



*Tendencias en el tratamiento
Integral de Aguas Residuales*

Congreso Internacional Ambiental Manizales

“Tendencias en el tratamiento integral de aguas residuales”

Manizales, septiembre 18 - 21 de 2017



Centro para la
Formación Cafetera
SENA Regional Caldas



Instituto de Estudios Ambientales IDEA
Sede Manizales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



Universidad[®]
Católica
de Manizales





UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

CÁLCULO TEÓRICO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MANIZALES MEDIANTE CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA

JUAN PABLO MARISCAL MORENO
Ingeniero Químico, MSc
Estudiante Doctorado en Ingeniería – Automática

BEATRIZ HELENA ARISTIZÁBAL ZULUAGA
Ingeniera Química, PhD
Docente del Departamento de Ingeniería Química

MILLER ALONSO CAMARGO-VALERO
Ingeniero Químico, PhD
Lecturer at University of Leeds

GRUPO DE TRABAJO ACADÉMICO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL
LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales



RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS



AGUAS RESIDUALES URBANAS

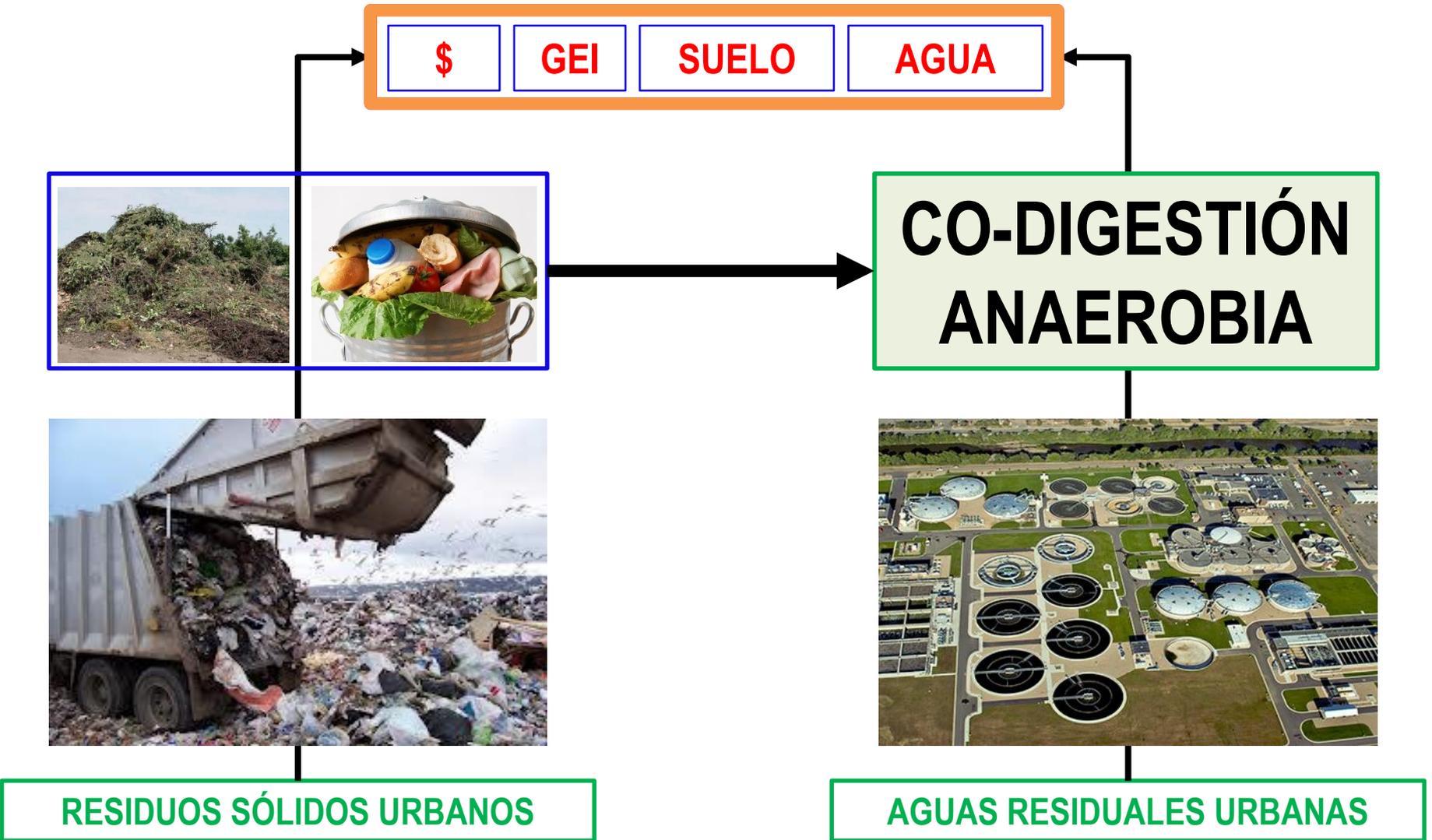


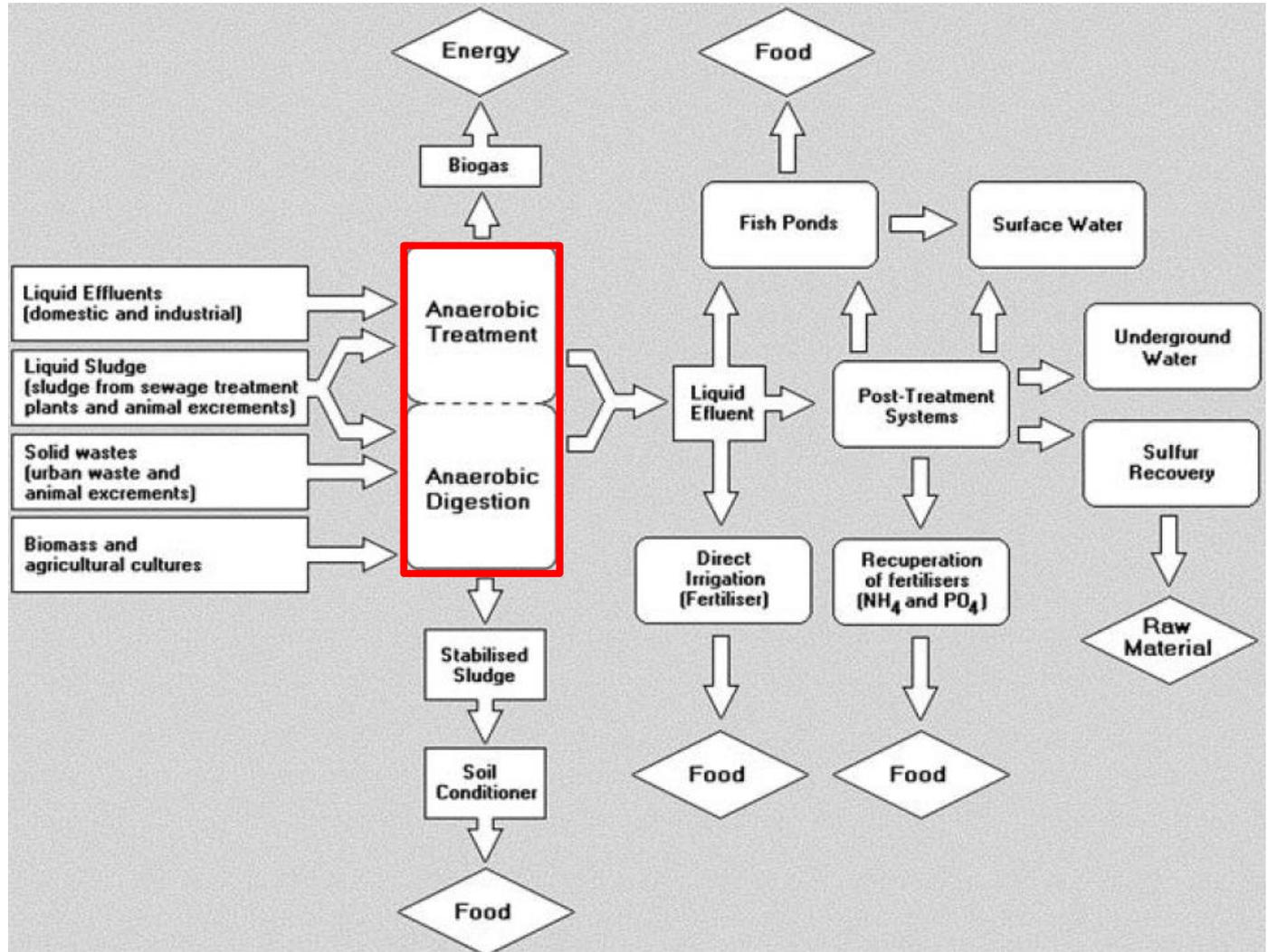
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS



AGUAS RESIDUALES URBANAS







INTRODUCCIÓN

ESTADO DEL MANEJO AGUAS RESIDUALES (MUNDO)

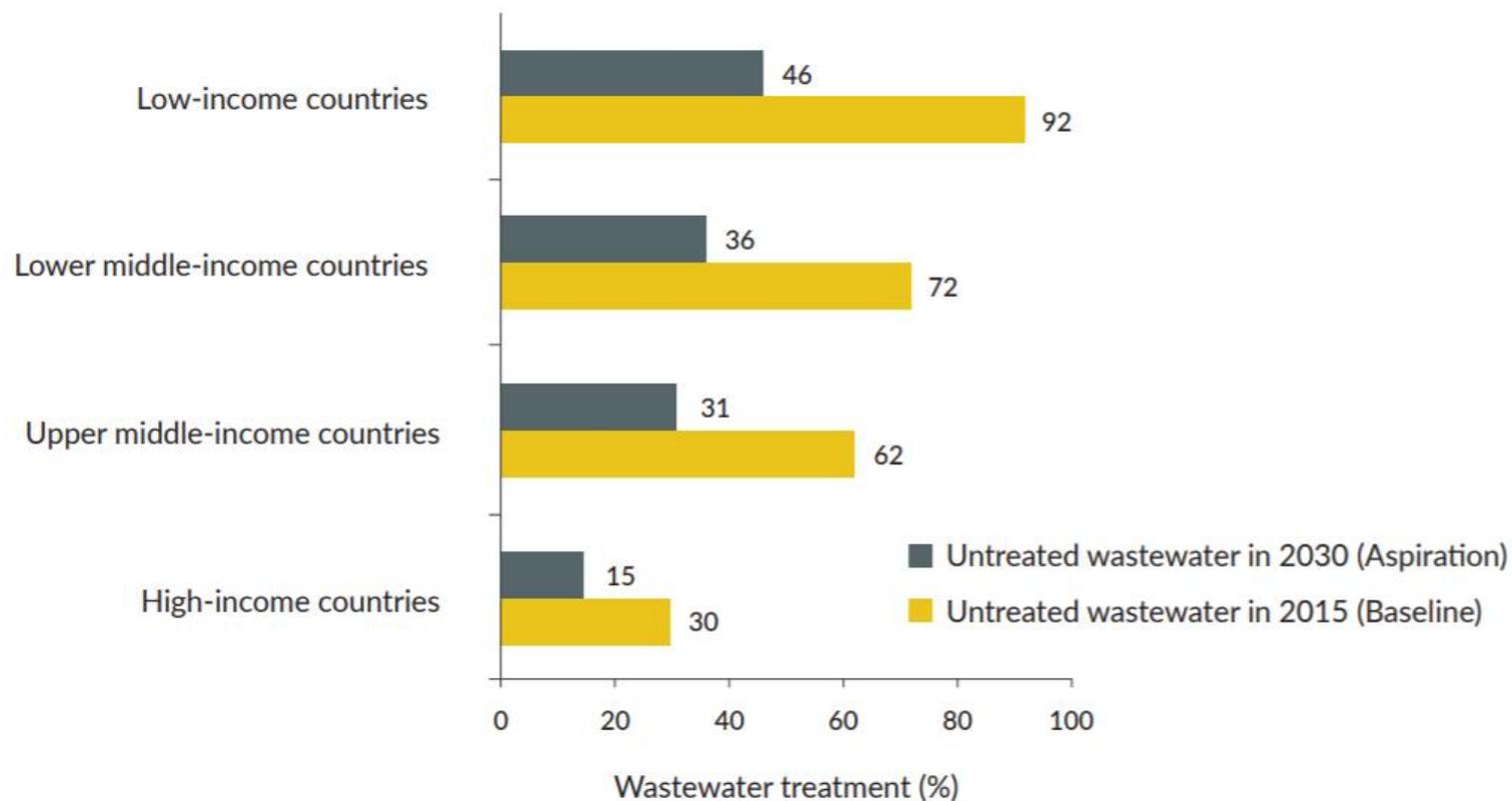


Figura. Porcentaje de agua residual no tratada a nivel mundial de acuerdo con el nivel de ingreso. Valores a 2015 y proyecciones a 2030.

