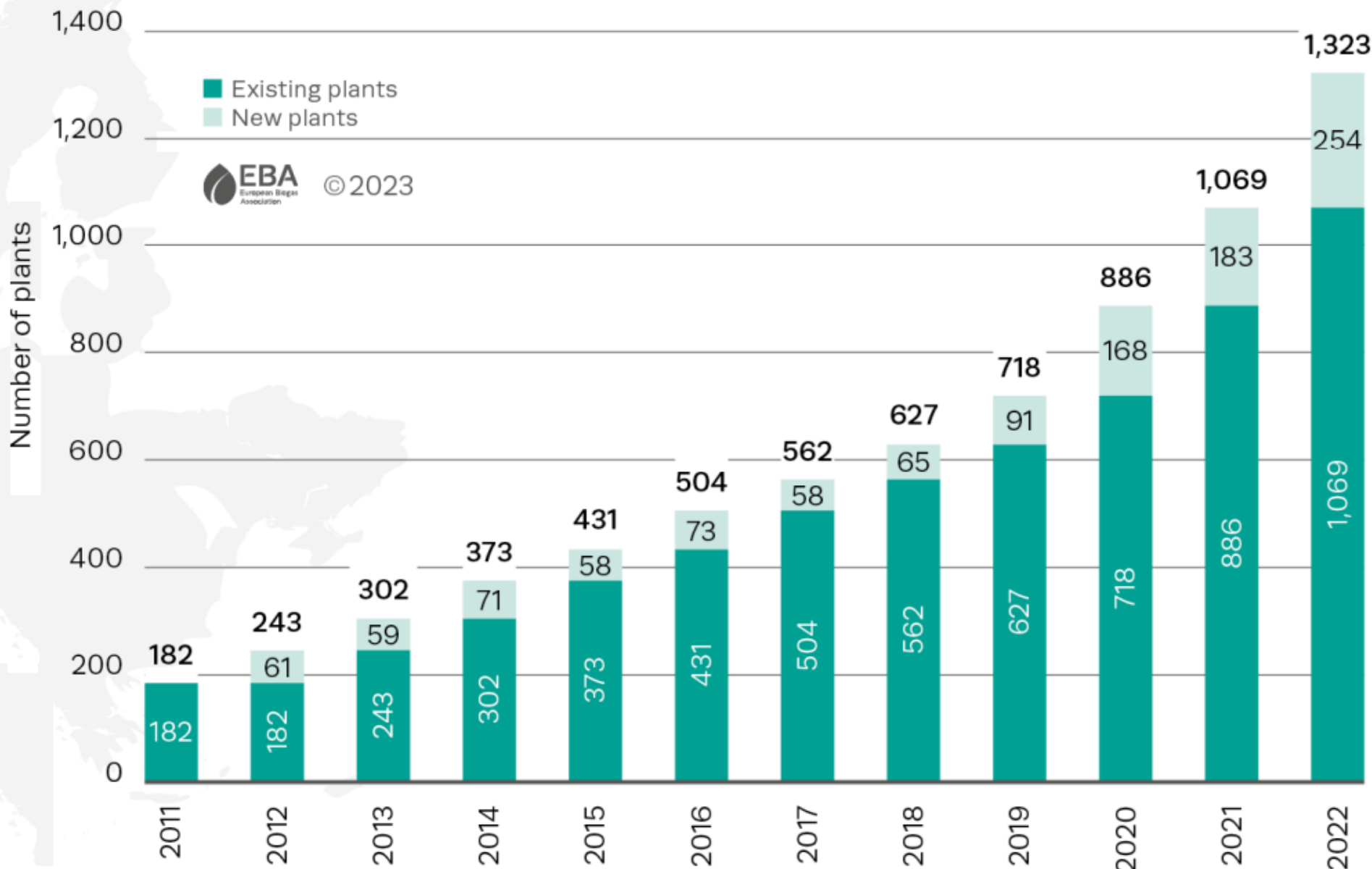


# Plantas de biogás instaladas en Europa hasta 2017 (EBA)

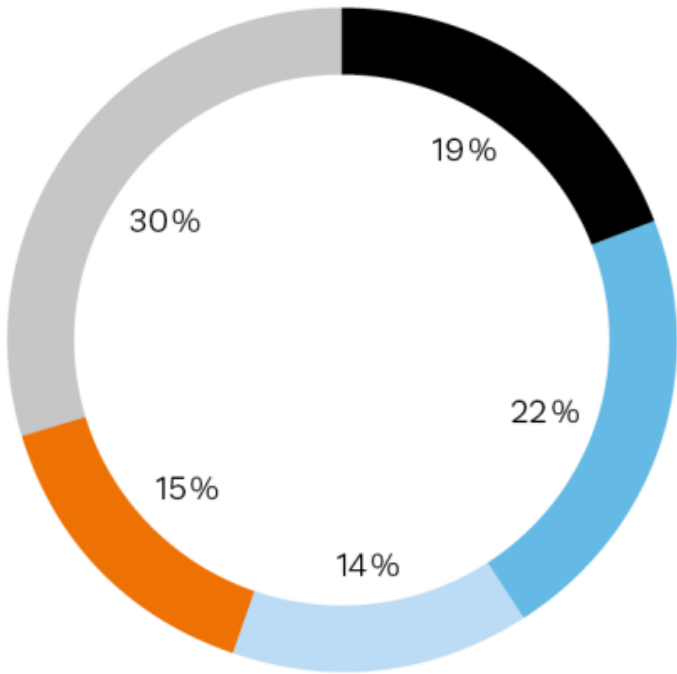


En 2015: 60 TWh de generación eléctrica y una cantidad similar de energía térmica

# Plantas de biometano en Europa hasta 2022

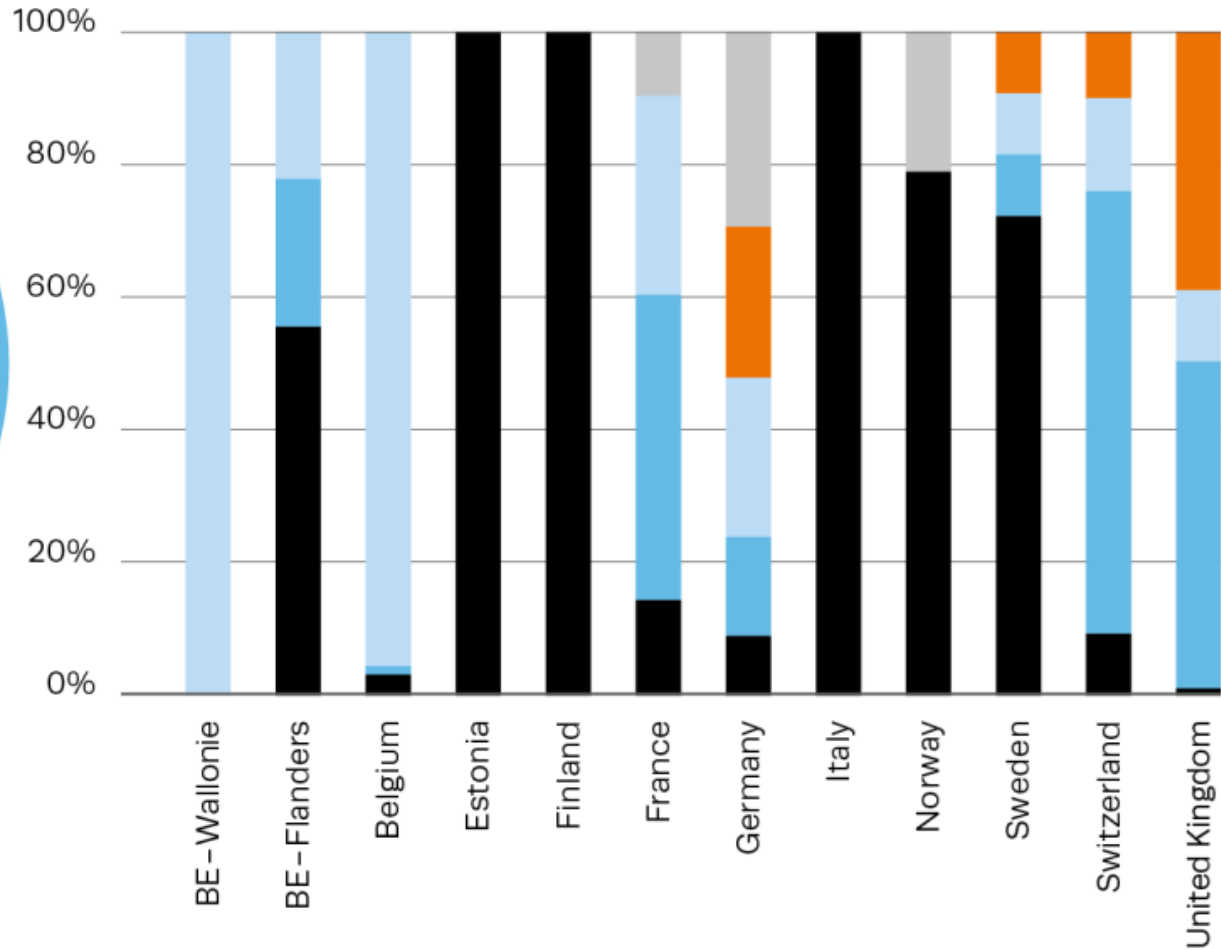


# Uso de biometano por sector en Europa



- Transport
- Building
- Industry
- Power
- Unknown

© 2023



# Precio del Gas Natural en Montevideo (julio 2024)



Poder calorífico del gas natural 9.3 Mcal/m<sup>3</sup>.  
 1Mwh = 860 Mcal  
 1Mwh = 3.41 Mbtu

Costo de GN en Mdeo:

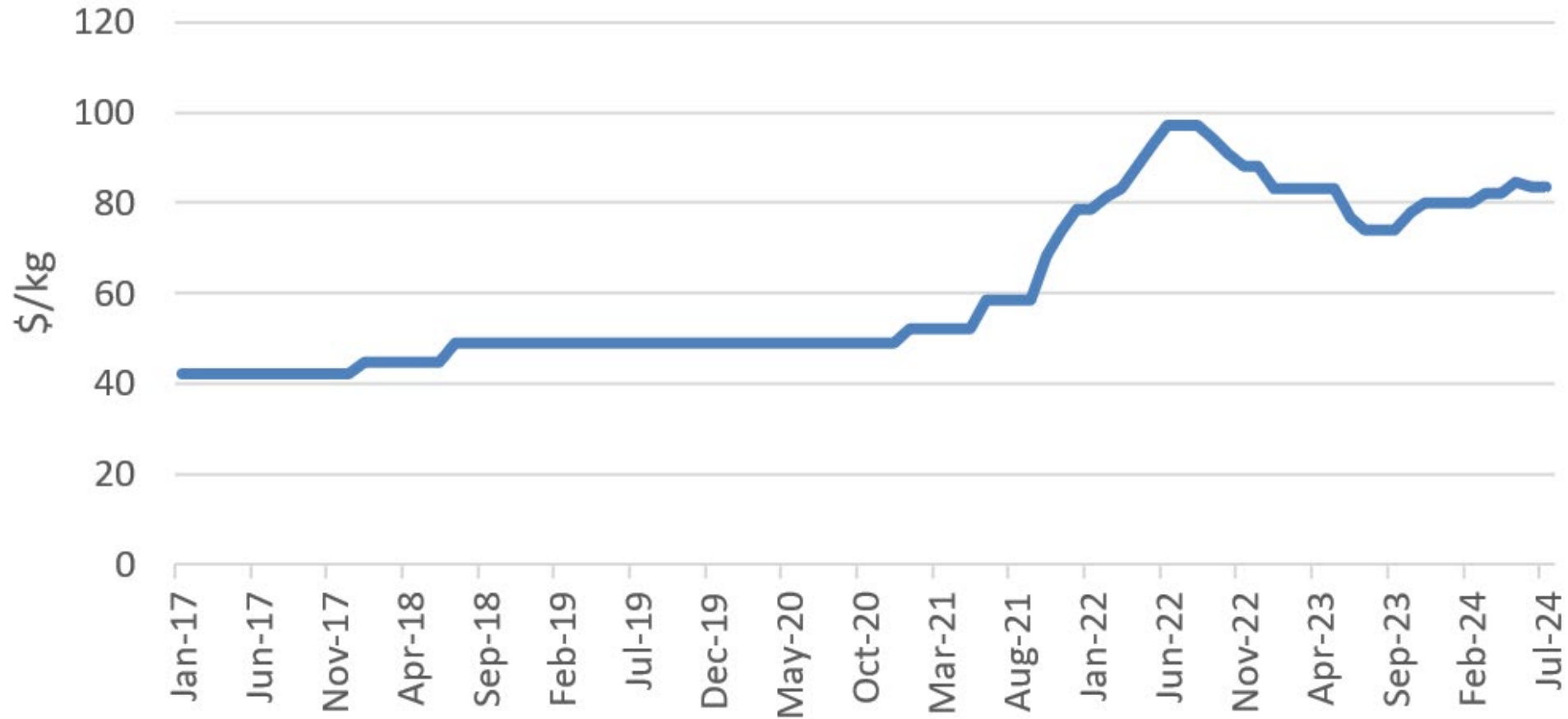
	USD/MWh	USD/Mbtu
Máximo	162	48
Mínimo	85	25

(sin considerar costos fijos)

Tarifa Código	Consumo anual en m <sup>3</sup> de 9.300 Kcal	Consumo mensual en m <sup>3</sup> de 9.300 kcal	Cargo fijo	Cargo Variable*	
<b>TARIFAS COMERCIALES - INDUSTRIALES</b>					
SERVICIO GENERAL P(2) 59		De 0 a 1.000	5.229,92	50,50	
		Más de 1.000		45,62	
PEQUEÑA EMPRESA 105	De 1 a 4.000	De 0 a 200	1.305,87	70,12	
		De 201 a 1.000	5.229,92	50,50	
		Más de 1.000	5.229,92	45,62	
		Factura mínima	3.232,94	-	
EMPRENDEDOR GASTRONÓMICO 122	de 1 a 4.000	0 a 1000	5.229,92	50,50	
		Más de 1000		45,62	
		Consumo Bonificado menor a 300 m <sup>3</sup>			
		Menor a 300	2.156,85	38,59	
GRAN INDUSTRIA 125	Mas de 180.000	0 a 1000	5.229,92	50,50	
		De 1001 a 15.000		45,62	
		De 15.001 a 30.000		39,23	
		Más de 30.000		36,79	