INTRODUCCIÓN

ESTADO DEL MANEJO AGUAS RESIDUALES (COLOMBIA)

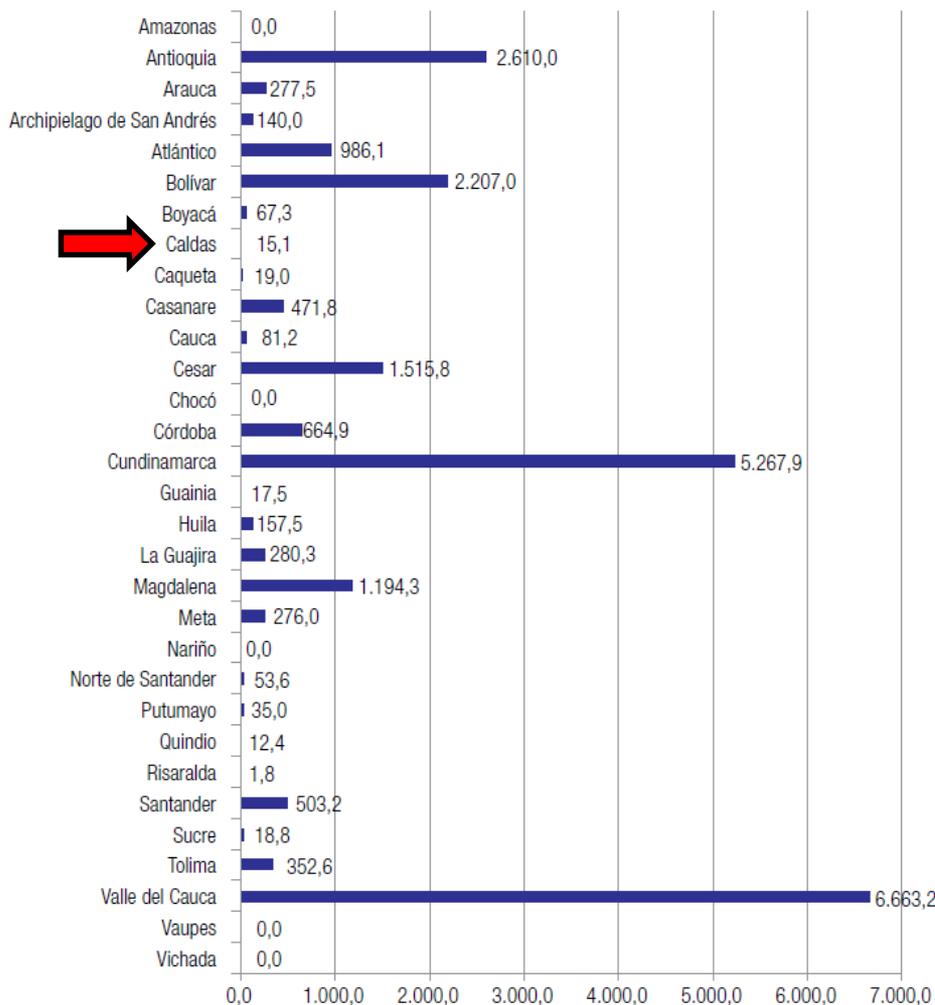


Figura. Caudal medio de agua residual urbana tratado por departamento (l/s)

44% de los municipios cuentan con sistemas de tratamiento

31% del caudal de agua residual es tratado (capacidad instalada para tratar el 51%)

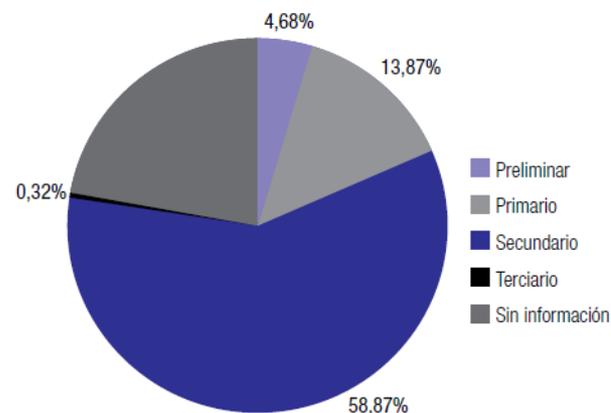


Figura. Tipo de tratamiento (%)

PND: 41% del caudal de agua residual en 2018

INTRODUCCIÓN

ESTADO DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS (MUNDO)

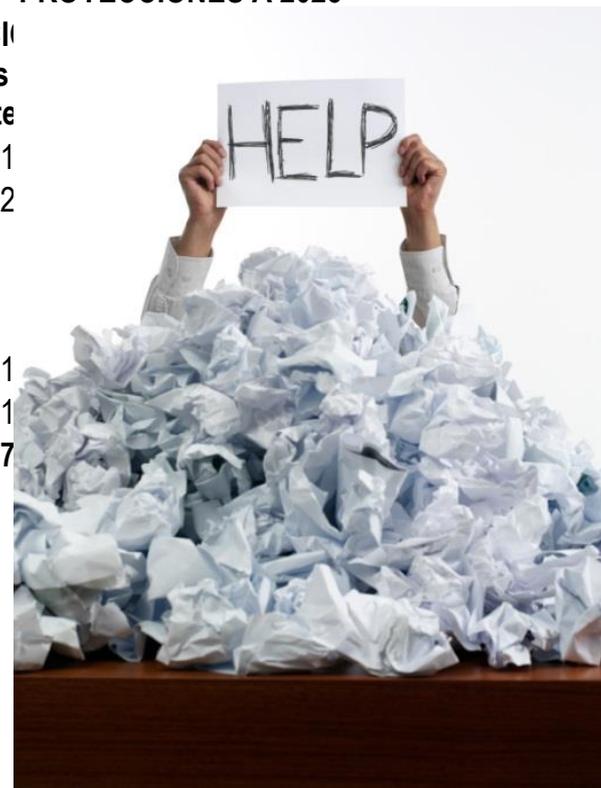
Tabla. Generación de RSU a nivel mundial

| Información Actual | Región | Proyecciones a 2025 | | | |
|--------------------|--------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------|
| | | Población (millones de habitantes) | Generación de RSU | | |
| | | | Por persona (kg/hab/día) | Total (miles ton/día) | |
| 0.65 | AFR | 169.1 | 1260 | 0.85 | 469.8 |
| 0.95 | EAP | 738.9 | 2727 | 0.95 | 1868.9 |
| 1.1 | ECA | 254.4 | 329 | 1.5 | 354.8 |
| 0.93 | ALC | 437.5 | 699 | 0.96 | 428.5 |
| 1.1 | MENA | 173.5 | 362 | 1.43 | 369.5 |
| 0.45 | SAR | 192.4 | 1026 | 0.43 | 1702.4 |
| 2.2 | OECD | 1566.3 | 1029 | 2.2 | 1566.3 |
| 1.2 | Total | 3532.2 | 2080 | 1.2 | 6662.2 |

PROYECCIONES A 2025

POBLACIÓN (millones habitante)

1
2
1
1
7



2200 millones ton/año

US 375 mil millones /año

PIB COLOMBIA 2016 = US 282.5 mil millones

AFR: África. EAP: Pacífico y Asia oriental. ECA: Europa Oriental y Asia central. ALC: América Latina y El Caribe.

MENA: Medio Oriente y Norte de África. SAR: Sur de Asia. OECD: Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD)

Tomado de: (World Bank, 2012; World Bank, 2017)

Tabla. Generación de RSU en Colombia

| AÑO | RESIDUOS SÓLIDOS REPORTADOS (ton/día) |
|------|---------------------------------------|
| 2010 | 26537 |
| 2011 | 24647 |
| 2012 | 26726 |
| 2013 | 25054 |
| 2014 | 26528 |

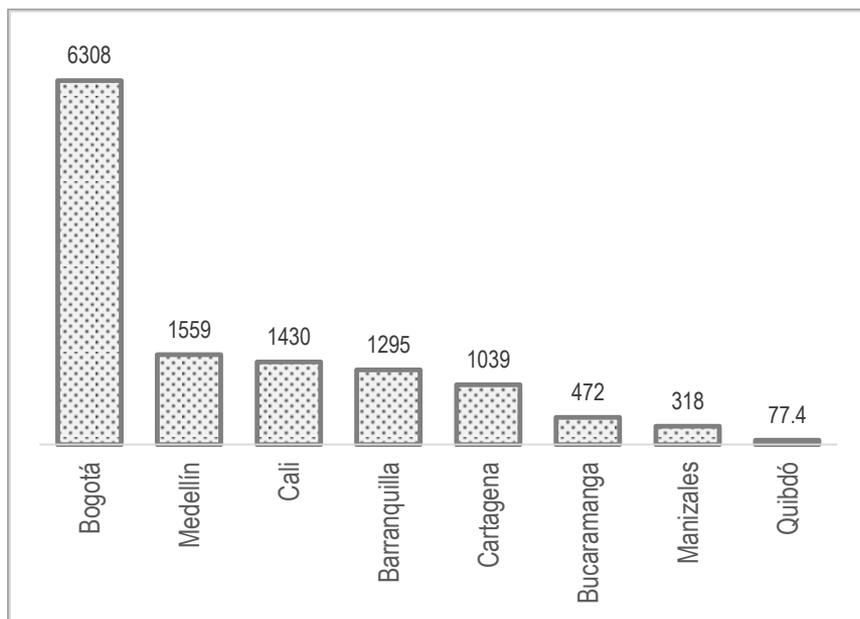


Figura. Generación de RSU por ciudad en Colombia en ton/día

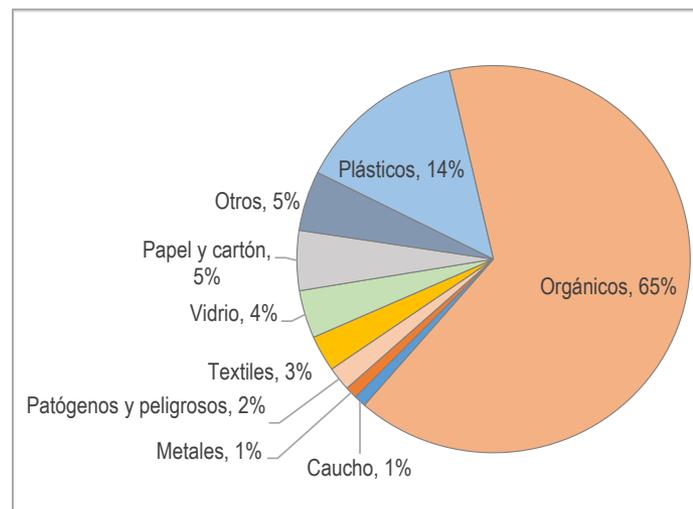


Figura. Caracterización promedio de RSU llevados a zonas de disposición en Colombia

INTRODUCCIÓN

ESTADO DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS (COLOMBIA)

Figura. Distribución de municipios por tipo de sistemas de disposición final

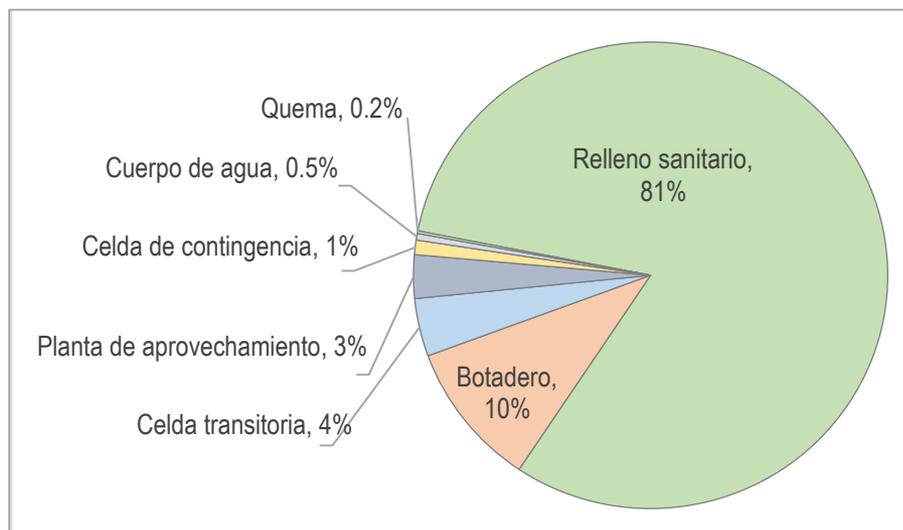
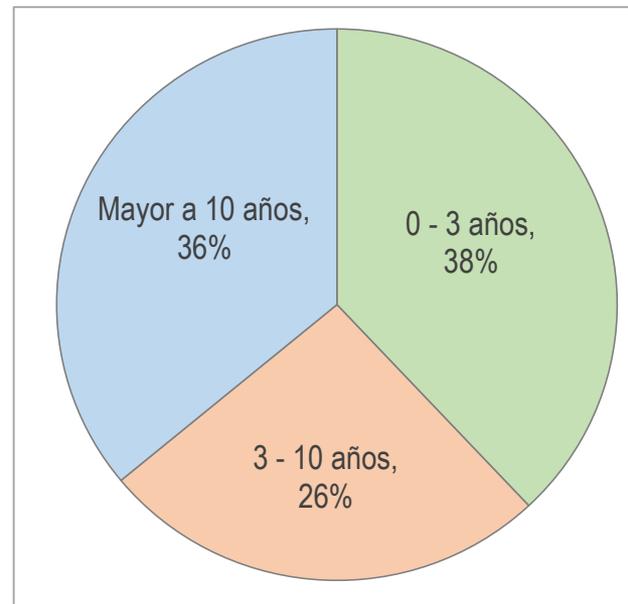