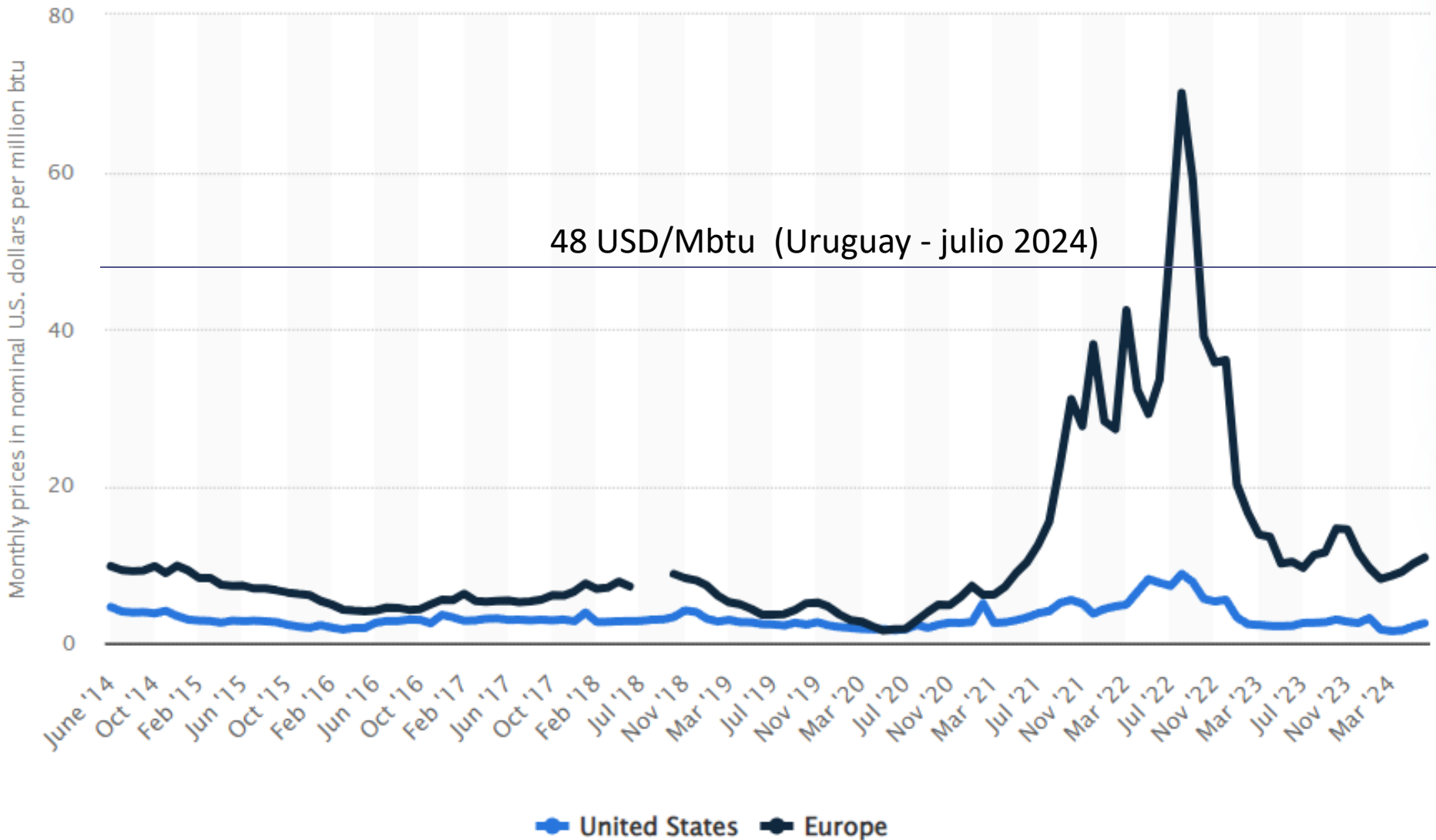
\* Precio por metro cúbico

# Evolución del precio del GLP a granel en Uy (ANCAP)



Julio 2024: Costo de GLP en Uruguay: 83\$/kg  
PCI del GLP: 11.0 Mcal/kg. 1Mwh = 860 Mcal  
162 USD/MWh o 48 USD/Mbtu

# Precio del Gas Natural en Estados Unidos y Europa

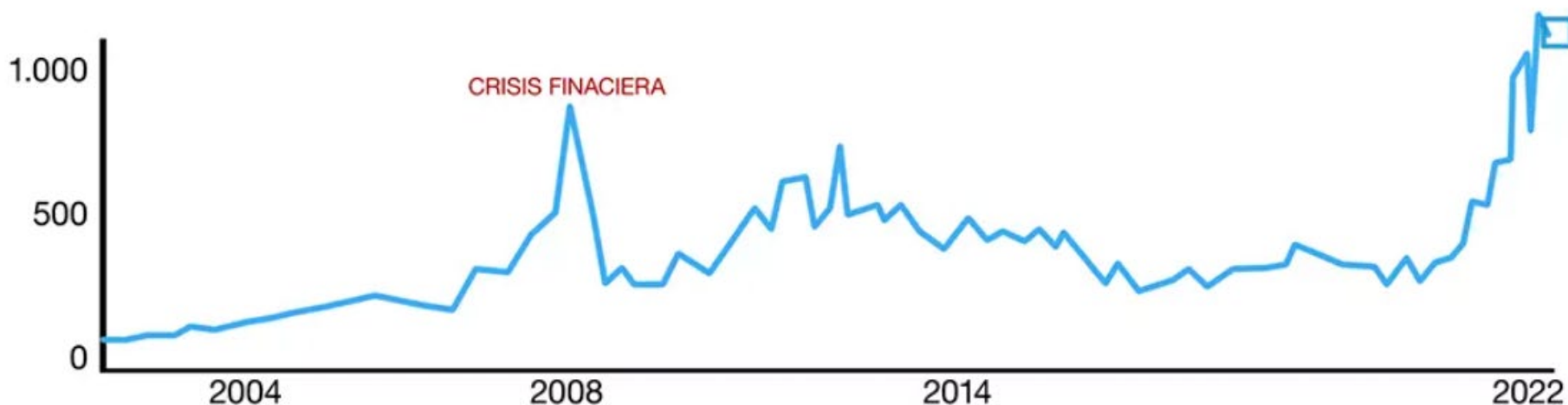




# Evolución del precio de la UREA (principal fertilizante N)

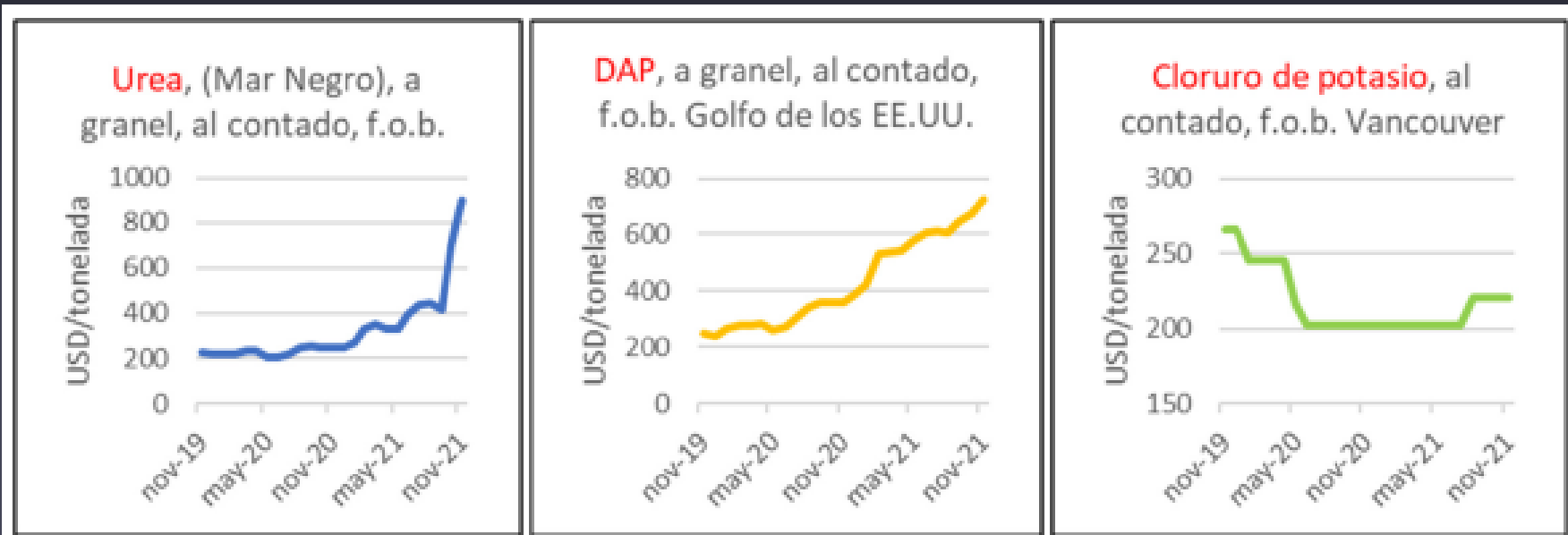
## PRECIO MUNDIAL DE FERTILIZANTES

\*DÓLAR POR TONELADA CORTA (2.000 LIBRAS)



Fuente: Green Markets North America Fertilizer Price Index

# Evolución de precios de principales Fertilizantes (FAO)



Tendencia de los precios al contado de los principales fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos en 2021

# Equivalencia del digestado producido en Europa con principales fertilizantes



**31 Mt (DM)**  
digestate produced  
Europe, **2022**

Digestate can already displace:

**15%**

**Nitrogen-based fertilisers**

(N demand in EU-27: 11.1 Mt/year)

**11%**

**Phosphorus fertilisers**

(P demand in EU-27: 2.8 Mt/year)

**6%**

**Potassium fertilisers**

(K demand in EU-27: 3.1  
Mt/year)



GHG reduction potential when displacing  
synthetic N-fertilizers with digestate

**10 Mt**  
**of CO<sub>2</sub> equivalent**  
**in 2022**

**Natural gas** is the main feedstock and  
energy source to produce **synthetic**  
**fertilisers**

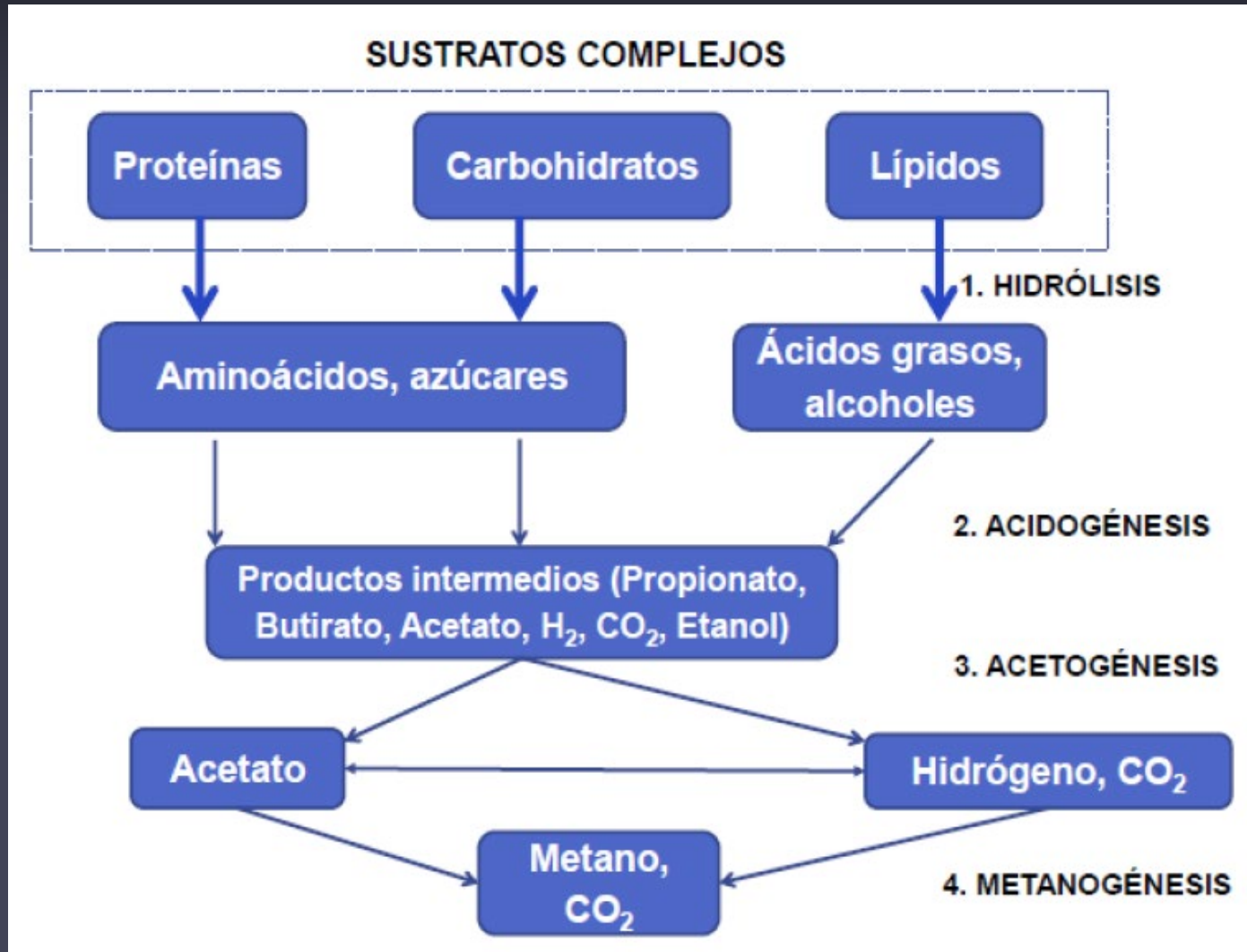
The replacement of 15%  
of **synthetic nitrogen fertilisers** with  
digestate could save today around  
**2 bcm of natural gas**

# ¿QUÉ ES LA DIGESTIÓN ANAEROBIA?

ES UN PROCESO CATALIZADO POR MICROORGANISMOS MEDIANTE EL CUAL LA MATERIA ORGÁNICA COMPLEJA SE SOLUBILIZA Y SE DEGRADA EN AUSENCIA DE O<sub>2</sub> HASTA CH<sub>4</sub> Y CO<sub>2</sub>



# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS



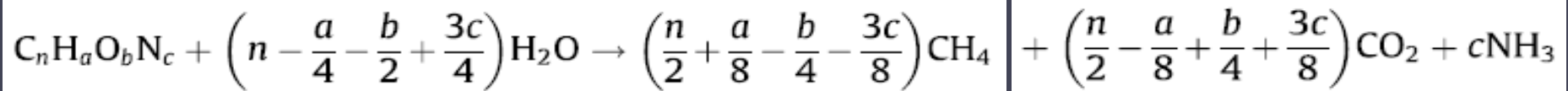
¿Cuánto metano se produce?