Figura. Vida útil de sistemas de disposición final



BOGOTÁ (Doña Juana)
6323 ton/día
2021

Pereira (La Gloria)
901 ton/día
2024

Manizales (La Esmeralda)
500 ton/día
2019

BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS



**Conditions
at point of
arising
Storage**

**Collect
Sorted
Items**

**Transport
Minimise**

Process
(De-pollute)
(Extract value)

**End of
Waste**

Disposal

Phase out

\$ **GEI** **SUELO** **AGUA**

INTRODUCCIÓN
WTE – WASTE TO ENERGY



WASTE TO ENERGY (WTE)

ÁREA RELACIONADA CON LAS TECNOLOGÍAS Y ESQUEMAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

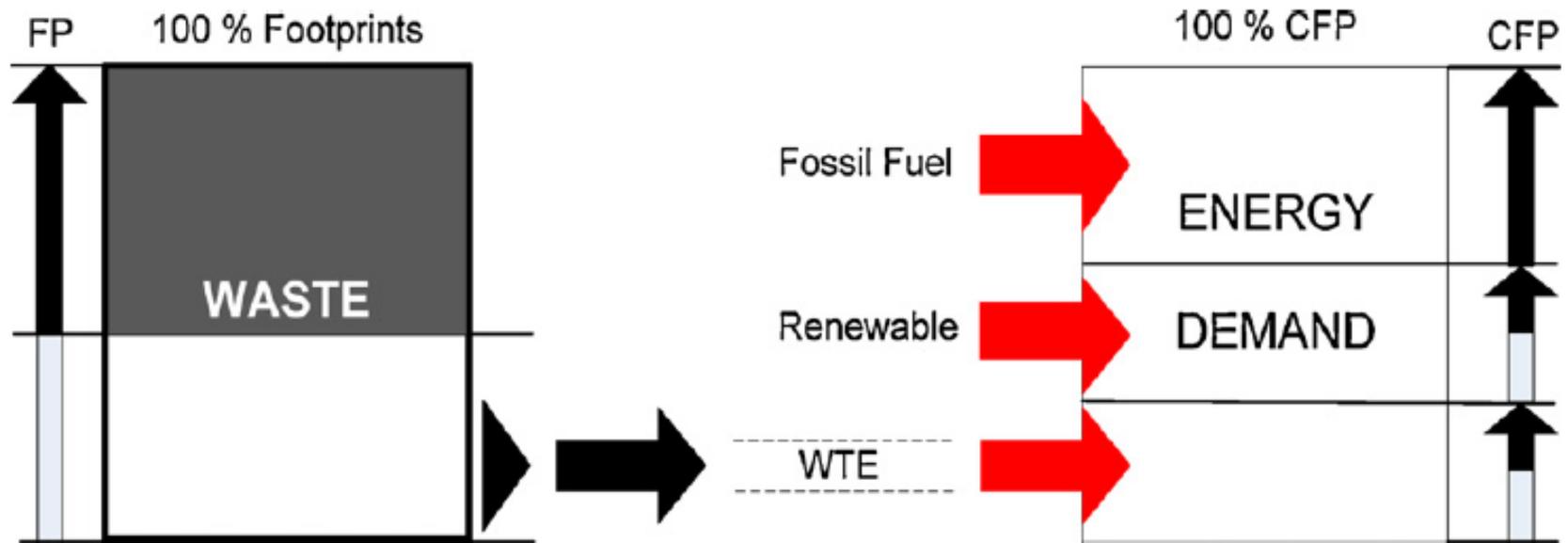


Figura. Ventajas de la implementación de tecnologías WTE

La selección de tecnologías está influenciada por el tipo y **CONDICIONES** de la biomasa, así como por el costo de implementación de cada una.

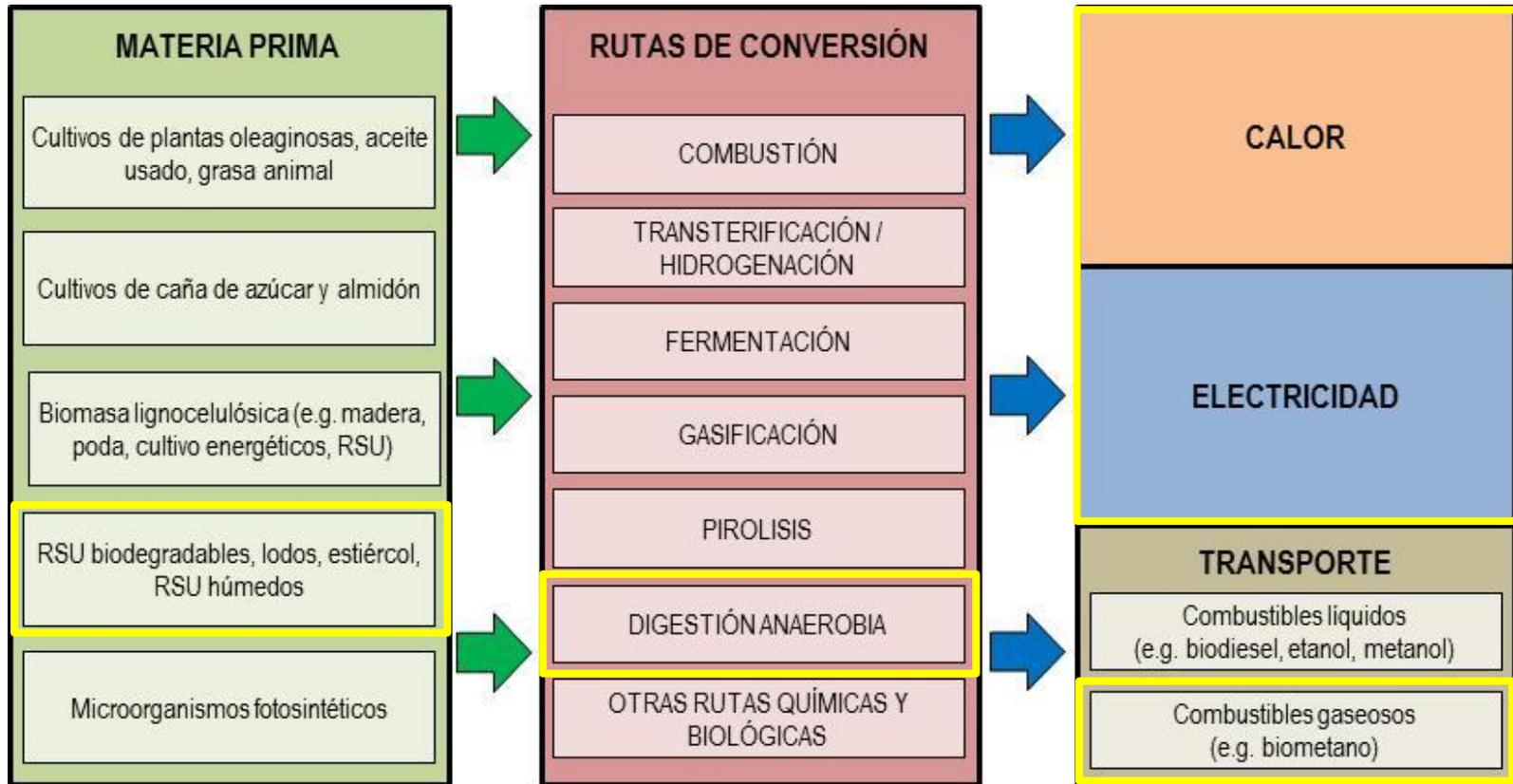
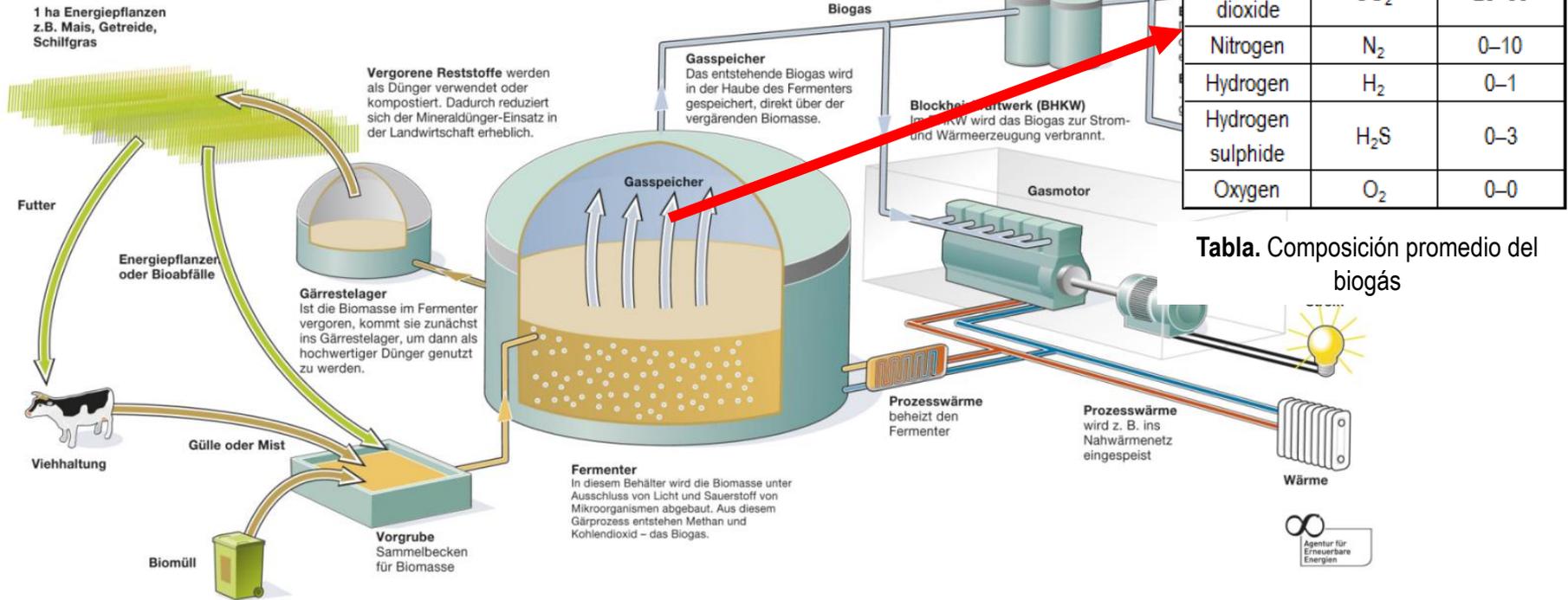


Figura. Rutas para la conversión de biomasa en energía

Figura. Proceso general de aprovechamiento de residuos orgánicos mediante DA

Biogas-Anlage

Für die Biogasproduktion eignen sich Gülle und feste Biomasse. Mit einem Rind von 500 kg Gewicht kann pro Tag z. B. eine Gasausbeute von maximal 1,5 Kubikmeter erzielt werden. Energetisch entspricht dies in etwa einem Liter Heizöl. Nachwachsende Rohstoffe liefern jährlich zwischen 6 000 Kubikmeter (Wiesengras) und 12 000 Kubikmeter (Silomais/Futterrüben) Biogas pro Hektar Anbaufläche.



DIGESTIÓN ANAEROBIA

Es el proceso biológico en el cual, a través de una serie de reacciones interconectadas, la materia orgánica (p.e. carbohidratos, proteínas, lípidos y compuestos más complejos) es transformada en metano, dióxido de carbón, hidrógeno, otros compuestos volátiles y biomasa anaerobia, en un ambiente libre de oxígeno

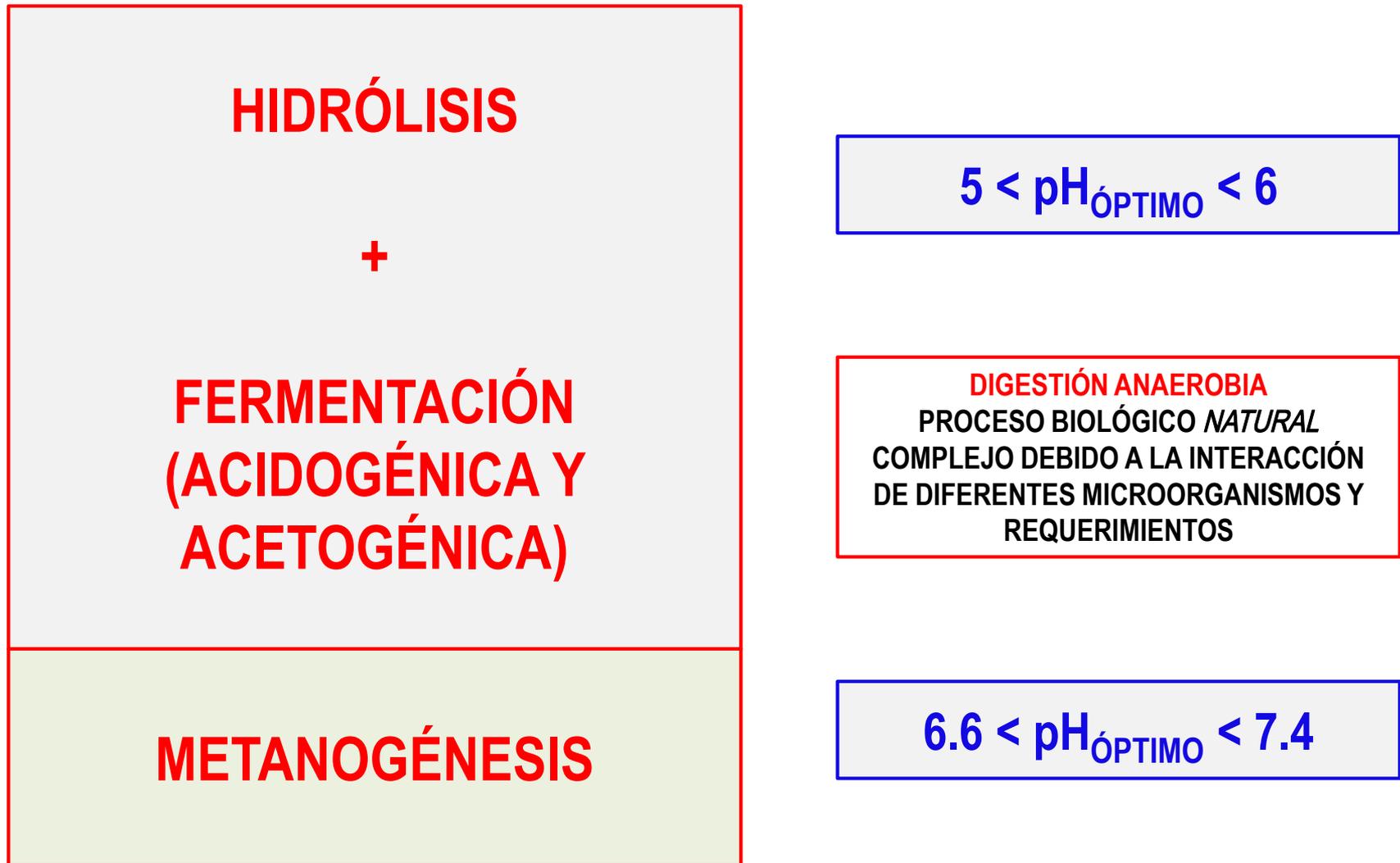
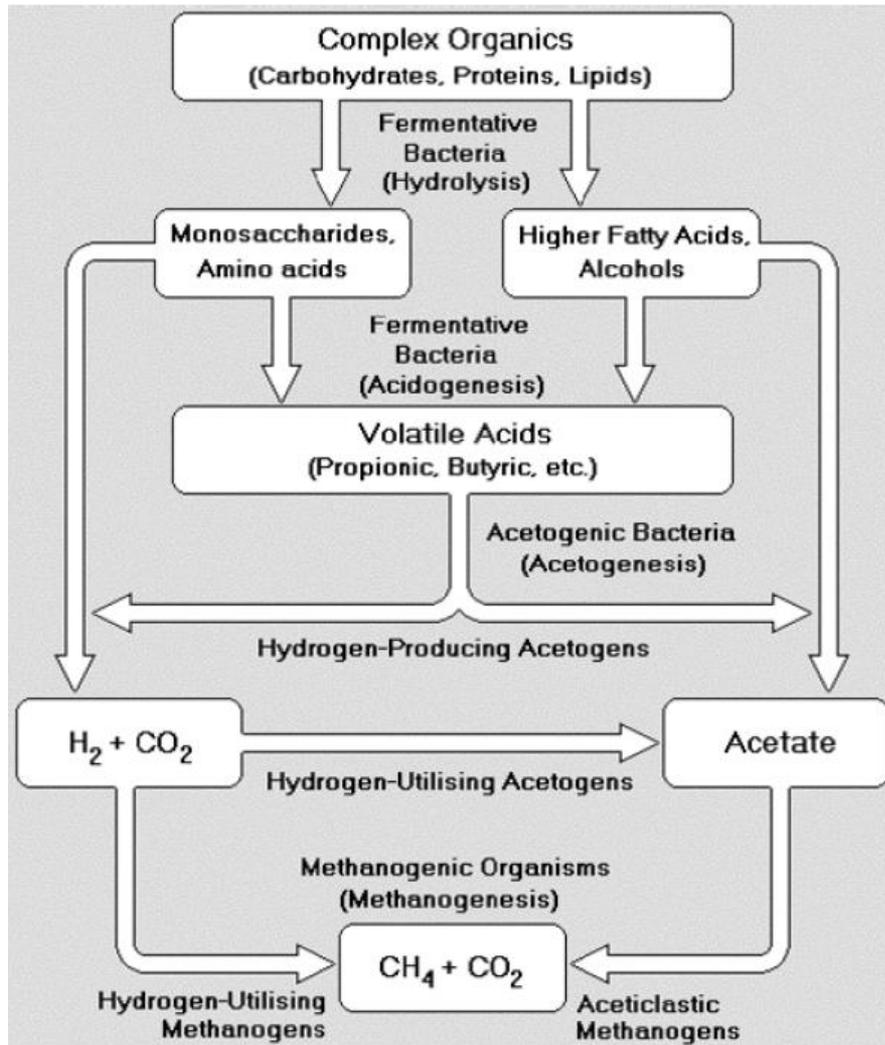


Figura. Ruta de degradación de compuestos orgánicos de forma anaerobia



$5 < \text{pH}_{\text{ÓPTIMO}} < 6$

DIGESTIÓN ANAEROBIA
 PROCESO BIOLÓGICO *NATURAL*
 COMPLEJO DEBIDO A LA INTERACCIÓN
 DE DIFERENTES MICROORGANISMOS Y
 REQUERIMIENTOS

$6.6 < \text{pH}_{\text{ÓPTIMO}} < 7.4$

Figura. Ruta de degradación de compuestos orgánicos de forma anaerobia

Figura. Plantas de producción de biogás en Europa, 2014

| Country | Biomethane plants | Biomethane plants feeding the grid | Biogas plants (incl. LFG, sewage, agricult.) | Agricultural | Biowaste (incl. organic MSW) | Sewage | Landfill gas |
|-------------|-------------------|------------------------------------|--|--------------|------------------------------|----------|--------------|
| Austria | 10 | 7 | 503 | approx. 300 | 55 | 134 | 14 |
| Croatia | - | - | 12 | 9 | - | 2 | 1 |
| France | 3 | 3 | 269 | 40 | 98 | 60 | 71 |
| Germany | 150 | 148 | 9.200 | 7.400 | 100 | 1.700 | |
| Hungary | 1 | - | 58 | 36 | - | 14 | |
| Italy | - | 2 | 1,3 | app. 1.000 | 32 | 60 | 8 |
| Netherlands | 15 | 15 | 130 | | | | 220 |
| Poland | - | - | 219 | 30 | 2 | app. 200 | |
| Slovakia | - | - | 57 | 34 | 4 | 10 | 9 |
| UK | 4 | 4 | 360 | 60 | | 100 | > 200 |
| Sweden | 47 | 11 | 242 | 26 | 26 | 135 | 55 |
| Switzerland | 17 | 15 | 600 | 140 | | 460 | |

Figura. Rendimiento de diferentes biocombustibles

| Biofuel | Diesequiv. l/ha | Operational range at 6l diesel per 100 km |
|------------|-----------------|---|
| Biodiesel | 1.200 | 20.000 km |
| Bioethanol | 2.000 | 33.000 km |
| BTL | 3,800 ? | 63.000 km |
| Biomethane | 4.000 | 66.000 km |

New Scientist

HOME NEWS TECHNOLOGY SPACE PHYSICS HEALTH EARTH HUMANS LIFE TOPICS EVENTS JOBS

Home | News | Earth

DAILY NEWS 20 June 2017

Sweden commits to becoming carbon neutral by 2045 with new law



Nordic drive towards renewables
ERIK MARTENSSON/AFP/Getty



INTRODUCCIÓN

WTE – WASTE TO ENERGY – DIGESTIÓN ANAEROBIA



New Scientist

HOME NEWS TECHNOLOGY SPACE PHYSICS HEALTH EARTH HUMANS LIFE TOPICS EVENTS JOBS

Home | News | Earth

DAILY NEWS 20 June 2017

Sweden commits to becoming carbon neutral by 2045 with new law



Nordic drive towards renewables
ERIK MARTENSSON/AFP/Getty

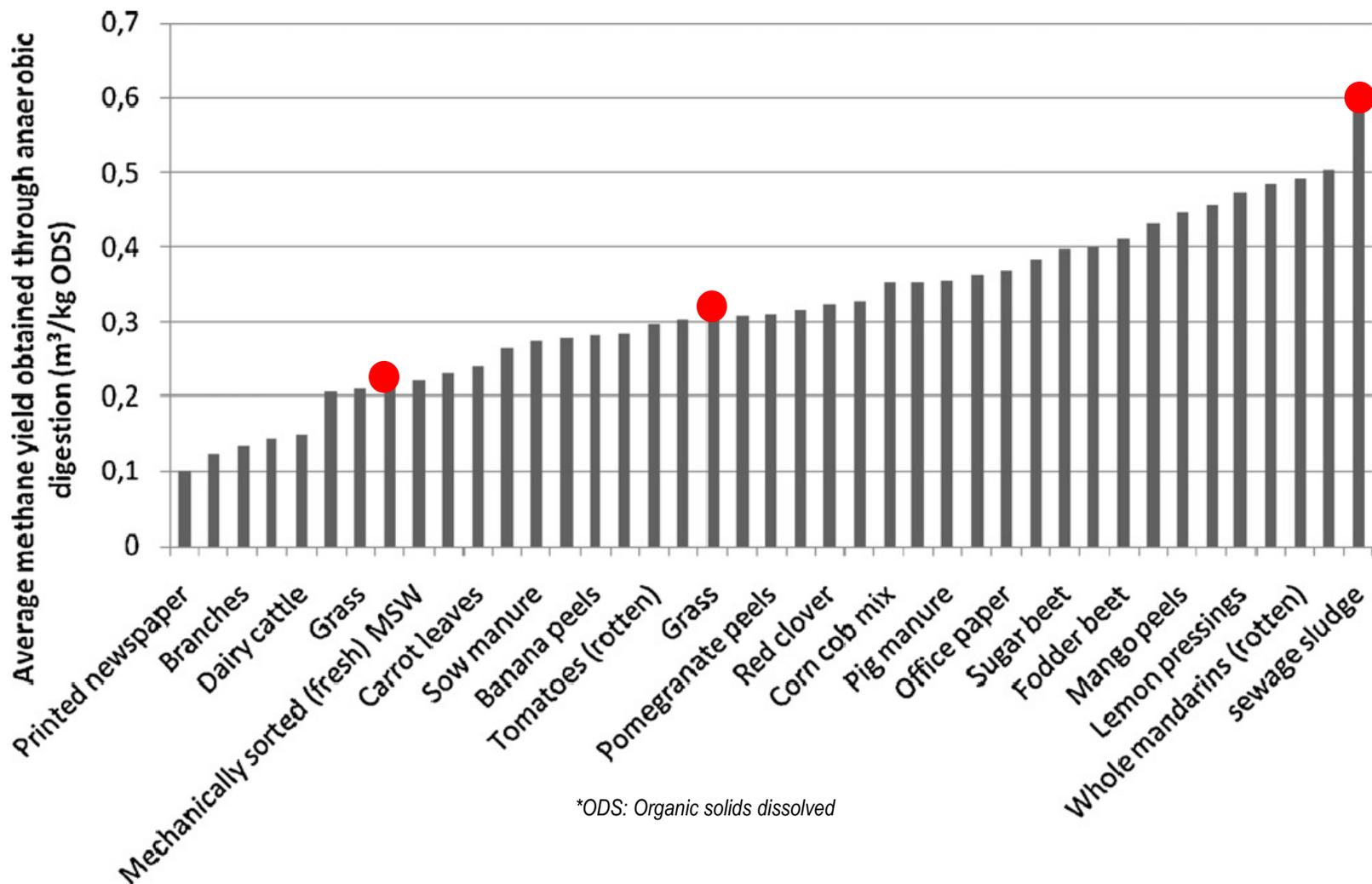


Figura. Rendimiento promedio de obtención de metano a partir de procesos de Digestión Anaerobia de diferentes sustratos