# PRODUCCIÓN DE METANO TEÓRICA

## Theoretical methane yield (TMY)

Cálculo:

1) En base a la composición elemental (Buswell & Mueller, 1952):



$$TMY_{ele} \left( \frac{\text{mL } CH_4}{\text{g VS}} \right) = \frac{22.4 \times 1000 \times \left( \frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right)}{12n + a + 16b + 14c}$$

2) En base a la composición orgánica (Kaparaju et al., 2009):

A partir de la fórmula química estimada para cada fracción y del % de cada fracción:

$$TMY_{org} \left( \frac{\text{mL } CH_4}{\text{g VS}} \right) = (373VFA + 496Protein + 1014Lipids + 415Carbohydrates + 727Lignin)/100$$

¿Es posible en la práctica alcanzar la producción teórica de metano?

# PRODUCCIÓN MÁXIMA DE METANO

## Potencial de Biometanización (BMP)

Es un indicador de la cantidad máxima de metano que se puede producir por unidad de masa de residuos alimentados al reactor.

Se expresa en  $\text{m}^3\text{CH}_4$  a PTN por kilogramo de SV alimentado.

Se determina mediante ensayo en batch hasta agotamiento o hasta un tiempo “suficiente” (ej.: BMP30).

# PRODUCCIÓN REAL DE METANO REAL

Es el correspondiente a la remoción de DQO (demanda química de oxígeno)

¿Cómo se relaciona la remoción de DQO con la producción de CH<sub>4</sub>?

¿Cuántos litros de metano a PTN se producen por kg DE DQO removida?

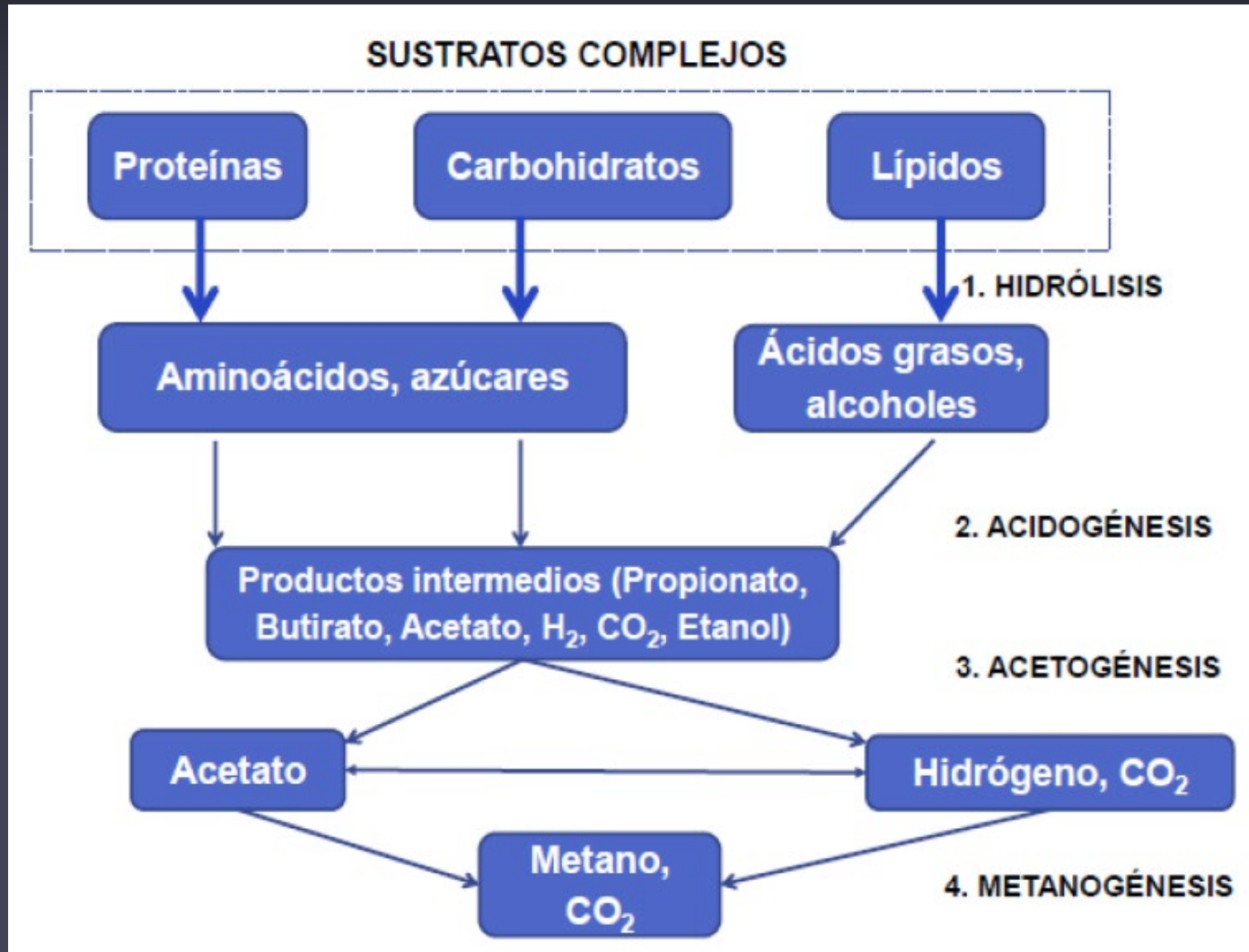
La DQO es removida como metano corresponde al oxígeno necesario para oxidar al metano hasta anhídrido carbónico:



Por estequiometría se producen 350L de CH<sub>4</sub> a PTN por kg de DQO removido



# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS



¿Qué fracción de la materia orgánica se gasifica?

# ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

La eficiencia de eliminación de materia orgánica depende de la biodegradabilidad del residuo y de las condiciones de operación del reactor.

Se mide en términos de Sólidos Volátiles (SV)

$$\text{Eficiencia} = (S_{Ve} - S_{Vs}) / S_{Ve}$$

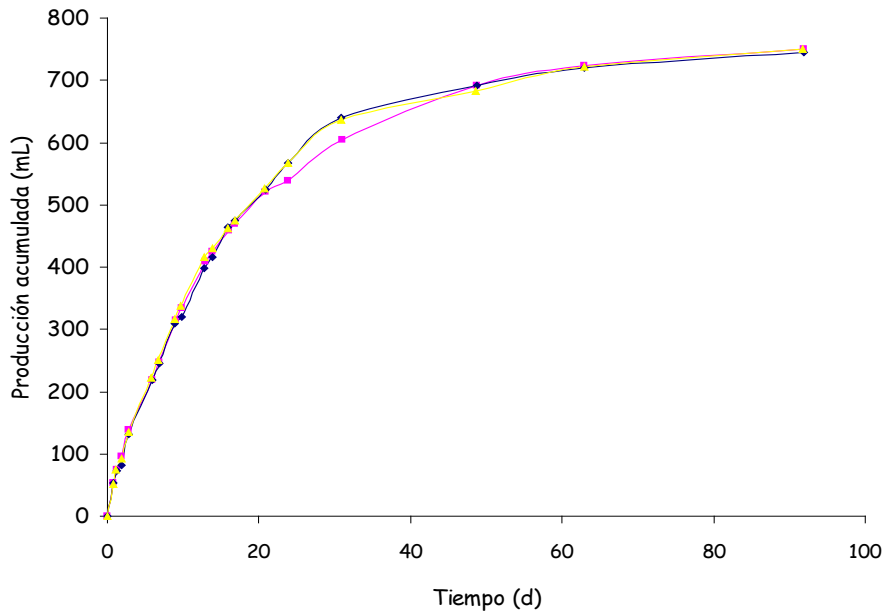
## Biodegradabilidad ( $\beta$ )

Es una característica de cada residuo, que se mide como la reducción máxima del contenido de SV luego de la digestión hasta agotamiento (con inóculo bien adaptado y sin inhibición).

Es un indicador de la máxima eficiencia que podemos esperar en la práctica.

# Biodegradabilidad y BMP

Producción de CH<sub>4</sub>

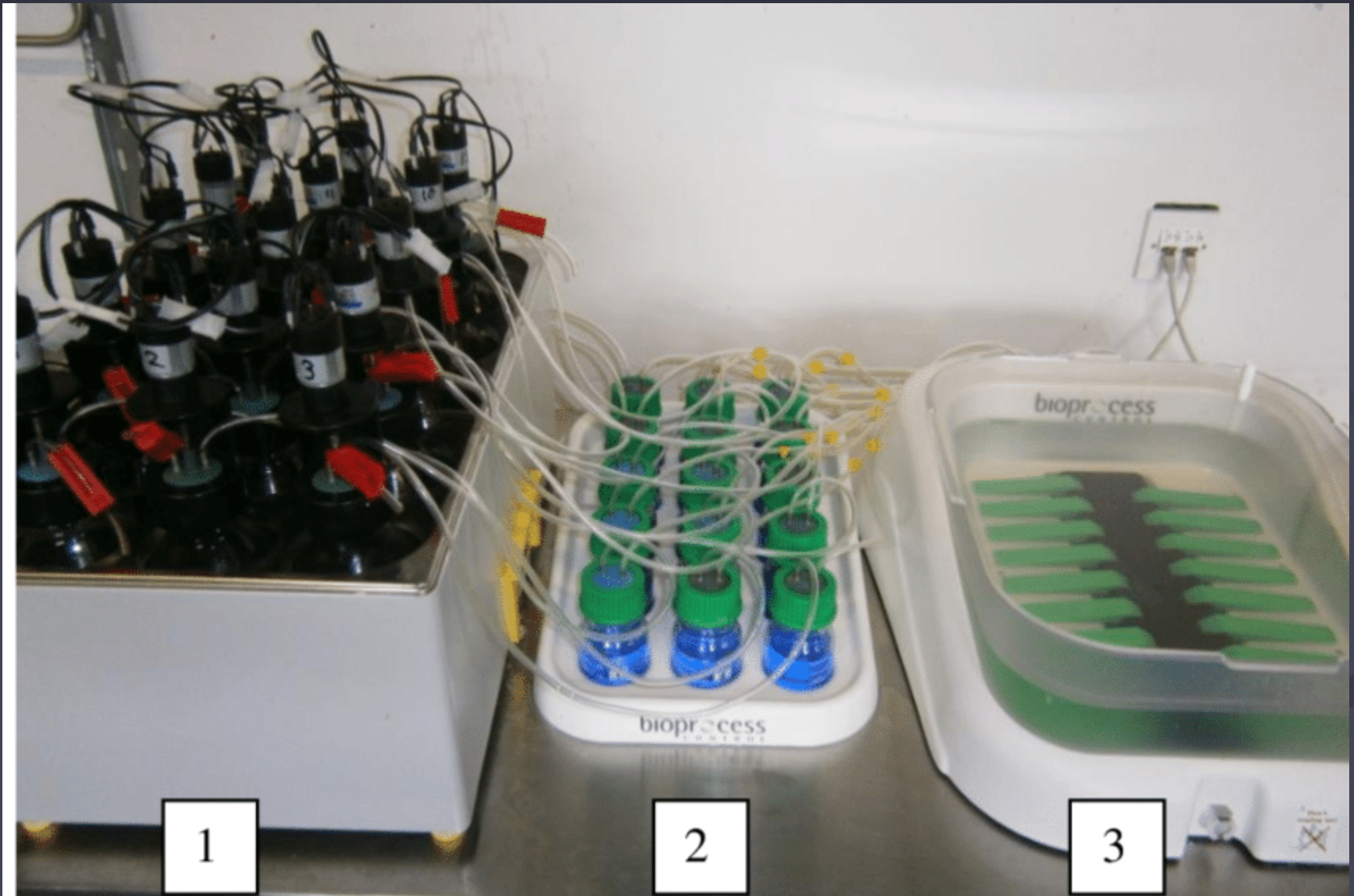


Se determinan a partir del mismo ensayo:  
BMP: producción de metano por unidad de SV de sustrato  
 $\beta$  : midiendo SV al inicio y al final (descontando el inóculo)  
o de forma aproximada, calculando el cociente BMP/TMY,  
o el cociente  $BMP/(350 * DQO/SV)$

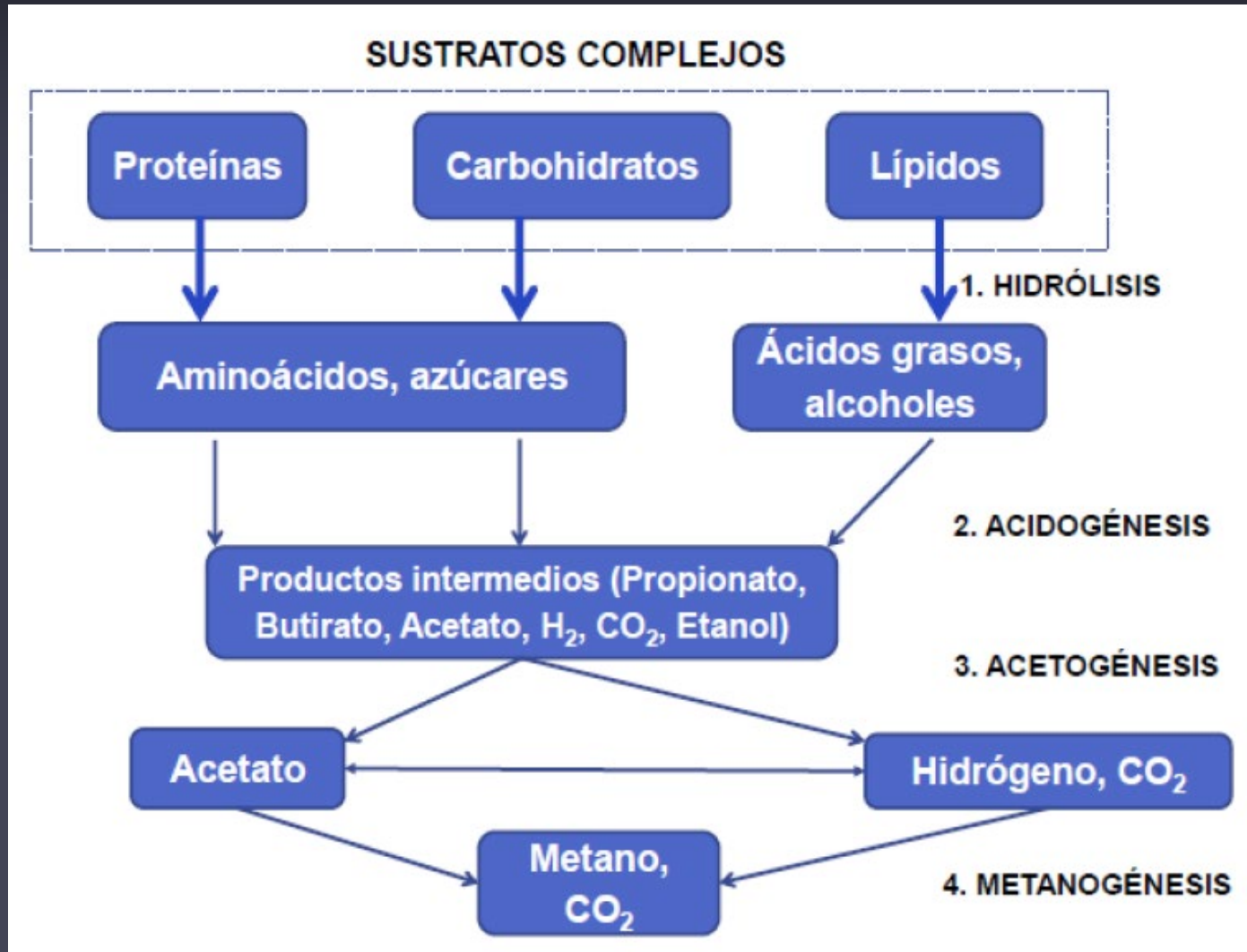
# Biodegradabilidad y BMP



# Biodegradabilidad y BMP



# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS



¿De qué depende la velocidad global del proceso?

# CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Cinética de hidrólisis:

Limita la velocidad del proceso durante operación estable

Siendo S la concentración de sustrato biodegradable:

Primer orden

Pavlostathis-Giraldo,1991

$$r = \frac{-dS}{dt} = k_h \cdot S$$

Superficie dependiente

Sanders et.al 1999

$$r = \frac{-dS}{dt} = k_{hA} \cdot A$$

Contois

Henze et.al 1995

$$r = \frac{-dS}{dt} = k_{hX} \cdot \frac{S}{K_S \cdot X_H + S} X_H$$

Crecimiento microbiano:

$$\frac{-dX_H}{dS} = Y_H \sim 0,10a0,15$$

# CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Cinética de la Metanogénesis:

Limita la velocidad del proceso durante procesos de desestabilización

La metanogénesis se modela con la cinética de Monod:

$$r = -\frac{dS}{dt} = \frac{K X_M S}{(K_S + S)}$$

Siendo S el sustrato para la metanogénesis

(básicamente acetato o H<sub>2</sub>)

Crecimiento microbiano:

$$-\frac{dX_M}{dS} = Y_M \sim 0,01 a 0,05$$

¿Por qué se puede desestabilizar un proceso anaerobio en un digester de sólidos?



Residuos difíciles de hidrolizar  
Poca superficie disponible  
Pobre mezcla inóculo-sustrato  
Macronutrientes insuficientes

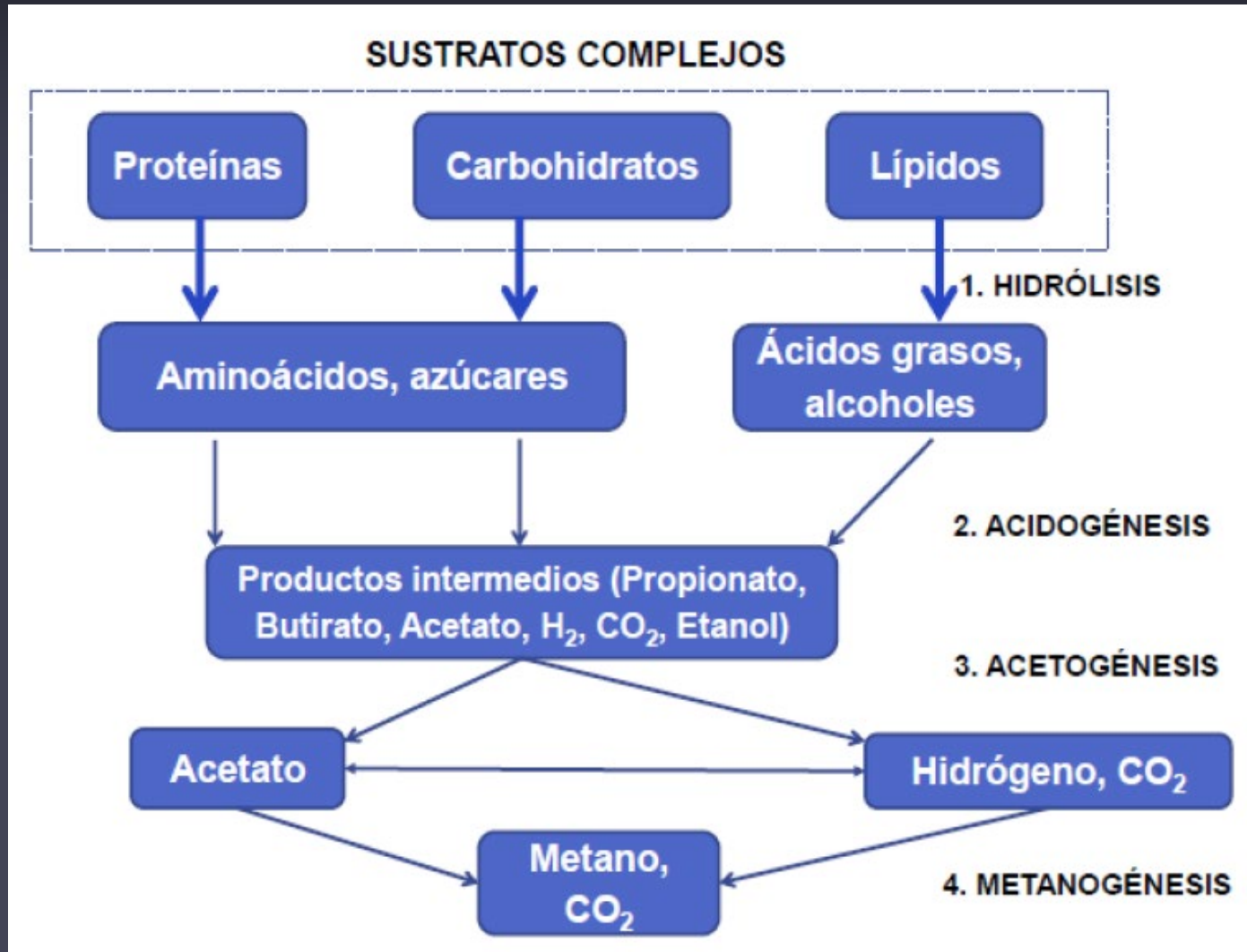
HIDRÓLISIS

¿Dónde está el cuello de botella?

Inóculo pobre en metanogénicas  
Bajo Tiempo de Residencia  
Presencia de Inhibidores  
Sobrecarga  
Faltan micronutrientes claves

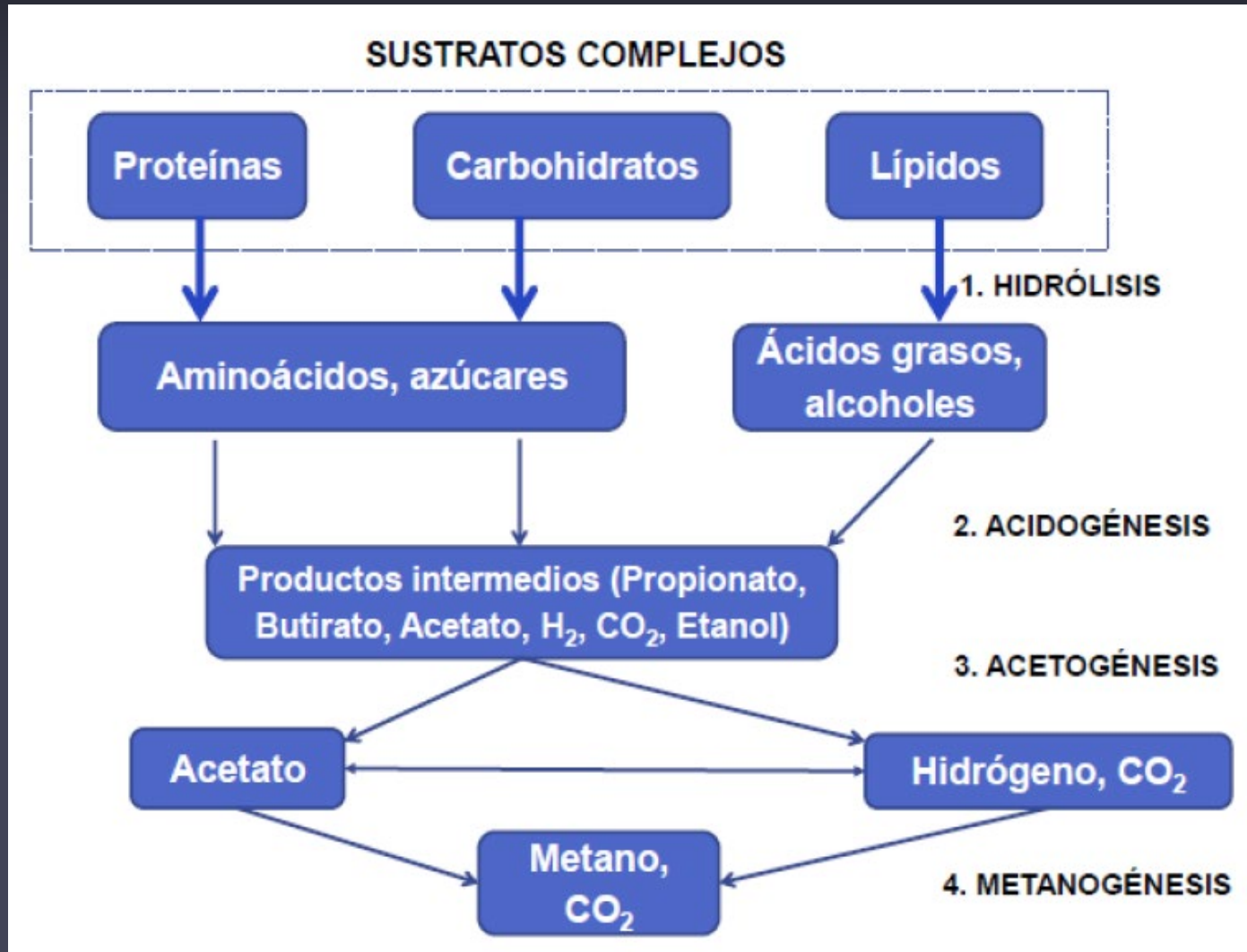
METANOGENESIS

# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS



¿Cómo podemos implementar este proceso?

# DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS



¿Qué volumen de reactor necesitamos? ¿De qué depende?

# BALANCE DE SV biodegradables (RCA ideal)

$$\left( \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{sustrato en el} \\ \text{reactor} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{caudal de} \\ \text{entrada de} \\ \text{sustrato en} \\ \text{el reactor} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{caudal de} \\ \text{salida de} \\ \text{sustrato} \\ \text{del reactor} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{velocidad de consumo} \\ \text{de sustrato por la} \\ \text{reacción microbiana} \\ \text{en el reactor} \end{array} \right)$$

En estado estacionario:

$$\left( \begin{array}{l} \text{caudal de} \\ \text{entrada de} \\ \text{sustrato en} \\ \text{el reactor} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{caudal de} \\ \text{salida de} \\ \text{sustrato} \\ \text{del reactor} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{velocidad de consumo} \\ \text{de sustrato por la} \\ \text{reacción microbiana} \\ \text{en el reactor} \end{array} \right)$$

$$q_e \cdot (SV_e) - q_s \cdot (SV_s) = r \cdot Vr$$

## VOLUMEN DE REACTOR ( $V_r$ )

$$V_r = (q_e \cdot (SV_e) - q_s \cdot (SV_s)) / r$$

Unidades: ( $m^3r$ ) = ( $m^3/d \cdot kgSV/m^3$ ) / ( $kgSV/(m^3r \cdot d)$ )

Rango normal de  $V_r$ : 5 a 10.000  $m^3$

## CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA ( $B_v$ )

$$B_v = q_e \cdot (SV_e) / V_r$$

Unidades: ( $kgSV/(m^3r \cdot d)$ ) = ( $m^3/d \cdot kgSV/m^3$ ) / ( $m^3r$ )

Rango normal de  $B_v$ : 1 a 10  $kgSV/(m^3r \cdot d)$

## TIEMPO DE RESIDENCIA ( $\tau$ )

$$\tau (d) = V_r (m^3) / q_s (m^3/d) \sim V_r (m^3) / q_e (m^3/d)$$

Rango normal de  $\tau$ : 15 a 60 días

# FACTORES FÍSICOS Y QUÍMICOS CLAVES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Determinan:

La velocidad de los procesos de degradación

El grado de estabilización del residuo.

- 1.-Naturaleza de los sustratos.
- 2.-Concentración de sustratos
- 3.-Concentración de microorganismos
- 4.-pH
- 5.-Temperatura
- 6.-Disponibilidad de macro y micronutrientes.
- 7.-Concentración de Inhibidores potenciales.
- 8.-Estabilidad de las condiciones

# 1.-Naturaleza de los sustratos:

## Composición Química:

- Carbohidratos
- Proteínas
- Lípidos
- Lignina

## Efecto sobre el rendimiento celular:

$Y$  (gSSV/gDQO):  $Y$  carbohidratos  $>$   $Y$  proteínas  $>$   $Y$  lípidos  
 $Y$  (gSSV/gSV):  $Y$  carbohidratos  $\simeq$   $Y$  proteínas  $<$   $Y$  lípidos

# 1.-Naturaleza de los sustratos:

Composición Química:  
Efecto sobre la cinética:

TABLA II.16. Constantes de hidrólisis por componentes químicos de la FORSU Ref: Christ, 2000

Proceso	Valor mínimo (días <sup>-1</sup> )	Valor máximo (días <sup>-1</sup> )
Hidrólisis de lípidos	0,005	0,010
Hidrólisis de proteínas	0,015	0,075
Hidrólisis de carbohidratos	0,025	0,200

Kinetic coefficients of the first-order rate of hydrolysis				Kinetic coefficients of the first-order rate of hydrolysis			
Substrate	<i>k</i> (day <sup>-1</sup> )	T (°C)	References	Substrate	<i>k</i> (day <sup>-1</sup> )	T (°C)	References
Carbohydrates	0.025–0.2	55	Christ et al. (2000)	Office paper	0.036	35	Vavilin et al. (2004)
Proteins	0.015–0.075	55	Christ et al. (2000)	Cardboard	0.046	35	Vavilin et al. (2004)
Lipids	0.005–0.010	55	Christ et al. (2000)	Newsprint	0.057	35	Vavilin et al. (2004)
Carbohydrates	0.5–2.0		Garcia-Heras (2003)	Food waste	0.55	37	Vavilin et al. (2004)
Lipids	0.1–0.7		Garcia-Heras (2003)	Forest soil	0.54	30	Lokshina and Vavilin (1999)
Proteins	0.25–0.8		Garcia-Heras (2003)	Forest soil	0.09–0.31	20	Lokshina and Vavilin (1999)
Lipids	0.76		Shimizu et al. (1993)	Slaughterhouse waste	0.35	35	Lokshina et al. (2003)
Lipids	0.63	25	Masse et al. (2002)				
Cellulose	0.04–0.13		Gujer and Zender (1983)	Household solid waste	0.1	37	Vavilin and Angelidaki (2005)
Cellulose	0.066	35	Liebetau et al. (2004)				
Kitchen waste	0.34	35	Liebetau et al. (2004)	Primary sludge	0.4–1.2	35	O'Rourke (1968)
Biowaste	0.12	35	Liebetau et al. (2004)	Primary sludge	0.99	35	Ristow et al. (2006)
Cattle manure	0.13	55	Present study	Secondary sludge	0.17–0.60	35	Ghosh (1981)
Pig manure	0.1	28	Vavilin et al. (1997)				
Proteins (gelatine)	0.65	55	Flotats et al. (2006)	Crops and crop residues	0.009–0.094	35	Lehtomaki et al. (2005)
Municipal solid waste	0.1	15	Bolzonella et al. (2005)				

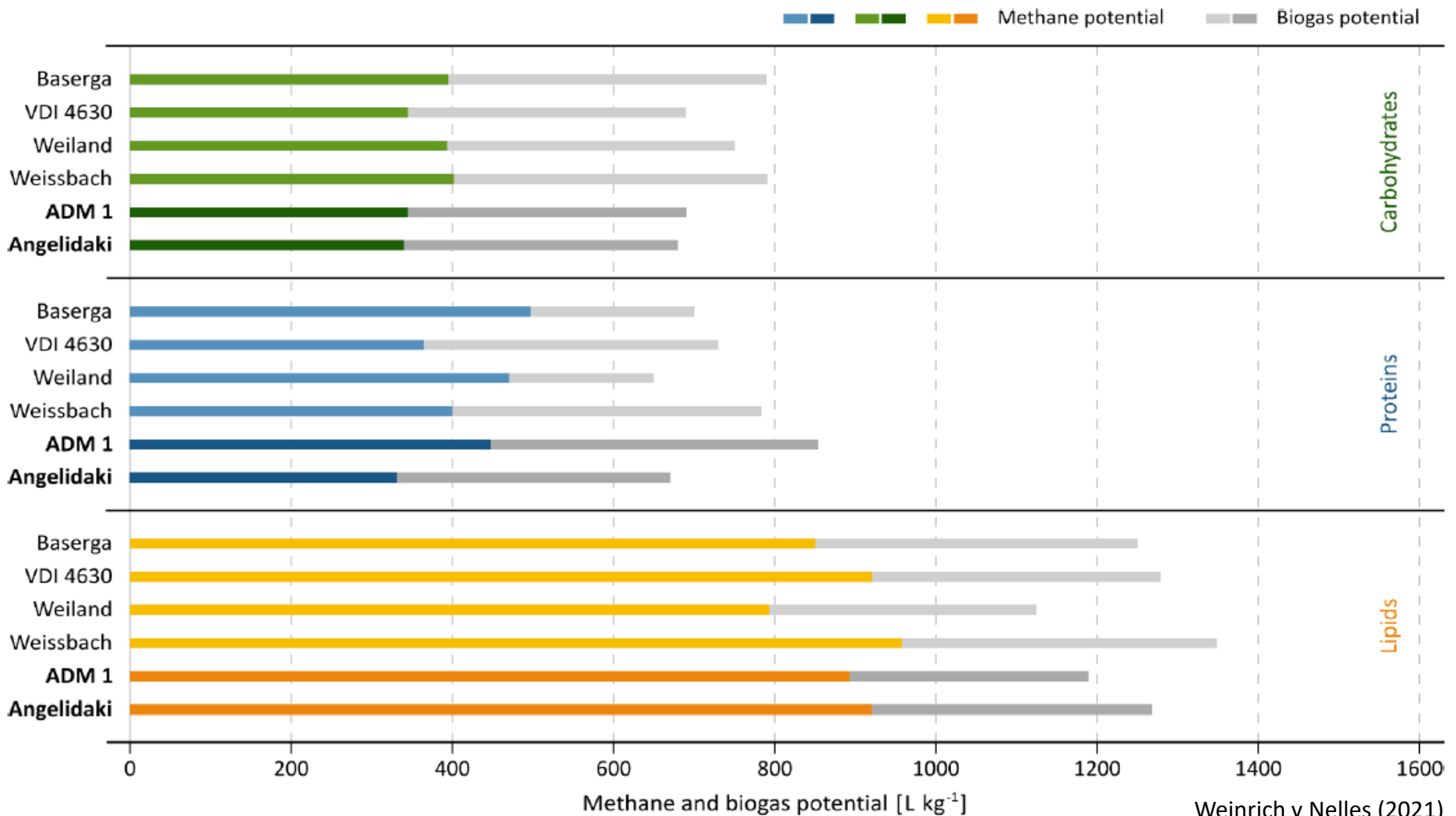
Ref: Vavilin, 2008



# 1.-Naturaleza de los sustratos:

Composición Química: BMP lípidos > BMP prot.> BMP carboh

En LCH<sub>4</sub>PTN/kgSV:                    ≈ 900                    ≈ 450                    ≈ 380



# 1.-Naturaleza de los sustratos :

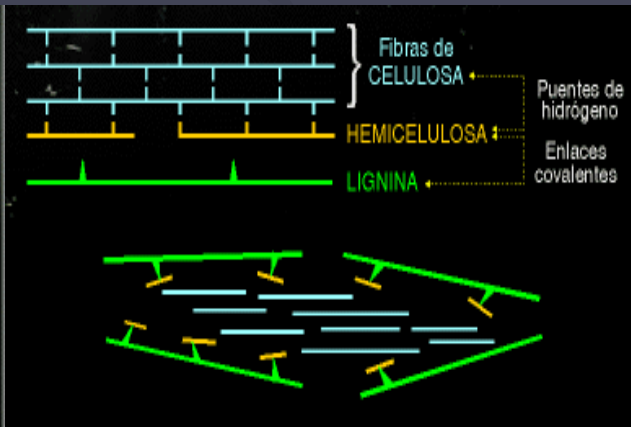
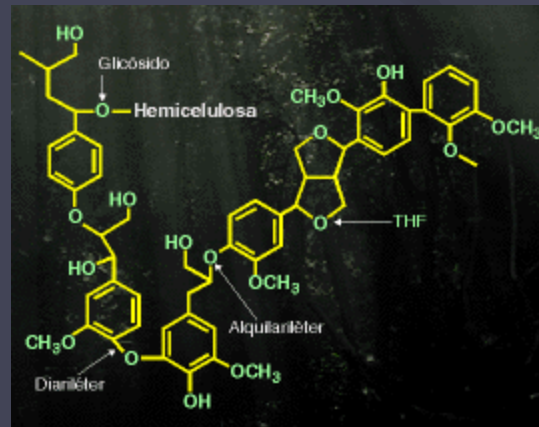
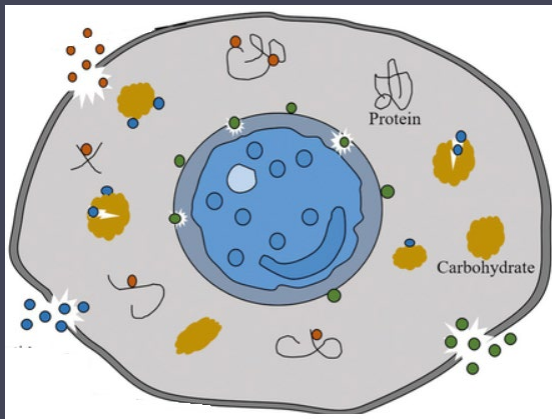
Superficie específica y tamaño de partícula:

Afecta velocidad de hidrólisis:

$$r = k_h A \cdot A$$

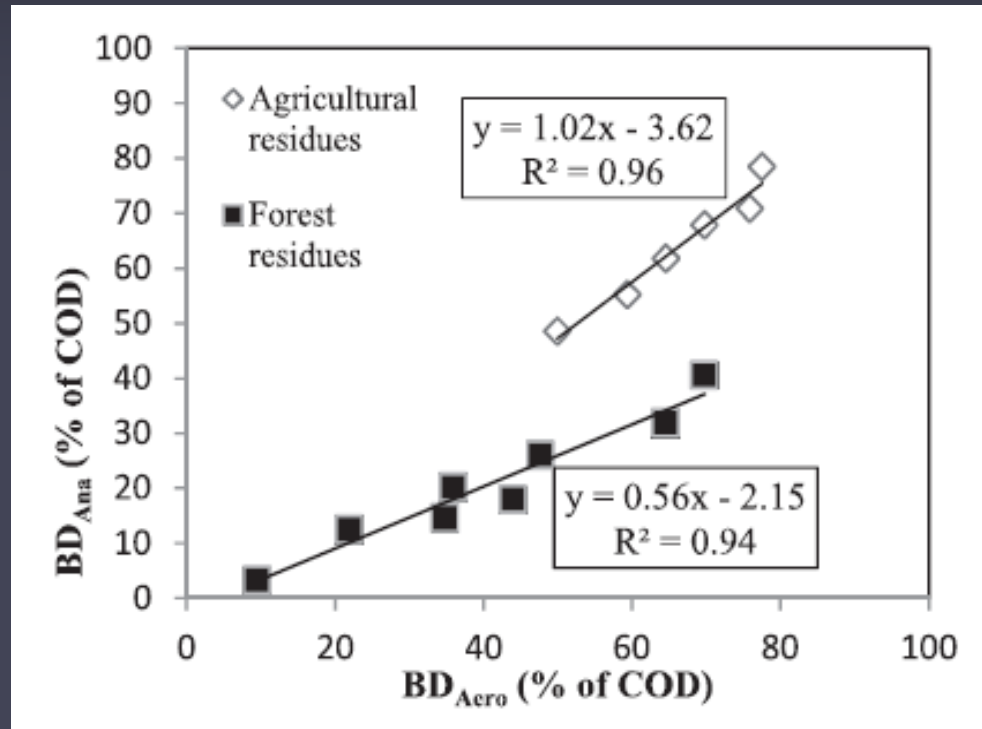
**Estructura Química:** Determina biodegradabilidad.

Ejs.: Estructura celular de los lodos secundarios o estructura lignocelulósica en tejidos vegetales



# 1.-Naturaleza de los sustratos:

Efecto de la lignina:



Residuos forestales: Lignina > 12%  
Residuos agrícolas: Lignina < 12%

## 2.-Concentración de sustratos :

Puede limitar la velocidad del proceso:

$$r = kh.S$$

(hidrólisis)

$$r = k.X.S/(k_s+S) = k.X/k_s. S$$

(metanogénesis)

Depende de que tan diluido esté el residuo en la alimentación, del modelo de flujo y del tiempo de residencia.

El valor mínimo del contenido de agua está limitado por :

- posibilidades de alimentación, mezclado y descarga
- concentración de inhibidores
- requerimientos de agua para la actividad microbiana
- requerimientos de agua para la transferencia de calor y masa

### 3.-Concentración de microorganismos :

Puede limitar la velocidad del proceso:

$$r = k_h X \cdot X_H$$

(hidrólisis)

$$r = k \cdot X \cdot S / (k_s + S) = k \cdot X$$

(metanogénesis)

Balance de X en un reactor continuo agitado (RCA)

En transitorio  $\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X - \frac{q \cdot X}{Vr}$

En E.E.  $\mu \cdot X = \frac{q \cdot X}{Vr}$

Siendo  $\mu$  la velocidad de crecimiento específico

Condición de lavado:  $\frac{dX}{dt} < 0$  Si  $\mu < q / Vr = 1 / \tau$

Si el  $\tau$  es muy bajo se pierde la población microbiana metanogénica acetoclástica, por ser la que tiene menor  $\mu$  ( $\mu = A M E_{M \cdot Y_M}$ )

## 4.- pH

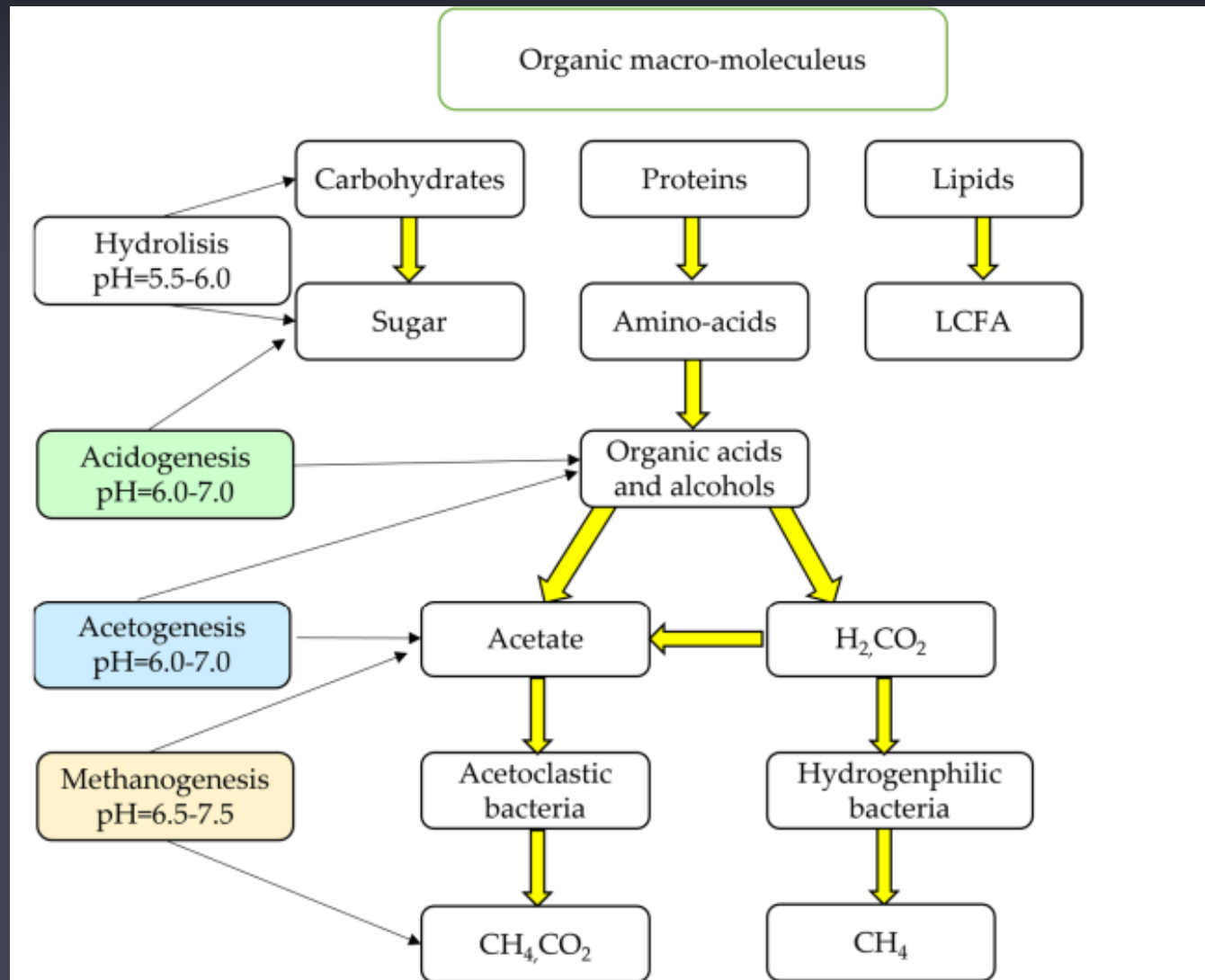


Figure 1. Flow chart of anaerobic digestion. Information collected from Pramanik et al., 2019 [2].