Tabla. Ventajas y desventajas de los sistemas de digestión anaerobia

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|--|
| Baja generación de sólidos | Largos tiempos de retención (20 - 30 días) |
| Uso del residuo sólido del proceso como fertilizante u otras recientes aplicaciones (adsorbente, biochar, etc). | Baja eficiencia en la degradación de compuestos orgánicos. |
| Bajos requerimientos energéticos (principalmente bombeo y calentamiento). | Requerimientos de pretratamiento para sustratos con alto contenido de lignocelulosa. |
| Gran flexibilidad para el tratamiento de residuos de diferentes grados de humedad. | Proceso biológico complejo que dificulta su entendimiento y control. |
| Aplicabilidad a sistemas de pequeña, mediana y gran escala. | Microorganismos sensibles a compuestos inhibitorios. |
| Manejo de residuos con alta humedad (>40%) ventajosos sobre procesos térmicos. | Posible generación de malos olores que pueden ser controlables. |
| Diferentes configuraciones (batch vs continuo, seco vs húmedo, mesofílico vs termofílico) | Remoción limitada de N, P y patógenos. |



2:1

NH_4^+



C:N

20:1 – 30:1

CO-DIGESTIÓN
ANAEROBIA

pH



19:1

AGV



ESTIMACIÓN TEÓRICA (SMP)

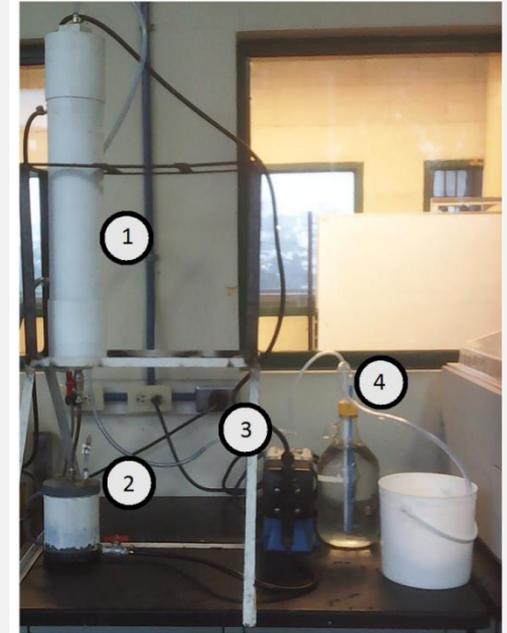
Basado en ajustes
estequiométricos

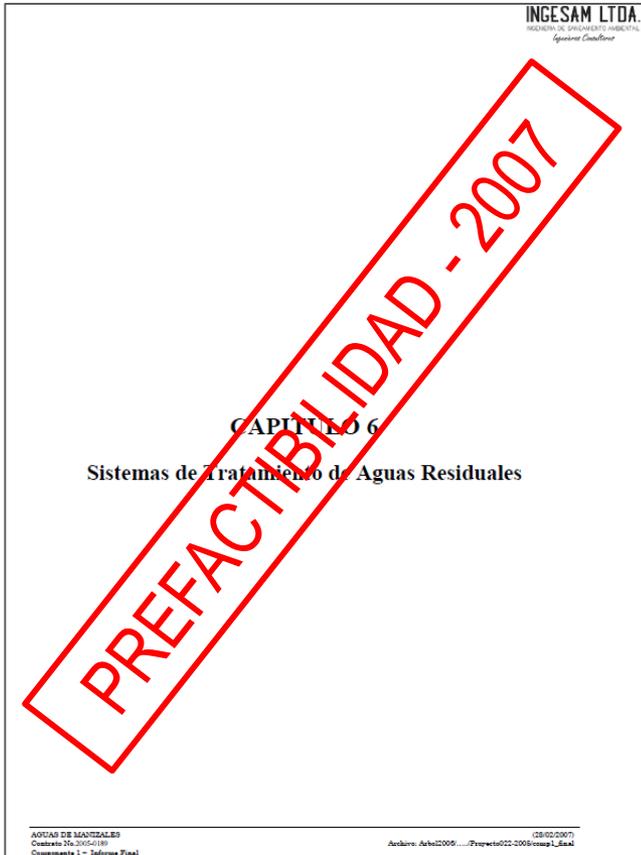
Requiere del análisis
elemental o de una
caracterización química

ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL EN LABORATORIO (BMP)

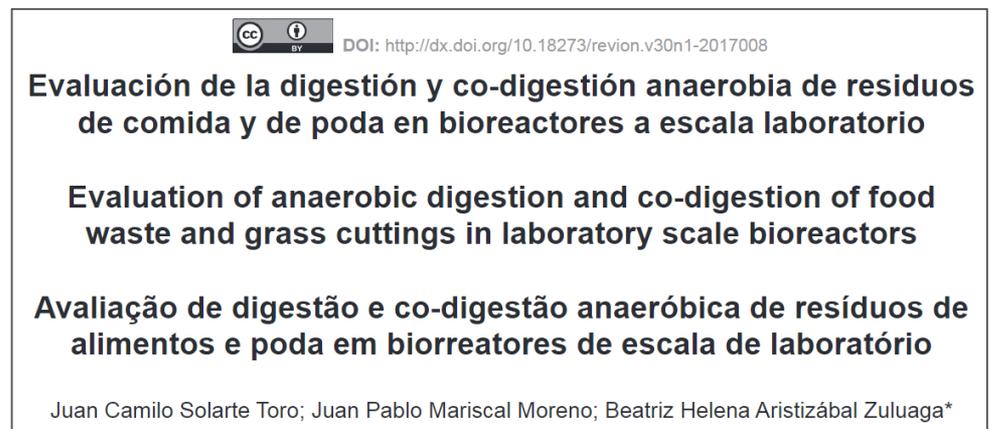


ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL EA NIVEL PILOTO (BMP)





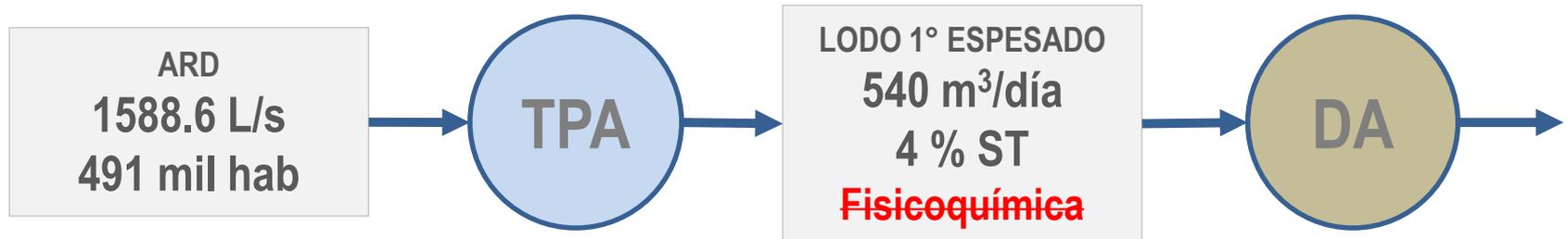
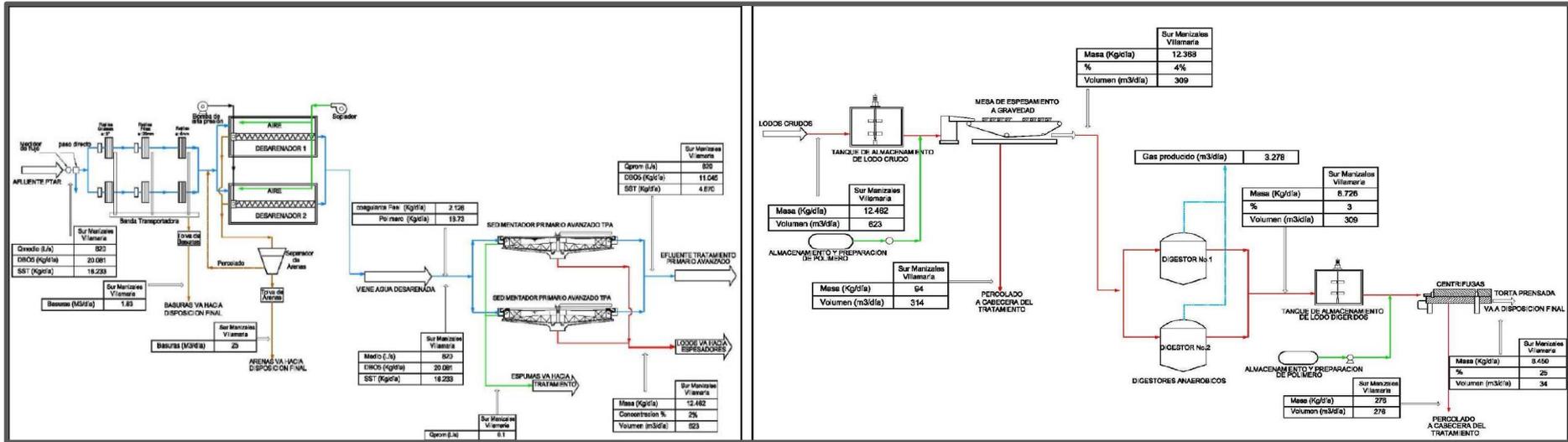
Plantea 6 alternativas para el tratamiento.



Resultados preliminares de trabajo doctoral

METODOLOGÍA

INFORMACIÓN DE REFERENCIA



Tomado de: *INGESAM, 2007*

Plantea 6 alternativas para el tratamiento. Se usará la información asociada al tratamiento con 1 PTAR de Tratamiento Primario Avanzado (sedimentación avanzada) y estabilización de lodos (digestión anaerobia).

TRABAJO DOCTORAL

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AIRE - LINEA MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS
 CASO DE APLICACIÓN CO-DIGESTIÓN RESIDUOS DE PODA Y COMIDA DE LA CIUDAD DE MANIZALES



TOTAL MANIZALES:
116000 ton/año

RESIDUOS DE PODA
4640 ton/año

RESIDUOS DE COMIDA
27900 ton/año

Tabla. Caracterización física y química de residuos de poda y comida del campus la Nubia de la UN.

| PARÁMETRO | UNIDADES | RESIDUOS DE PODA MANIZALES* | RESIDUOS DE RESTAURANTE MANIZALES* | LODO DE TR 1° AV |
|-----------|------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------|
| ST | % (m/m) | 88.7 | 29 | |
| SV | % ST (m/m) | 92.1 | 87.2 | |
| C | | 44.7 | 48.3 | |
| H | | 5.9 | 6.8 | |
| O | | 35.9 | 39 | |
| N | | 2.7 | 2.1 | |
| S | | 0.2 | 0.2 | |
| C/N | (m/m) | 16.6 | 23.0 | |

Determinación de sólidos de acuerdo con métodos APHA.

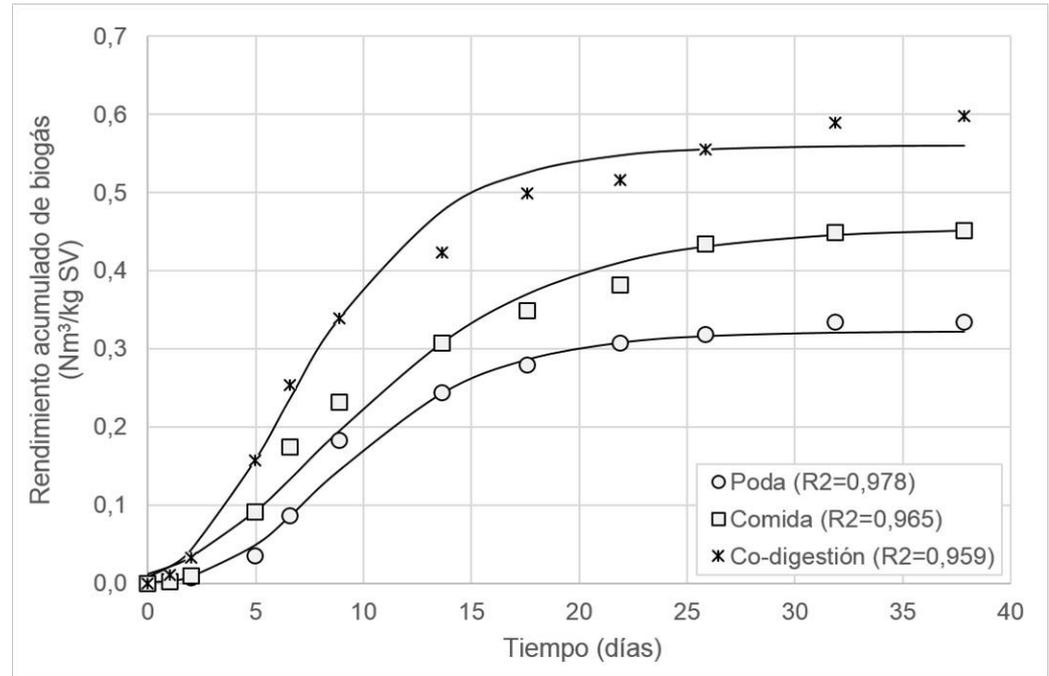
Análisis elemental realizado según el método ASTM D5373-14



Fotografía. Sistemas Yieldmaster BLUESENS para evaluación de producción de metano

Ensayos de digestión anaerobia
 Mezcla de residuos de poda y
 residuos de comida en relación
 50% : 50% (SV).
 Condiciones mesofílicas

Figura. Producción acumulada de biogás y ajuste cinético de la ecuación de Gompertz



| SUSTRATO | RENDIMIENTO ACUMULADO DE BIOGÁS (Nm³/kg SV) | | EFICIENCIA (%) |
|--------------|---|--------------|----------------|
| | Teórico | Experimental | |
| Poda | 0.89 | 0.34 | 38 |
| Comida | 0.93 | 0.45 | 49 |
| Co-digestión | 0.9 | 0.6 | 66 |



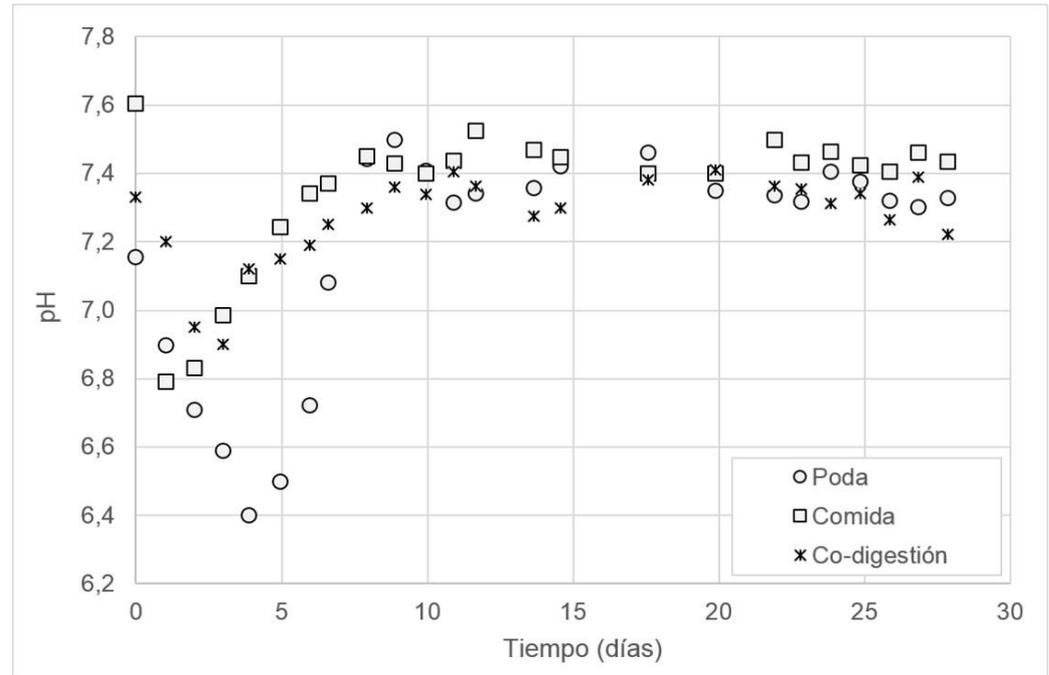
Fotografía. Sistemas Yieldmaster BLUESENS para evaluación de producción de metano

Ensayos de digestión anaerobia

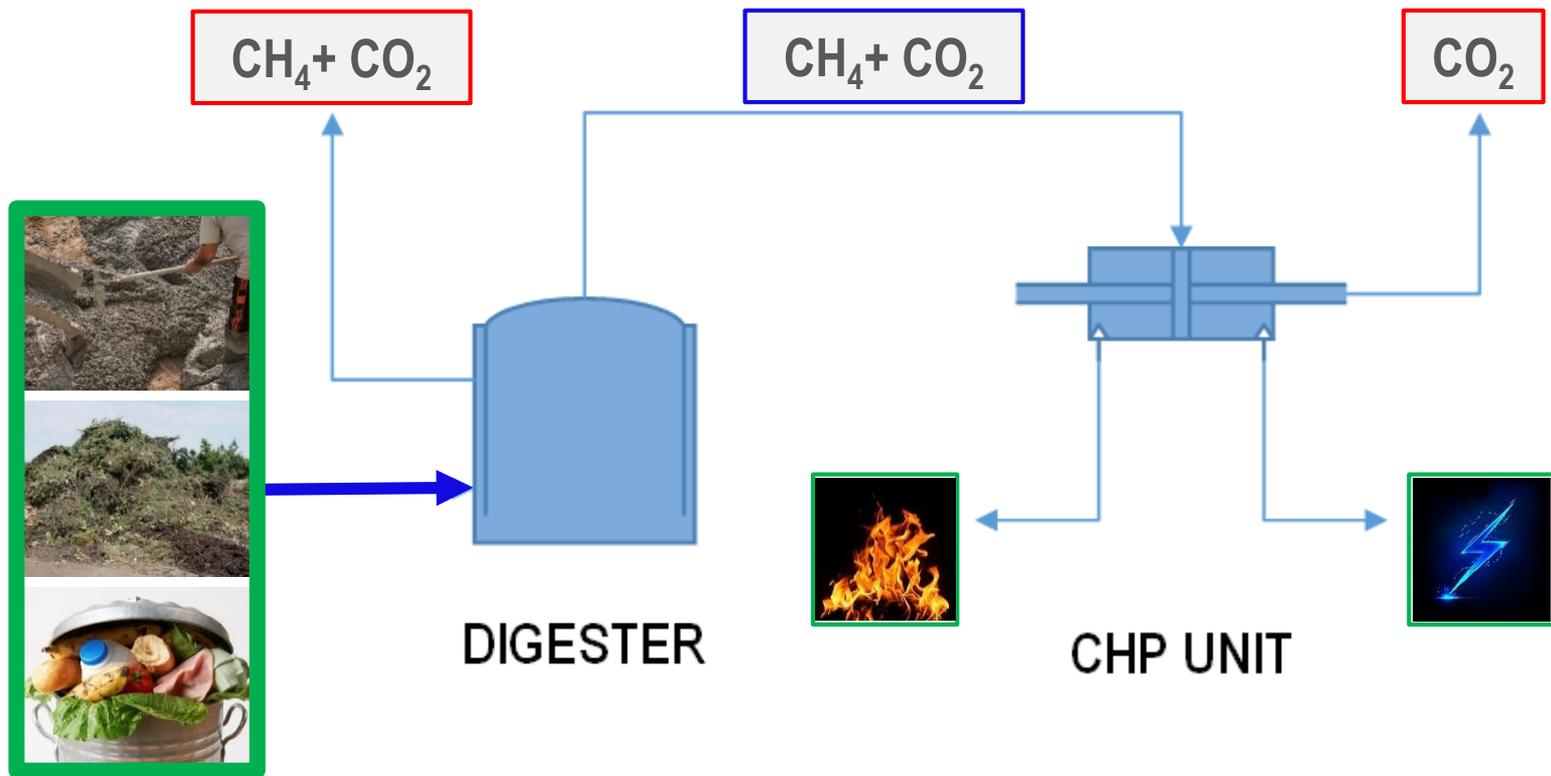
Mezcla de residuos de poda y residuos de comida en relación 50% : 50% (SV).

Condiciones mesofílicas

Figura. Variación del pH en los ensayos de mono digestión y co-digestión



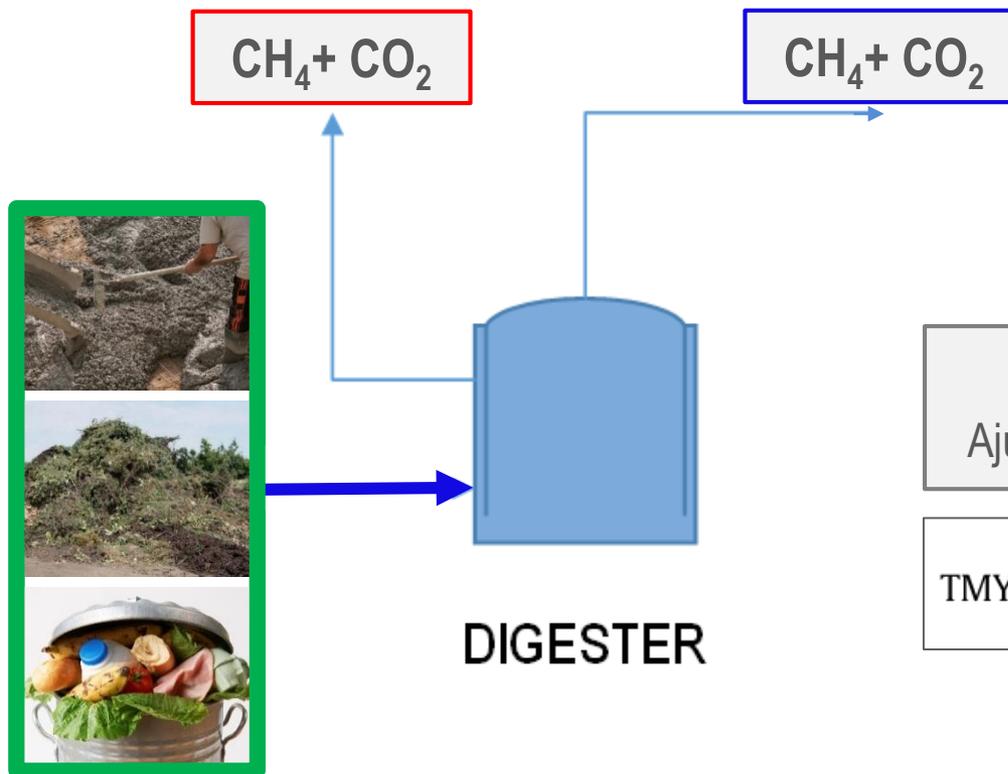
| SUSTRATO | RENDIMIENTO ACUMULADO DE BIOGÁS (Nm ³ /kg SV) | | EFICIENCIA (%) |
|--------------|--|--------------|----------------|
| | Teórico | Experimental | |
| Poda | 0.89 | 0.34 | 38 |
| Comida | 0.93 | 0.45 | 49 |
| Co-digestión | 0.9 | 0.6 | 66 |



¿Cómo modifica los rendimientos la co-digestión?

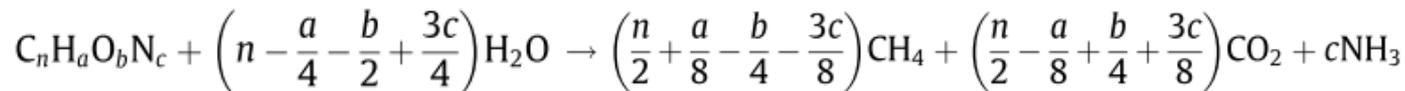
¿Cuánta energía puede generarse?

¿Cuál es la reducción de GEI emitidos?



Ecuación de Buswell*
Ajuste de coeficientes estequiométricos

$$TMY \left(\frac{\text{mL CH}_4}{\text{g VS}} \right) = \frac{22.4 \times 1000 \times \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right)}{12n + a + 16b + 14c}$$



¿Cómo modifica los rendimientos la co-digestión?