## 4.- pH

pH óptimo: 6.5-7.5 (para metanogénesis)

Resulta de los múltiples equilibrios de ácidos y bases débiles, de la alcalinidad y acidez mineral y del equilibrio con el  $\text{CO}_2(\text{g})$

Alcalinidad: Representa la capacidad buffer del sistema para evitar la bajada del pH por acumulación de AGV

En residuos sólidos orgánicos proviene fundamentalmente del  $\text{NH}_3$  producto de la hidrólisis de proteínas.

Se almacena fundamentalmente como  $\text{HCO}_3^-$



Se mide como Carbonato de Calcio equivalente.

Solo la alcalinidad debida al bicarbonato actúa dentro del rango de pH de operación.

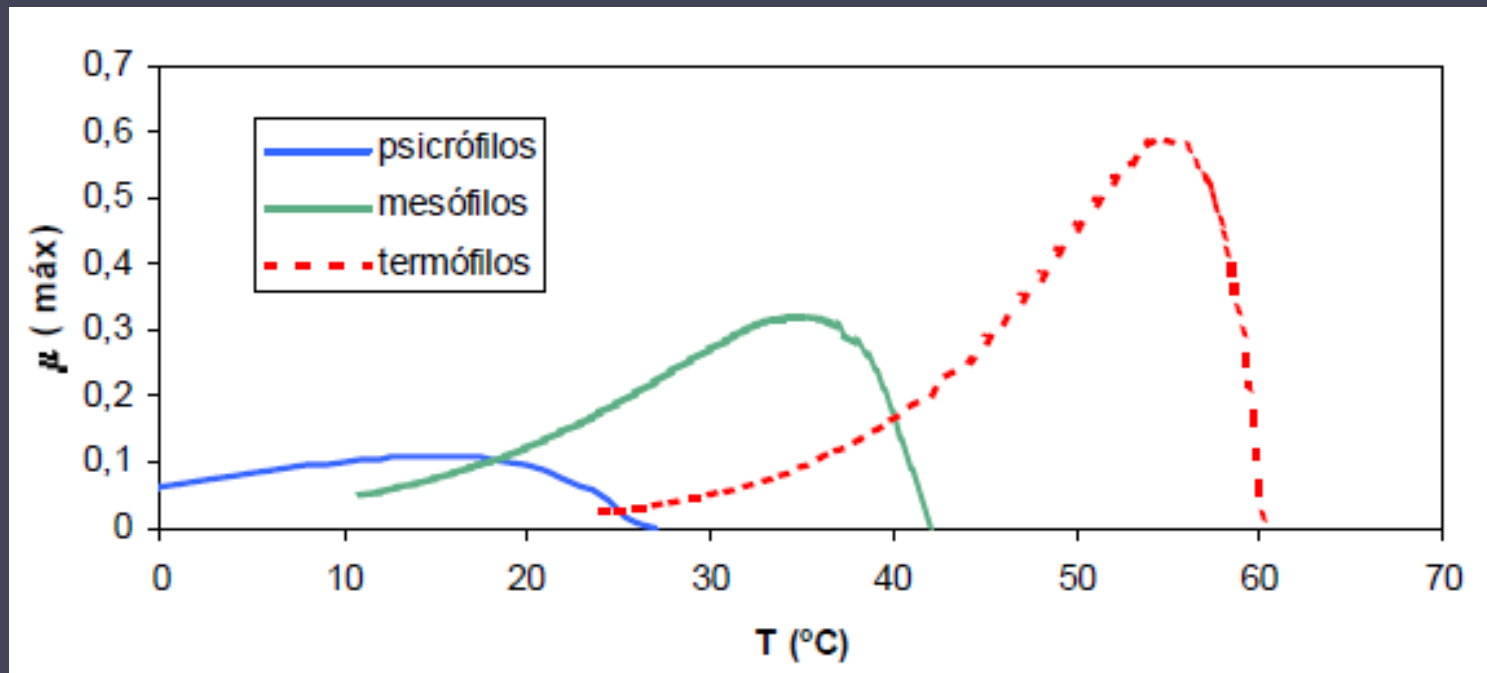
## 5.-Temperatura

Cinética enzimática sigue Arrhenius:  $K = A e^{-E_a/(RT)}$   
hasta la temperatura en que empieza la desnaturalización

Dos rangos óptimos:

Mesofílico: 20 a 40 °C

Termofílico: 40 a 60 °C



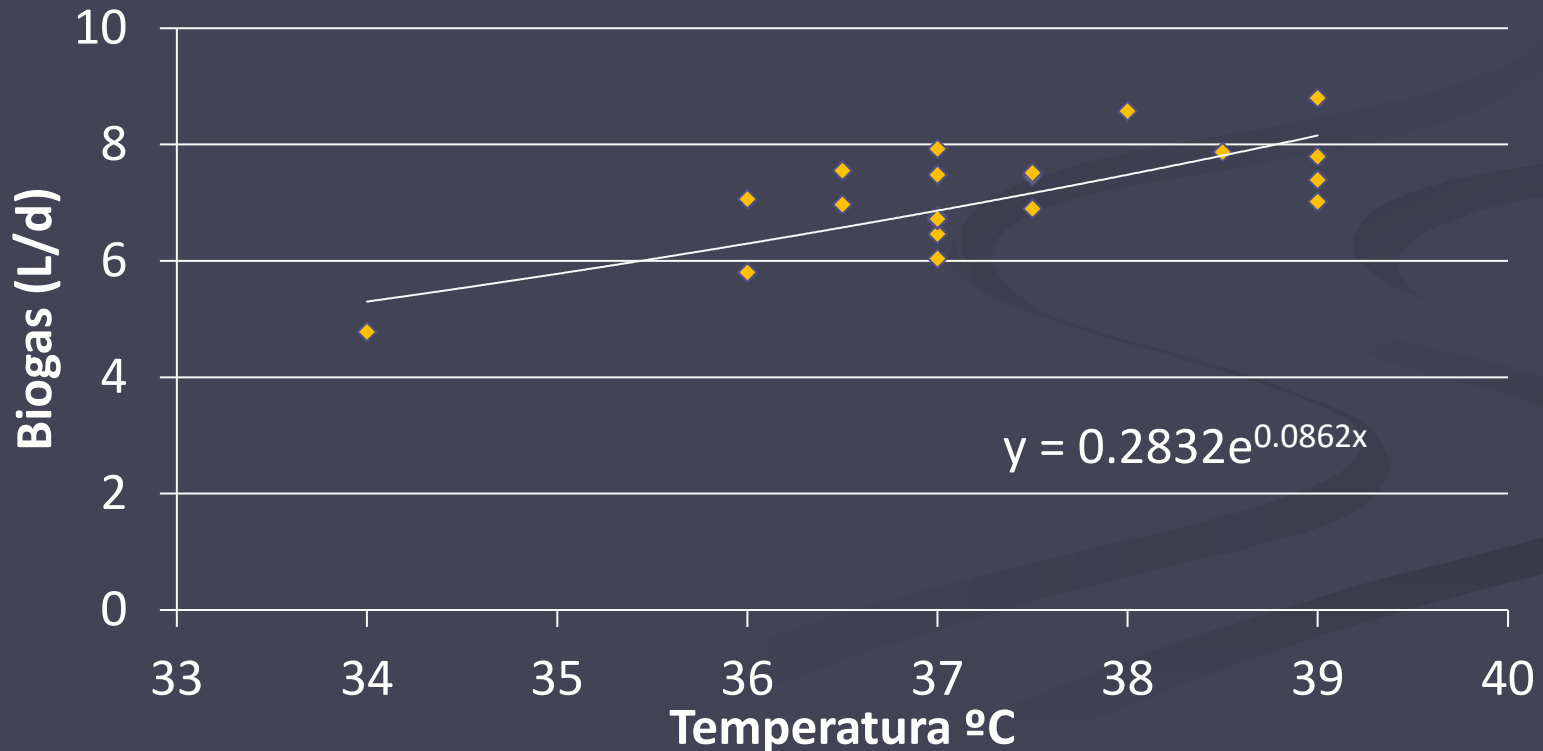
La velocidad se duplica aproximadamente cada 10°C (en meso y en termo)



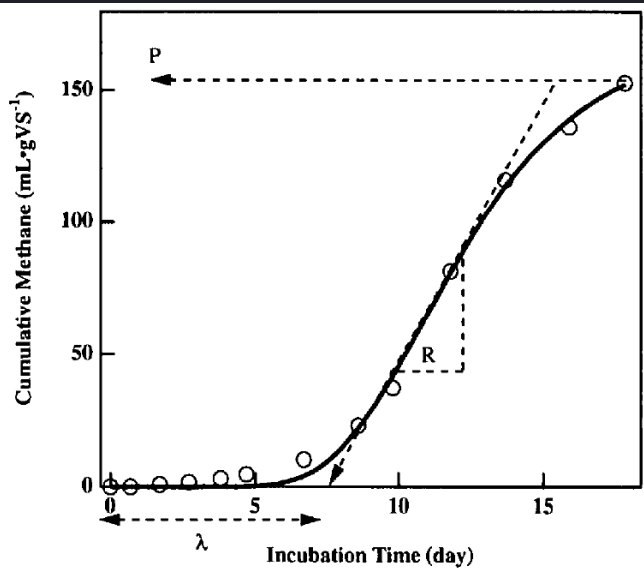
## 5.-Temperatura

$r(T) = r(T_0) e^{0.1(T-T_0)}$  con T en °C  
Safley y Westerman (1990)

### Efecto de la Temperatura (Reactor de 3,5L)



# 5.-Temperatura



$$P = A \cdot \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{Ue}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

Ecuación de Gompertz modificada.  
(para digestión en batch)

Ghatak, M. D., & Mahanta, P. (2017). Kinetic model development for biogas production from lignocellulosic biomass. *International Journal of Technology*, 8(4), 673-680. DOI: 10.14716/ijtech.v8i4.9491

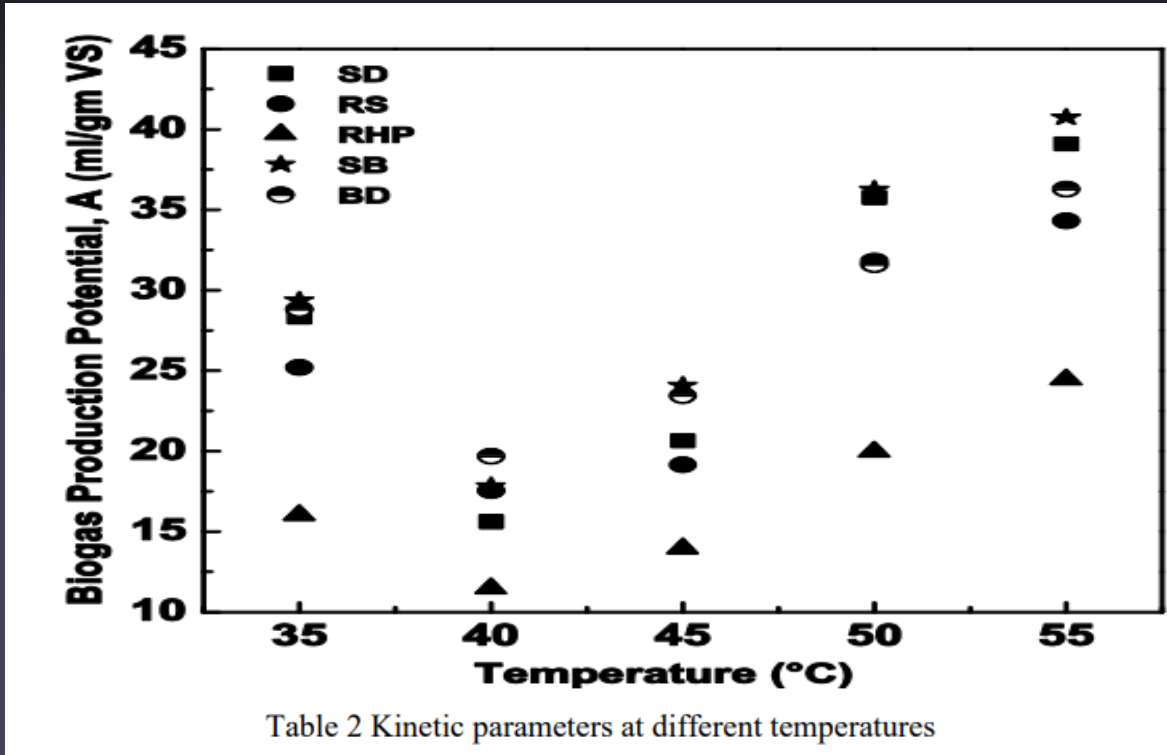
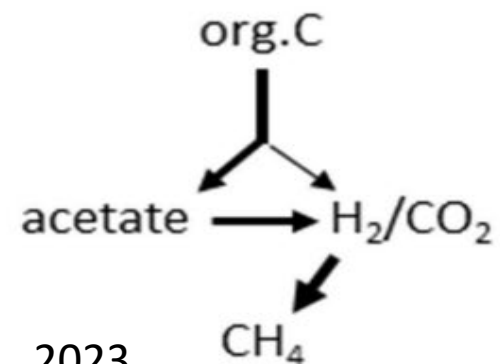
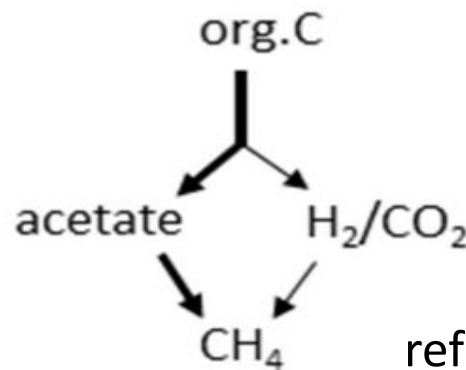
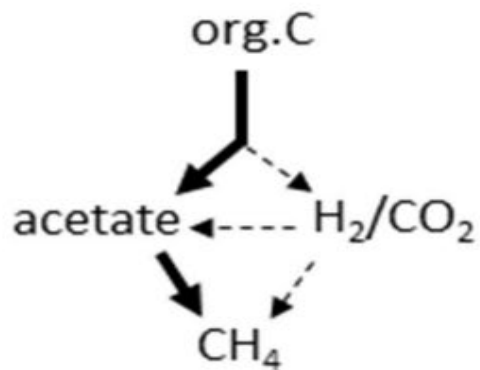
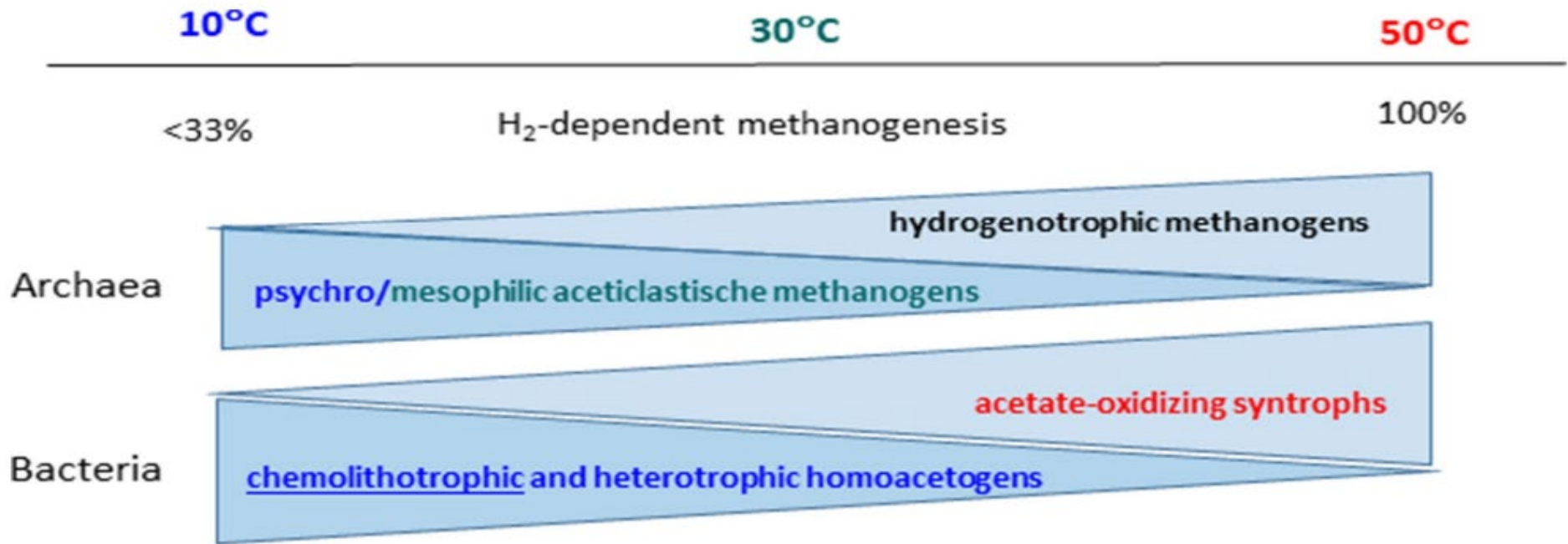