*Tomado de: Solarte, Mariscal y Aristizábal, 2017; Shanmugam y Horan, 2009

$$EE = E_{eff} \cdot TMY \cdot LHV$$

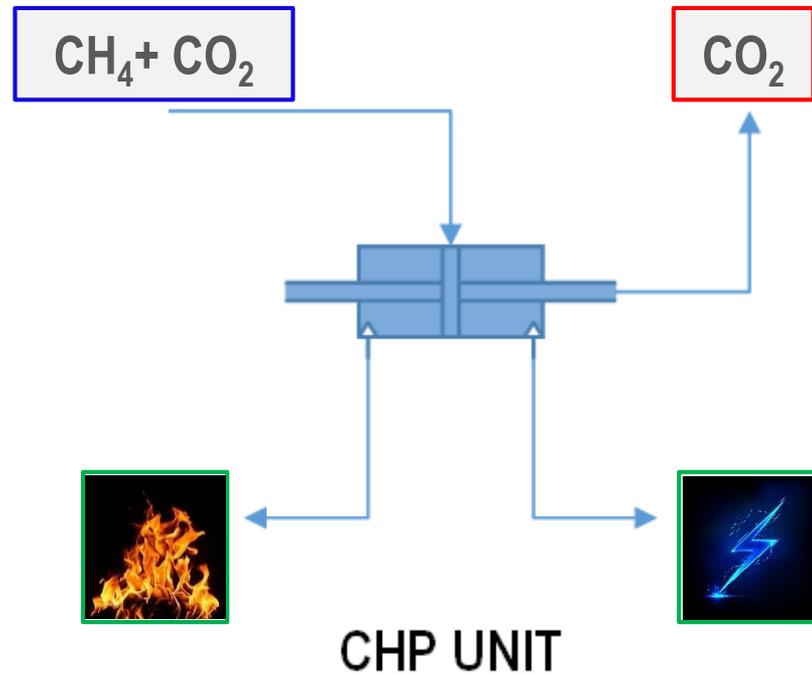
Donde,

EE: electricidad generada (kWh/año)

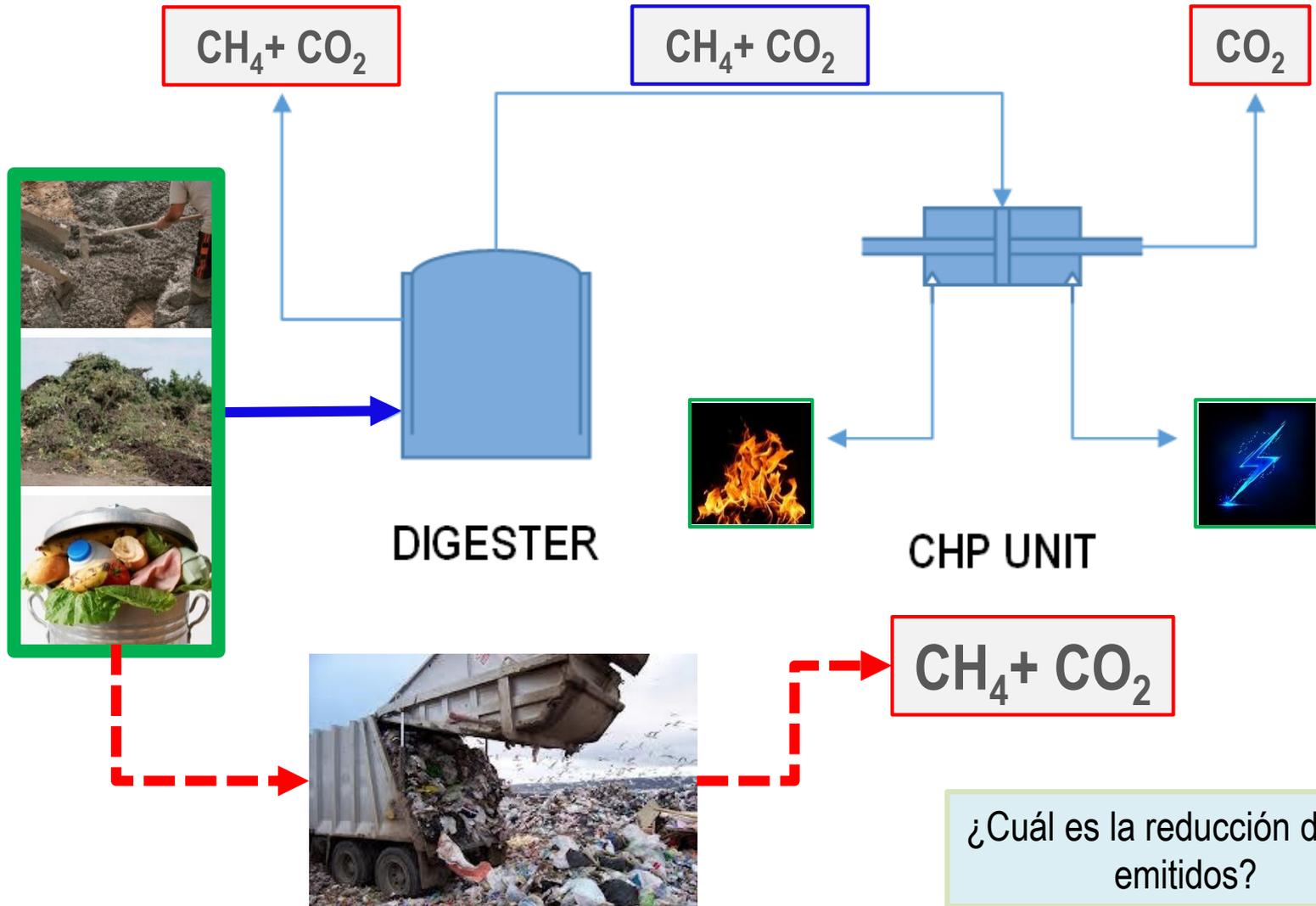
E_{eff}: eficiencia de la unidad CHP (39%)

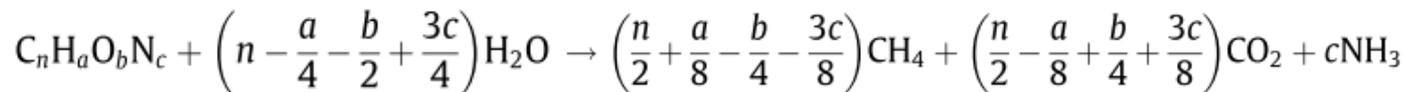
TMY: metano generado (Nm³ CH₄/año)

LHV: poder calorífico inferior del metano (9.94 kWh/m³)



¿Cuánta energía puede generarse?





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



Tabla. Caracterización fisicoquímica de sustratos disponibles

| PARÁMETRO | UNIDADES | RESIDUOS DE PODA MANIZALES* | RESIDUOS DE RESTAURANTE MANIZALES* | LODO ESPESADO DE TRATAMIENTO 1° AVANZADO** |
|-----------|------------|-----------------------------------|--|--|
| ST | % (m/m) | 88.7 | 29 | 3.8 |
| SV | % ST (m/m) | 92.1 | 87.2 | 60.3 |
| C | | 44.7 | 48.3 | 28.7 |
| H | | 5.9 | 6.8 | 4.6 |
| O | | 35.9 | 39 | 24.7 |
| N | | 2.7 | 2.1 | 2.4 |
| S | | 0.2 | 0.2 | 0.5 |
| C/N | | (m/m) | 16.6 | 23.0 |

¿Cómo modifica los rendimientos la co-digestión?

Efecto de la mezcla con lodo Cálculo de TMY

Figura. Valores de TMY (producción de metano) para distintas mezclas de 2 sustratos

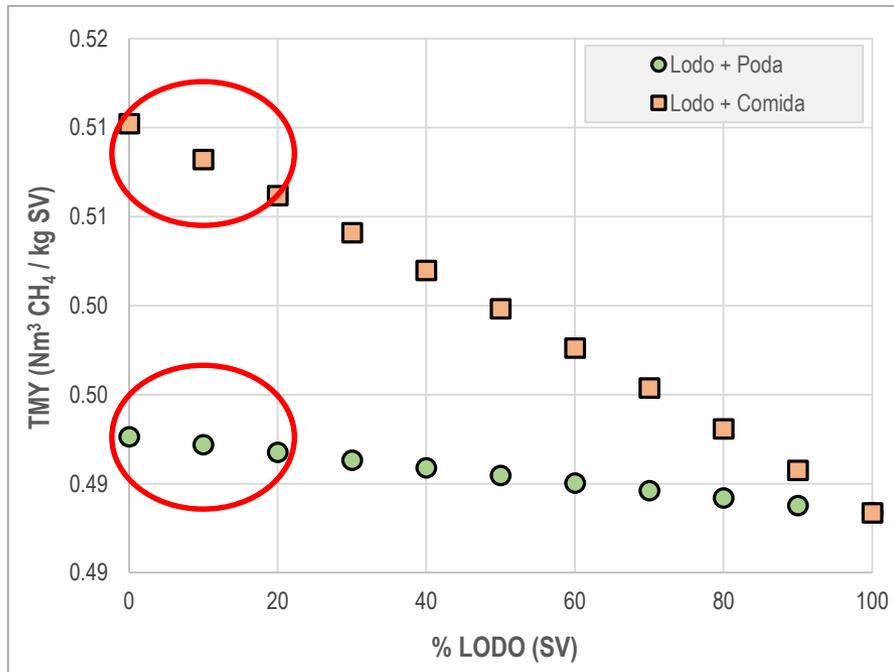
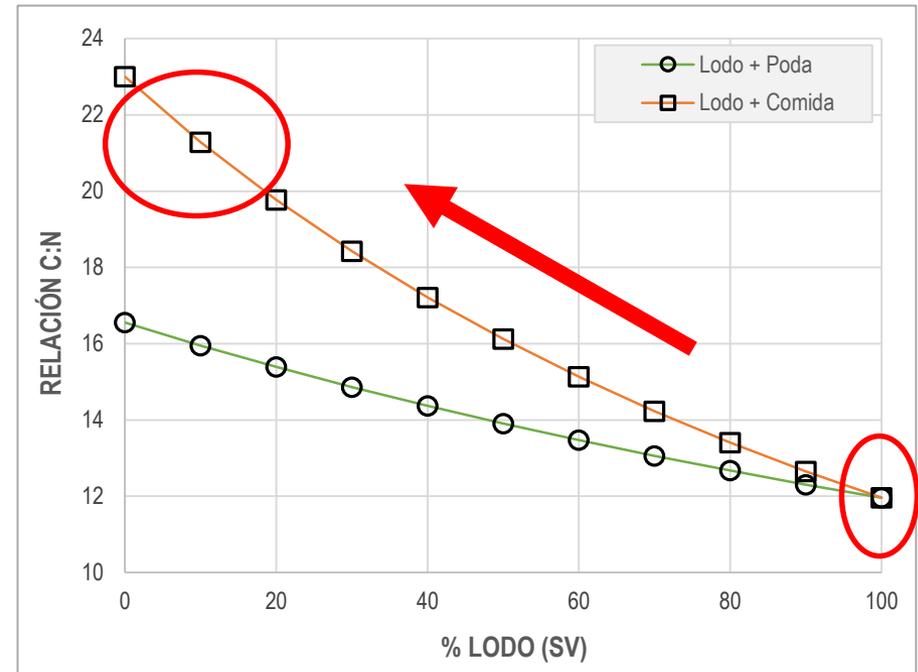


Figura. Valores de C:N para distintas mezclas de 2 sustratos



¿Cómo modifica los rendimientos la co-digestión?