Table 2 Kinetic parameters at different temperatures

Substrates		35°C	40°C	45°C	50°C	55°C
Sawdust (SD)	A, (ml/gm VS)	28.333	15.619	20.644	35.770	39.106
	U, (ml/gm VS/day)	1.091	0.501	0.613	0.994	1.406
	λ, (days)	9.160	7.391	7.192	6.444	6.228
Rice straw (RS)	A, (ml/gm VS)	25.201	17.544	19.150	31.820	34.317
	U, (ml/gm VS/day)	1.091	0.669	0.759	1.445	1.493
	λ, (days)	10.261	10.016	9.760	9.621	8.735
Sugarcane bagasse (SB)	A, (ml/gm VS)	29.379	17.834	24.080	36.259	40.744
	U, (ml/gm VS)	1.192	0.759	0.897	1.304	1.405
	λ, (days)	9.465	9.265	8.732	7.876	6.570
Bamboo dust (SB)	A, (ml/gm VS)	28.820	19.682	23.447	31.576	36.278
	U, (ml/gm VS/day)	1.151	0.845	0.899	1.293	1.340
	λ, (days)	9.393	10.267	10.247	8.260	8.053

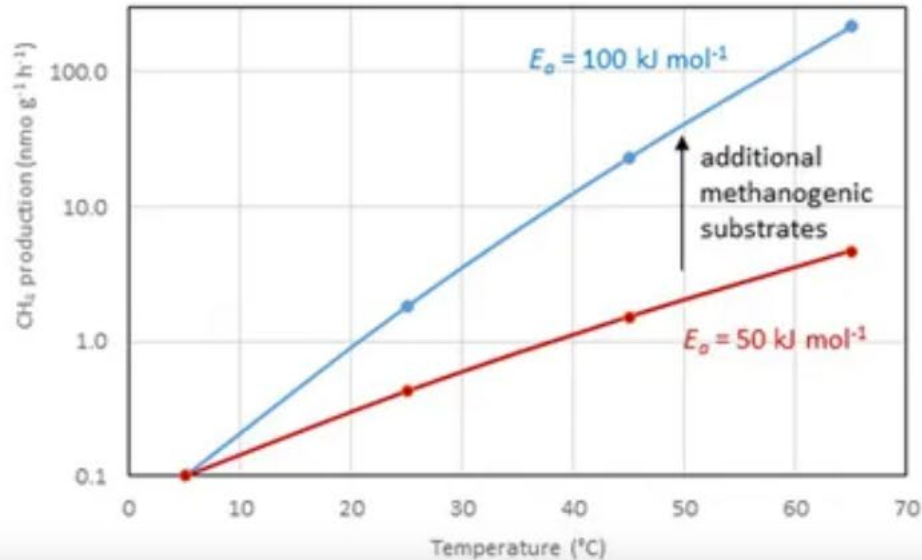
# 5.-Temperatura

El rango de temperatura también afecta a las vías metanogénicas



ref: Conrad , 2023

# 5.-Temperatura



CH<sub>4</sub> production and hydrolysis of organic matter by assuming  $E_a$  values of 100 and 50 kJ mole<sup>-1</sup>, respectively.

REVIEW article

Front. Microbiol., 05 July 2023

Sec. Biology of Archaea

Volume 14 - 2023 | <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1232946>

Efecto de una bajada de temperatura abrupta:  
Acumulación de AGV y posible acidificación

## 6.-Disponibilidad de macro y micronutrientes:

Relación DQO:N:P aproximada en microorganismos 100:12:2

Requerimiento de nutrientes para síntesis celular

	DQO	N	P	Y gSSV/gDQO
Anaerobio (carbohidratos)	350	5	1	0.14-0.17
Anaerobios (ácidos grasos)	1000	5	1	0.04
Aerobios	100	5-7	1	0.6

En general los macronutrientes son suficientes para anaerobios

## 6.-Disponibilidad de macro y micronutrientes:

La población metanogénica requiere para sus enzimas específicas varios micronutrientes en concentración de trazas: Ni, Fe, Co

Requerimiento del micronutriente en la alimentación:

$$R_n(\text{g/L}) = \text{DQO}(\text{g/L}) \cdot Y(\text{gSSV/gDQO}) \cdot C_n(\text{g/gSST}) \cdot \text{SST/SSV}$$

Elemento	Cn (g/gSST)
Fe	$7-28 \times 10^{-4}$
Ni	$0.65-1.8 \times 10^{-4}$
Co	$0.1-1.2 \times 10^{-4}$

En general los micronutrientes son suficientes para anaerobios  
La presencia de sulfuros puede limitar la disponibilidad

## 7.-Concentración de Inhibidores potenciales:

En residuos sólidos es crítico por la alta concentración general

### Definiciones

Inhibición metabólica: Es reversible porque solo inhibe el metabolismo sin dañar a los microorganismos.

Inhibición fisiológica: Es reversible pero no inmediatamente porque daña componentes celulares.

Biocida: Es irreversible porque mata a los microorganismos

%Inhibición =  $100 \times (1 - \text{Actividad con inhibidor} / \text{Actividad sin inhibidor})$

IC50= concentración del inhibidor que reduce un 50% la actividad metanogénica

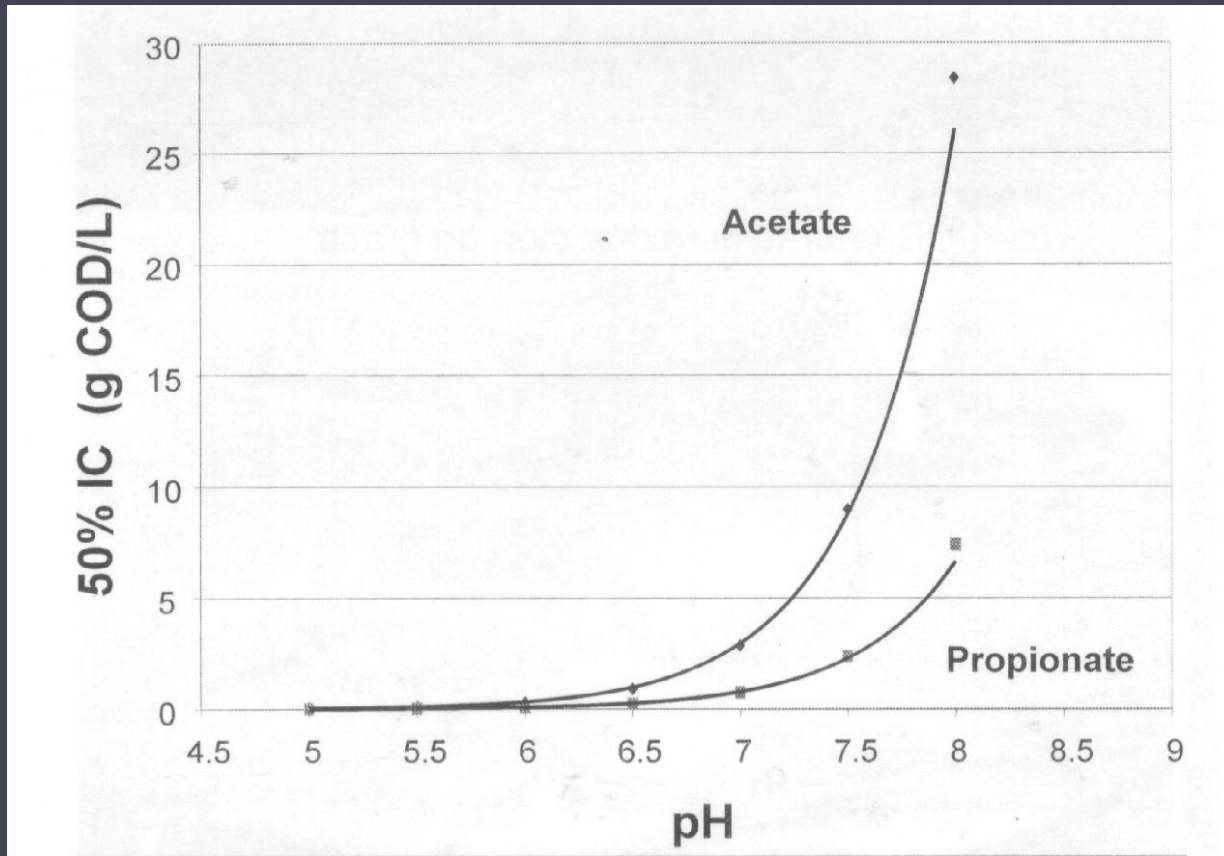
# Inhibidores Orgánicos:

## AGV:

Producto intermedio en la degradación.

Toxicidad debida fundamentalmente a la especie no iónica

La toxicidad se incrementa a bajos pH.





# Inhibidores Orgánicos:

## AGCL:

Producto de la hidrólisis de Lípidos.

Afecta las propiedades de la membrana celular por efecto detergente

Se adsorben al lodo afectando la transferencia de masa

Sinergia con AGV (refuerza Inhibición por sobrecarga aparente)

Se minimiza con adaptación/selección microbiana y RCA.

**Fenoles** (productos de hidrólisis de lignina)

**Terpenos** (presentes en resinas y aceites vegetales)

**Taninos** (polifenoles presente en cortezas, piel de uva, aloe, etc,)

**Cloroformo (CHCl<sub>3</sub>), tensoactivos, desinfectantes y otros sintéticos.**

# Inhibidores Inorgánicos:

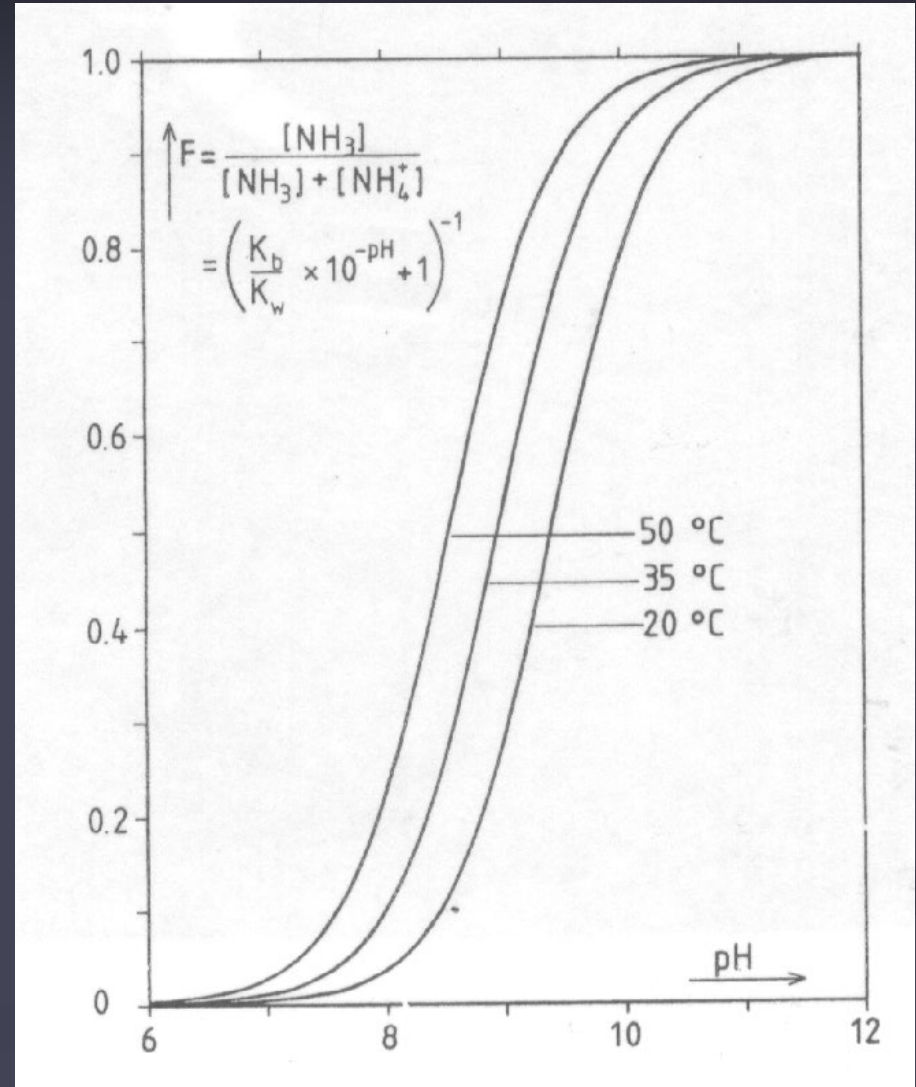
## NH<sub>3</sub>

Proveniente de la hidrólisis de proteínas.

Toxicidad fundamentalmente debida a la especie no iónica

La toxicidad se incrementa a altos pH  
altas temperaturas.

Altas relaciones C/N generan pH menores que limitan la toxicidad.



# Inhibidores Inorgánicos:

## NH3

Cálculo de NH<sub>3</sub>-N en función de Temperatura y N amoniacal total

$$K_a = 10^{-pK_a} = \frac{[H^+][NH_3]}{[NH_4^+]}$$

$$K_a = K_{a_{25}} * e^{\frac{51965}{R}(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{T})}$$

$$NH_3-N = \frac{[TAN]}{1 + 10^{pK_a - pH}}$$

Donde:

K<sub>a</sub> es la constante de disociación a T (K)

K<sub>A\_25</sub> es la constante de disociación a 25°C = 10<sup>-9.25</sup>

[TAN] es la concentración total de N amoniacal

R es la constante de los gases (8.314 J / (mol.K)).

# Inhibidores Inorgánicos:

## NH<sub>3</sub>

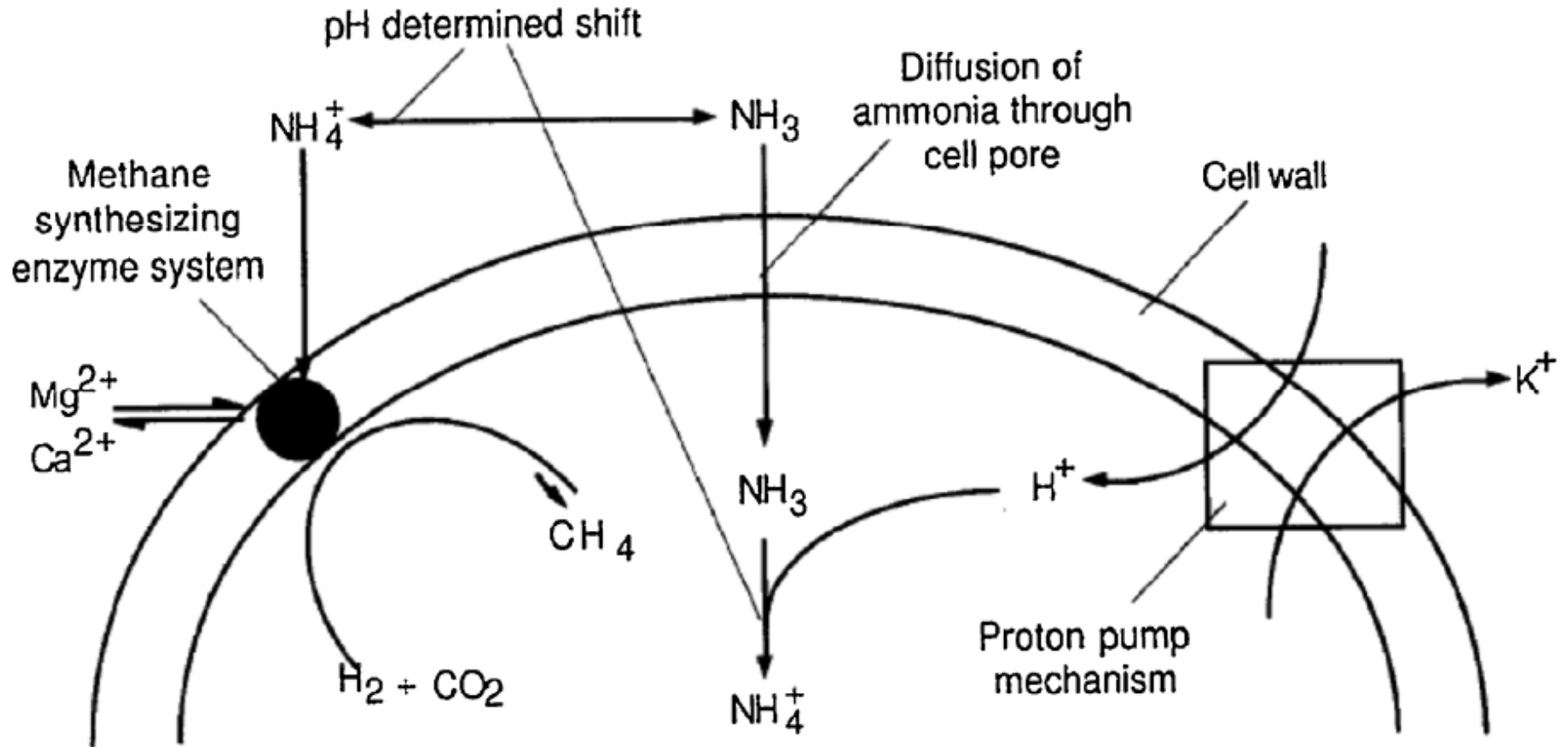


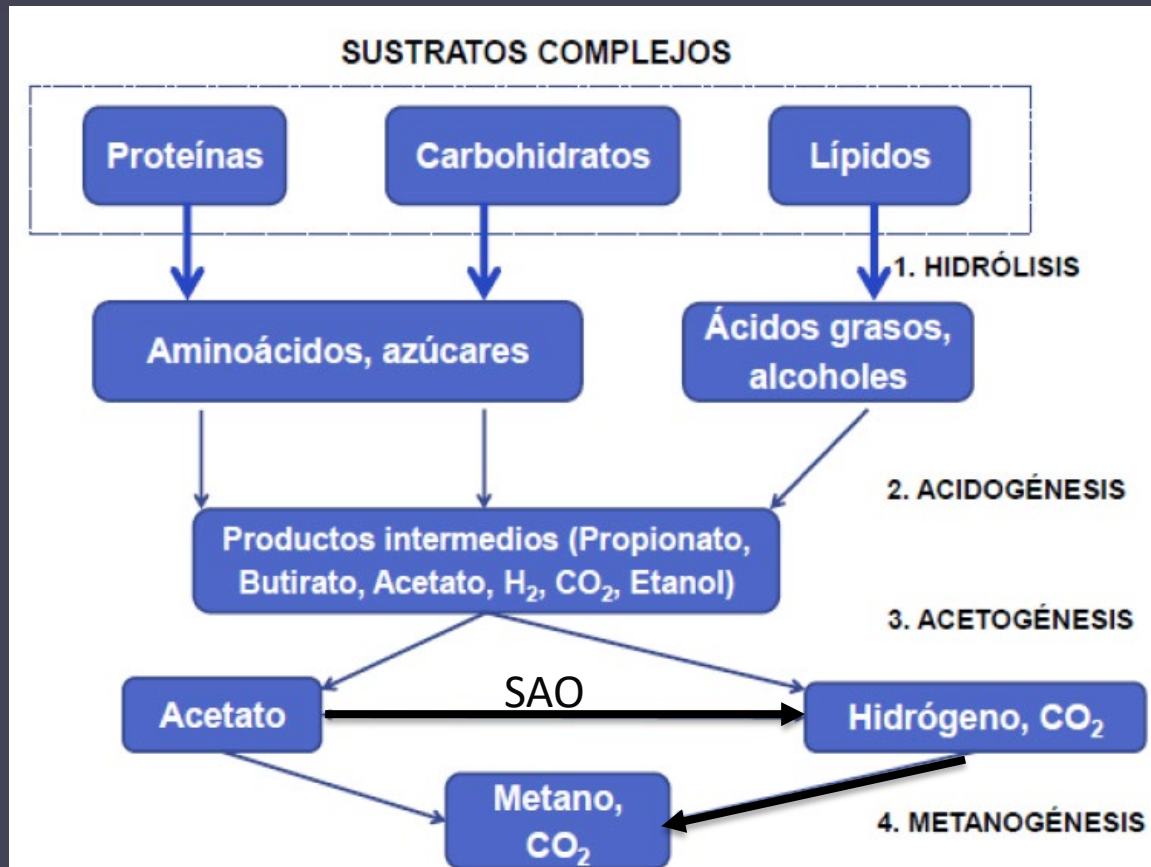
Fig. 1. Proposed mechanism of ammonia inhibition in methanogenic bacteria [12].

Gasto energético en bomba de protones y desbalance de cationes ( $\text{K}^+$ )

# Inhibidores Inorgánicos:

## NH<sub>3</sub>

Valores inhibitorios del orden de 50 ppm de amonio libre.  
Con varios meses de adaptación/selección puede soportar más de 1000mg/L mediante el cambio de la vía metanogénica predominante



# Inhibidores Inorgánicos:

## NH<sub>3</sub>

### Valores inhibitorios experimentales

Inhibition limit of FA and TAN in continuously fed reactors.

Temp. °C	Substrate	Reactor	Inoculum	Inhibition limit FA mgN l <sup>-1</sup>	Inhibition limit TAN g N l <sup>-1</sup>	% reduction in CH <sub>4</sub> production	pH
55	Soluble non-fat dry milk + NH <sub>4</sub> Cl	CSTR	Acclim		5.77	64	6.40
55	Cattle manure	CSTR	Acclim	600-800	NR		7.4-7.9
55	Cattle manure	UASB	Acclim	500	7.00	72	
50	Cattle manure	CSTR	NR	NR	1.70	Initial inhibition	NR
55	Cattle manure	Continuously fed reactor	NR	900	4.00	25	NR
55	Swine manure	CSTR	NR	1600	NR	70	7.97
60	Swine manure	CSTR	NR	2600	NR	96	8.15
55	OFMSW	Complete-mix reactor	NR	45	1.2		7.20
37	Food waste	CSTR	NR	> 1000	5.7	NR	> 7.5
55	OFMSW	CSTR	Acclim	680-690	3.4-3.5	50	7.60
37	OFMSW	CSTR	Acclim	220-280	3.0-3.7	50	7.60
55	OFMSW	CSTR with waste recirculation	Acclim	251	1.83	NR	NR

Note: Acclim = acclimatised; FA = Free Ammonia; NR = Not reported.

# Inhibidores Inorgánicos:

## H<sub>2</sub>S

Proveniente de la reducción de sulfato

La especie no iónica es la más inhibitoria.

La toxicidad se incrementa a bajos pH

Además, las sulfatoreductoras compiten con las metanogénicas.

## Metales

Mg<sup>+2</sup>, Ca<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>

Al<sup>+3</sup>, Cu<sup>+1+2</sup>, Cd<sup>+2</sup>, Ni<sup>+2+3</sup>, Pb<sup>+2+4</sup>, Cr<sup>+3+6</sup>

Efecto sinérgico y antagónico

Biodisponibilidad/Toxicidad

**Salinidad:** deshidratación por presión osmótica

## Oxígeno (O<sub>2</sub>)

Las metanogénicas son anaerobias estrictas

Las bacterias facultativas limitan el ingreso de O<sub>2</sub>

## 8.- Estabilidad de las condiciones

Para la selección natural de las comunidades microbianas más aptas para la operación de un reactor, es clave la estabilidad de las condiciones ambientales en el tiempo y en el espacio:

- temperatura,
- pH,
- concentración de sustratos, nutrientes y potenciales inhibidores

La agitación, además de facilitar la colonización del sustrato, favorece condiciones y uniformes, pero si es excesiva produce la disgregación de los consorcios microbianos que se estructuran en el espacio, orientados por una alta eficiencia.



# MODELADO de la DA de RESIDUOS SÓLIDOS

El modelado completo de la DA es de una gran complejidad pues aún para casos teóricamente sencillos como el RCAI, se requiere conocer:

- Concentración y caracterización de sustratos
- Estequiometría de las reacciones involucradas en el proceso
- Modelo cinético de múltiples reacciones en serie y en paralelo
- Posibles inhibiciones
- “Producción y consumo” de catalizadores diversos.
- Procesos de transferencia de masa
- Equilibrios químicos de tipo ácido-base

# MODELADO de la DA de RESIDUOS SÓLIDOS

**ADM1** Processes: 19 | Components: 34 | Parameters: 52 | Kinetics: Monod · first-order | Inhibitors: pH · H<sub>2</sub> · NH<sub>3</sub> · IN<sub>lim</sub>



**ADM1-R1** Processes: 17 | Components: 31 | Parameters: 44 | Kinetics: Monod · first-order | Inhibitors: pH · NH<sub>3</sub> · IN<sub>lim</sub>



**ADM1-R2** Processes: 12 | Components: 26 | Parameters: 38 | Kinetics: Monod · first-order | Inhibitors: pH · NH<sub>3</sub> · IN<sub>lim</sub>



**ADM1-R3** Processes: 6 | Components: 17 | Parameters: 24 | Kinetics: Monod · first-order | Inhibitors: pH · NH<sub>3</sub> · IN<sub>lim</sub>



**ADM1-R4** Processes: 4 | Components: 10 | Parameters: 11 | Kinetics: first-order



**PROBLEMA 1)** Para el tratamiento de 45 m<sup>3</sup>/d de un lodo de industria láctea se proyecta un digestor anaerobio de mezcla completa

El residuo tiene una densidad de 1000g/L y contiene 10% de sólidos totales, de los cuales el 90% son volátiles. Estos SV están compuestos por 40% lípidos, 50% proteínas y el restante 10% se asume que son carbohidratos.

Al someter el residuo al ensayo de BMP se obtienen 600 mLCH<sub>4</sub>/gSV. Al analizar el residuo luego del ensayo, se pudo estimar que se habían degradado el 90% de los lípidos, el 70% de las proteínas, y el 80% de los carbohidratos.

Ensayos de laboratorio permitieron determinar que la cinética de la digestión del lodo residual se ajusta a orden 1 con una constante de hidrólisis aparente a 35°C de 0.15 d<sup>-1</sup> respecto a los SV biodegradables.

- a) Asumiendo que la etapa limitante es la hidrólisis, estime el volumen de reactor requerido para recuperar el 80% del BMP, si opera a 35°C
- b) Estima el % de ST dentro del reactor.
- c) ¿Con que carga y TRH debería operar?
- d) Estima la relación molar entre el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> producido.
- e) Se sospecha que podría haber inhibición por N-NH<sub>3</sub>. Estima, asumiendo una concentración de acetato de 1.2 g/L en estado estacionario,

¿Cuál sería la concentración de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y de N-NH<sub>3</sub>?

Puede suponer que el residuo llega al proceso sin alcalinidad ni acidez significativa.