Se mejoran los rendimientos en comparación con la digestión mono-sustrato de lodo

Efecto de la mezcla con lodo
Cálculo de TMY

Figura. Valores de TMY (producción de metano) para distintas mezclas de 3 sustratos

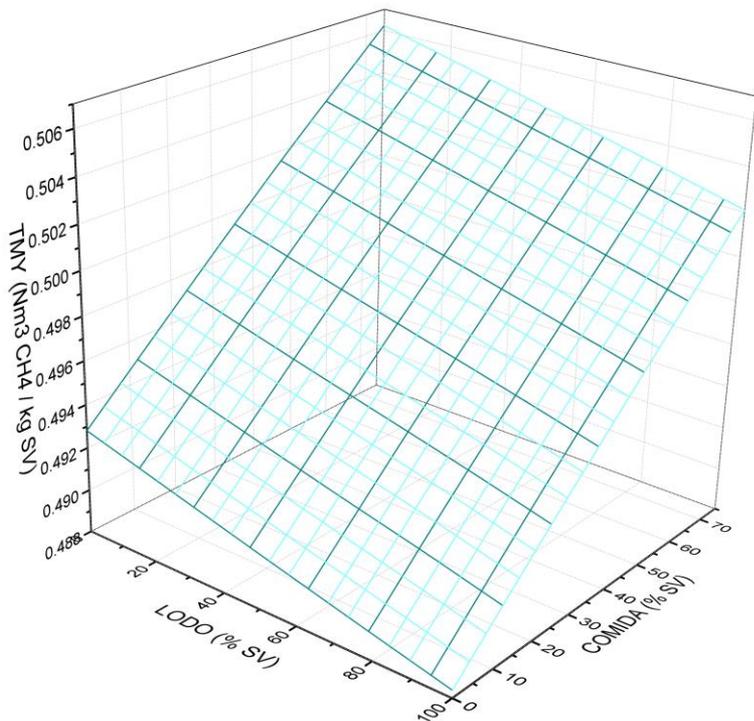
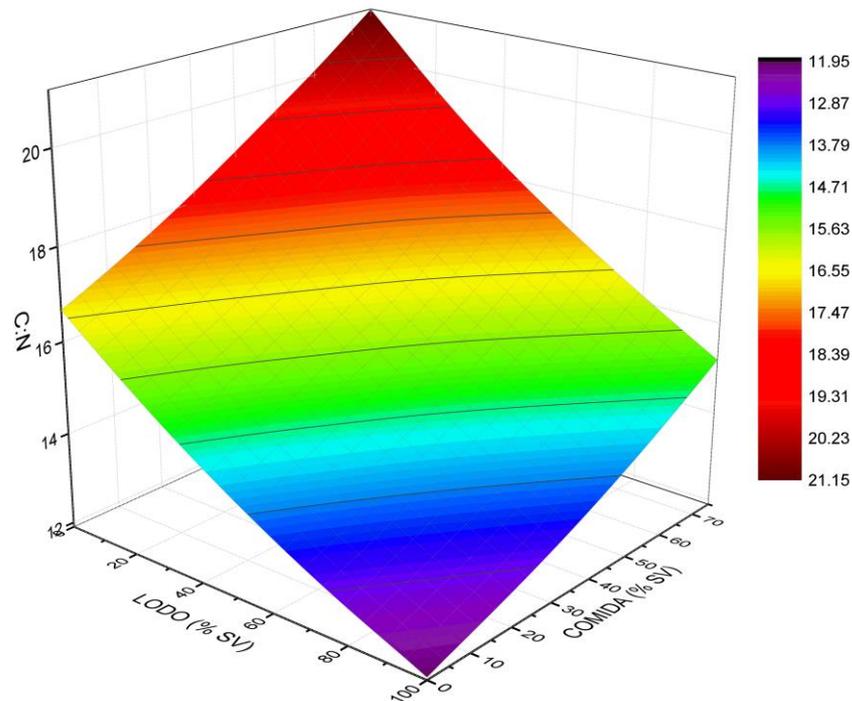


Figura. Valores de C:N para distintas mezclas de 3 sustratos

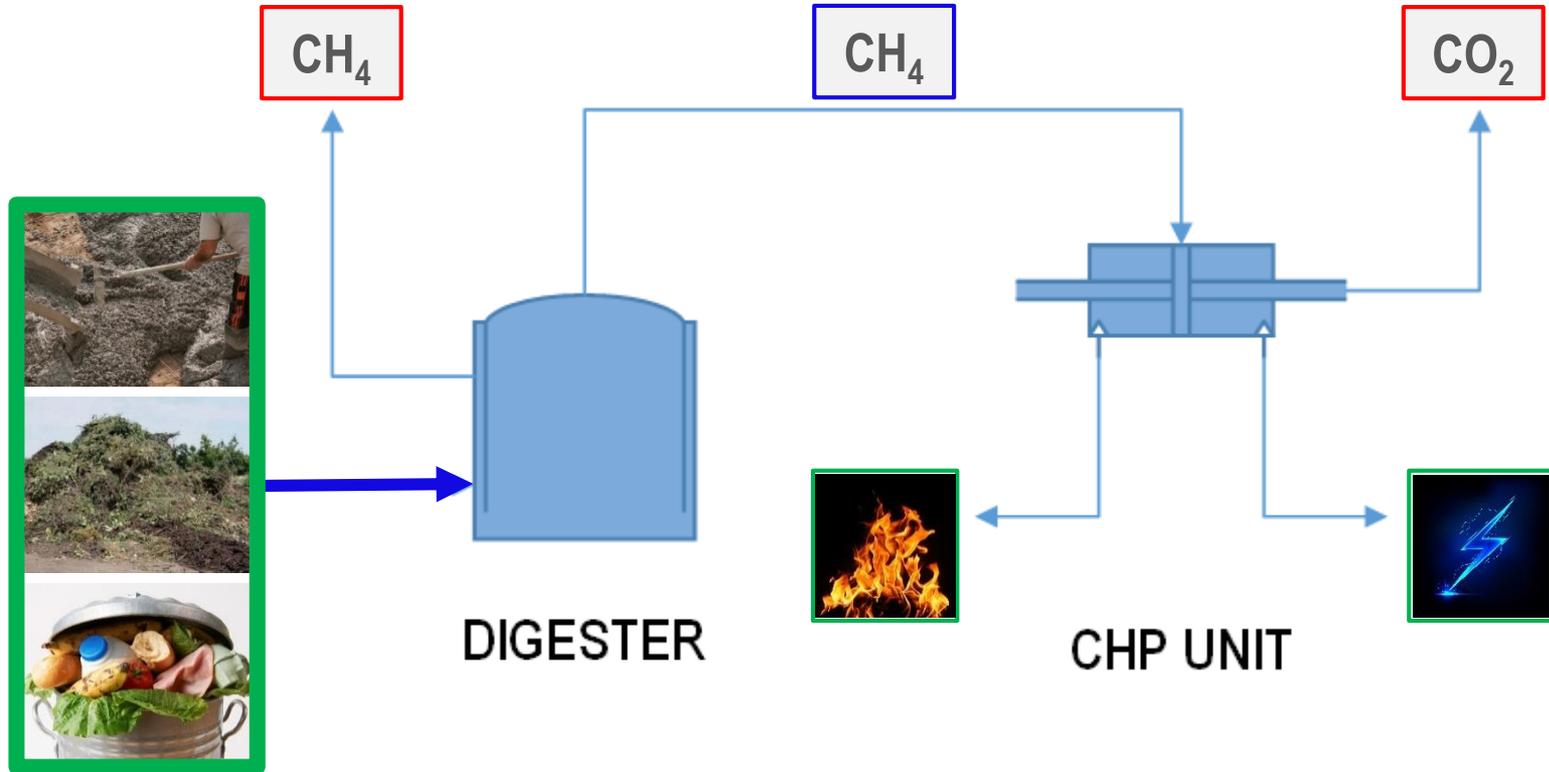


¿Cómo modifica los rendimientos la co-digestión?

Se mejoran los rendimientos en comparación con la digestión mono-sustrato de lodo

RESULTADOS

USO DE BIOGÁS GENERADO PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA



¿CUÁNTO DE LA MATERIA PRIMA
DISPONIBLE SE VA A UTILIZAR?

¿CÓMO SE VAN A MEZCLAR?

¿Cuánta energía puede
generarse?

Depende

RESULTADOS

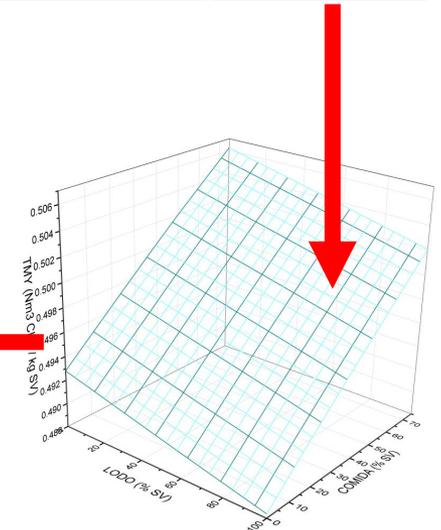
USO DE BIOGÁS GENERADO PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Tabla. Escenarios propuestos para la evaluación energética

| SUSTRATO | CANTIDAD DISPONIBLE | | SV (ton SV/día) | FRACCIÓN MÁXIMA UTILIZADA (ton SV/día) | | MEZCLA (%SV) |
|----------|---------------------|---------|--------------------|---|----------------------|-----------------|
| | | | | Escenario 1 (30%) | Escenario 2 (70%) | |
| COMIDA | 76.4 | ton/día | 19.3 | 5.8 | 13.5 | 40 |
| PODA | 12.7 | ton/día | 10.4 | 3.1 | 7.3 | 20 |
| LODO | 540.1 | m3/día | 17.6 | 5.3 | 12.3 | 40 |



$$EE = E_{eff} \cdot TMY \cdot LHV$$



¿CUÁNTO DE LA MATERIA PRIMA
DISPONIBLE SE VA A UTILIZAR?

¿CÓMO SE VAN A MEZCLAR?

¿Cuánta energía puede
generarse?

Tabla. Valoración energética de escenarios en la PTAR Manizales

| PRODUCTO | UNIDADES | Escenario 1 (30%) | Escenario 2 (70%) | OBSERVACIONES |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| Metano | Mm ³ /año | 1.7 | 3.9 | * Producción PTAR Salitre = 4.2 Mm ³ /año * Producción PTAR Cañaveralejo = 4 Mm ³ /año |
| Electricidad | GWh/año | 6.5 | 15.2 | * Consumo promedio PTAR = 30 - 50 GWh/año * 0.00003% consumo nacional |
| Calor | TJ/año | 36.8 | 85.7 | * Útil para calentamiento de reactores |

Cantidad de energía importante para suplir
requerimientos propios de la planta

¿Cuánta energía puede
generarse?

RESULTADOS

USO DE BIOGÁS GENERADO PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Tabla. Generación de metano en cada escenario

| PRODUCTO | UNIDADES | Escenario 1 (30%) | Escenario 2 (70%) | OBSERVACIONES |
|--------------|----------------------|-------------------|-------------------|---|
| Metano | Mm ³ /año | 1.7 | 3.9 | * Producción PTAR Salitre = 4.2 Mm ³ /año * Producción PTAR Cañaveralejo = 4 Mm ³ /año |
| Electricidad | GWh/año | 6.5 | 15.2 | * Consumo promedio PTAR = 30 - 50 GWh/año * 0.00003% consumo nacional |
| | TJ/año | | 85.7 | * Útil para calentamiento de reactores |

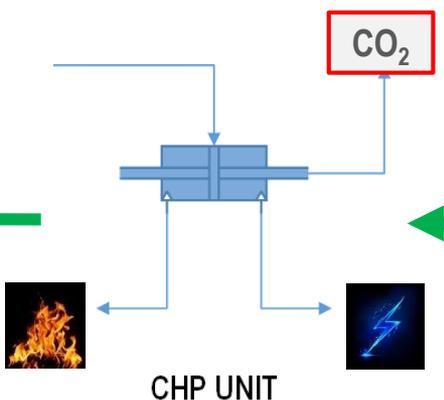
2783 ton CH₄/año
58463 tonCO_{2eq}/año



TOTAL COLOMBIA:
258.8 MtonCO_{2eq}/año
4% Saneamiento

TOTAL CALDAS:
3.42 MtonCO_{2eq}/año
6.45% Saneamiento

7655 tonCO_{2eq}/año



Reducción estimada de 87% en GEI

¿Cuál es la reducción de GEI emitidos?

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La “solución” al problema del tratamiento de aguas residuales en Manizales genera el “problema” del manejo de lodos. Se mostró que la integración del manejo de residuos líquidos y sólidos es una alternativa viable.

Este cálculo es sólo una aproximación al diseño. Muchas suposiciones y falta de experimentación hacen necesario analizar estas cifras como los “máximos valores alcanzables”.

La digestión anaerobia es una tecnología flexible y muestra de esto es las diversas posibilidades que ofrecen los esquemas de co-digestión para superar pasos limitantes en el proceso.

Los resultados muestran que los residuos de poda y especialmente de comida, pueden generar un mejoramiento en el tratamiento de los lodos. De forma integrada ofrecen mejores rendimientos en el proceso con beneficios ambientales como reducción de gases de efecto invernadero.

Estos resultados muestran un negocio común en Europa: las plantas de tratamiento reciben residuos sólidos para digerirlos en sus sistemas, recibiendo dinero para su disposición y ganancias por la bioenergía generada.

Involucrar en ensayos experimentales, lodos similares a los proyectados para la ciudad con el fin de refinar los rendimientos reportados en este trabajo.

Residuos de mayor C:N pueden mejorar aún más las condiciones del proceso. Ejemplos pueden ser residuos de central de sacrificio, residuos de supermercados, entre otros.

¿Qué hacer con el biosólido resultante y con el lixiviado?

CÁLCULO TEÓRICO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MANIZALES MEDIANTE CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA

JUAN PABLO MARISCAL MORENO

Ingeniero Químico, MSc

Estudiante Doctorado en Ingeniería – Automática

jpmariscalm@unal.edu.co

GRUPO DE TRABAJO ACADÉMICO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL
LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales