



## **TESIS DOCTORAL**

**CULTIVOS ENERGÉTICOS Y RESIDUOS AGRO-GANADEROS  
COMO SUSTRATOS PARA OPTIMIZAR EL POTENCIAL DE  
GENERACIÓN DE BIOGÁS EN PROCESOS DE DIGESTIÓN  
ANAEROBIA**

**ANA ISABEL PARRALEJO ALCOBENDAS**

*Modelización y Experimentación en Ciencia y Tecnología*

Conformidad de los directores:

**Dr. Juan Félix González González**

Catedrático de Universidad

**Dr. Jerónimo González Cortés**

Director Científico de Finca La Orden (CICYTEX)

**2020**



*“Recuerda mirar a las estrellas y no tus pies.....Sé curioso. Aunque la vida pueda parecer difícil, siempre hay algo que puedes hacer y tener éxito. Lo importante es que no te rindas”*

***Stephen Hawking***

## **AGRADECIMIENTOS**

*El logro plasmado en este documento merece unas breves pero merecidas palabras de agradecimiento a todas aquellas personas que me han ofrecido su apoyo, ayuda y comprensión a lo largo de toda la trayectoria del trabajo de Tesis.*

*A mis directores de Tesis, los Doctores D. Juan Félix González González y D. Jerónimo González Cortés, por su esfuerzo para guiarme, enseñarme y mostrar su inusitada ayuda para el desarrollo de este trabajo.*

*Al Doctor D. Eduardo Sabio Rey, agradecer su trabajo realizado, el cual ha dotado a este trabajo de Tesis de una connotación matemática-física.*

*Al Centro de Investigación Finca La Orden-Valdesequera (CICYTEX) por permitir que todos los medios disponibles en el mismo hayan podido servirme para conseguir realizar mis trabajos. Igualmente he de dar las gracias a todos los compañeros del Departamento de Cultivos Extensivos, con aquellos que trabajé y con los que actualmente trabajo codo a codo, por hacer que cada día haya avanzado con su ayuda desinteresada en todos los trabajos a desarrollar.*

*A mi familia, padre, madre y hermana, y a mi pareja, sin los cuales probablemente este trabajo no hubiese podido concluir. Ellos me aportan cada día toda la alegría, seguridad y cariño que se necesita para conseguir aquello que uno se proponga.*

*Mil gracias por todo.*

# ÍNDICE

<b>1. Antecedentes</b>	<b>17</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>28</b>
<b>3. Digestión anaerobia</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Etapas que constituyen el proceso de digestión anaerobia.</b>	<b>30</b>
<b>3.2. Parámetros que influyen en el proceso de digestión anaerobia.</b>	<b>39</b>
3.2.1. Parámetros ambientales.	39
3.2.2. Parámetros operacionales.	42
<b>3.3. Sustratos susceptibles de digerir anaeróbicamente.</b>	<b>47</b>
3.3.1. Purín.	47
3.3.2. Aceite de colza.	50
3.3.3. Microalgas.	51
3.3.4. Ensilado de sustratos vegetales.	53
3.3.4.1. Sorgo	54
3.3.4.2. Triticale.	56
3.3.4.3. Rastrojo de maíz.	57
<b>3.4. Productos obtenidos en digestión anaerobia.</b>	<b>59</b>
3.4.1. Tratamiento y valorización del biogás.	59
3.4.2. Empleo agrícola del digestato.	63
<b>3.5. Tecnologías empleadas en digestión anaerobia.</b>	<b>66</b>
3.5.1. Digestores discontinuos	66
3.5.2. Digestores semi-continuos o continuos	66
<b>3.6. Estudio económico</b>	<b>68</b>
<b>4. Metodología</b>	<b>70</b>
<b>4.1. Acondicionamiento de sustratos empleados.</b>	<b>70</b>
4.1.1. Cultivos energéticos o productos procedentes de ellos.	71
4.1.2. Biomasa microalgal.	75
4.1.3. Residuos agroindustriales.	78
<b>4.2. Ensayos de digestión anaerobia.</b>	<b>80</b>
4.2.1. Equipos de biodigestión anaerobia y montaje experimental a nivel de laboratorio.	80
4.2.2. Planta piloto de biodigestión anaerobia e instalación completa de gases.	83
4.2.3. Procedimiento experimental.	86
4.2.4. Ensayos de digestión anaerobia tipo batch.	88
4.2.4.1. Ensayo batch S, T y A: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos.	88
4.2.4.2. Ensayo batch B: biomasa microalgal.	89
4.2.4.3. Ensayo batch P y R: residuos agroindustriales.	89
4.2.5. Ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo.	90
4.2.5.1. Ensayo en régimen semi-continuo SP: cultivo energético sorgo dulce y purín de cerdo.	90
4.2.5.2. Ensayo en régimen semi-continuo SB: cultivo energético sorgo dulce y biomasa microalgal autóctona.	91
4.2.5.3. Ensayo en régimen semi-continuo SBP: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona y purín de cerdo.	91

4.2.5.4.	Ensayo en régimen semi-continuo SBPT: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo y cultivo energético triticale.	92
4.2.5.5.	Ensayo en régimen semi-continuo SBPTR: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo, cultivo energético triticale y rastrojo de maíz.	93
4.2.5.6.	Ensayo en régimen semi-continuo STP: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale y purín de cerdo.	93
4.2.5.7.	Ensayo en régimen semi-continuo STPA: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale, purín de cerdo y aceite de colza.	94
<b>4.3.</b>	<b>Métodos analíticos.</b>	<b>94</b>
4.3.1.	Sólidos totales y sólidos volátiles (ST y SV)	95
4.3.2.	Alcalinidad	95
4.3.3.	Demanda química de oxígeno (DQO)	95
4.3.4.	Nitrógeno amoniacal	96
4.3.5.	pH y potencial redox	96
4.3.6.	Ácidos grasos volátiles (AGV)	97
4.3.7.	Análisis elemental	97
4.3.8.	Determinación de lípidos y proteínas	98
4.3.9.	Análisis de macroelementos y microelementos	98
<b>4.4.</b>	<b>Tratamiento de resultados obtenidos.</b>	<b>99</b>
4.4.1.	Análisis estadístico de resultados de ensayos de digestión anaerobia tipo batch y semi-continuo.	99
4.4.1.1.	Comparación de medias muestrales (ANOVA)	99
4.4.1.2.	Estudio cinético de degradación mediante regresión lineal en experimentos tipo batch	100
4.4.1.3.	Análisis de interacciones entre parámetros mediante correlaciones en experimentos tipo semi-continuo	102
4.4.2.	Análisis de modelización de resultados de ensayos de digestión anaerobia tipo batch.	102
<b>4.5.</b>	<b>Estudio económico</b>	<b>111</b>
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>112</b>
<b>5.1.</b>	<b>Ensayos batch desarrollados en laboratorio.</b>	<b>112</b>
5.1.1.	Ensayo batch S, T y A: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos	112
5.1.2.	Ensayo batch B: biomasa microalgal	123
5.1.3.	Ensayo batch P y R: residuos agroindustriales.	126
<b>5.2.</b>	<b>Ensayo batch desarrollados en planta piloto</b>	<b>132</b>
5.2.1.	Ensayo batch S, T y A: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos	132
5.2.2.	Ensayo batch B: biomasa microalgal	136
5.2.3.	Ensayo batch P y R: residuos agroindustriales.	137
<b>5.3.</b>	<b>Ajuste a modelo ADM1</b>	<b>140</b>
<b>5.4.</b>	<b>Ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo</b>	<b>142</b>
5.4.1.	Ensayo en régimen semi-continuo SP: cultivo energético sorgo dulce y purín de cerdo	143
5.4.2.	Ensayo en régimen semi-continuo SB: cultivo energético sorgo dulce y biomasa microalgal autóctona	143
5.4.3.	Ensayo en régimen semi-continuo SBP: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona y purín de cerdo	143
5.4.4.	Ensayo en régimen semi-continuo SBPT: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo y cultivo energético triticale	144

5.4.5.	Ensayo en régimen semi-continuo SBPTR: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo, cultivo energético triticale y rastrojo de maíz	144
5.4.6.	Ensayo en régimen semi-continuo STP: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale y purín de cerdo	144
5.4.7.	Ensayos en régimen semi-continuo STPA: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale, purín de cerdo y aceite de colza.	145
<b>5.5.</b>	<b>Analítica de ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio</b>	<b>145</b>
<b>5.6.</b>	<b>Analítica de ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en planta piloto (STP3-4 y STPA2-3-4)</b>	<b>152</b>
<b>5.7.</b>	<b>Estudio económico</b>	<b>153</b>
<b>6.</b>	<b>Discusión de resultados</b>	<b>155</b>
<b>6.1.</b>	<b>Discusión de resultados 1: Sustratos estudiados</b>	<b>155</b>
<b>6.2.</b>	<b>Discusión de resultados 2: Ensayo batch desarrollados en laboratorio y planta piloto</b>	<b>159</b>
6.2.1.	Ensayos tipo batch desarrollados en laboratorio	159
6.2.2.	Ensayos tipo batch desarrollados en planta piloto	168
6.2.3.	Estudio cinético de producciones en ensayos batch en laboratorio y planta piloto	170
<b>6.3.</b>	<b>Discusión de resultados 3: Modelización de resultados obtenidos de ensayos batch con sustratos S, A, B y R</b>	<b>174</b>
<b>6.4.</b>	<b>Discusión de resultados 4: Ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio</b>	<b>176</b>
<b>6.5.</b>	<b>Discusión de resultados 5: Ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio y planta piloto para estudiar la influencia del aceite de colza</b>	<b>190</b>
<b>6.6.</b>	<b>Discusión de resultados 6: Estudio económico</b>	<b>204</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>207</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>211</b>
<b>9.</b>	<b>Apéndice</b>	<b>228</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. HISTÓRICO DE PRECIOS DEL PETRÓLEO MEDIOS [1].	17
FIGURA 1.2. DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA PRIMARIA A NIVEL MUNDIAL [2].	18
FIGURA 1.3. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN ESPAÑA EN 2015 SEGÚN BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY 2016 [5].	20
FIGURA 1.4. ANÁLISIS DE LA CONTRIBUCIÓN DE COSTES EN EL CULTIVO DE SORGO Y MAÍZ PARA CULTIVOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES [8].	21
FIGURA 1.5. CENSO DE CERDOS EN DIFERENTES PAÍSES EUROPEOS EN MILLONES DE ANIMALES ANUALES (MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN).	22
FIGURA 3.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA [32].	31
FIGURA 3.2. FLUJO DE UN MATERIAL COMPUESTO PARTICULADO SEGÚN EL MODELO ADM1 [42].	36
FIGURA 3.3. DESINTEGRACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO COMPUESTO EN FRACCIONES SÓLIDAS MÁS SIMPLES.	37
FIGURA 3.4. HIDRÓLISIS DE LAS FRACCIONES DE CARBOHIDRATOS, PROTEÍNAS Y LÍPIDOS SÓLIDAS EN FRACCIONES SOLUBLES.	37
FIGURA 3.5. DEGRADACIÓN DE LA FRACCIÓN SOLUBLE DE MONOSACÁRIDOS EN COMPUESTOS MÁS SENCILLOS DURANTE LA ETAPA ACIDOGÉNICA.	38
FIGURA 3.6. TRANSFORMACIONES PRODUCIDAS ENTRE COMPUESTOS SIMPLES DURANTE LA ETAPA DE ACETOGÉNESIS.	38
FIGURA 3.7. DEPENDENCIA DE LA CONSTANTE DE CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS CON LA TEMPERATURA [69].	43
FIGURA 3.8. MOLINO DE IMPACTO PARA REDUCIR EL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE UNA MUESTRA.	45
FIGURA 3.9. FASES DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS.	52
FIGURA 3.10. EQUIVALENCIAS ENTRE EL BIOGÁS Y OTRAS FUENTES DE ENERGÍAS.	61
FIGURA 3.11. IMPUREZAS PRESENTES EN BIOGÁS Y SUS EFECTOS [105].	61
FIGURA 3.12. COMPOSICIÓN MEDIA DE NPK DE ABONOS ORGÁNICOS DE DIFERENTE ORIGEN ANIMAL [109].	64
FIGURA 3.13. RESPUESTA PRODUCTIVA DEL MAÍZ AL ABONADO CON SUBPRODUCTOS GANADEROS [109].	65
FIGURA 4.1. PASTA DE CHUMBERA OBTENIDA A PARTIR DE PALAS DE CHUMBERA RECOLECTADA EN CAMPO.	70
FIGURA 4.2. TRITURADORA NIARSA UTILIZADA EN EL PRIMER PRETRATAMIENTO DE TIPO MECÁNICO EN SUSTRATOS DE ORIGEN VEGETAL.	72
FIGURA 4.3. SILOS DE PEQUEÑO TAMAÑO CON MATERIAL VEGETAL LIGNOCELULÓSICO PARA EMPLEAR COMO SUSTRATO EN DIGESTORES ANAEROBIOS.	73
FIGURA 4.4. PROCESO DE TAMIZADO PARA ELIMINAR RESTOS VEGETALES CON TAMAÑO DEMASIADO ELEVADO (ARRIBA). SILOS DE GRAN TAMAÑO CON MATERIAL VEGETAL LIGNOCELULÓSICO PARA EMPLEAR COMO SUSTRATO EN DIGESTORES ANAEROBIOS (ABAJO).	73
FIGURA 4.5. PRENSA FARMET® CESKA SKALICE FL200 LCPV7-11 USADA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LAS SEMILLAS DE COLZA.	74
FIGURA 4.6. PRODUCTO OLEAGINOSO PROCEDENTE DE COLZA OBTENIDO PARA LA EVALUACIÓN EN PROCESOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.	74
FIGURA 4.7. ESPECIES DE MICROALGAS ENCONTRADAS EN EL MEDIO A AUMENTOS DE 20X (ARRIBA), 40X Y 100X (ABAJO, DE IZQUIERDA A DERECHA). CICYTEX.	75
FIGURA 4.8. COLUMNAS Y PANELES CORRESPONDIENTES A LA PLANTA PILOTO DE MICROALGAS.	76
FIGURA 4.9. CENTRÍFUGA GEA WESTFALIA SEPARATOR GROUP GMBH 59302 OELDE, ALEMANIA, EMPLEADA EN LA SEPARACIÓN DE LAS FRACCIONES SÓLIDA Y LÍQUIDA (ARRIBA E IZQUIERDA). MICROALGAS CONCENTRADAS TRAS EL PROCESO DE CENTRIFUGACIÓN (ARRIBA Y DERECHA). MICROALGAS SECADAS EN ESTUFA A 105 °C (ABAJO).	77



FIGURA 4.10. TRACTOR CISTERNA PARA CARGA Y TRANSPORTE DE PURINES USADOS EN ENSAYOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	79
FIGURA 4.11. DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO DE PURINES PARA SU EMPLEO EN LA ALIMENTACIÓN DE PLANTA PILOTO DE BIOGÁS. ....	79
FIGURA 4.12. EQUIPOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA, MEDIDORES Y MONTAJE EXPERIMENTAL DE BIOGÁS PRODUCIDO EMPLEADOS EN EXPERIMENTOS REALIZADOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	81
FIGURA 4.13. PLANTA PILOTO DE BIOGÁS CON SISTEMA DE ALIMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE GASES PRODUCIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EMPLEADOS EN LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA. ....	84
FIGURA 4.14. EQUIPO DE MEDICIÓN DE COMPOSICIÓN DE BIOGÁS PORTÁTIL (DERECHA) Y CALDERA DE COMBUSTIÓN DE BIOGÁS (IZQUIERDA).....	86
FIGURA 4.15. FOTÓMETRO PF-12 MACHEREY NAGEL PARA LA MEDICIÓN DE DQO Y NITRÓGENO AMONICAL EN MUESTRAS DE SUSTRATOS Y DIGESTOR VARIO C2 NANOCOLOR® MACHEREY NAGEL PARA LA DIGESTIÓN PREVIA. ....	96
FIGURA 4.16. DISCRETIZACIÓN DE UN SISTEMA FORMADO POR UN REACTOR DE ACERO EN UNA ESTUFA. .	103
FIGURA 4.17. INTRODUCCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO EN EL PROGRAMA COMSOL. ....	104
FIGURA 4.18. CONSTANTES CINÉTICAS Y VELOCIDADES DE REACCIÓN EMPLEADAS EN EL MODELO ADM1. ....	105
FIGURA 4.19. CINÉTICAS DE LAS DISTINTAS ESPECIES ESTUDIADAS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ACUERDO AL MODELO ADM1.....	105
FIGURA 4.20. REACCIONES EMPLEADAS EN EL MODELO ADM1.....	106
FIGURA 4.21. ELECCIÓN DEL MOTOR DE CÁLCULO EN EL MODELO ESTUDIADO.....	107
FIGURA 4.22. ELECCIÓN DE MÉTODO DE CÁLCULO DE OPTIMIZACIÓN PARA DEPURAR LOS RESULTADOS FINALES. ....	108
FIGURA 5.1. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE METANO ACUMULADO A LO LARGO DEL TIEMPO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO, DE ACUERDO AL MODELO ADM1, PARA LOS ENSAYOS BATCH REALIZADOS CON S EN LABORATORIO (IZQUIERDA) Y PLANTA PILOTO (DERECHA). ....	141
FIGURA 5.2. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE METANO ACUMULADO A LO LARGO DEL TIEMPO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO, DE ACUERDO AL MODELO ADM1, PARA LOS ENSAYOS BATCH REALIZADOS CON R EN LABORATORIO (IZQUIERDA) Y PLANTA PILOTO (DERECHA). ....	141
FIGURA 5.3. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE METANO ACUMULADO A LO LARGO DEL TIEMPO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO, DE ACUERDO AL MODELO ADM1, PARA LOS ENSAYOS BATCH REALIZADOS CON R EN LABORATORIO (IZQUIERDA) Y PLANTA PILOTO (DERECHA). ....	142
FIGURA 5.4. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE METANO ACUMULADO A LO LARGO DEL TIEMPO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO, DE ACUERDO AL MODELO ADM1, PARA LOS ENSAYOS BATCH REALIZADOS CON R EN LABORATORIO (IZQUIERDA) Y PLANTA PILOTO (DERECHA). ....	142
FIGURA 6.1. EVOLUCIÓN DE VALORES MEDIOS OBTENIDOS EN EL PARÁMETRO SÓLIDO VOLÁTIL EN CADA ENSAYO DESARROLLADO CON DIFERENTES SUSTRATOS.....	162
FIGURA 6.2. EVOLUCIÓN DE VALORES MEDIOS OBTENIDOS EN EL PARÁMETRO DQO EN CADA ENSAYO DESARROLLADO CON DIFERENTES SUSTRATOS. ....	163
FIGURA 6.3. EVOLUCIÓN DE VALORES MEDIOS OBTENIDOS EN EL PARÁMETRO NITRÓGENO AMONICAL EN CADA ENSAYO DESARROLLADO CON DIFERENTES SUSTRATOS.....	164
FIGURA 6.4. EVOLUCIÓN DE VALORES MEDIOS OBTENIDOS EN VOLUMEN DE BIOGÁS EN CADA ENSAYO DESARROLLADO CON DIFERENTES SUSTRATOS. LOS RESULTADOS REPRESENTADOS CORRESPONDEN A VALORES MEDIOS DE TRES RÉPLICAS. ....	165
FIGURA 6.5. RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO MEDIO DIARIO EN CADA ENSAYO DESARROLLADO CON DIFERENTES SUSTRATOS. LOS RESULTADOS REPRESENTADOS CORRESPONDEN A VALORES MEDIOS DE TRES RÉPLICAS.....	166
FIGURA 6.6. EVOLUCIÓN DE VALORES MEDIOS OBTENIDOS EN EL PARÁMETRO ALCALINIDAD EN CADA ENSAYO DESARROLLADO CON DIFERENTES SUSTRATOS.....	167

FIGURA 6.7. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO PARA LOS SUSTRATOS ESTUDIADOS B, S, R Y A EN LABORATORIO (IZQUIERDA) Y PLANTA PILOTO (DERECHA). .....	176
FIGURA 6.8. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO PARA UNA VCO DE $1 \text{ G SV L}_D^{-1} \text{ D}^{-1}$ . .....	183
FIGURA 6.9. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO OBTENIDO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO PARA UNA VCO DE $1 \text{ G SV L}_D^{-1} \text{ D}^{-1}$ . .....	184
FIGURA 6.10. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO OBTENIDO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO PARA UNA VCO DE $2 \text{ G SV L}_D^{-1} \text{ D}^{-1}$ . .....	184
FIGURA 6.11. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO OBTENIDO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO PARA UNA VCO DE $3 \text{ G SV L}_D^{-1} \text{ D}^{-1}$ . .....	185
FIGURA 6.12. EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO OBTENIDO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO PARA UNA VCO DE $4 \text{ G SV L}_D^{-1} \text{ D}^{-1}$ . .....	185
FIGURA 6.13. PRINCIPALES EFECTOS E INTERACCIONES DE DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS EN EL ALIMENTO Y A DIFERENTES VCO PARA LOS PARÁMETROS RENDIMIENTO DE METANO (A) Y REDUCCIÓN DQO (B). .....	187
FIGURA 6.14. PRINCIPALES EFECTOS E INTERACCIONES DE DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS EN EL ALIMENTO Y A DIFERENTES VCO PARA LOS PARÁMETROS REDUCCIÓN SV (C) Y NITRÓGENO AMONIAICAL (D). .....	188
FIGURA 6.15. PRINCIPALES EFECTOS E INTERACCIONES DE DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS EN EL ALIMENTO Y A DIFERENTES VCO PARA LOS PARÁMETROS ALCALINIDAD (E) Y AGV (F). .....	188
FIGURA 6.16. PRINCIPALES EFECTOS E INTERACCIONES DE DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS EN EL ALIMENTO Y A DIFERENTES VCO PARA EL PARÁMETRO RATIO C/N (G). .....	189
FIGURA 6.17. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS Y LA CONCENTRACIÓN DE METANO OBTENIDOS POR EL EXPERIMENTO STP1. ....	193
FIGURA 6.18. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS Y LA CONCENTRACIÓN DE METANO OBTENIDOS POR EL EXPERIMENTO STP2. ....	194
FIGURA 6.19. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS Y LA CONCENTRACIÓN DE METANO OBTENIDOS POR EL EXPERIMENTO STPA1. ....	194
FIGURA 6.20. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS Y LA CONCENTRACIÓN DE METANO OBTENIDOS POR LA EXPERIENCIA DESARROLLADA EN PLANTA PILOTO SIN ACEITE DE COLZA DIVIDIDA EN LOS EXPERIMENTOS STP3 Y STP4. ....	195
FIGURA 6.21. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS Y LA CONCENTRACIÓN DE METANO OBTENIDOS POR LA EXPERIENCIA DESARROLLADA EN PLANTA PILOTO CON ACEITE DE COLZA DIVIDIDA EN LOS EXPERIMENTOS STPA2, STPA3 Y STPA4. ....	195
FIGURA 6.22. RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO A LO LARGO DE LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO STP2 Y STPA1. ....	196
FIGURA 6.23. RENDIMIENTO DE METANO ACUMULADO A LO LARGO DE LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN PLANTA PILOTO STP3-4 Y STPA2-3-4. ....	197
FIGURA 6.24. EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS ST (VALORES ABAJO) Y SV (VALORES ARRIBA) A LO LARGO DEL TIEMPO PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO STP2 Y STPA1 (A), Y PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN PLANTA PILOTO STP3-4 Y STPA2-3-4 (B). ....	198

FIGURA 6.25. EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO AGV A LO LARGO DEL TIEMPO PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO STP2 Y STPA1 (A), Y PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN PLANTA PILOTO STP3-4 Y STPA2-3-4 (B).....	198
FIGURA 6.26. EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO N-NH <sub>4</sub> A LO LARGO DEL TIEMPO PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO STP2 Y STPA1 (A), Y PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN PLANTA PILOTO STP3-4 Y STPA2-3-4 (B).....	199
FIGURA 6.27. EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS PH (VALORES ABAJO) Y ALCALINIDAD (VALORES ARRIBA) DEL MEDIO A LO LARGO DEL TIEMPO PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO STP2 Y STPA1 (A), Y PARA LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN PLANTA PILOTO STP3-4 Y STPA2-3-4 (B). ....	200

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. CERDO IBÉRICO RIBER 2013 [16].....	23
TABLA 1.2. ENCUESTAS GANADERAS PORCINAS REALIZADAS EN NOVIEMBRE DE 2015.....	23
TABLA 3.1. TIPOS DE BACTERIAS POR ETAPAS [33] [35].....	34
TABLA 3.2. CONCENTRACIÓN DE TOXICIDAD E INHIBICIÓN DE METALES PESADOS [64]. ....	42
TABLA 3.3. COMPOSICIÓN DE ESTIÉRCOLES Y PURINES DE DISTINTOS ORIGEN [72].....	47
TABLA 3.4. COMPOSICIÓN DEL PURÍN DE CERDO EN CADA FASE PRODUCTIVA [72].....	48
TABLA 3.5. RENDIMIENTOS DE BIOGÁS DE DISTINTOS CULTIVOS SEGÚN ESTABLECE LA IEA EN “BIOGAS FROM ENERGY CROP DIGESTION” [93].....	57
TABLA 3.6. CARACTERÍSTICAS DE DISTINTOS TIPOS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS.....	58
TABLA 3.7. COMPUESTOS DEL BIOGÁS [105]. ....	60
TABLA 3.8. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL DIGESTATO EN FUNCIÓN DEL ORIGEN DE LOS RESIDUOS DIGERIDOS ANAERÓBICAMENTE [108].....	64
TABLA 4.1. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE SORGO, TRITICALE Y ACEITE DE COLZA. ....	89
TABLA 4.2. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE BIOMASA MICROALGAL. ....	89
TABLA 4.3. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE PURÍN Y RASTROJO DE MAÍZ.....	90
TABLA 4.4. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN. ....	91
TABLA 4.5. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL. ....	91
TABLA 4.6. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN.....	92
TABLA 4.7. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE. ....	92
TABLA 4.8. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ.....	93
TABLA 4.9. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN. ....	94
TABLA 4.10. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE, PURÍN Y ACEITE DE COLZA. ....	94
TABLA 4.11. CONDICIONES DE ANÁLISIS ANOVA PARA ENSAYOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN SEMI-CONTINUO. ....	100
TABLA 4.13. PROCESO BIOQUÍMICO Y ECUACIONES CINÉTICAS DEL MODELO ADM1. ....	110
TABLA 5.1. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE SORGO (S1).....	113
TABLA 5.2. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE SORGO (S2).....	114
TABLA 5.3. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE SORGO (S3).....	115
TABLA 5.4. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE TRITICALE (T1).....	116
TABLA 5.5. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE TRITICALE (T2).....	117
TABLA 5.6. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE TRITICALE (T3).....	118
TABLA 5.7. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE ACEITE DE COLZA (A1). ....	119
TABLA 5.8. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE ACEITE DE COLZA (A2). ....	121
TABLA 5.9. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE ACEITE DE COLZA (A3). ....	122
TABLA 5.10. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE BIOMASA MICROALGAL (B1). ...	123
TABLA 5.11. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE BIOMASA MICROALGAL (B2). ...	124
TABLA 5.12. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE BIOMASA MICROALGAL (B3). ...	125
TABLA 5.13. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE PURÍN (P1).....	126
TABLA 5.14. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE PURÍN (P2).....	127
TABLA 5.15. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE PURÍN (P3).....	128

TABLA 5.16. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE RASTROJO DE MAÍZ (R1). .....	129
TABLA 5.17. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE RASTROJO DE MAÍZ (R2). .....	130
TABLA 5.18. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE RASTROJO DE MAÍZ (R3). .....	131
TABLA 5.19. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE SORGO EN PLANTA PILOTO (S4). .....	133
TABLA 5.20. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE TRITICALE EN PLANTA PILOTO (T4). .....	134
TABLA 5.21. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE ACEITE DE COLZA EN PLANTA PILOTO (A4). .....	135
TABLA 5.22. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE BIOMASA MICROALGAL EN PLANTA PILOTO (B4). .....	136
TABLA 5.23. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE PURÍN EN PLANTA PILOTO (P4). .....	138
TABLA 5.24. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE RASTROJO DE MAÍZ EN PLANTA PILOTO (P4). .....	139
TABLA 5.25. VALORES DE CONCENTRACIONES DE COMPUESTOS O FRACCIONES SOLUBLES Y CONSTANTES CINÉTICAS PARA EXPERIMENTOS BATCH DESARROLLADOS CON S, R, A Y B. ....	140
TABLA 5.26. PARÁMETROS ANALIZADOS EN SUSTRATOS EMPLEADOS COMO ALIMENTO EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN BATCH Y SEMI-CONTINUO EN LABORATORIO. ....	146
TABLA 5.27. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP1). ....	147
TABLA 5.28. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP2). ....	147
TABLA 5.29. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP3). ....	147
TABLA 5.30. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP4). ....	147
TABLA 5.31. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB1). ....	148
TABLA 5.32. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB2). ....	148
TABLA 5.33. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB3). ....	148
TABLA 5.34. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB4). ....	148
TABLA 5.35. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP1)... ..	149
TABLA 5.36. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP2)... ..	149
TABLA 5.37. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP3)... ..	149
TABLA 5.38. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP4)... ..	149
TABLA 5.39. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT1). .....	150
TABLA 5.40. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT2). .....	150
TABLA 5.41. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI- CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT3). .....	150

TABLA 5.42. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT4).....	150
TABLA 5.43. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR1).....	151
TABLA 5.44. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR2).....	151
TABLA 5.45. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR3).....	151
TABLA 5.46. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR4).....	151
TABLA 5.47. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN (STP1). ....	152
TABLA 5.48. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN (STP2). ....	152
TABLA 5.49. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE, PURÍN Y ACEITE DE COLZA (STPA1).....	152
TABLA 5.50. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN (STP3-4). ....	153
TABLA 5.51. PARÁMETROS ANALIZADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE, PURÍN Y ACEITE DE COLZA (STPA2-3-4). ....	153
TABLA 5.52. CONDICIONES DE PARTIDA PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y ECONÓMICA DE LOS EXPERIMENTOS P0 Y STPA2. ....	153
TABLA 5.53. ESTUDIOS ENERGÉTICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS EN FUNCIONAMIENTO EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO Y ALIMENTADA POR PURÍN. ....	154
TABLA 5.54. ESTUDIOS ENERGÉTICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS EN FUNCIONAMIENTO EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO Y ALIMENTADA POR UNA MEZCLA DE PURÍN, TRITICALE, SORGO Y ACEITE DE COLZA. ....	154
TABLA 6.1. RESULTADOS CORRESPONDIENTES A ANÁLISIS ANOVA DE ENSAYOS TIPO BATCH REALIZADOS EN LABORATORIO EN MONO-DIGESTIÓN PARA DIVERSOS PARÁMETROS.....	159
TABLA 6.2. PARÁMETROS EVALUADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DESARROLLADOS EN PLANTA PILOTO PARA LOS SUSTRATOS S, T, A, B, P Y R ESTUDIADOS.....	170
TABLA 6.3. PARÁMETROS ESTIMADOS DE ACUERDO A LOS MODELOS CINÉTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO EN ENSAYOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA BATCH CON LOS DIFERENTES SUSTRATOS. ....	171
TABLA 6.4. RENDIMIENTOS DE METANO OBTENIDOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R MEZCLADOS EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO A DIFERENTE VCO. ....	177
TABLA 6.5. ANÁLISIS ANOVA DE PARÁMETROS EVALUADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO PARA LOS SUSTRATOS S, T, B, P Y R EN DIFERENTES PROPORCIONES EN EL ALIMENTO Y MODIFICANDO LA VCO.....	181
TABLA 6.6. VALORES DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE PARÁMETROS ANALIZADOS PARA DIFERENTES VCO (VALORES EN NEGRITA INDICAN CORRELACIONES DE MAGNITUD MODERADA A ALTA ENTRE VARIABLES).....	189

TABLA 6.7. VALORES DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE PARÁMETROS ANALIZADOS PARA DIFERENTES SERIES DE EXPERIMENTOS (VALORES EN NEGRITA INDICAN CORRELACIONES DE MAGNITUD MODERADA A ALTA ENTRE VARIABLES) .....	189
TABLA 6.8. PARÁMETROS EVALUADOS EN EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO DESARROLLADOS EN LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA LOS SUSTRATOS S, T, P Y A ESTUDIADOS, EVALUANDO LA INFLUENCIA DEL SUSTRATO A EN LA PRODUCCIÓN.....	191
TABLA 6.9. ANÁLISIS ANOVA DE LOS PARÁMETROS ALCALINIDAD, N-NH <sub>4</sub> Y AGV PARA LOS EXPERIMENTOS STP2, STPA1, STP3-4 Y STPA2-3-4.....	201
TABLA 6.10. CARACTERIZACIÓN DEL DIGESTATO OBTENIDO EN LOS EXPERIMENTOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO Y PLANTA PILOTO, Y EMPLEANDO ACEITE DE COLZA EN EL ALIMENTO Y SIN EMPLEARLA.....	201
TABLA 6.11. FASES EN EL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA DOSIS Y COMPOSICIÓN DE DIGESTATO (PROCEDENTE DEL EXPERIMENTO STPA2-3-4) APLICADO A UN ENSAYO DE CEREAL DE PRIMAVERA DETERMINADO [153]. .....	203
TABLA 6.12. CLASIFICACIÓN DE DIGESTATOS OBTENIDOS BASADA EN LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS SEGÚN EL RD 999/2017 [155]. .....	203
TABLA 6.13. EJEMPLOS DE TIPOLOGÍAS Y CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE DIFERENTES PLANTAS DE BIOGÁS. ....	206
TABLA 9.1. COEFICIENTES BIOQUÍMICOS DE VELOCIDAD ( $\gamma_{i,j}$ ) Y ECUACIONES DE VELOCIDAD CINÉTICA ( $\rho_i$ ) PARA COMPONENTES SOLUBLES (i=1-12; j=1-19).....	229
TABLA 9.2. COEFICIENTES BIOQUÍMICOS DE VELOCIDAD ( $\gamma_{i,j}$ ) Y ECUACIONES DE VELOCIDAD CINÉTICA ( $\rho_i$ ) PARA COMPONENTES PARTICULADOS (i=13-24; j=1-19).....	230
TABLA 9.3. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP1). ....	231
TABLA 9.4. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP2). ....	233
TABLA 9.5. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP3). ....	235
TABLA 9.6. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y PURÍN (SP4). ....	237
TABLA 9.7. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB1).....	239
TABLA 9.8. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB2).....	241
TABLA 9.9. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB3).....	243
TABLA 9.10. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO Y BIOMASA MICROALGAL (SB4).....	245
TABLA 9.11. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP1). ....	247
TABLA 9.12. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP2). ....	249
TABLA 9.13. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP3). ....	251
TABLA 9.14. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL Y PURÍN (SBP4). ....	253
TABLA 9.15. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT1).....	255
TABLA 9.16. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT2).....	257

TABLA 9.17. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT3).....	259
TABLA 9.18. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN Y TRITICALE (SBPT4).....	261
TABLA 9.19. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR1). ...	263
TABLA 9.20. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR2). ...	265
TABLA 9.21. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR3). ...	267
TABLA 9.22. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, BIOMASA MICROALGAL, PURÍN, TRITICALE Y RASTROJO DE MAÍZ (SBPTR4). ...	269
TABLA 9.23. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN (STP1).....	271
TABLA 9.24. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN (STP2).....	273
TABLA 9.25. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE Y PURÍN EN PLANTA PILOTO (STP3-4).....	275
TABLA 9.26. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE, PURÍN Y ACEITE DE COLZA (STPA1). ....	277
TABLA 9.27. EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO SEMI-CONTINUO ALIMENTADOS CON UNA MEZCLA DE SORGO, TRITICALE, PURÍN Y ACEITE DE COLZA EN PLANTA PILOTO (STPA2-3-4). ....	279



## RESUMEN

El estudio de optimización de aquellas condiciones adecuadas para un proceso de digestión anaerobia empleando cultivos energéticos y residuos agroindustriales supone un importante avance en el sector ganadero, y es el tema tratado en el trabajo de Tesis. Por un lado, debido a la baja actividad existente actualmente en cuanto al tratamiento de sustratos en plantas de biogás en España se necesita impulsar esta tecnología. Por otro lado, en literatura se encuentran infinitos estudios acerca de la digestión anaerobia con multitud de sustratos, lo que sucede es que la mayor parte de ellos se realizan a pequeña escala, la cual no es reproducible a escala real ya que en este caso no se reflejan todos los obstáculos o dificultades que supone el escalado. Por ello y en consonancia con el desarrollo de la economía verde, se facilita con este proyecto la puesta a punto de instalaciones generadoras de biogás proporcionando diversas opciones y aportando una garantía de funcionamiento y continuidad. Concretamente, se han llevado a cabo evaluaciones desarrolladas a escala de planta piloto persiguiendo como objetivos reproducir la digestión anaerobia de la forma más sencilla y real posible, y conseguir potenciales de generación de biogás elevados empleando diferentes mezclas de sustratos. Para ello, el trabajo de Tesis se centra en los siguientes aspectos:

1. Evaluación del rendimiento de biogás/metano para los sustratos seleccionados (sorgo, triticale, biomasa microalgal, purín, aceite de colza y rastrojo de maíz) mediante ensayos tipo batch en reactores de laboratorio y planta piloto.
2. Optimización de aquellas mezclas de alimento de los sustratos anteriormente citados a diferentes Velocidades de Carga Orgánica (VCO) en laboratorio y planta piloto.
3. Estudio de la influencia del aceite de colza en el aumento del rendimiento de biogás/metano.

Los resultados obtenidos tras realizar el trabajo de evaluación del rendimiento de biogás/metano para cada uno de los sustratos facilita la optimización de las cantidades a emplear como alimento. En el caso de los sustratos sorgo y aceite de colza los rendimientos de metano obtenidos a diferente escala (laboratorio y planta piloto) muestran una acertada similitud ( $397 \text{ NLCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  frente a  $419 \text{ NLCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  y

655 NLCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> frente a 740 NLCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>, respectivamente, para planta piloto y laboratorio). Se ha de mencionar que se corresponde con aquellos sustratos que se emplearon en idénticas condiciones de partida. Adicionalmente, se llevaron a cabo estudios cinéticos sobre la evolución del volumen de metano acumulado con respecto al tiempo, obteniéndose una mayor velocidad de generación de metano más elevada para los sustratos sorgo y rastrojo de maíz (0,1145 d<sup>-1</sup> y 0,1138 d<sup>-1</sup>, respectivamente). Finalmente, en los ensayos discontinuos o batch se modelizó el comportamiento de las distintas especies a lo largo de todo el proceso de digestión anaerobia para los sustratos sorgo, rastrojo de maíz, biomasa microalgal y aceite de colza, a ambas escalas de trabajo. Se obtuvo un ajuste muy bueno en todos los casos, lo cual permitió que se haya podido simular el comportamiento mencionado anteriormente.

En cuanto a la optimización de aquellas mezclas más adecuadas para potenciar el rendimiento de biogás/metano obtenido se deduce que una VCO de 1 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> conlleva valores de rendimientos de metano más elevados en las series de experimentos que contienen menor número de sustratos en la mezcla alimentada al digestor. Sin embargo, las series de experimentos estudiadas que presentan mayor número de sustratos en la mezcla alimentada obtienen rendimientos de metano más altos con VCO de 2 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> y 3 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. Este hecho se puede deber a la sinergia conseguida gracias al aporte de un mayor número de sustratos (nutrientes), lo cual provoca una respuesta positiva frente a una posible inhibición como aparece en bibliografía.

Por otro lado, la influencia del sustrato aceite de colza en la mezcla alimentada al digestor en el rendimiento de biogás/metano producido es positiva tanto a nivel de laboratorio (incrementos del 20%) y planta piloto (incrementos del 30%).

Para cumplir con los objetivos de una economía circular se ha llevado a cabo además una caracterización de digestatos obtenidos en experimentos desarrollados presentando unos valores de K<sub>2</sub>O que oscilan entre 0,10-0,89 %, valores de N entre 0,20-0,25 %, y valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> situados en un rango que va desde 0,04% a 0,09 %. Todos los resultados obtenidos para N y los óxidos de P y K son comparables a contenidos obtenidos por otros autores. En cuanto a la clasificación de dichos digestatos de acuerdo al RD 999/2017 para su uso como biofertilizantes se pueden establecer como fertilizantes de clase A o B.

Finalmente, se realizó una extrapolación de resultados reales obtenidos en experimentos en planta piloto a una planta de biogás de 70 m<sup>3</sup> con el objetivo de determinar un estudio energético y económico más cercano a la realidad. Los resultados obtenidos muestran una producción de energía térmica diaria cerca de 10 veces mayor (383,55 kWh frente a 40,82 kWh) para un proceso de co-digestión anaerobia empleando una mezcla alimentada de sorgo, triticale, purín de cerdo y aceite de colza, frente a una mono-digestión anaerobia llevada a cabo con purín de cerdo, ambas en régimen semi-continuo. Para el estudio económico, se estimaron unos tiempos de retorno de la inversión de 14,67 años para el proceso de co-digestión anaerobia descrito anteriormente.

## ABSTRACT

The optimization study of initial conditions of an anaerobic digestion using energy crops and agroindustrial waste involves an important progress to livestock sector, and it is the main topic of this study. On the one hand, there are few biogas plants in Spain today. For this reason that technology is necessary to impulse it. On the other hand, a lot of studies about anaerobic digestion employing different substrates are found in literature. However, most of the research papers are performed in a small scale which is not reproducible in a real scale because obstacles or difficulties from a big scale are not reflected. Thus, according to green Economy, this study facilitates the set-up of biogas facilities, provides different mixtures in the feeding and provides a guarantee of operation and continuity of the biogas plant. Specifically, assessments developed in a pilot scale have been studied to get two main aims, a simple replication of anaerobic digestion process, and an elevate biogas yield using different mixture of substrates. Definitely, the study has been focused in the following aspects:

1. Evaluation of the biogas/methane yield for selectioned substrates (sorghum, triticale, microalgae biomass, pig manure, corn straw and rapeseed oil) through batch assays in laboratory and pilot plant.
2. Optimization of feeding employing mixtures composed by previously mentioned substrates for different Organic Load Rate (OLR) in laboratory and pilot plant.
3. Study of the rapeseed oil influence in the biogas/methane yield.

The results obtained after evaluating the biogas/methane yield for each substrate help to the optimize the substrates proportion in the feeding. The sorghum and rapeseed oil substrates methane yields obtained in different scale (laboratory and pilot plant) show similar values ( $397 \text{ NLCH}_4 \text{ kg VS}^{-1}$  versus  $419 \text{ NLCH}_4 \text{ kg VS}^{-1}$  and  $655 \text{ NLCH}_4 \text{ kg VS}^{-1}$  versus  $740 \text{ NLCH}_4 \text{ kg VS}^{-1}$ , respectively, for pilot plant and laboratory). For all experiments, substrates were employed in the same initial conditions. Additionally, kinetic studies of acumulated methane volumen were carried out. It was obtained the highest methane generation rate for sorghum biomass and corn stover substrates ( $0,1145 \text{ d}^{-1}$  and  $0,1138 \text{ d}^{-1}$ , respectively). Finally, the behaviour of different species were modelling in batch assays throughout anaerobic digestion process for sorghum biomass,

corn stover, microalgae biomass and rapeseed oil at different scale. An excellent fit was achieved for each substrate so the behaviour be able to simulated.

In relation to the mixture optimization of substrates to increases the biogas/methane yield, high values of methane yield were determined when the OLR used was  $1 \text{ g VS L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  (for studied experiments using feeding composed of three or less substrates). However, experiments studied that mixture were composed of four or five substrates obtained methane yields higher than other experiments with OLR of  $2 \text{ g VS L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  and  $3 \text{ g VS L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ . This issue could be due to the synergy achieved thanks to the input of the high content of nutrients. It induces a positive reply opposite a possible inhibition as it is appeared in literature.

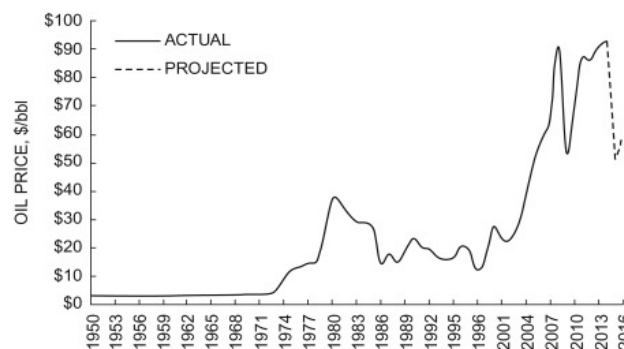
On the other hand, a positive influences in the biogas/methane yield was achieved employing rapeseed oil in the feeding, at laboratory level (20% of increase) and pilot plant level (30 % of increase).

A characterization of the digestates generated were carried out in experiments developed to accomplish with a circular economy. The results show values of  $\text{K}_2\text{O}$  around 0,10-0,89 %, values of N between 0,20-0,25 %, and values of  $\text{P}_2\text{O}_5$  ranged to 0,04% and 0,09 %. All results obtained for N and P and K oxides can be compared to values published by other authors. According to RD 999/2017 about the clasification of digestates for using as biofertilizers can be stablished as class A or B.

Finally, an extrapolation of real results from experiments evaluated in pilot plant was performed for a biogas plant of  $70 \text{ m}^3$  capacity. The aim was to develop an energetic and economic study close to the reality. Results obtained show a diary thermal energetic production 10 times higher (383,55 kWh opposite to 40,82 kWh) for anaerobic co-digestion process (employing a feeding composed of sorghum, triticale, pig manure and rapeseed oil) than a simple anaerobic digestion carried out with pig manure, both of them in semi-continuous regime. For economic study were estimated a return on investment of 14,67 years, corresponding to previous anaerobic co-digestion process mentioned.

## 1. Antecedentes

Una tecnología a partir de la cual se puedan obtener beneficios energéticos hoy en día es sumamente importante. Esto es así debido a que la energía se trata de un bien común de primera necesidad que resulta esencial para la vida y la supervivencia. Por ello, a partir de 1973 tras más de un siglo de abundancia en el suministro de energía de bajo coste (desde el primer pozo de Drake en 1859) se produjo casi una década en la que se comenzó a temer por la escasez de combustible afectando a las economías industriales [1]. Tal y como se refleja en la Figura 1.1, en menos de una década tiene lugar una perturbación muy acusada en el precio del petróleo, a la que le siguen otras dos en la cual los precios permanecen relativamente constantes.

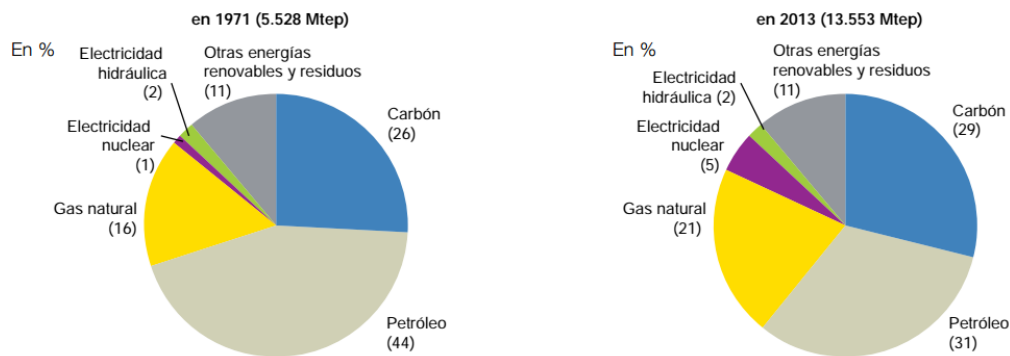


**Figura 1.1.** Histórico de precios del petróleo medios [1].

Como consecuencia de ello se adoptaron medidas de eficiencia a nivel mundial para contrarrestar dicha demanda de combustible. Con la llegada del nuevo milenio los precios del petróleo se dispararon de nuevo, a una velocidad que supuso valores del precio del barril de Brent de más del triple en 8 años. Todo lo acontecido a lo largo de los años con respecto al precio del petróleo influye directamente en el desarrollo de las energías renovables y sus costes, y al mismo tiempo en los esfuerzos por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los gases considerados como de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono siendo el que más contribuye al mismo, el metano que se sitúa en segundo lugar en cuanto al total de las emisiones de gases a la atmósfera, el óxido nitroso y los gases fluorados (PFC, HFC y SF<sub>6</sub>). Las

moléculas de todos estos gases aumentan el calentamiento global del planeta absorbiendo el calor que trata de escapar al espacio.

A mayores precios del petróleo más se incentivará el fomento de energías renovables disminuyendo con ello lógicamente las emisiones de efecto invernadero tan perjudiciales para el planeta. A pesar de ello, la Figura 1.2 que representa la distribución de la energía primaria en el mundo, indica que desgraciadamente en casi 50 años el porcentaje de energía procedente de energías de origen renovable no ha aumentado, apreciándose un descenso en el uso del petróleo a costa de aumentar el gas natural, la electricidad nuclear o el carbón como fuente de energía.



**Figura 1.2.** Distribución de la energía primaria a nivel mundial [2].

Sin embargo, en la actualidad se está apostando a nivel mundial por una economía verde y circular, esto es aquella cuyas emisiones de carbono sean bajas, los recursos de los que se dispone se aprovechen de forma eficiente, los residuos que se generen sean lo más bajos posibles y los productos, materiales y recursos presenten un valor suficiente en la economía durante el mayor tiempo posible.

Entre todas las posibles fuentes de energía renovable se encuentra la bioenergía, que se trata de un tipo de energía que procede del aprovechamiento de la materia orgánica, de residuos de plantas, de personas o de animales. Dependiendo del origen de la bioenergía existen varios tipos, biocombustibles sólidos, se considera a la biomasa cuyo objetivo principal se centra en el procesamiento de materia orgánica principalmente agrícola o forestal, otro tipo son los biocombustibles líquidos (biocarburantes o biodiesel) los

cuales son producto del procesado de aceites vegetales o grasas animales, y finalmente se encuentran los biocombustibles gaseosos, entre los que se encuentra el biogás que procede de residuos orgánicos de origen animal, aunque también se pueden emplear residuos de origen vegetal.

Aquellos países del mundo en los que las producciones de biogás son mayores son China, Estados Unidos y Alemania. El uso que se le da a este tipo de biocombustible varía mucho dependiendo del país en el que nos encontremos. En China la mayor parte del biogás se produce a pequeña escala y se emplea para uso doméstico. Por el contrario, en Estados Unidos el 50% del biogás generado es empleado para la generación de electricidad mientras que la otra mitad se emplea para producir calor. Los países europeos (con Alemania a la cabeza, seguida de Italia y Reino Unido) emplean más del 90% del biogás generado para producir energía eléctrica.

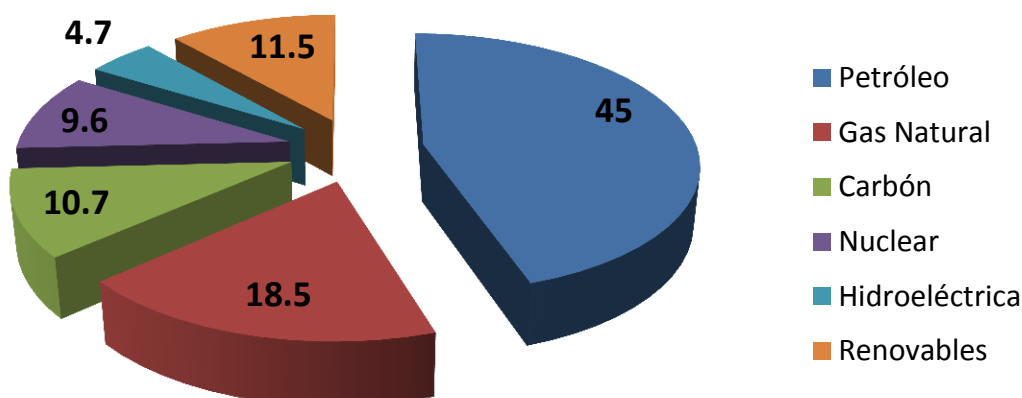
Un estudio más detallado a nivel meramente europeo muestra una situación actual del biogás muy desarrollada en algunos países frente a una escasa existencia de plantas de biogás en muchos otros. Según el informe estadístico presentado por la Asociación Europea de Biogás (EBA) se está produciendo un crecimiento continuado en el sector del biogás, en concreto se ha conseguido triplicar prácticamente el número de plantas de biogás en los últimos seis años. En 2015 existían en Europa 17.376 plantas de biogás, marcado por un crecimiento significativo en países como Reino Unido, Bélgica y Países Bajos, donde el crecimiento supuso el 17%, 11% y 6%, respectivamente [3].

A nivel nacional, el consumo de energía procedente de renovables supuso en 2016 el 11,5% del total de las energías primarias, tal y como aparece reflejado en la Figura 1.3.

España tiene un potencial de generación de biogás de unos 1.8 Mtep, considerándose el biogás agroindustrial como su principal contribuyente a esta cantidad suponiendo el 78% del total [4]. No obstante, España se sitúa a la cola en cuanto a número de plantas de biogás, no superando las 40 plantas totales.



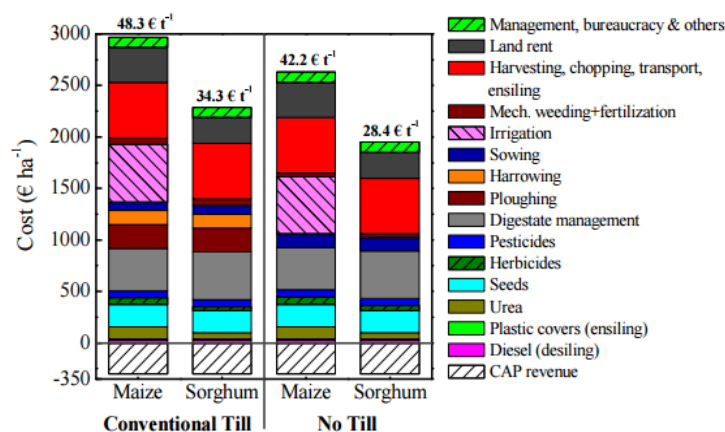
## Consumo energía primaria en España



**Figura 1.3.** Consumo de energía primaria en España en 2015 según BP Statistical Review of World Energy 2016 [5].

Lejos de esta realidad se sitúa Italia, cuyo número de plantas de biogás era ya de 994 a finales de 2012. Como consecuencia de la creciente expansión en este tipo de bioenergía diversos autores llevan a cabo estudios acerca de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero Evitadas (GEI) y de la factibilidad de producir energía eléctrica con diversos tipos de sustratos en función de sus gastos. En la Figura 1.4 se puede observar como la gestión del digestato empleado como propio abono para el cultivo supone una gran parte de los costes totales del cultivo relacionado con el impacto ambiental que causa en el medio ambiente según métodos de evaluación del ciclo de vida recomendados por el ILCD (International Reference Life Cycle Data System) [6, 7].

En concreto, en una planta situada en Valle del Po se realizó un estudio de sus propios purines generados, sorgo y maíz como opciones de sustratos a emplear en la misma [8]. Como principales conclusiones, se extrajeron: beneficios económicos en las operaciones realizadas en el proceso desde el punto de vista de la electricidad producida y menores emisiones GEI cuando se empleaban mezclas de purines y sorgo en lugar de sorgo o maíz ensilado de forma independiente; cultivar sorgo en lugar de maíz genera mejoras económicas y ambientales para la granja en general.



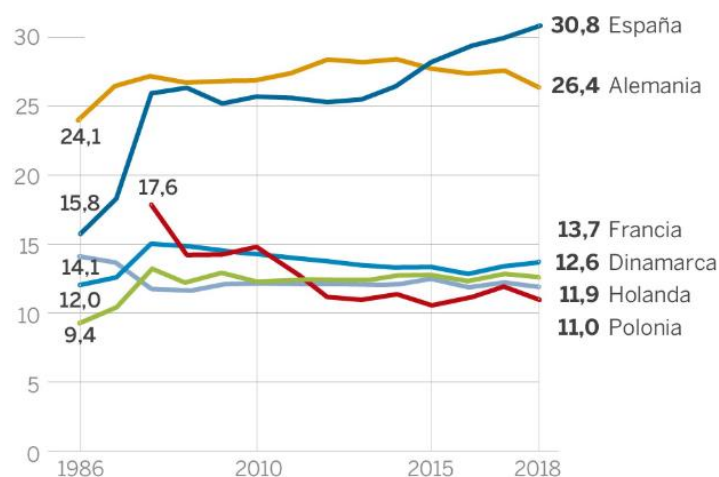
**Figura 1.4.** Análisis de la contribución de costes en el cultivo de sorgo y maíz para cultivos convencionales y no convencionales [8].

Para avanzar en este tipo de bioenergía en España se deben integrar los dos objetivos fundamentales, sus objetivos energéticos, incentivándose la realización de cogeneraciones e incluso estableciéndose un posible marco normativo y económico para su inyección en redes, y las políticas medioambientales, reconociéndose económicamente las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas a la atmósfera por la digestión anaerobia de las deyecciones ganaderas. Según IDAE en el PER 2011-2020 se estima que se hayan evitado 3.093.316 tCO<sub>2</sub> gracias al empleo sostenible de biogás, asimismo se prevén emisiones acumuladas de CH<sub>4</sub> y NO<sub>2</sub> evitadas por las nuevas tecnologías de la biodigestión expresadas como tCO<sub>2</sub> equivalentes de 10.069.317 tCO<sub>2</sub> equivalentes asociadas al uso eléctrico del biogás y 4.277.718 tCO<sub>2</sub> equivalentes asociadas al empleo térmico del biogás.

Para conseguir un biogás aprovechable energéticamente es necesario que en los reactores pertinentes tenga lugar un proceso de digestión anaerobia, esto es en ausencia de oxígeno, con el objetivo de que los microorganismos responsables de producir un biogás rico en metano se mantengan con vida y se puedan desarrollar adecuadamente en el medio de digestión, siempre predominando frente a otros [9, 10, 11, 12 y 13].

La digestión anaerobia puede aplicarse a residuos ganaderos agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Los residuos a los que se refiere son: purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, entre otros [14].

Este estudio se va a centrar en los residuos ganaderos de carácter porcino como base de estudio debido al gran potencial que posee España actualmente. En la Figura 1.5 se puede observar la evolución temporal de la producción de purines de cerdo en diferentes países como Francia, Alemania o España, situándose éste último a la cabeza en 2018.



**Figura 1.5.** Censo de cerdos en diferentes países europeos en millones de animales anuales (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

Asimismo, la comunidad autónoma de Extremadura está situada en el tercer lugar en cuanto a productor en España de piezas curadas [15]. En la Tabla 1.1, se muestran datos de cerdo ibérico en 2013 en diferentes comunidades autónomas siendo Extremadura una de las que posee mayor cantidad de animales.

Si se comparan datos de toda España en el año 2015 con los datos recogidos en cuanto al censo del sector porcino en general, Extremadura se sitúa en una posición intermedia con respecto al resto de comunidades autónomas (Tabla 1.2)[17].

Presentados estos datos, resulta necesario aprovechar al máximo la fuente de residuos que genera el citado sector desarrollando tratamiento de los mismos, siendo el más conocido el desarrollado con los purines mediante una digestión anaerobia.

Tabla 1.1. Cerdo ibérico Riber 2013 [16].

	Andalucía	Extremadura	C. La Mancha	C. y León	España
<i>Ibérico puro bellota</i>	73.973	30.998	1.333	892	107.232
<i>Ibérico bellota</i>	78.765	149.564	1.932	28.348	258.609
<b>Total bellota</b>	<b>153.238</b>	<b>180.562</b>	<b>3.265</b>	<b>29.240</b>	<b>365.841</b>
<i>Ibérico puro recebo</i>	835	2.081	0	64	2.980
<i>Ibérico recebo</i>	935	7.395	0	2.670	11.000
<b>Total recebo</b>	<b>1.770</b>	<b>9.476</b>	<b>0</b>	<b>2.734</b>	<b>13.980</b>
<i>Ibérico puro cebo campo</i>	1.945	210	0	8.181	10.336
<i>Ibérico cebo campo</i>	11.547	11.599	190	1.737	25.073
<b>Total cebo campo</b>	<b>13.492</b>	<b>11.809</b>	<b>190</b>	<b>9.918</b>	<b>35.409</b>
<i>Ibérico puro cebo</i>	2.650	2.357	2.086	4.524	1.787
<i>Ibérico cebo</i>	95.130	417.188	194.547	706.373	1.567.818
<b>Total cebo</b>	<b>97.780</b>	<b>419.545</b>	<b>196.633</b>	<b>710.897</b>	<b>1.579.605</b>
<b>Total ibérico puro</b>	<b>79.403</b>	<b>35.646</b>	<b>3.419</b>	<b>13.661</b>	<b>132.335</b>
<b>Total ibérico</b>	<b>186.377</b>	<b>585.746</b>	<b>196.669</b>	<b>739.128</b>	<b>1.862.500</b>
<b>Totales</b>	<b>265.780</b>	<b>621.392</b>	<b>200.088</b>	<b>752.789</b>	<b>1.994.835</b>

Tabla 1.2. Encuestas ganaderas porcinas realizadas en Noviembre de 2015.

ENCUESTAS GANADERAS, 2015 GANADO PORCINO							
Análisis del censo de animales por tipos, NOVIEMBRE 2015 (número de animales)							
Comunidades Autónomas	Total animales	Lechones	Cerdos de 20-49 kg (peso vivo)	Cerdos en cebo			
				Total cerdos de cebo (peso vivo)	De 50-79 kg	De 80-109 kg	> 109 kg
GALICIA	1.082.035	259.991	279.184	440.222	200.440	148.695	91.087
P. DE ASTURIAS	14.281	4.031	3.008	5.130	2.462	2.206	462
CANTABRIA	2.400	345	371	1.361	428	509	424
PAIS VASCO	27.124	1.974	8.763	15.279	6.766	6.707	1.806
NAVARRA	528.764	60.025	74.809	327.055	188.509	119.592	18.954
LA RIOJA	92.359	12.042	22.998	52.412	26.439	23.562	2.411
ARAGÓN	6.904.196	2.107.993	1.932.635	2.377.261	1.026.227	1.265.577	85.457
CATALUÑA	7.699.746	2.147.213	1.714.778	3.200.999	1.650.621	1.437.784	112.594
BALEARES	56.879	23.883	6.708	11.704	4.610	4.393	2701
MADRID	22.896	7.299	5.859	6.658	3.548	2.663	448
C. Y LEÓN	3.694.272	1.092.373	633.849	11.571.767	615.276	668.952	287.539
C. LA MANCHA	1.559.676	483.142	321.699	593.164	248.516	266.955	77.692
C. VALENCIA	1.107.816	300.233	223.343	509.238	234.787	253.406	21.045
R. DE MURCIA	1.744.862	289.869	555.863	763.368	317.445	394.280	51.642
Badajoz	1.269.406	446.635	183.224	479.522	60.809	84.882	333.831
Cáceres	108.749	26.410	12.724	57.756	9.282	16.070	32.403
EXTREMADURA	1.387.154	473.045	195.948	537.277	70.091	100.953	366.234
ANDALUCÍA	2.401.992	630.473	603.607	930.144	275.129	338.393	316.623
CANARIAS	49.882	15.710	11.777	14.943	10.423	3.998	522
ESPAÑA	<b>28.367.335</b>	<b>7.909.641</b>	<b>6.595.199</b>	<b>11.357.982</b>	<b>4.881.716</b>	<b>5.038.625</b>	<b>1.437.641</b>

Los residuos procedentes del cerdo reúnen las características idóneas para llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia debido a que poseen un elevado contenido en agua, una buena capacidad tampón y un contenido en nutrientes adecuado para el correcto desarrollo de los microorganismos en el medio mencionado.

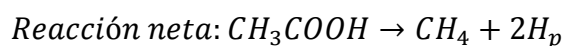
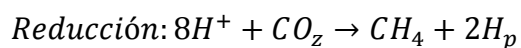
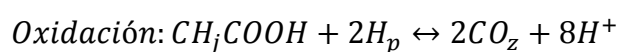
El proceso de digestión anaerobia aplicado a purines de cerdo ha demostrado, a lo largo de las últimas décadas, su viabilidad técnica y versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones de trabajo: grandes instalaciones de gestión centralizada [18]; plantas en granjas individuales [19]; instalaciones sencillas de recuperación de gas en balsas cubiertas [20]; tratando la fracción líquida [21] o la fracción sólida [22]. Las ventajas genéricas del proceso son bien conocidas [23], y las líneas de investigación y desarrollo se dirigen a conocer mejor el proceso a nivel microbiológico, a aumentar la velocidad de proceso, a aumentar la capacidad de control, a incrementar el potencial de producción de biogás, a mejorar el balance energético, a integrar el proceso en un tratamiento completo y, en definitiva, a mejorar el balance económico.

Para conocer más de cerca el tipo de proceso que da lugar a la obtención de biogás se presenta un breve desarrollo de aquellos aspectos más relevantes en este ámbito a lo largo de la historia.

No se debe olvidar que el proceso anaerobio surge de forma espontánea en la naturaleza con el objetivo de degradar la materia orgánica, produciendo entre otros, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los animales rumiantes.

Volta investigó y llegó a identificar el gas de los pantanos en el siglo XVIII (año 1776). Posteriormente, en 1804 Dalton establecería la composición química del metano ( $\text{CH}_4$ ). Pero no fue hasta el siglo XIX cuando se tuvo la certeza de la participación de organismos vivos unicelulares en el proceso, siendo el responsable de tal hallazgo Beauchamp, el cuál estableció concretamente en 1868 la presencia de microorganismos en los procesos de producción de metano. Seguidamente otros autores descubrirían otros hallazgos interesantes relacionados con la formación de este gas. Pasteur confirmó que la temperatura favorecía el desarrollo de los microorganismos más interesantes, y Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias. Hasta ese momento Propoff, junto a otros científicos, Van Senus y Omelianski no tenían claro si las bacterias encargadas de producir metano eran capaces de emplear polímeros directamente, o si por el contrario el gas metano generado era procedente de moléculas más simples, siendo las mismas producidas por la rotura de los polímeros cuyo proceso lo llevarían a cabo otros microorganismos. Omelianski llegó a demostrar que durante la fermentación de la celulosa se producía hidrógeno, ácido

acético y ácido butírico, para seguidamente producir metano. En el aspecto microbiológico, Barker, en 1936, anunció el primer aislamiento en cultivo puro de un metanógeno y muestra resultados de los primeros estudios bioquímicos con este microorganismo. Plantea basándose en la teoría de la reducción del dióxido de carbono desarrollada por Van Niel en 1934 [24] que los electrones generados durante la oxidación del etanol a acetato son utilizados para reducir los iones bicarbonato, los cuales actúan como aceptores finales de electrones respondiendo a la siguiente reacción redox [24]:



En cuanto al aprovechamiento energético del producto obtenido a partir de este tipo de microorganismos, en 1884 fue cuando se atribuyó una aplicación ya que Pasteur propuso la utilización del biogás generado a partir de residuos animales para la iluminación de las calles [25].

Ya en el siglo XX, en la primera mitad se realizaron numerosas experiencias a escala de laboratorio y planta piloto, alcanzando una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Lamentablemente, la mayoría de las instalaciones construidas durante esta época fueron poco a poco cesando en su funcionamiento como consecuencia del fin de la guerra y el fácil acceso a combustibles fósiles. La primera instalación conocida se situaba en Bombay, en 1859, y desde entonces ya en la India se promovió la instalación de pequeñas plantas, a nivel familiar o local, tratando como sustrato estiércol, con el objetivo de producir gas para cocinar y obtener, a su vez, un producto fertilizante. En otros muchos países como Taiwán, Corea, Tailandia, Kenia, Sudáfrica y China se localizan multitud de pequeñas instalaciones de semejantes características, en total se han contabilizado del orden de 5 a 6 millones de digestores en comunas y fábricas [26]. Se trata de digestores en los que no existe tratamiento del gas producido ni control en la estabilidad del proceso.

En países industrializados, la historia de la tecnología de biometanización ha sido diferente y el desarrollo ha estado motivado más por razones medioambientales que energéticas, siendo un método clásico la estabilización de lodos activos residuales de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. A partir de la crisis energética de 1973, y durante la década de los ochenta, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales. Nuevamente, con la bajada de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, no obstante en algunos países industrializados se han llevado a cabo importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial. En estos países se plantean como objetivos primordiales la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. Dinamarca, en 1985, comenzó un programa de demostración, desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica. Así, en 1997 se contabilizaban 19 grandes plantas que trataban conjuntamente residuos de origen industrial, residuos urbanos, lodos de depuradores y residuos ganaderos [27].

En Alemania en 2015, el número total de plantas de biogás era 8.856, con una potencia instalada de 4018 MW, cifras que si se comparan con las españolas resultan extremadamente insuperables. A pesar de ello, en dicho año Alemania sufrió un estancamiento en el incremento del sector del biogás, por este motivo se ha creado en 2017 un nuevo sistema de licitaciones en el que las plantas de biogás ya existentes tienen que pagar 16,9 c€ kWh<sup>-1</sup>, y las plantas de nueva instalación 14,88 c€ kWh<sup>-1</sup>. Además se ha establecido un límite máximo anual de capacidad adicional para los años 2017 a 2019, y otro diferente desde 2020 a 2022. Las plantas de biogás de una capacidad inferior a 150 kW están sometidas a una normativa especial [28]. Por todo ello, Alemania es líder en el mercado y en la tecnología dentro del sector del biogás, y ha adquirido importantes conocimientos, sobretodo en el campo de la gasificación basada en residuos orgánicos y recursos renovables. Las empresas alemanas son pioneras en cada una de las cadenas de valor de las tecnologías relacionadas con el biogás finalizando con la alimentación a la red de gas natural con biogás [29].

En Italia, la industria del biogás tiene un potencial enorme con unas producciones de 8 billones de m<sup>3</sup> de biometano anuales [30].



## 2. Objetivos

En este trabajo se persigue como **principal objetivo** hacer un estudio de las posibilidades que existen de potenciar la generación de biocombustible gaseoso, biogás, empleando un cultivo energético, sorgo en co-digestión con un residuo agroganadero, purín de cerdo, y otros residuos y/o recursos agrícolas y biomásicos, cumpliendo de este modo con una economía verde y circular, tal y como marca el nuevo modelo extremeño “Extremadura 2030”.

Para poder cumplir con este propósito mencionado es necesario realizar un trabajo exhaustivo enfocado en cada uno de los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar el potencial de generación de metano de cada uno de los residuos o cultivos energéticos sometidos a investigación en este trabajo. Para ello se propusieron los siguientes objetivos específicos:
  - a. Evaluar el rendimiento de metano para cada sustrato en cuestión en ensayos tipo batch en reactores de laboratorio de 5 L de capacidad. Estudio de mono-digestión anaerobia.
  - b. Trasladar cada uno de las experiencias llevadas a cabo a escala de laboratorio a una planta piloto de 1500 L de capacidad, para conseguir una representación de los rendimientos obtenidos de metano más cercana a la realidad a nivel industrial.
2. Estudio (cinético) de simulación del comportamiento del proceso de digestión anaerobia mediante el modelo ADM1 referido a cada sustrato particular estudiado. Como objetivo específico se planteó el siguiente:
  - a. Determinación de aquellas ecuaciones de simulación basadas en resultados obtenidos en el objetivo específico 1 empleando el modelo ADM1 mediante el programa COMSOL Multiphysics.
3. Estudio de viabilidad de aquella proporción óptima entre sorgo y el resto de sustratos estudiados que obtenga una mejora en la producción de metano en el

proceso de digestión anaerobia. Para ello, se plantearon dos objetivos específicos:

- a. Estudio en semi-continuo de diferentes Velocidades de Carga Orgánica (VCO) a nivel de laboratorio para cada una de las mezclas de sustratos establecidas.
  - b. Estudio en semi-continuo del proceso de co-digestión anaerobia con el sustrato sorgo fijo y el resto de sustratos aumentando paulatinamente en cada ensayo.
4. Estudio de viabilidad del biogás generado en planta piloto para aprovechamiento energético, y del digestato como fertilizante agrícola. Se plantearon dos objetivos específicos:
- a. Estudio de la influencia del aceite de colza en la mejora del rendimiento de metano obtenido para su aprovechamiento energético.
  - b. Estudio del digestato obtenido en ensayos de digestión anaerobia en planta piloto para su posible uso y aplicación en campo.

### **3. Digestión anaerobia**

El proceso de digestión anaerobia consiste en un proceso biológico que se desarrolla en ausencia de oxígeno, en el cuál la materia orgánica mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (compuesto por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) entre otros), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (Ca, N, P, K, etc.) y compuestos de difícil degradación [14] [10][31].

El producto gaseoso debido a su elevado contenido en metano (50-70%) es susceptible de ser aprovechado energéticamente mediante su combustión en motores, turbinas o en calderas, bien solo o mezclado con otro combustible.

El digestato obtenido tras la digestión resulta un excelente fertilizante para el suelo usado como abono agrícola por su alto contenido en productos minerales. Se trata de un producto que se encuentra totalmente “descontaminado” de gases de efecto invernadero.

#### ***3.1. Etapas que constituyen el proceso de digestión anaerobia.***

Un proceso anaerobio como el que se va a estudiar en este trabajo está compuesto por una serie de etapas microbiológicas bastante complejas, con un gran número de rutas, cada una de las cuales puede emplear una comunidad anaerobia para la transformación biológica de las sustancias orgánicas. Por ello, este tipo de transformaciones constituyen una bioquímica mucho más compleja que los procesos aerobios. De hecho, dichas rutas no son conocidas específicamente, sin embargo se está avanzado mucho en las líneas de investigación de este tipo de proceso. Ya existen modelos estándar para la simulación y el comportamiento de cada una de las etapas con sus materiales de partida y sus productos finales (modelo ADM1) que se desarrollarán más adelante.

Existen varias fases en la digestión anaerobia, las cuales son consecutivas y bien diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), en las cuales intervienen cinco grandes poblaciones de microorganismos, especificados en la Figura 3.1. Las velocidades de

crecimiento de cada una de las poblaciones específicas son diferentes, así como la sensibilidad a cada compuesto intermedio inhibitor (ya sean el H<sub>2</sub>, ácido acético o amoníaco producido de la acidogénesis de aminoácidos). Por lo tanto, se trata de etapas con velocidades de reacción diferentes entre ellas, que obviamente dependerán de la composición del sustrato a degradar. Un proceso global estable requiere de un equilibrio que evite compuestos intermedios acumulados que resulten inhibidores, o bien Ácidos Grasos Volátiles (AGV) que den lugar a bajadas de pH del medio. Un adecuado equilibrio entre los compuestos CO<sub>2</sub>-bicarbonato facilita la estabilidad del pH, para ello se mide el parámetro alcalinidad, ya que resulta un perfecto indicador de la cantidad de bicarbonato presente en el medio de digestión.

Las etapas que constituyen un proceso de digestión anaerobia son cuatro [32], tal y como aparece reflejado en la Figura 3.1: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

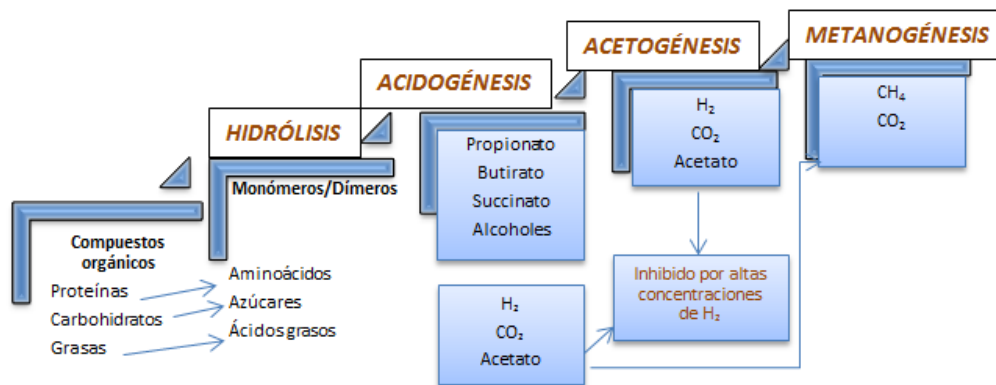
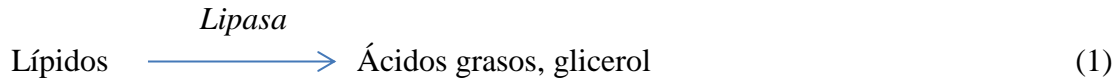


Figura 3.1. Descripción de etapas en el proceso de digestión anaerobia [32].

### Fase hidrolítica

Las bacterias correspondientes a esta primera fase o etapa toman la materia orgánica o compuestos orgánicos con sus largas cadenas de estructuras carbonadas y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (monómeros o dímeros) liberando hidrógeno y dióxido de carbono. Los microorganismos que llevan a cabo este tipo de trabajo son en su gran mayoría anaerobios facultativos. La secuencia de reacciones se muestra en las ecuaciones (1), (2) y (3).

Esta fase será la limitante del proceso si la degradación anaerobia se realiza sobre compuestos de difícil degradación o aquellos de carácter lignocelulósico.



### Fase acidogénica

En esta fase los productos procedentes de la etapa hidrolítica, es decir los compuestos orgánicos más simples son degradados a una serie de productos intermedios, principalmente ácidos orgánicos volátiles (tales como, propiónico, butírico o valérico) u otros ácidos como el lactato o alcoholes como el etanol. Además esta fase genera ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, tal y como aparece reflejado en la Figura 3.1. Se ha de tener especial cuidado con la concentración de hidrógeno en esta etapa ya que puede provocar inhibición del proceso pudiendo dar lugar a valores en el pH del medio por debajo de 5 [32].

### Fase acetogénica

Etapa que precede a la metanogénica, en ella se forman los compuestos principales que sirven como precursores del metano, como son el ácido acético, el dióxido de carbono y el hidrógeno (compuestos que previamente se han comenzado a formar en la etapa acidogénica también). Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los compuestos anteriormente mencionados gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas (las bacterias acetogénicas consumen los ácidos volátiles acumulados que son inhibidores para las bacterias metanogénicas, y éstas a su vez consumen el hidrógeno que resulta inhibidor a altas concentraciones para las anteriores) [33, 34]. La baja concentración de productos finales activa la reacción y actividad de las bacterias acetogénicas haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

Fase metanogénica

Las bacterias intervinientes en esta etapa poseen características únicas que las diferencian de todo el resto de las bacterias por lo cual se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre. El principal sustrato que emplean las bacterias incluidas en esta etapa es el ácido acético junto a otros ácidos orgánicos de cadena corta y los productos finales liberados están constituidos por metano y dióxido de carbono. El 70% del metano producido al final del proceso procede de la descarboxilación del acetato mientras el 30% restante se origina a través de la reducción del CO<sub>2</sub> y la conversión del hidrógeno [33]. En las ecuaciones (4) y (5) aparecen reflejados los dos posibles caminos para la producción de metano.

*Archaea metanogénicas acetoclásticas*



*Archaea metanogénicas hidrogenotróficas*



Los microorganismos intervinientes en cada fase poseen propiedades muy diferentes que resultan muy importantes y se han de conocer exactamente para poder lograr comprender el equilibrio y funcionamiento óptimo de un digestor. En la Tabla 3.1 se describe el tipo de bacteria que actúa en cada una de las fases del proceso de digestión anaerobia.

De los dos tipos principales de microorganismos metanogénicos que existen en este tipo de procesos se ha demostrado por numerosos científicos que aproximadamente el 70 % del carbono fijado en el metano proviene de acetato, esto es de bacterias metanogénicas acetoclásticas [36]. Para llegar a esta conclusión es necesario que se apliquen técnicas muy sofisticadas de análisis de cultivo como pueden ser la hibridación *in situ* fluorescente (FISH), la PCR cuantitativa (Polymerase Chain Reaction), la cual se emplea para amplificar y simultáneamente cuantificar de forma absoluta el producto de la amplificación del ADN, y por último, el análisis de genes mediante la secuenciación del 16S rARN, que es un componente de la subunidad 30S de los ribosomas procariotas.

**Tabla 3.1.**Tipos de bacterias por etapas [33] [35].

FASE O ETAPA	TIPO DE BACTERIA
<b>Hidrolítica</b>	<i>Clostridium, Proteus Vulgaris, Vibrio, Peptococcus, Bacillus y Micrococcus.</i> Algunos protozoos y hongos.
<b>Acidogénica</b>	<u>Facultativas</u> como <i>Propionibacterium, Eubacterium, Lactobacillus, Streptococcus, Pseudomonas, Desulfobacter, Micrococcus, Bacillus, Butyrbacterium, Escherichia, Ruminococcus y Bacteroides.</i>
<b>Acetogénica</b>	<u>Acetogénicas productoras de hidrógeno:</u> <i>Syntrophomonas wolfei y Syntrophobacter wolinii.</i>  <u>Homoacetogénicas:</u> <i>Acetobacterium, Acetogenium, Acetoanaerobium, Butyrbacterium, Clostridium y Pelobacter.</i>
<b>Metanogénica</b>	<u>Acetoclásticas:</u> <i>Methanosarcina, Methanosaeta y Methanospirillum.</i> <u>Hidrogenotróficas:</u> <i>Methanobacterium, Methanobrevibacterium y Methanoplanus.</i>

Para conseguir un recuento fiable de la cantidad de microorganismos responsables de la generación de metano se ha avanzado mucho en la técnica FISH. En concreto, en un reciente estudio desarrollado por Abendroth y col. [37] se demuestra que la técnica FISH puede convertirse en un método útil para evaluar el estado metabólico de microorganismos en plantas de digestión anaerobia.

Finalmente, para la detección de las bacterias y las arqueas presentes en las muestras tomadas que fueron sometidas a este elaborado tratamiento se emplearon diferentes sondas. Éstas fueron marcadas con el fluoróforo Cy3. El proceso de hibridación se desarrolló en una cámara húmeda saturada en ambiente tamponado. Como control adicional cada hibridación se desarrolló además con muestras de cultivos puros de bacterias gram-positivas y gram-negativas, así como con arqueas aisladas. El recuento para la detección de células totales se llevó a cabo con DAPI (4,6`-diamidino-2-fenilindol) y las muestras se analizaron con un microscopio de epifluorescencia.

Independientemente de todo el conjunto de bacterias definidas se encuentran las bacterias sulforreductoras, las cuales emplean el sulfato como aceptor de electrones. Estas bacterias aparecen junto a las metanogénicas y compiten en concreto con las bacterias de tipo hidrogenotróficas por reducir el hidrógeno que se encuentra libre en el

medio con el objetivo de formar ácido sulfhídrico. Este tipo de bacterias son muy perjudiciales para la producción de metano debido a que reducen su producción, de esta forma aumenta la producción de ácido sulfhídrico, compuesto muy tóxico e incompatible con el empleo del biogás para motores de combustión interna por provocar su corrosión.

El modelo ADM1 es el más extendido entre los científicos que desarrollan estudios para procesos anaerobios [38-41], de hecho surge de la colaboración entre un gran número de expertos de diferentes países en el área mencionada [42]. Se trata de un modelo cinético que describe matemáticamente el proceso de digestión anaerobia basándose en cinéticas de primer orden para la hidrólisis y la muerte microbiana, y la ecuación de Monod para simular el consumo de los compuestos solubles y la producción de gas. Este modelo describe la transformación de sustratos complejos en sus principales componentes (carbohidratos, lípidos, proteínas, azúcares, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, ácidos grasos volátiles, aniones y cationes) (ver Figura 3.2), además de incluir otros pasos que describen los procesos bioquímicos y fisicoquímicos que se encuentran en el proceso anaerobio de biodegradación de compuestos complejos. Por otro lado, el modelo tiene en cuenta las reacciones de inhibición que se pueden presentar durante las transformaciones de los compuestos complejos de forma no competitiva (relativas al hidrógeno y amoníaco libre), competitiva (entre butirato y valerato) y referentes a la inhibición por pH. No obstante, las reacciones de inhibición no han sido consideradas en el modelado llevado a cabo en este trabajo, ya que los resultados obtenidos en analíticas realizadas en los sustratos iniciales y digestatos finales no han mostrado indicios de inhibición del proceso.



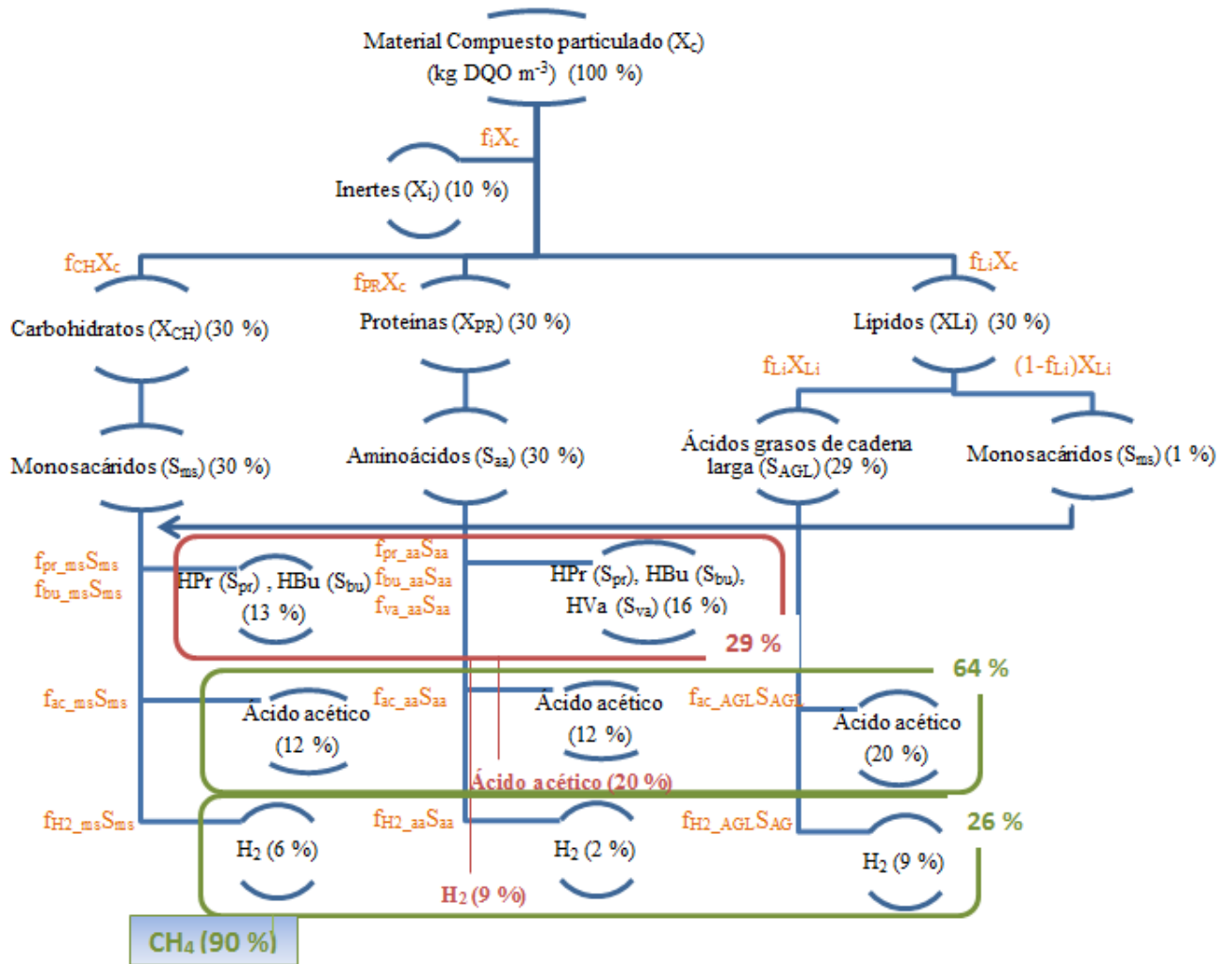
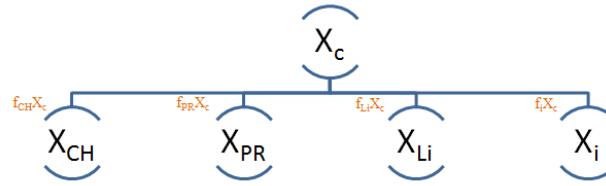


Figura 3.2. Flujo de un material compuesto particulado según el modelo ADM1 [42].

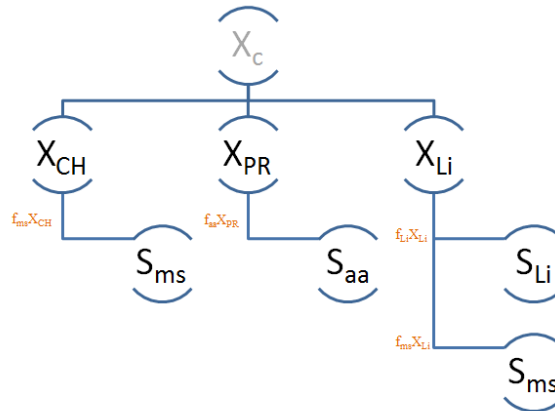
Para un proceso de digestión anaerobia el modelo ADM1 define las reacciones indicadas para cada uno de los compuestos que aparecen en la Figura 3.2, a través de cinco etapas diferenciadas:

1. Desintegración del material compuesto particulado ( $X_c$ ) en una fracción sólida de carbohidratos ( $X_{CH}$ ), una fracción sólida de proteínas ( $X_{PR}$ ), otra fracción sólida de lípidos ( $X_{Li}$ ), y una fracción sólida final de inertes ( $X_i$ ).



**Figura 3.3.** Desintegración del material particulado compuesto en fracciones sólidas más simples.

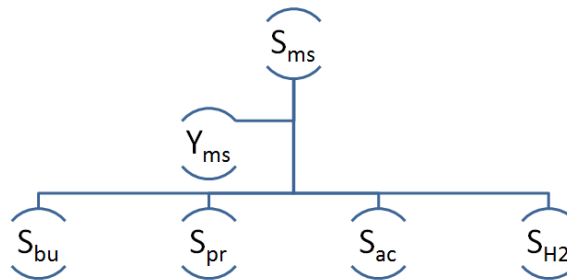
2. Hidrólisis de cada una de las fracciones anteriormente citadas en fracciones de compuestos más simples. En el caso de las fracciones solubles de carbohidratos y proteínas, la totalidad de las mismas es convertida en fracciones de monosacáridos ( $S_{ms}$ ) y aminoácidos ( $S_{aa}$ ) solubles, respectivamente, si bien para la fracción sólida de lípidos no ocurre lo mismo. De la fracción inicial de lípidos procedente del proceso de desintegración, una parte se hidroliza en ácidos grasos de cadena larga solubles ( $S_{AGL}$ ) y una pequeña parte en monosacáridos soluble ( $S_{ms}$ ).



**Figura 3.4.** Hidrólisis de las fracciones de carbohidratos, proteínas y lípidos sólidas en fracciones solubles.

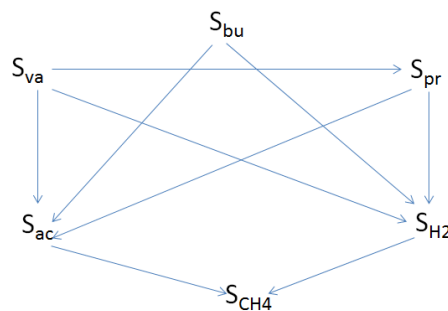
3. Acidogénesis, consumo de las fracciones solubles de monosacáridos ( $S_{ms}$ ), aminoácidos ( $S_{aa}$ ) y ácidos grasos de cadena larga ( $S_{AGL}$ ) por parte de microorganismos específicos, para dar lugar a compuestos más simples. A modo de ejemplo, en la Figura 3.5 se expone el proceso de

transformación que sufren los monosacáridos bajo la acción de los microorganismos específicos de la etapa acidogénica. Al ser consumida la fracción soluble de monosacáridos ( $S_{ms}$ ), parte de ella es transformada por los microorganismos en ácido butírico ( $S_{bu}$ ), ácido propiónico ( $S_{pr}$ ), ácido acético ( $S_{ac}$ ) e hidrógeno ( $S_{H_2}$ ). Como consecuencia de la presencia de microorganismos en esta etapa aparece una nueva fracción sólida referida a ellos ( $Y_{ms}$ ).



**Figura 3.5.** Degradación de la fracción soluble de monosacáridos en compuestos más sencillos durante la etapa acidogénica.

4. Acetogénesis, consumo de las fracciones solubles de los compuestos simples ácido valérico ( $S_{va}$ ), ácido propiónico ( $S_{pr}$ ), ácido butírico ( $S_{bu}$ ), ácido acético ( $S_{ac}$ ) e hidrógeno ( $S_{H_2}$ ) por parte de otros microorganismos específicos de esta etapa. El objetivo final de las transformaciones es llegar a producir una fracción de metano. En la Figura 3.6 se refleja de forma simplificada las transformaciones ocurridas entre dichas fracciones de compuestos simples.



**Figura 3.6.** Transformaciones producidas entre compuestos simples durante la etapa de acetogénesis.

5. Decaimiento o muerte celular de las fracciones sólidas ( $X_{CH}$ ,  $X_{PR}$ ,  $X_{Li}$ ,  $X_i$ ) y de microorganismos ( $Y_{ms}$ ,  $Y_{aa}$ ,  $Y_{AGL}$ ,  $Y_{c4}$ ,  $Y_{pr}$ ,  $Y_{ac}$ ,  $Y_{H2}$ ) que han participado en las etapas de acidogénesis y acetogénesis anteriores. Las fracciones mencionadas se convertirán nuevamente en material compuesto particulado ( $X_c$ ).

Todas las reacciones que suceden a lo largo de las cinco etapas definen el modelo ADM1, y se presentan detalladas en las Tablas 9.1 y 9.2 del Apéndice.

### *3.2. Parámetros que influyen en el proceso de digestión anaerobia.*

Debido a la lenta velocidad de recuperación de las bacterias metanogénicas, la estabilización de un digester dañado será muy lenta, por ello resulta imprescindible el cuidado de los parámetros que gobiernan el proceso y que se verán seguidamente en detalle. La digestión anaerobia se encuentra dirigida por parámetros de dos tipos: ambientales y operacionales.

#### *3.2.1. Parámetros ambientales.*

En lo relativo a los parámetros ambientales, relacionados con las características del sustrato, cabe destacar los siguientes:

**pH:** se pueden establecer diferentes estimaciones para los valores en los cuales el proceso de digestión anaerobia resulta óptimo, algunos autores lo sitúan entre 6,5 y 7,5 [43], otros establecen un valor neutro de 7 [44], a diferencia de autores que aceptan como óptimo un pH de 6 a 8,3 [45, 46] u otros que son menos estrictos en su estimación aceptándolo como simplemente próximo a la neutralidad [14].

**Alcalinidad:** es una medida de la capacidad tampón del medio. Esta capacidad tampón puede ser proporcionada por un amplio rango de sustancias, siendo por tanto una medida inespecífica. En el rango de pH de 6 a 8 [47, 48], el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono-bicarbonato. La capacidad tampón del bicarbonato es muy importante ya que si se encuentra en valores adecuados

hace que acumulaciones de ácidos grasos volátiles no provoquen descensos en el pH del medio de forma que inhiban o paralicen el proceso de producción de biogás.

La alcalinidad al bicarbonato debe mantenerse por encima de  $2500 \text{ mg L}^{-1}$  para asegurar la estabilidad del digestor [49]. Sin embargo, otras bibliografías establecen que la alcalinidad necesaria para la estabilidad del reactor debe ser superior a  $1500 \text{ mg L}^{-1}$  [4] o situada entre  $2 \text{ y } 3 \text{ g L}^{-1}$  [50].

**Potencial redox:** se controla que el valor no sea mayor de  $-350 \text{ mV}$  inicialmente, aunque se ha de tener en cuenta que al comenzar la metanogénesis se obtendrá un potencial redox algo mayor, a partir de ese momento se considera como válidos valores de potencial menores a  $-300 \text{ mV}$  [51].

**DQO:** cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica y los compuestos oxidables de una determinada muestra, por lo tanto se trata de una medida indirecta del contenido en materia orgánica [45]. Se mide como  $\text{g O}_2 \text{ kg}^{-1}$  o  $\text{g O}_2 \text{ L}^{-1}$ , y valores mayores en DQO, normalmente se corresponden con rendimientos en biogás más elevados.

**Sólidos totales:** un material de partida óptimo para sufrir un proceso de digestión anaerobia en húmedo en un reactor de mezcla completa debe situarse en valores de materia seca menores al 10% [52, 53]. De esta forma se evitan problemas de mezclado y bombeo del contenido del digestor. Además si el sustrato alimentado al digestor se trata de un material fibroso podría provocar problemas en el eje para conseguir la agitación requerida, por ello se debería diluir en parte el material que se vaya a someter a digestión.

**Sólidos volátiles:** este parámetro se encuentra relacionado con el anterior y se refiere a la cantidad de alimento que puede ser suministrado a las bacterias para su crecimiento. Una cantidad de sólidos volátiles del 65% con respecto a los sólidos totales de partida (estimado mediante métodos estándar de cálculo) es necesario para partir de un material apto para digerir anaeróbicamente, Rittmann y McCarty concretamente lo sitúan en valores superiores al 70% [54]. El control de este parámetro resulta muy útil para realizar un seguimiento de la degradación de la materia orgánica a lo largo del tiempo e indica si la velocidad de carga orgánica o cantidad alimentada al digestor es la adecuada.

**Inhibidores**: el término de inhibición o toxicidad se encuentra influido en bibliografía por diversos factores como pueden ser la concentración, el antagonismo o el sinergismo, la formación de complejos o la aclimatación de los distintos microorganismos a unas determinadas condiciones [55, 48].

La mayor parte de los autores califican de inhibidores del proceso a metales alcalinos y alcalinotérreos en concentraciones elevadas, en el caso del sodio, concentraciones de 5, 10 y 14 g L<sup>-1</sup> fueron asociadas a inhibiciones en microorganismos metanogénicos acetoclásticos de 10, 50 y 100%, respectivamente [56]; metales pesados [55, 57] (Tabla 3.2); hidrógeno, sulfuros (procedentes de sulfatos u otros compuestos oxidados de azufre empleados por las bacterias sulfato-reductoras como aceptor final de electrones) cuyas concentraciones superiores a 841 ppm [58] reducen a la mitad la actividad de las bacterias metanogénicas; sulfatos [42, 48]; fenoles [59]; compuestos amonios cuaternarios y nitrógeno amoniacal, los límites de inhibición varían según el autor dependiendo del rango de temperatura y tipo de sustrato empleado. Con respecto a este tóxico la forma que parece causar la inhibición por amonio es el amoníaco libre (NH<sub>3</sub>) ya que el efecto inhibitorio del amonio aumenta a pH alcalinos y a altas temperaturas [60]. Existe una gran amplitud de trabajos en los que se establecen diferentes valores umbrales inhibitorios de concentración de nitrógeno amoniacal, Flotats y col. [61] observaron el efecto inhibitorio a concentraciones mayores de 2,1 g N-NH<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> en rango termofílico, Van Velsen [62] encontró en régimen mesofílico un proceso de digestión anaerobia viable para concentraciones de 3 g N-NH<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> para purines de cerdo y 5 g N-NH<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> para lodos de depuradora. Los científicos Parkin y Owen [63] fijaron en valores de concentraciones de 3 g N-NH<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> el límite de inhibición para procesos de digestión anaerobia. Estudios de monitoreo de diferentes plantas de biogás en funcionamiento establecen como valor umbral una concentración de 5 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> L<sup>-1</sup> [53]. Otros inhibidores en potencia pueden ser los antibióticos ingeridos por los animales de granja, desinfectantes clorados y detergentes sintéticos procedentes de la limpieza y desinfección de la propia granja [45]; los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) con valores superiores a 4000 [53], 3000 ppm [65] o 2000 ppm [66]; ácidos grasos de cadena larga, fósforo, grasa bruta y fibra [45].

**Tabla 3.2.** Concentración de toxicidad e inhibición de metales pesados [64].

Metal	Alimentación gradual		Alimentación brusca
	Concentración de inhibición*, mg L <sup>-1</sup>	Límite de toxicidad, mg L <sup>-1</sup>	Límite de toxicidad, mg L <sup>-1</sup>
<i>Cr (III)</i>	130	260	<200
<i>Cr (VI)</i>	110	420	<180
<i>Cu</i>	40	70	<50
<i>Ni</i>	10	30	<30
<i>Cd</i>	-	>20	>10
<i>Pb</i>	340	>340	>250
<i>Zn</i>	400	600	<1700

\*Inicio de la disminución de la producción de gas.

**Nutrientes:** existen diferentes relaciones establecidas entre distintos nutrientes que puede contener el sustrato del medio (C/N, C/P, DQO/N/P, entre otros). Según diferentes autores el ratio C/N se encuentra alrededor de 30/1, más concretamente algunos autores lo sitúan en 15-30/1 [67], otros en 20-30/1 [44]. En cuanto al ratio establecido como C/P algunos autores lo sitúan en valores 75-113/1 [42]. Además, hay otras sustancias que actúan como nutrientes del medio, como son el Hierro (< 1 ppm), Níquel (< 0,01 ppm), Cobalto (< 0,05 ppm), metales alcalinos y alcalinotérreos a bajas concentraciones, Selenio, Riboflavina y vitamina B12 [67].

### 3.2.2. Parámetros operacionales.

Mientras los parámetros ambientales dependen de los sustratos a digerir en el digestor, los parámetros operacionales se encuentran relacionados con las condiciones en las que se desarrolle el proceso de digestión anaerobia. Los más importantes son:

**Temperatura:** de forma general, a altas temperaturas las tasas de reacción química y biológica son más rápidas que a bajas temperaturas. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables, que a su vez es dependiente de la temperatura [68]. Se establecen tres rangos de temperatura en los que se puede trabajar, rango psicrófilico (alrededor de 25

°C), rango mesofílico (en torno a 35 °C) y rango termofílico (alrededor de 55 °C). Un aumento en la temperatura implica una mayor tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos en el medio de reacción (Figura 3.7) pero supone una mayor sensibilidad de los mismos a cualquier cambio en los parámetros ambientales y operacionales. La temperatura a lo largo de todo el proceso ha de mantenerse constante por lo que se debe establecer un control.

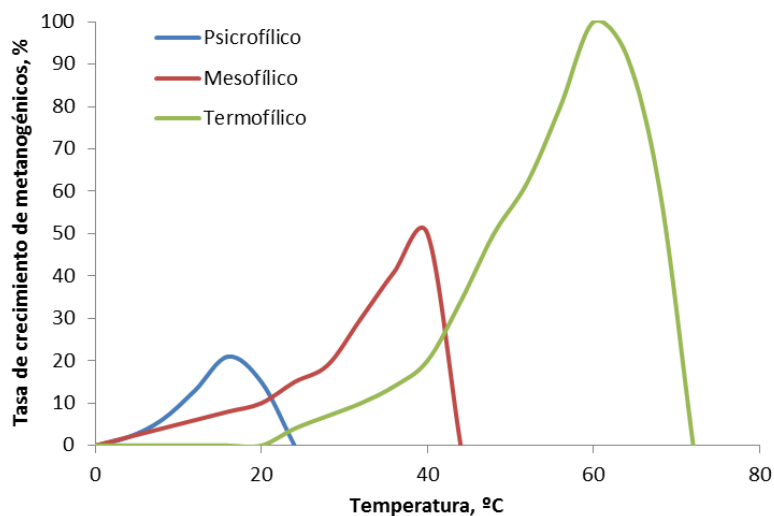


Figura 3.7. Dependencia de la constante de crecimiento de microorganismos con la temperatura [69].

**Agitación:** necesaria para favorecer una transferencia de sustrato a cada población o agregados de bacterias [14], de forma que se mantengan los valores bajos en las concentraciones de inhibidores.

**Tiempo de permanencia en el digestor:** normalmente oscila entre 90 y 30 días en función del tipo de sustrato que se esté tratando y de la presencia o no de inóculos en el medio de digestión que ayuden a agilizar la velocidad de la reacción.

**Velocidad de Carga Orgánica y Tiempo de Retención Hidráulica (VCO y TRH):** se trata de dos parámetros muy importantes para el diseño de un reactor, ambos vendrán determinados por el tipo de sustrato empleado. El TRH es el tiempo medio durante el cual el alimento permanece en el digestor [53]. La fracción de materia orgánica degradada aumenta al incrementarse el TRH, sin embargo la producción o rendimiento de metano comienza a descender una vez se ha alcanzado el tiempo óptimo. Con estos parámetros se va a trabajar en este estudio determinando precisamente aquella VCO que



proporcione mejores rendimientos de metano. Los tiempos de retención varían mucho dependiendo de la bibliografía, se encuentran en un rango de valores de 10 a 30 días [48]. Para calcular el TRH basta con calcular el cociente de volumen del digestor entre el volumen total diario de sustrato alimentado al mismo.

La carga orgánica establece la relación entre la cantidad de materia orgánica (expresada como Demanda Química de Oxígeno (DQO) o Sólidos Volátiles) por unidad de tiempo y volumen de reactor. Dada esta relación, la carga orgánica depende directamente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención. La VCO se va incrementando lentamente al inicio de una experiencia en laboratorio o planta piloto para conseguir adaptar los microorganismos a las condiciones del medio.

Altas cargas orgánicas, en ausencia de inhibidores, proporcionan altas producciones volumétricas de biogás. Según algunos autores [48] la resistencia a ciertos inhibidores puede aumentar con la carga orgánica. Sin embargo, la inestabilidad aumenta también con el aumento de carga, especialmente en el caso de “sobrecargas” puntuales, que conllevan la acumulación de ácidos grasos volátiles [65].

**Pretratamiento:** este tipo de acondicionamiento se realiza como tratamiento previo con el objetivo de reducir el tamaño de partícula con una molienda fina, en el caso de material lignocelulósico, controlar el pH inicial de sustratos ácidos o básicos, homogeneizar un material muy heterogéneo, espesar o diluir, e incluso eliminar metales y patógenos en el material de partida [14].

La puesta en marcha de los reactores supone generalmente un gran esfuerzo, se requieren tiempos largos que pueden llegar a ser del orden de meses. La velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Si el residuo es soluble, la fase limitante normalmente será la metanogénica, para acelerarla se adoptan estrategias consistentes en diseños que permitan una concentración alta de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor. Si por el contrario, el residuo se encuentra en forma de partículas, la fase limitante será la hidrolítica puesto que su proceso depende de la superficie de las partículas. Para conseguir tiempos más cortos en este caso, se llevan a cabo pretratamientos que consigan disminuir el tamaño de partícula, tratamientos mecánicos, o ayudar a la solubilización de las mismas (maceración, ultrasonido, tratamientos térmicos, alta presión o combinación de las dos últimas).

Los pretratamientos mecánicos se llevan a cabo mediante la molienda, pero ésta puede ser principalmente de dos tipos diferentes:

- Molienda a partir de molinos de bolas: se basa fundamentalmente en la desintegración de los microorganismos al rozar con unas bolas que llenan el interior de una especie de cámara en las que se induce un movimiento rotativo, de esta forma tiene lugar una fuerza de rozamiento y una presión entre las bolas y el residuo a tratar.
- Molienda mediante molino de impacto: se trata de dos rotores girando en sentido opuesto en el interior de una cámara de molienda produciéndose diferencias de presión que reducen el tamaño de las partículas del residuo (Figura 3.8).



**Figura 3.8.** Molino de impacto para reducir el tamaño de partícula de una muestra.

Uno de los tratamientos desarrollados es el ultrasonido, cuyas implicaciones pueden ser además de tipo térmicas y químicas. Para realizar este tipo de pretratamiento se utiliza un equipo de ultrasonidos cuyo fundamento se basa en la formación de burbujas de cavitación en la fase líquida, las cuales cuando alcanzan un tamaño crítico colapsan violentamente. La elevada presión y el calentamiento local en la interfase líquido-gas al que da lugar este fenómeno provoca turbulencias y la formación de radicales que oxidan contaminantes orgánicos tóxicos y recalcitrantes (compuesto tóxico para los microorganismos cuyas estructuras químicas presentan o bien formas muy estables y

resistentes al ataque biológico, o poseen elementos estructurales que raramente se encuentran en la naturaleza).

Reciben el nombre de tratamientos térmicos aquellos en los que se aplican altas temperaturas (50-200 °C) al residuo a degradar durante un determinado espacio de tiempo. Para lodos de EDAR (Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales) con este tipo de pretratamiento se consiguen mayores producciones de metano, para purines frescos se ha mejorado un 45 % el rendimiento de metano cuando el residuo se pretrató a una temperatura de 80 °C durante 3 h [70]. Sin embargo, una de las desventajas de aplicar este tipo de pretratamiento a los residuos puede ser las reacciones de Maillard. Según estas reacciones se producen compuestos recalcitrantes difíciles de degradar anaeróbicamente denominados “melanoidinas”.

También existen los pretratamientos químicos cuyo fundamento principal se basa en la reacción con ácidos o bases fuertes, así como oxidantes, normalmente a temperaturas bajas o ambiente.

- Pretratamiento básico: aplicado a residuos vegetales ricos en lignina y celulosa (óxido de calcio, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, hidróxido de calcio, hidróxido de magnesio). El coste de aplicación es bajo pero puede causar inhibición como consecuencia de la elevación en las concentraciones de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en el medio.
- Pretratamiento oxidativo: se solubiliza excesivamente la materia orgánica, por lo que su aplicación es muy limitada (cloro, peróxido de hidrógeno y ozono).
- Pretratamiento termoquímico: se suele realizar a una temperatura entre 120 y 130 °C. En el caso de residuos grasos se favorece de este modo la solubilidad del residuo. Se emplea una temperatura de 60 °C durante 30 minutos con hidróxido sódico.

Si lo que se emplean son microorganismos o enzimas para solubilizar el material a digerir en cuestión, en lugar de altas temperaturas, reactivos ácidos o básicos, o equipos de ultrasonido y molienda, se trata de pretratamientos biológicos. Para ello, se puede recurrir a distintas estrategias:

- Fermentación aerobia previa a la digestión anaerobia.

- Uso de un agente enzimático como es el compostaje, que es mezclado con el residuo.
- Adición directa de enzimas, como pueden ser la lipasa, proteasa, etc.

### *3.3. Sustratos susceptibles de digerir anaeróbicamente.*

#### *3.3.1. Purín.*

Los purines son residuos de carácter orgánico cuya procedencia es de origen ganadero, lo conforman una mezcla de heces y orines de los animales, aguas de lavado, residuos de comida y de los bebederos [71]. Dada las aplicaciones que se atribuyen al residuo es muy importante conocer su composición. Se trata de un efluente con una elevada carga orgánica y un pH del medio cercano a la neutralidad, no obstante su composición puede ser muy variable dependiendo de diversos factores como son la alimentación del ganado, la edad del animal, el régimen de explotación de la granja, etc. Del nitrógeno total que se encuentra en el purín aproximadamente el 70 % corresponde a nitrógeno amoniacal y el resto se trata de nitrógeno orgánico. En la Tabla 3.3 se reflejan los valores de nitrógeno total y materia seca para estiércoles y purines de diferente procedencia.

**Tabla 3.3.** Composición de estiércoles y purines de distintos origen [72].

<b>Estiércol/ Purín</b>	<b>Materia seca, %</b>	<b>N Total, kg m<sup>-3</sup></b>
<i>Gallinas puesta</i>	34	15-30
<i>Pollos de carne</i>	57-68	17-28
<i>Conejos</i>	28-50	15-33
<i>Ovino</i>	25-55	14-26
<i>Porcino cebo</i>	6.3-8.4	5.9
<i>Porcino reproductor</i>	2-3.2	3.4

Dentro del porcino, que es el residuo que se va a estudiar en este trabajo, en función de la fase de producción en la que se encuentre el animal las características del mismo oscilarán notablemente como se puede observar en la Tabla 3.4.

La cantidad de purines generados diarios por animal con un peso inferior a 30 kg es de 3,6 L, mientras que para cerdos de engorde, la generación media de purín diario es de 7,7 L, superando ese valor las madres gestantes que producen 16 L diarios [71]. Como consecuencia de ello, en las granjas de cerdo de carácter intensivo la cantidad que se genera cada día de residuos da lugar a un problema medioambiental cada vez más importante si no se regula por vía administrativa, buscando una solución viable que se encuentre en consonancia con una economía verde y circular.

Actualmente, existen muchas granjas que están aportando su residuo al campo como abono. Esta opción no resulta muy beneficiosa para el medio ambiente ya que se está contaminando el suelo y el agua, y se está emitiendo una gran cantidad de gases a la atmósfera. Si se persigue evitar que los gases contaminantes lleguen a la atmósfera se pueden crear unas condiciones anaerobias evitando que el residuo quede expuesto al exterior.

**Tabla 3.4.** Composición del purín de cerdo en cada fase productiva [72].

Fase productiva	N <sub>Total</sub> kg m <sup>-3</sup>	N <sub>Orgánico</sub> kg m <sup>-3</sup>	N <sub>Amoniacal</sub> kg m <sup>-3</sup>	Materia seca, kg m <sup>-3</sup>	Materia orgánica, kg m <sup>-3</sup>	C/N
<i>Cebo</i>	6,60	1,82	4,79	63	43	3,1
<i>Gestación</i>	3,18	0,56	2,62	22	15	2,8
<i>Matadero</i>	2,96	0,51	2,45	19	11	1,7

Esta opción si no se controla puede dar lugar a la generación de gases muy peligrosos como son el SH<sub>2</sub> y el NH<sub>3</sub>, responsables de malos olores y pueden afectar a tejidos húmedos y vías respiratorias. Por todo ello, existen diferentes alternativas de tratamiento de purines entre las que se encuentran las siguientes:

- a) Secado térmico directo: se trata de una opción que conlleva elevados costes de operación debido a la humedad del residuo a tratar, aunque existían bonificaciones en el país que permitían hacer viable este sistema de tratamiento. Hace unos años se promovió la cogeneración a base de la quema de gas natural que secaba los residuos y producía energía eléctrica. En la actualidad la política del sector eléctrico no permite que esta vía de tratamiento de residuos sea posible.

- b) Compostaje: sirve para aprovechar la parte sólida del purín junto a turba y fibra vegetal, y de esta forma restaurar ecológicamente y paisajísticamente un suelo que puede estar degradado por diversos motivos. La mezcla creada sirve para aumentar la materia orgánica del suelo, o lo que es lo mismo su fertilidad. El coste que supone esta opción de tratamiento supera otras alternativas.
- c) Tratamiento biológico aerobio junto a tratamiento fisicoquímico: el tratamiento biológico aerobio elimina nutrientes del residuo combinando el mismo con un sistema fisicoquímico. La gran desventaja de este tipo de tratamiento se centra en los costes y dificultades de explotación frente a otros tratamientos.
- d) Biometanización y evaporación del digestato: esta opción resulta muy interesante desde el punto de vista medioambiental y económico. Consiste en someter a purines junto a otros residuos que contengan materia orgánica, ya sean de origen vegetal o no, a un proceso de digestión anaerobia o biometanización. Los productos que se obtienen de tal proceso son: fracción sólida (estabilizada e higienizado que puede ser empleada de forma directa como abono natural), fracción líquida (puede ser sometido a proceso de evaporación para obtener agua y residuos concentrado valorizado como fertilizante) y fracción gaseosa (biogás, empleado como biocombustible en un proceso de cogeneración, en el cuál se transforma en energía eléctrica y térmica, usadas para autoconsumo en la explotación ganadera y planta de tratamiento de purines).

La última opción es la más adecuada para llevar a cabo un tratamiento de los residuos generados en las granjas de ganado porcino con el objetivo de cumplir con el Decreto 515/2009, de 22 de Septiembre, por el que se establecen las normas técnicas, higiénico-sanitarias y medioambientales de las explotaciones ganaderas.

Son muchos los autores que se han dedicado al estudio del proceso de aprovechamiento del residuo purín de cerdo en ausencia de oxígeno para la generación de energía. En una revisión bibliográfica llevada a cabo por Mao y col. [73], se muestran resultados en rendimientos de metano de purines procedentes de diversos animales. Particularmente para el purín de cerdo en ensayos batch de DA en rango termofílico obtuvieron valores de 188 LCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>. Otros purines como aquellos de ave de corral se estudiaron en rango termofílico y empleando un sistema de eliminación de amonio alcanzaron rendimientos de 195 LCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>. Chamy y Ramos [74] evaluaron aquellos factores

que intervenían en el potencial metanogénico de purín de pavo, y los resultados obtenidos de sus ensayos presentaron rendimientos de metano de  $150 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}_{\text{added}}^{-1}$  para una concentración de  $40 \text{ g L}^{-1}$  de SV y  $30 \text{ g L}^{-1}$  de ST. Otra investigación fue la realizada por el autor Flotats y col. [50] en la que se estudió una combinación de diferentes residuos de pulpa de pera, tierras decolorantes de aceite de oliva y purines de cerdo para analizar la influencia en su rendimiento de metano. En este trabajo el rendimiento de metano que se obtuvo para el ensayo en mono-digestión del purín de cerdo fue de  $144 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ .

### **3.3.2. Aceite de colza.**

Uno de los biocombustibles líquidos por excelencia es el aceite de colza, extraído de las semillas de una planta resistente y con bajos requerimientos de agua y cuidados para su crecimiento y desarrollo. Principalmente, este biocombustible está destinado a alimentación humana o animal (torta obtenida tras la extracción del aceite), o al empleo como combustible en motores mezclados con diésel. Debido a la problemática existente, cuando se ha pretendido poner en práctica el biocombustible ya sea como producto alimenticio o para combustible en motores, se ha de buscar otras alternativas al producto.

El aceite de colza posee una elevada carga orgánica como consecuencia de su composición de carácter oleico, esto le va a convertir en un excelente co-sustrato para digerir anaeróbicamente y aumentar la concentración en metano del biogás generado. Según la literatura, existen algunos estudios realizados con aceite procedente de colza para empleo en procesos de digestión anaerobia. Kougias y col. [75] han utilizado dicho co-sustrato como agente antiespumante del medio de digestión confirmando paralelamente que la productividad en biogás se ve claramente favorecida cuando se emplea en co-digestión con purines. Otros investigadores han conseguido rendimientos en metano muy exitosos gracias al empleo de este biocombustible directamente, como es el caso de Kleyböcker y col. [76] con resultados de producciones en torno a  $700 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ . Además, hay trabajos de investigación que se han realizado a partir de los subproductos obtenidos en una biorefinería a partir del tratamiento de la planta de colza completa, en concreto a partir del glicerol residual las pruebas llevadas a cabo por

Luo y col. [77] han conseguido rendimientos de metano de 314 LCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>. No obstante, el aceite de colza se ha implantado en nuestra sociedad para ser empleado con fines distintos al tratamiento depurativo o de eliminación de residuo, por lo que, en este trabajo, se ha estudiado el sustrato en pequeñas dosis simplemente para demostrar que se puede optimizar enormemente el rendimiento de metano en un proceso de digestión anaerobia gracias a él.

### **3.3.3. Microalgas.**

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos no vasculares que contienen clorofila “a” y poseen estructuras reproductoras simples [78]. Estos microorganismos están compuestos por carbohidratos, lípidos y proteínas en una proporción cuyos valores pueden oscilar bastante dependiendo de las condiciones ambientales a las que se enfrenten. De hecho en muchos casos, se aprovecha esta versatilidad de las microalgas para seleccionar aquel tipo de microalgas que posea la composición más adecuada para el uso que se le quiera dar con posterioridad.

El contenido de proteínas en las microalgas varía de un 30% a un 65% de su peso seco [78]. Los carbohidratos que se presentan en términos de azúcares en las microalgas pueden variar considerablemente entre diferentes especies, presentándose en mayor concentración la glucosa, seguido de galactosa, manosa y ribosa. Según Zhen y col. [79] los valores de la concentración de carbohidratos para microalgas de las especies *Scenedesmus* y *Chlorella* se encuentran en torno al 7% de su peso seco. En cuanto a los lípidos, la fracción lipídica puede dividirse en dos grupos principales: los lípidos polares (glicolípidos y fosfolípidos) y los lípidos neutros (triglicéridos, hidrocarburos, alquenonas, esteroides y pigmentos). La mayor parte de los lípidos son polares, que son los que conforman la membrana, y triglicéridos, que sirven de reserva de ácidos grasos para las funciones fisiológicas de las microalgas [78]. Normalmente, la concentración de lípidos en las microalgas suele ser del 20% [80].

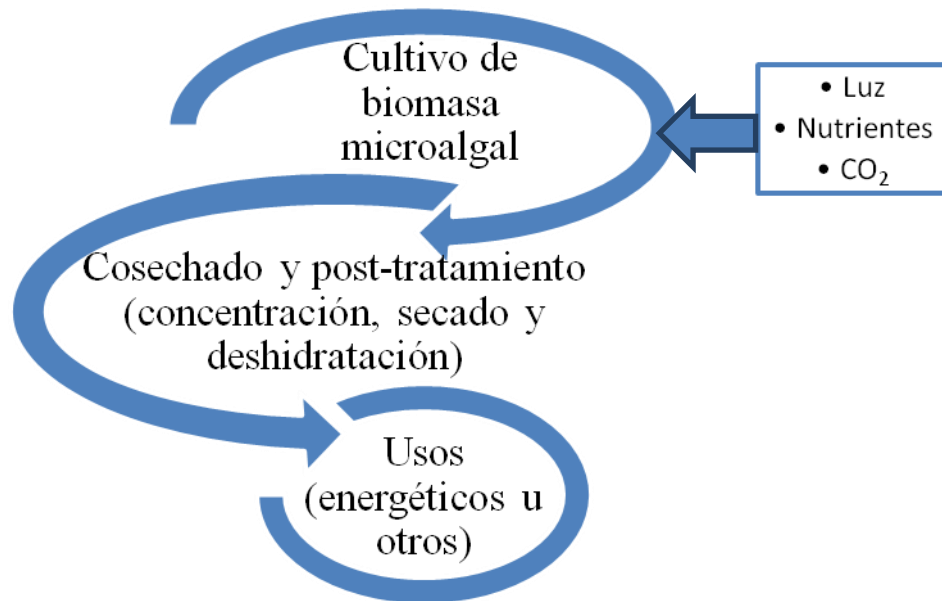
Existen multitud de especies de microalgas dedicadas a diferentes fines, muchas se pueden destinar a diversos usos en función de las necesidades del momento. Este estudio se centra en fines energéticos relacionados con el concepto de biorefinería por lo que las microalgas cosechadas se centran principalmente en la obtención de



biocombustibles gaseosos. No obstante, existen otros usos y aplicaciones para este tipo de microorganismos como son la obtención de productos de alto valor añadido, ya sean, pigmentos, aditivos alimentarios, cosméticos, biofertilizantes entre otros. Para cualquiera de estos fines es necesario cultivar la microalga y cosecharla para obtener el mayor rendimiento en biomasa [81].

El flujo de proceso de las microalgas desde su inicio durante el proceso de fotosíntesis hasta su destino final se presenta en la Figura 3.9.

Los biocombustibles que se pueden obtener a partir de microalgas son biodiesel, bioetanol, biohidrógeno y biometano principalmente. Puesto que la tecnología más simple para producir biocombustibles a partir de microalgas es la digestión anaerobia, se ha empleado, en este estudio, este tipo de biomasa mezclada con otros sustratos para producir biometano.



**Figura 3.9.** Fases de producción de biomasa a partir de microalgas.

La digestión anaerobia de microalgas presenta una dificultad y es la hidrólisis de su pared celular, lo cual limita su biodegradabilidad, por ello se han de emplear pretratamientos químicos, térmicos y/o mecánicos que permitan la desintegración del

sustrato. Hoy en día, se ha estudiado la digestión anaerobia de microalgas de gran variedad de especies, según la revisión bibliográfica redactada por Jankowska y col. [82] algunos autores remarcan el incremento en la producción de metano en un 62% gracias a la co-digestión anaerobia frente a la digestión anaerobia simple, logrando rendimientos de  $330 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ , empleando una mezcla de microalgas *Taihu* y paja de maíz. Otros autores [83] logran mejorar el rendimiento de metano de  $63 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$  a  $330 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$  adicionando a la microalga *Dunaliella salina* residuos de la extracción del aceite de oliva en unas proporciones del 25-75%, respectivamente. Por otro lado, Ward y col. [84] realizaron otra revisión bibliográfica donde los rendimientos de metano de las especies microalgales (*Chlorella* sp. *Scenedesmus*) que se van a estudiar en este trabajo se encuentran en el rango de  $170\text{-}320 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ .

#### 3.3.4. Ensilado de sustratos vegetales.

En el proceso de digestión anaerobia existen muy diversos tipos de sustratos que se pueden someter al mismo, pero algunos de ellos requerirán de un pretratamiento previo, o tal vez su empleo en el digestor no se requiera en su totalidad en la época del año en la que se dispone. Por ello, es muy importante el modo de almacenamiento del mismo, el cual se puede aprovechar para optimizar o facilitar la posterior digestión anaerobia. Los tipos de residuos a los que se refiere este apartado del estudio son residuos orgánicos, forrajes o cultivos de tipo energético o no energético.

En relación a la forma de almacenamiento de los sustratos o residuos se han de mencionar tres principales tipos: almacenamiento al aire libre (estiércoles, purines, etc.), en este caso, si la generación de residuos es elevada puede llevar a pérdidas sustanciales de potencial de metano debido a la degradación aerobia que se produciría de los materiales en contacto con el aire. Para sustratos que se generan estacionalmente se pueden dar dos principales formas de almacenamiento, una de ellas es el secado previo en campo para la posterior fabricación de pacas del material seco, técnica que se puede encontrar condicionada por las lluvias durante la cosecha, y además limitada a cultivos que sean de secado fácil, es decir rápido y uniforme. Un almacenamiento para sustratos generados estacionalmente muy prometedor, para evitar las pérdidas de energía antes de someterse a un proceso de producción de metano, es el ensilado, cuyo fundamento se

basa en un proceso bioquímico bajo un ambiente anaerobio dividido en cuatro etapas, de acuerdo a las principales transformaciones bioquímicas y microbiológicas que suceden a lo largo del proceso.

1. Etapa 1. PERIODO AEROBIO INICIAL: una vez lleno y sellado el silo de sustrato, principalmente biomasa vegetal, queda una parte de oxígeno atrapado en el sistema que da lugar a una respiración continua durante varias horas consumiéndose, así azúcares y produciéndose dióxido de carbono y agua, hasta que el oxígeno desaparece.
2. Etapa 2. FERMENTACIÓN ANAEROBIA: los microorganismos con capacidad para crecer en un ambiente anaerobio comienzan a proliferar (clostridios, levaduras, enterobacterias...) y compiten por los productos orgánicos presentes. Durante los primeros días, se considera la etapa crítica para que el ensilado resulte exitoso o por el contrario la fermentación fracase. Si las condiciones son adecuadas, bacterias responsables de producir ácido láctico sobrevivirán produciendo éste y reduciendo el pH a valores cercanos a 4 [84].
3. Etapa 3. FASE DE ESTABILIZACIÓN: la actividad fermentativa iniciada en la etapa anterior comienza a decrecer pero las condiciones anaerobias se mantienen, por lo que el pH permanecerá constante de forma que la actividad enzimática y microbiana será mínima en el material almacenado.
4. Etapa 4. ALIMENTACIÓN: una vez se va a emplear el silo para alimentar al biodigestor, la biomasa entrará de nuevo en un ambiente aeróbico, por lo que se reactivarán los microorganismos aeróbicos que podrían estropear el ensilado y dar lugar a pérdidas que rozarían el 15% en energía.

Los sustratos vegetales empleados en esta investigación han sido sometidos a un ensilado como método de almacenamiento del mismo persiguiendo aumentar las producciones en metano en los trabajos llevados a cabo.

#### **3.3.4.1. *Sorgo***

El sorgo es una planta que tiene su origen en África tropical, se introdujo en USA la de tipología *Durra*, gracias a ello se consiguió la difusión extensiva [85]. En algunas

regiones del mundo está sustituyendo ya al cultivo de maíz, y ha aumentado su importancia como consecuencia de la utilización en alimentación humana. En la industria de panificación, la harina de sorgo está tomando auge, de hecho se ha comprobado que puede sustituir hasta en un 50% a la harina de trigo, en las mezclas para la elaboración de pan, conservando la calidad del mismo [86].

El sorgo es una gramínea con una enorme tolerancia a la sequía debido a que la absorción radicular del sorgo es dos veces más eficiente que la del maíz. Por eso, se trata de un cultivo perfecto para la región extremeña en la que existen frecuentes épocas de escasez de lluvias. A pesar de ello, las producciones no disminuyen puesto que el sorgo es un cultivo que genera una alta producción con un consumo mucho menor de agua que otros cereales de verano comparables. El sorgo se puede catalogar como un cultivo energético, que es aquel cultivo implantado y explotado con el objetivo de obtener biomasa.

Una gran ventaja del sorgo es que frente a condiciones ambientales adversas puede retrasar su desarrollo, siendo una planta eficiente en el uso del agua y nutrientes.

Adicionalmente a estas características tan positivas, el sorgo posee un sistema radicular que ayuda a recuperar la estructura del suelo y aporta una gran cantidad de materia orgánica al mismo [87].

Acorde a la temática tratada en este trabajo, el sorgo puede ser empleado además de como alimento para animales y humanos, como sustrato susceptible de degradarse en un proceso anaerobio, con el objetivo de generar gases aprovechables energéticamente, en el proceso conocido como co-digestión anaerobia. Son muchos los autores que han desarrollado multitud de experiencias enfocadas a la producción de biogás e hidrógeno a partir de este tipo de cultivo. Dareioti y Kornaros [88] identificaron al sorgo como una “promesa de cultivo energético”, realizaron experiencias evaluando la influencia del tiempo de retención hidráulica en la producción de metano e hidrógeno en un proceso de digestión anaerobia en dos fases bajo condiciones mesofílicas, empleando una mezcla de sorgo pretratado ensilado, suero de queso y purín de vaca líquido. Los rendimientos máximos de metano obtenidos tras 24 y 16 días de desarrollo del proceso fueron de  $326.4 \pm 56.9 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$  y  $310.3 \pm 41.3 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$ , respectivamente.

Kalamaras y Kotsopoulos [89] desarrollaron un estudio comparativo entre distintos cultivos alternativos (sorgo, cardo y cardo de leche ensilados) al maíz en cuanto a la producción de biogás se refiere. La proporción empleada entre cada tipo de cultivo y purín de cerdo fue de 40 % y 60 %, respectivamente, lo que significa que se realizaron co-digestiones. En lo relativo al cultivo del sorgo se obtuvo un rendimiento de metano de  $241 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$  para un proceso mesofílico en reactor tipo batch frente al rendimiento de  $267 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$  obtenido para el maíz. Resultados más alentadores fueron los que consiguieron Sambusiti y col. [90] gracias a un pretratamiento termoquímico del sustrato sorgo ensilado que consistía en mantenerlo a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 h reaccionando con una concentración de NaOH de  $10 \text{ g}/100 \text{ g ST}$ . Como rendimientos finales de metano los autores presentan valores de  $346 \pm 9 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  frente a  $269 \pm 22 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  procedente de un material sin pretratamiento. Estos valores se corresponden con experiencias desarrolladas en régimen batch a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Además se realizaron experimentos en régimen de alimentación semi-continuo en los que se adicionaba una vez al día  $100 \text{ mL}$  de un sustrato alimento de sorgo ensilado sin pretratamiento frente a otro experimento alimentado con un sustrato de sorgo ensilado pretratado. Para una VCO en torno a  $1 \text{ g SV L}^{-1}\text{d}^{-1}$  los rendimientos de metano que consiguieron dichos investigadores fueron de  $237 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  y  $297 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para un sorgo sin pretratamiento y con pretratamiento, respectivamente.

#### 3.3.4.2. *Triticale.*

El triticale tiene su origen en el cruzamiento artificial realizado por el hombre entre el cereal de trigo y el centeno. El objetivo perseguido por esta acción fue combinar la calidad del grano (generalmente proteico y con aminoácidos) con la productividad aportada por el trigo, con el vigor de la planta de centeno, resistencia a la sequía, bajas temperaturas, y limitantes de suelo [91]. Según la especie de trigo que se haya empleado en el cruzamiento con centeno, los triticales pueden ser *hexaploides* u *octoploides*.

Precisamente, las características ventajosas que posee este cultivo, al igual que el sorgo lo convierten en una excelente materia prima para la producción de bioenergía. Aunque no son muchos, existen algunos investigadores que han trabajado la digestión anaerobia de este cultivo energético. Cantale y col. [92], han estudiado 10 variedades diferentes de

triticale cosechado en la fase de masa leñosa en ensayos de tipo batch durante un período de 75 días obteniendo resultados de rendimiento de biogás situados en un rango entre 673,7 y 570,4 NmL g SV<sup>-1</sup>, con unas concentraciones de metano medias en el biogás del 57%. De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (IEA), los rendimientos de este tipo de cultivo se sitúan en valores algo más bajos, según se puede apreciar en la tabla 5. En otros estudios bibliográficos encontrados se recogen valores de rendimientos de metano para el triticale de 319-335 NL kg SV<sup>-1</sup> [94]. De acuerdo a un trabajo científico publicado por Herrman y col., [95] el cultivo de triticale se sitúa en valores de producción de metano de 315 NL kg SV<sup>-1</sup> con un contenido medio en el gas de 55,3 %. Estos resultados se extraen de experimentos batch realizados de un material ensilado que no ha sufrido pretratamiento alguno.

**Tabla 3.5.** Rendimientos de biogás de distintos cultivos según establece la IEA en “Biogas from Energy Crop Digestion” [93].

<b>Cultivo</b>	<b>Rendimiento de biogás (L kg SV<sup>-1</sup>)</b>
<i>Grano de trigo</i>	384-426
<i>Girasol</i>	154-400
<i>Pataca</i>	300-370
<i>Sorgo</i>	295-372
<i>Triticale</i>	337-555
<i>Maíz</i>	205-450
<i>Paja</i>	242-324
<i>Cebada</i>	353-658

### **3.3.4.3. Rastrojo de maíz.**

Se considera rastrojo de maíz al conjunto de tallos y hojas sobrantes en el terreno tras cosechar el cultivo del cereal. Dicho cultivo se introdujo en Europa desde México ya en el siglo XVII. Hoy en día, el maíz es un cereal totalmente adaptado a las condiciones de la región extremeña ya que se caracteriza por ser una planta con una enorme habilidad para desarrollarse en diversos climas.

Una vez cosechado el maíz, los restos de planta o el rastrojo se pueden secar y empacar para uso alimenticio de animales [96]. A pesar de ello, según las características de la

Tabla 6 [97] su energía metabolizable es escasa, por lo que el valor nutritivo de este tipo de subproducto agrícola no es suficiente para las funciones orgánicas del animal.

**Tabla 3.6.** Características de distintos tipos de residuos agrícolas.

Residuo agrícola	Materia Seca, %	Proteína, %	Energía		
			Metabolizable, Mcal/kg	Fibra, %	FDN*, %
<i>Rastrojo de maíz</i>	91,8	5,9	1,58	39,5	72,0
<i>Paja de arroz</i>	91,8	4,3	1,48	35,1	70,2
<i>Hojas de caña</i>	20,3	6,2	1,95	35,1	62,0

\*FDN: Fibra Detergente Neutro.

Como consecuencia de ello, se han de buscar otras aplicaciones para el rastrojo de maíz a partir de las cuales se pueda sacar mayor rendimiento a un residuo agrícola tan abundante en la región extremeña. Por su contenido en materia orgánica, su elevado contenido en C (43 %), su adecuada relación entre los macronutrientes C y N (35) [98], se convierte en un sustrato muy apto para emplear en co-digestión con purines. Por ello, de la misma forma que se ha hecho un recorrido bibliográfico o un breve estudio del estado del arte del resto de sustratos estudiados, se destacan algunas citas con resultados obtenidos acerca del maíz y del propio rastrojo en el área de la bioenergía. Herrman y col. [95] estudiaron una gran cantidad de especies de cultivos energéticos entre ellos el triticale y sorgo, así como el maíz, al cual le atribuyeron según sus experiencias batch un rendimiento de  $328,2 \text{ L}_N \text{ kg SV}^{-1}$ , con una concentración media de metano en el biogás de 55 %, partiendo de un material sin pretratar. Estos rendimientos se encuentran dentro del rango establecido por la IEA reflejados en la Tabla 3.5.

Un aprovechamiento energético del rastrojo del cultivo de maíz en el proceso de digestión anaerobia es atestiguado por numerosos autores en sus trabajos (Hassan y col., [99], Solé-Bundó y col., [100], Croce y col., [101], Bolado-Rodríguez y col., [102], Khatri y col. [103]). Estos últimos autores realizaron pretratamientos químicos al rastrojo de maíz empleando hidróxido sódico y dosis de hierro variables para conseguir aumentar los rendimientos de metano y disminuir, a su vez, los tiempos de digestión en experiencias batch en rango mesofílico. Los mejores resultados obtenidos en este estudio se consiguieron combinando una concentración del 6% de hidróxido sódico con

una dosis de hierro de 200-1000 mg L<sup>-1</sup>, obteniéndose unos rendimientos de metano de 472.9 LN kg SV<sup>-1</sup> y un tiempo de digestión de 7 días. Esto se debió a la sinergia que provocan ambos compuestos mejorando la accesibilidad a la fracción biodegradable del cultivo y contribuyendo a incrementar la actividad enzimática.

### ***3.4. Productos obtenidos en digestión anaerobia.***

Los beneficios obtenidos tras la digestión anaerobia se duplican una vez estabilizado el residuo tratado y eliminados los GEI que tanto contaminan al medio ambiente. Esto es así debido a que se generan dos conocidos productos durante o al final del proceso. El primero de ellos es un gas rico en metano cuya producción es continua una vez el proceso de digestión anaerobia se encuentra en su etapa metanogénica, y el segundo consiste en el material final que se extrae del reactor al finalizar su degradación anaeróbica, denominado digestato. A ambos productos se les pueden atribuir aplicaciones muy interesantes que se desarrollarán seguidamente en cada uno de los apartados que aparecen reflejados.

#### ***3.4.1. Tratamiento y valorización del biogás.***

El biogás es un producto gaseoso procedente de la digestión anaerobia de biomasa, sin depurar, con un contenido en metano que oscila entre el 50% y 70% [104]. Los rendimientos de biogás obtenidos varían dependiendo del alimento empleado en el proceso, principalmente viene determinado por el contenido en materia orgánica y su facilidad de degradación. Como se ha comentado con anterioridad, el biogás está compuesto principalmente por metano, pero otra parte está formada por CO<sub>2</sub> (entre el 40% y 20%), y algunas impurezas (principalmente agua y H<sub>2</sub>S). En la Tabla 3.7 se presenta la composición detallada del biogás especificando cada uno de los gases que conforman el mismo.

El metano es un gas muy ligero debido a que su densidad es de 0.7 kg m<sup>-3</sup> en condiciones normales, situándose por debajo del butano o el propano [105]. Esto sirve



para que se disminuyan los riesgos de explosión al almacenarlo puesto que no se acumula a ras del suelo.

**Tabla 3.7.** Compuestos del biogás [105].

Metano (CH <sub>4</sub> )	50-75 %
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25-45 %
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	1-2 %
Monóxido de Carbono (CO)	0-0,3 %
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	1-5 %
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0-3 %
Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0,1-0,5 %
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,1-1 %

Existe una clasificación del biogás que viene determinada por el sustrato orgánico del que procede y de las características de las instalaciones de generación-captación del biogás:

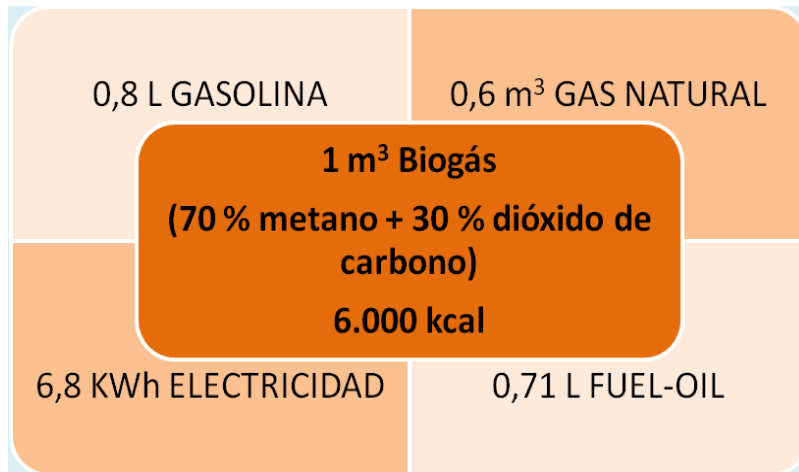
1. **Biogás de vertedero:** surge del sellado de los vertederos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). En función de su composición puede presentar ciertas impurezas de compuestos fluorados y clorados, y siloxanos.
2. **Biogás de digestores:** este tipo de biogás se puede dividir en tres categorías dependiendo del origen de los sustratos orgánicos a digerir:
  - a. **Biogás de depuradoras urbanas:** procedente de los fangos primarios.
  - b. **Biogás FORSU:** procedente de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.
  - c. **Biogás agroindustrial:** procedente de subproductos y residuos de los sectores agrícolas, ganadero o la industria agraria.

El biogás se puede aprovechar energéticamente gracias a su elevada capacidad calorífica, 5750 kcal m<sup>-3</sup>. Por ello, las aplicaciones que se le atribuyen al biogás son muy diferentes, se puede emplear directamente para producir calor (principalmente procedente de digestores a pequeña escala con una producción de biogás menor a 50 m<sup>3</sup>

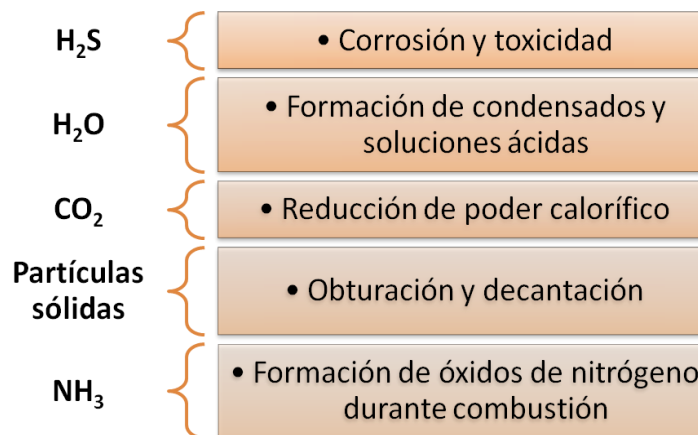
$h^{-1}$ ), para co-generación de calor y electricidad o como combustible para transporte. En la Figura 3.10 se presentan equivalencias entre el biogás y otras fuentes de energías.

Para co-generación de calor y electricidad del biogás y para combustible de vehículos se requiere una purificación del mismo, de forma que pueda sustituir al gas natural existente actualmente y procedente de combustibles fósiles. Las impurezas contenidas en el biogás reseñadas al principio pueden provocar efectos dañinos en los equipos destinados al aprovechamiento posterior del mismo. En la Figura 3.11 se pueden observar los efectos asociados a cada una de las posibles impurezas presentes en el biocombustible.

**Figura 3.10.** Equivalencias entre el biogás y otras fuentes de energías.



**Figura 3.11.** Impurezas presentes en biogás y sus efectos [105].



Existe una amplia variedad de tecnologías para la purificación del biogás. Las tecnologías más conocidas para la eliminación de CO<sub>2</sub> están basadas en los principios de adsorción química o adsorción física o de separación por membranas. Cuando el biogás es purificado y el contenido en metano supera el 90% de metano se puede asemejar a la calidad de gas natural y recibe el nombre de biometano. A continuación se detallan algunos sistemas de depuración del biogás:

1. Desulfuración: se pueden presentar tres tipos:
  - a. Microaerofílica: se basa en la inyección de una pequeña porción de oxígeno en la parte superior del biodigestor donde se forman unas bacterias sulfooxidantes encargadas de degradar el ácido sulfhídrico a azufre elemental.
  - b. Desulfuración biológica externa: en este sistema se emplea un biofiltro que está compuesto con un relleno de plástico sobre el que se adhieren bacterias desulfurizantes.
  - c. Proceso de adición de sales férricas: se realiza de forma previa a la generación del biogás evitando la producción del ácido sulfhídrico al producirse sulfatos insolubles en el sustrato con la incorporación de sales férricas al mismo. Existen algunos inconvenientes derivados de la adición de este tipo de sales, como son las posibles bajadas de pH o la corrosión de los materiales.
2. Deshumidificación: la eliminación de agua se centra en el fenómeno de condensación empleando tubos refrigerantes a través de los cuales pasa el biogás.
3. Eliminación de CO<sub>2</sub>: hay varias técnicas destinadas a este fin: lavado con agua, con disolventes orgánicos, filtración en carbón activo, separación por membranas y separación criogénica de las materias según el punto de ebullición.

### **3.4.2. Empleo agrícola del digestato.**

Como se ha mencionado anteriormente el digestato es uno de los productos que se obtiene tras el proceso de digestión anaerobia. Se presenta en estado semi-líquido y es un potencial fertilizante orgánico. La aplicación de este producto al suelo puede hacerse directamente o previa separación de las fracciones líquida y sólida. Por un lado, la fracción sólida del digestato es la encargada de incrementar la tasa de humificación y la estabilidad del suelo. Por otro lado, la fracción líquida del digestato puede ser sustituida en gran parte por el riego con agua, lo que conlleva el correspondiente beneficio para el medio ambiente. Es muy común la aplicación del residuo orgánico directamente como abono sin haber sido digerido con anterioridad. En estos casos no se está aprovechando de forma eficiente el residuo ya que posee una menor calidad higiénica, el grado de mineralización del mismo es mucho menor como consecuencia de que tras la fermentación anaerobia el nitrógeno y fósforo orgánico pasan a mineral, y por último provocan una mayor carga contaminante al medio ambiente. A todo ello se ha de unir una adecuada gestión del digestato, ya que según un estudio realizado en un biodigestor localizado en Ontario (Canadá) [106] el 12% de las emisiones de metano producidas dentro del digestor procedían del almacenamiento del digestato. Adicionalmente, un 76% de las emisiones correspondientes al digestato se concentraron en los meses más cálidos, de Junio a Octubre.

El empleo de digestato como fertilizante contribuye de forma directa a cerrar el ciclo del carbono dirigiéndose hacia una economía circular, ya que además crea un valor añadido a las plantas de biogás.

En función de los residuos o cultivos digeridos en el proceso de digestión anaerobia, las características del digestato obtenido serán ligeramente distintas, tal y como aparece en la Tabla 8, y como ha demostrado además el estudio llevado a cabo por el investigador Muscolo y col. [107].

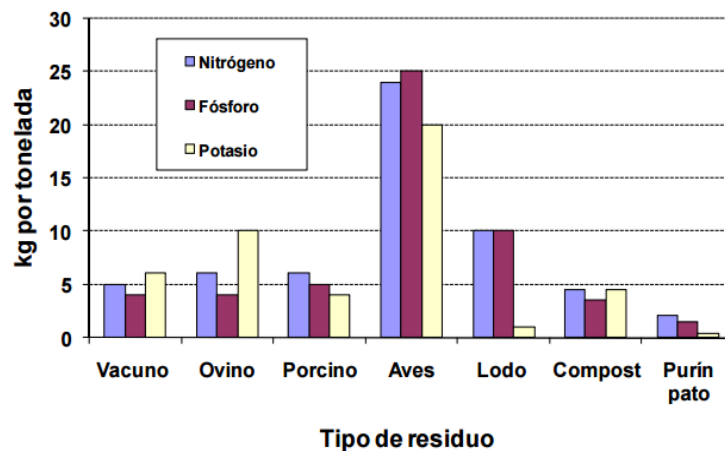
Está demostrado por numerosos estudios científicos que el digestato posee potencial suficiente para mejorar la calidad y fertilidad del suelo [107], pero los principales parámetros del mismo a los que afecta este producto dependen en gran medida del porcentaje y tipo de sustrato que ha sido sometido a digestión anaerobia.

**Tabla 3.8.** Composición química del digestato en función del origen de los residuos digeridos anaeróbicamente [108].

<i>Sustrato de procedencia</i>	<b>Materia seca, %</b>	<b>C<sub>Total</sub>, %</b>	<b>N-NH<sub>4</sub>, g L<sup>-1</sup></b>	<b>N<sub>Total</sub>, %</b>	<b>AGV, g L<sup>-1</sup></b>
<i>80% residuo de destilería - 20% cereales</i>	3,7	9,0	4,1	6,4	0,8
<i>96% purín de cerdo – 4% repollo</i>	6,0	27,0	3,1	4,3	5,6
<i>100% estiércol de vaca</i>	7,4	34,0	2,2	3,4	3,6
<i>78% residuo orgánico – 12% ensilado – 10% grasa</i>	5,9	24,0	3,5	5,5	1,9
<i>81 % purín – 15% residuos de matadero – 3% residuos de industrias de procesado de comidas – 1% cultivo energético</i>	4,8	20,0	2,4	3,8	1,6

Los minerales más importantes que se encargan de enriquecer el suelo para fertilización son el nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), en la Figura 3.12 se muestra el aporte de cada uno de estos minerales dependiendo de la especie animal que generó el residuo orgánico que se alimenta al digestor.

La composición media de abonos orgánicos con diferente origen animal de la Figura 3.12 clarifica que los residuos orgánicos generados por aves son aquellos que más NPK pueden proporcionar al suelo. Existen algunos residuos orgánicos como el procedente de ovino o los lodos, cuya cantidad aportada de mineral K, y N y P, respectivamente, superan los 5 kg T<sup>-1</sup>, valor por debajo del cual se encuentran los minerales en el resto de abonos orgánicos procedentes de otros animales.



**Figura 3.12.** Composición media de NPK de abonos orgánicos de diferente origen animal [109].

Los nutrientes minerales P y K comerciales vienen nominados en forma de óxidos, es decir en la forma  $P_2O_5$  y  $K_2O$ , respectivamente [72]. Se requiere un factor de conversión para expresar la riqueza que posee un determinado óxido de P o K en el mineral propiamente dicho.

Algunos estudios demuestran que la productividad de algunos cultivos se presenta claramente mejorada cuando se lleva a cabo un aporte de digestato al suelo donde se está desarrollando el mismo. La Figura 3.13 constata la afirmación mencionada con anterioridad para un cereal, el maíz, cuya productividad ha sido estudiada con y sin aporte de digestato.

En definitiva, el digestato es uno de los productos del proceso de digestión anaerobia cuya aplicación como fertilizante mineral, previo conocimiento de su composición, aporta nutrientes que están disponibles para el cultivo que se vaya a sembrar posteriormente, siempre y cuando se realicen los ajustes de las cantidades de NPK oportunos.

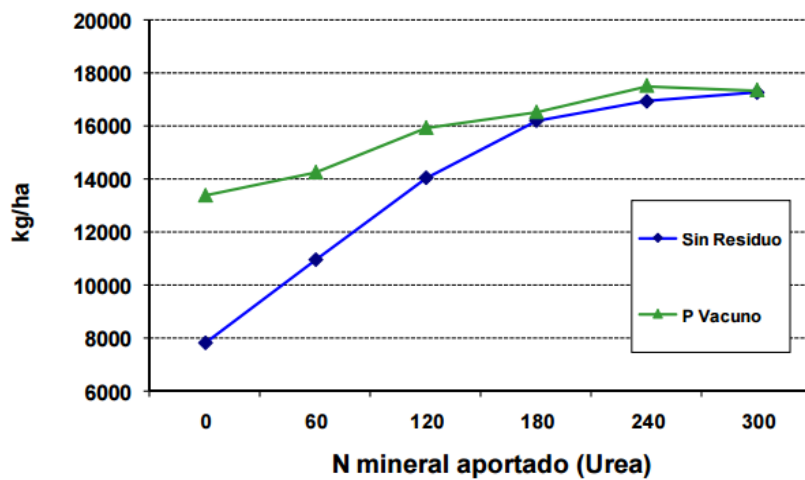


Figura 3.13. Respuesta productiva del maíz al abonado con subproductos ganaderos [109].

### ***3.5. Tecnologías empleadas en digestión anaerobia.***

Una vez desarrollado en qué consiste el proceso de digestión anaerobia, los parámetros que regulan el mismo, alguno de los sustratos susceptibles de participar en el proceso y los productos obtenidos que cierran el ciclo del carbono y cumple con una economía verde y circular, se procede a detallar aquellos equipos en los que la digestión anaerobia tiene lugar.

A groso modo, se pueden distinguir dos grandes tipos de biodigestores (reactor en el que cuál se produce una digestión anaerobia de un determinado sustrato) dependiendo del modo de realizar la carga del residuo: continuos o semi-continuos, y discontinuos.

#### ***3.5.1. Digestores discontinuos***

La principal característica a destacar de este tipo de biodigestores es la carga única con residuos y una pequeña parte de inóculo (biomasa activa en microorganismos). Normalmente, se utiliza este tipo de biodigestores y se lleva a cabo el régimen discontinuo para residuos con un alto contenido en sólidos o de carácter celulósico, esto conlleva elevados tiempos de permanencia del sustrato en el interior del biodigestor. El producto biogás obtenido a partir de este tipo de cargas discontinuas se genera lógicamente de forma discontinua, lo cual supone un problema. Para encontrar una solución se suelen emplear tres o más biodigestores, suponiendo en conjunto el volumen total de un biodigestor y de esta forma la producción en biogás se produce de forma más escalonada.

#### ***3.5.2. Digestores semi-continuos o continuos***

En este tipo de digestores el flujo de residuo o sustrato que se introduce en el interior del mismo es igual al flujo de salida de producto digerido de forma que el volumen permanece siempre constante. En los digestores de tipo semi-continuo la carga y descarga de una parte de sustrato se realiza diariamente, a diferencia de los de tipo continuo cuya alimentación requiere de equipos específicos para tal fin puesto que es

necesario un suministro y retirada de sustrato continuos. Este último tipo de digestor se emplea para grandes instalaciones industriales donde la generación de biogás diaria es muy alta.

Independientemente de su tipo de alimentación continua o semicontinua, se establece una clasificación de los mismos [105]:

Digestor de mezcla completa: el más tradicional de todos ellos y se caracteriza por conseguir una mezcla total del sustrato contenido en el digestor. La concentración de bacterias que se encuentran presentes en el volumen total no es muy elevada ya que periódicamente se va retirando conjuntamente con el residuo digerido. Esto quiere decir que la producción de biogás por unidad de volumen de digestor es bastante reducida.

Digestor de flujo-pistón: se dispone horizontalmente de forma que únicamente se produce el mezclado del sustrato en el interior por secciones longitudinales, consiguiéndose así estados de digestión distintos en cada una de dichas secciones. Se suelen emplear para el tratamiento de residuos con elevada materia en suspensión.

Digestor de contacto o reciclado de lodos: con este tipo de digestor se persigue mejorar las producciones de biogás evitando la pérdida de bacterias mediante un sistema de decantación posterior al digestor. La concentración de bacterias permanece elevada gracias a la recirculación del material decantado al interior del mismo desechándose el efluente que queda en la parte superior.

Finalmente se ha de mencionar un conjunto de digestores que presentan una serie de modificaciones encaminadas a incrementar la concentración de microorganismos activos en el residuo que se va a someter a digestión anaerobia, son los conocidos como “digestores de tercera generación”. Para ello, se realizan modificaciones en el sustrato, ya sea mediante una serie de separadores o soportes que ayuden a que se formen zonas en las que la floculación de los microorganismos sea más propensa y de esta forma se evite que salgan (**digestores de lecho de lodos o U.A.S.B.**), pequeñas partículas en suspensión a las que se adhieran los microorganismos siendo fácilmente recuperables con el filtrado del efluente (**digestores de lecho fluidizado**), o bien filtros anaerobios de material plástico o silicatos sobre los que se fijan los microorganismos sin peligro de que se produzca su pérdida (**digestores de filtro anaeróbico**) [104, 105].



### **3.6. Estudio económico**

Uno de los objetivos principales de una planta de biogás es la reducción de la cantidad de residuos en la medida de lo posible. Con este objetivo se consigue solventar un problema medioambiental, bien es verdad que de la solución a dicho problema surge una oportunidad para aprovechar la energía generada. La viabilidad económica de una planta de biogás se encuentra influenciada en gran medida por el rendimiento energético generado en la misma. Uno de los aspectos clave en la rentabilidad de una planta de biogás y que puede amenazar su viabilidad económica es la disponibilidad de sustratos. Se debe asegurar el suministro de residuos a la planta de biogás, por este motivo el proceso de co-digestión se plantea como una alternativa que dota de cierta flexibilidad para conseguir una continuidad en el funcionamiento del digestor. En función de las características de la zona en la que se generen los residuos se pueden aplicar dos modelos de gestión en el tratamiento de residuos según el *Real Decreto 1255/2010, de 8 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 949/2009, de 5 de junio, por el que se establecen las bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de Biodigestión de Purines* [110]:

**Modelo de tratamiento centralizado:** se trata conjuntamente sustratos procedentes de diferentes instalaciones en una planta con varios digestores, el biogás producido es almacenado y valorizado energéticamente. Presenta más riesgos en el suministro de sustratos pero se incrementan las posibilidades de transportar otros residuos para realizar co-digestiones de forma que se mejore la eficiencia del proceso. Sin embargo, se ha de tener especial cuidado con el transporte de residuos en este modelo ya que según un estudio realizado por la Agencia Andaluza de la Energía [111] el transporte de residuo es energéticamente eficiente si se encuentra localizado a menos de 50 km de la planta de biogás y posee una eficiencia nula a más de 1025 km.

**Modelo de gestión individual:** tratamiento del residuo en el lugar de la producción del mismo. En este modelo la posibilidad de co-digestión es más complicada, y con ello la eficiencia en la producción de metano durante el proceso, pero el riesgo en el suministro de residuos se ve claramente disminuido. En este modelo, el tamaño de la planta de biogás es menor que en el modelo anteriormente citado.

Un modelo de gestión de los residuos individual siempre resulta más fiable frente a un modelo de tratamiento centralizado en cuanto a ingresos generados por la planta de biogás debido a tres motivos principales, se integra totalmente en la gestión del negocio principal, la inversión es menor y se asegura un suministro de materias primas a la misma.

## 4. Metodología

### 4.1. Acondicionamiento de sustratos empleados.

Todos los ensayos desarrollados en este trabajo han requerido un material previamente acondicionado en reactores de laboratorio (inóculo), el cual ha servido para proporcionar una concentración suficiente de población microbiana. El inóculo está formado por una mezcla de purín de cerdo, procedente de la Finca Montepistacho ubicada en Lobón (Badajoz) (38°51'00''N/6°37'27''O) y palas de chumbera (Figura 4.1), completamente trituradas que proceden de un ensayo de su cultivo localizado en la Finca La Orden del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX). La proporción de la mezcla utilizada ha sido aquella que se degrada más rápidamente según se ha demostrado en el trabajo de Bolívar [112].



**Figura 4.1.** Pasta de chumbera obtenida a partir de palas de chumbera recolectada en campo.

Los ensayos en régimen batch y en régimen semi-continuo han tenido lugar con tres tipos principales de sustratos: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos, biomasa microalgal y residuos agroindustriales.

#### 1. Cultivos energéticos o productos procedentes de ellos:

- Sorgo
- Triticale
- Aceite de colza

2. Biomasa microalgal
3. Residuos agroindustriales:
  - Purín de cerdo
  - Rastrojo de maíz

Todos los sustratos orgánicos mencionados anteriormente se describen a continuación, reproduciendo el procedimiento adecuado para ellos desde su origen hasta su entrada en el digestor anaerobio.

#### 4.1.1. Cultivos energéticos o productos procedentes de ellos.

En este trabajo científico se realizan ensayos con cultivos energéticos procedentes de cosechas llevadas a cabo en CICYTEX, en concreto sorgo y triticale, y a su misma vez aceite extraído de las semillas recolectadas del cultivo energético colza. Se eligen cultivos energéticos para realizar cada uno de los ensayos como consecuencia del rápido crecimiento que poseen y la fácil adaptación de los mismos a condiciones extremas como las que se presentan en la región extremeña (ubicación donde tienen lugar los ensayos). Se trata de dos tipos de sustratos, sólidos y lignocelulósicos, y líquidos y homogéneos.

En el primer caso, se ha procedido a la reducción del tamaño de las porciones sólidas para su fácil manejo mediante una trituradora Niarsa de *Máquinas forestales Ventura* (Figura 4.2). Se han realizado dos pases para conseguir un tamaño de los restos vegetales más pequeño, alrededor de 25 mm.

En segundo lugar, se ha llevado a cabo un tamizado de la muestra a un tamaño de malla de 20 mm para evitar que se introduzcan en el biodigestor sustratos con un tamaño de partícula excesivamente grande. Hay que destacar en este pretratamiento mecánico intermedio que, en algunos casos, el tamizado se ha realizado tras la fermentación en el silo, es decir, previo a la alimentación del digestor con el sustrato vegetal. Esta variación se ha efectuado cuando los ensayos se han realizado a escala de planta piloto y los silos fabricados poseían grandes cantidades de material ensilado.



**Figura 4.2.** Trituradora Niarsa utilizada en el primer pretratamiento de tipo mecánico en sustratos de origen vegetal.

En último lugar, se han elaborado silos de forma manual teniendo en cuenta que uno de los requisitos más importantes en este tipo de conservación de sustratos es la ausencia de oxígeno y luz. Por este motivo, los silos se han fabricado con extrema dedicación empleando botes de vidrio con cierre hermético almacenados en lugar cerrado donde los rayos de luz no incidan sobre ellos, y bolsas de plástico, completamente opacas a la luz del sol. Los botes de vidrio poseen una capacidad de 1 kg y están destinados para ensayos de digestión anaerobia en reactores anaerobios de laboratorio (Figura 4.3). Las bolsas de plástico pueden llegar a almacenar aproximadamente unos 350 kg de material ensilado (Figura 4.4), lo cual quiere decir que se utilizan para aquellos ensayos de digestión anaerobia que se realizan en planta piloto.

En lo referente a cultivos energéticos, el tratamiento llevado a cabo ha sido descrito con anterioridad, sin embargo existen algunos cultivos energéticos como es el caso de la colza, en el cuál es posible extraer un producto energético diferente a la parte lignocelulósica en sí misma.



**Figura 4.3.** Silos de pequeño tamaño con material vegetal lignocelulósico para emplear como sustrato en digestores anaerobios.



**Figura 4.4.** Proceso de tamizado para eliminar restos vegetales con tamaño demasiado elevado (arriba). Silos de gran tamaño con material vegetal lignocelulósico para emplear como sustrato en digestores anaerobios (abajo).

La colza como cultivo oleaginoso proporciona un aceite contenido en las semillas que se extraen tras su cosecha. El procedimiento de extracción de aceite a partir de las semillas se realiza mediante una prensa de tornillo. En este caso se ha empleado una

prensa Farmet® CESKA SKALICE FL200 LCPV7-11 (Figura 4.5), posee un émbolo encargado de ejercer una fuerza sobre las semillas provocando de esta forma su rotura y expulsando todo el contenido oleaginoso de su interior.



**Figura 4.5.** Prensa Farmet® CESKA SKALICE FL200 LCPV7-11 usada en el proceso de extracción de aceite de las semillas de colza.

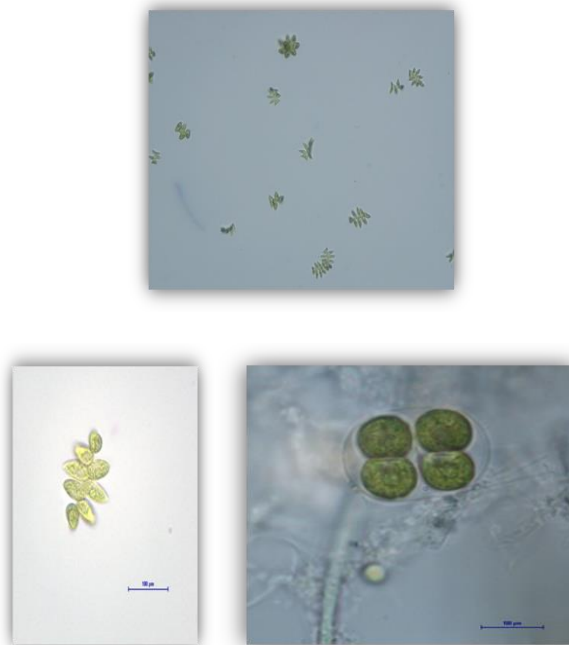
El aceite generado (Figura 4.6) ha sido filtrado mediante papel desecante para posteriormente ser almacenado en recipientes adecuados. La parte sólida generada en la prensa tras el proceso de extracción de aceite se denomina torta, es aprovechada principalmente para alimentación animal por lo que en este trabajo científico no ha sido sometida a estudio.



**Figura 4.6.** Producto oleaginoso procedente de colza obtenido para la evaluación en procesos de digestión anaerobia.

#### 4.1.2. Biomasa microalgal.

La biomasa microalgal que se ha empleado como sustrato para digestión anaerobia es el resultado de un enorme trabajo desarrollado bajo el proyecto “*Planta Integrada para la fijación de CO<sub>2</sub> en microalgas y su aprovechamiento en un proceso de co-digestión para la generación de energía térmica y eléctrica. Extremadura Region Project (SPAIN), PCJ1006, and Extremadura Region grants for research groups (ref. GR10159)*”. Las microalgas obtenidas para tales fines proceden de muestras de agua tomadas de los embalses extremeños de Arrocampo y Orellana, y de la charca de Brovales. Han crecido y se han multiplicado en reactores de laboratorio. Los microorganismos existentes en este medio están formados entre otros por una población de especies de microalgas autóctonas de la región extremeña, en la cual predomina la especie *Scenedesmus* y convive junto a otra especie unicelular de forma esférica, *Chlorella*. En la Figura 4.7 se muestran las especies encontradas en una observación microscópica realizada con un microscopio Eclipse 50i Nikon a distintos aumentos acoplado a una cámara fotográfica.



**Figura 4.7.** Especies de microalgas encontradas en el medio a aumentos de 20x (arriba), 40x y 100x (abajo, de izquierda a derecha). CICYTEX.



Las microalgas en alta concentración (el volumen total en el cuál se encontraban) han sido trasladadas desde los reactores de laboratorio a una instalación/planta piloto compuesta por una serie de paneles y columnas diluyendo con agua y alimentándolas con la proporción de fertilizantes comerciales adecuada.

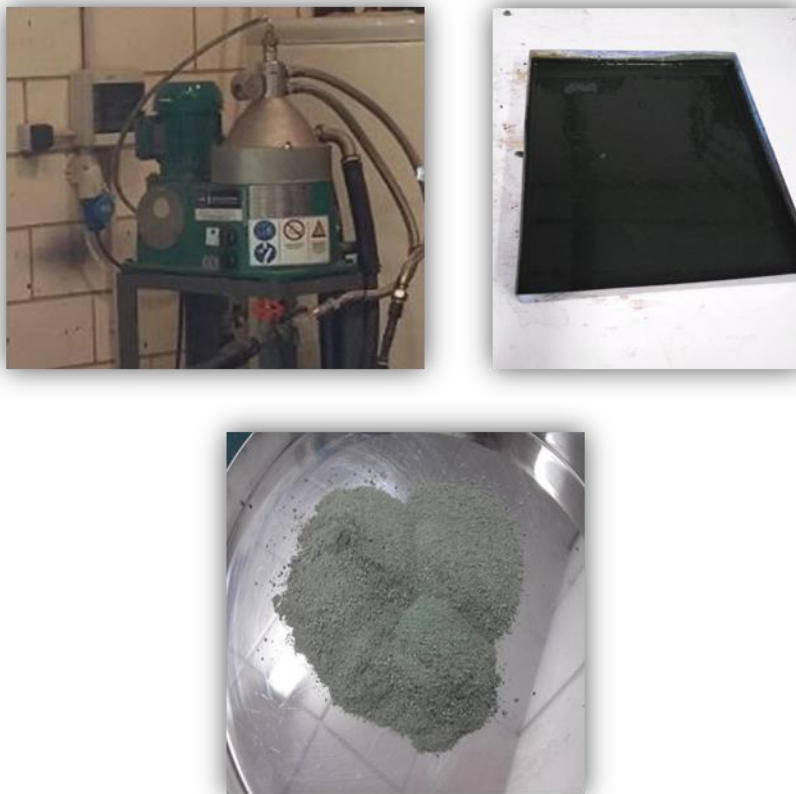
Las microalgas existentes en el medio de cultivo han recibido gas CO<sub>2</sub> en determinadas ocasiones en las que el valor de pH del medio ha superado el valor neutro de acidez mediante un sistema de control. En la Figura 4.8 se puede observar la planta piloto funcionando en su totalidad.



**Figura 4.8.** Columnas y paneles correspondientes a la planta piloto de microalgas.

Por otro lado, ha existido un burbujeo constante de aire en todos los paneles y columnas para conseguir un constante movimiento de las microalgas en el medio y así evitar la

adhesión de las mismas en las paredes. De lo contrario, la entrada de luz al interior del panel o columna sería menor, lo que conllevaría un menor crecimiento en las microalgas. Diariamente, un tercio de la capacidad de los paneles/columnas ha sido cosechado y se ha renovado esa cantidad con agua limpia mezclada con una proporción adecuada de fertilizantes comerciales. Los nutrientes más importantes contenidos en dichos fertilizantes han sido N, P y K, los cuales han servido de alimento a los microorganismos junto a la luz solar que han recibido continuamente a través de sus paredes. La biomasa cosechada en cada uno de los reactores se ha trasladado a una centrífuga para la separación de las partes líquida y sólida, tal y como se muestra en la Figura 4.9. La concentración media de microalgas en los paneles o fotobiorreactores ha sido de 0.1% (p/p), y tras realizar el proceso de centrifugado la concentración obtenida ha oscilado entre el 4% (p/p) y el 8% (p/p). La parte sólida se ha sometido a secado en estufa a 105 °C durante 24 horas (Figura 4.9).



**Figura 4.9.** Centrífuga GEA Westfalia Separator Group GMBH 59302 Oelde, Alemania, empleada en la separación de las fracciones sólida y líquida (arriba e izquierda). Microalgas concentradas tras el proceso de centrifugación (arriba y derecha). Microalgas secadas en estufa a 105 °C (abajo).

**4.1.3. Residuos agroindustriales.**

En lo relativo a los residuos agroindustriales con los que se han realizado ensayos de biodigestión anaerobia se encuentran el purín de cerdo y el rastrojo de maíz. Este último recibe un pretratamiento similar al que se lleva a cabo con los cultivos energéticos. El purín de cerdo al tratarse de un sustrato orgánico líquido que contiene partículas sólidas apenas requiere pretratamiento, excepto una homogeneización manual del mismo para evitar problemas de variabilidad en los resultados obtenidos.

El maíz procedente de ensayos de cereales sembrados en el centro de investigación CICYTEX se ha cosechado para estudios desarrollados por investigadores, y el rastrojo de maíz generado durante la recolecta se ha triturado de forma similar al sustrato vegetal estudiado en este trabajo. Posteriormente, no ha sido sometido al proceso de ensilado debido a su escasa humedad, lo cual evita que puedan proliferar mohos u otro tipo de microorganismos en su superficie. Por este motivo, se ha podido mantener en forma de paca o simplemente apilado en campo y tapado con tela plástica aislante de la luz y el agua.

El purín de cerdo ha sido recogido en la Finca Montepistacho, mencionada anteriormente, puesto que se trata del mismo residuo que se ha utilizado para acondicionar el inóculo con la pasta de chumbera. El material se ha recogido directamente de la fosa de la explotación porcina, cada vez que se ha requerido material para ensayos de laboratorio. En el caso de requerir cantidades mayores, ha sido necesaria la ayuda de tractor cisterna (Figura 4.10) cuya capacidad es de 5000 L. El modo de recogida del residuo ha consistido en la extracción del mismo con ayuda de la bomba de la cisterna, de una balsa de grandes dimensiones situada en la Finca Montepistacho. Un depósito de 1000 L (Figura 4.11) de capacidad ha sido el lugar en el cuál se ha almacenado el purín para su empleo diario en planta piloto cuando así lo ha requerido el ensayo de biodigestión.



**Figura 4.10.** Tractor cisterna para carga y transporte de purines usados en ensayos de digestión anaerobia.



**Figura 4.11.** Depósito de almacenamiento de purines para su empleo en la alimentación de planta piloto de biogás.

#### ***4.2. Ensayos de digestión anaerobia.***

En este trabajo de investigación se ha tratado de obtener aquella proporción de sorgo junto a otros sustratos orgánicos, ya sean cultivos energéticos, y/o residuos agroindustriales, que optimice los rendimientos de metano en una planta de biogás. Para ello es imprescindible conocer el potencial de generación de metano que posee cada uno de los sustratos orgánicos que se ensayan, así como su cinética de degradación. Pues bien, conociendo la finalidad principal del trabajo a desarrollar primeramente se considera lógico realizar una serie de ensayos de laboratorio de digestión anaerobia de tipo batch por triplicado para cada sustrato independiente. En estos ensayos se ha analizado la evolución diaria del volumen de biogás y metano generado por el sustrato, la caracterización físico-química de dicho sustrato e inóculo al inicio del proceso, así como del digestato obtenido al finalizar del mismo. Adicionalmente, se ha empleado el modelo matemático ADM1 para obtener una simulación del comportamiento de cada uno de los compuestos que contienen los sustratos sometidos a digestión anaerobia. A continuación, los ensayos realizados en mono-digestión se repiten de nuevo en una planta piloto con una capacidad 300 veces mayor a la capacidad de los reactores de laboratorio para llevar a cabo una comparativa de rendimientos obtenidos en cuanto al biogás o metano generado.

Por otro lado, se encuentran los experimentos en régimen semi-continuo, en los cuales se ha estudiado la influencia de la velocidad de carga orgánica (VCO) de la mezcla de sustratos estudiados como alimento, y la proporción de cada sustrato en la mezcla en el rendimiento de metano obtenido. Dichos experimentos se han realizado en los mismos reactores de laboratorio en los que han tenido lugar las experiencias batch. A continuación, se detalla la forma de operar en función del tipo de ensayo llevado a cabo y la instalación o montaje empleado en cada caso, puesto que los equipos que se han empleado son los mismos.

##### ***4.2.1. Equipos de biodigestión anaerobia y montaje experimental a nivel de laboratorio.***

En laboratorio se han utilizado reactores cilíndricos de tipo mezcla completa construidos en acero inoxidable, con una capacidad total de 6 L y un volumen de trabajo

en torno a 5 L. Se dispone de dos baterías compuestas por cuatro reactores de laboratorio cada una de ellas. Los reactores o digestores anaerobios poseen un sistema de agitación que consiste en un eje central unido a la parte superior de la tapa del reactor con dos aspas en forma de hélice. El eje gira gracias a un motor eléctrico que se encuentra en la tapa, la velocidad se puede regular de forma manual en un cuadro de control. Los digestores anaerobios también deben disponer de un sistema de control de la temperatura interna puesto que es imprescindible para que proliferen unos microorganismos u otros en función de ella. Por ello, existe un calentador alimentado eléctricamente que se encarga de calentar agua contenida en un circuito de camisas externas a las paredes de los reactores, regulándose la temperatura desde el cuadro de control mencionado con anterioridad. En la parte superior de la tapa se introduce una sonda de temperatura que sirve para conocer a tiempo real que valor de temperatura existe en el interior del reactor y de esta forma el calentador aporta la cantidad de calor necesaria para llegar al valor de temperatura prefijado. En la Figura 4.12 se presenta un esquema explicativo del montaje experimental del digestor anaerobio con todas sus salidas y la parte destinada a la acumulación y medición de los gases generados durante los ensayos.



**Figura 4.12.** Equipos de digestión anaerobia, medidores y montaje experimental de biogás producido empleados en experimentos realizados de digestión anaerobia.

1. Entrada de material al digestor: válvula manual de entrada al digestor para emplear en los experimentos realizados en semi-continuo.
2. Salida de gas del digestor: orificio de salida de biogás producido con conexión mediante conducto al contador automático.
3. Motor de agitación: responsable de aportar la potencia necesaria al eje central del digestor para conseguir la agitación del sustrato solicitada.
4. Pinzas de seguridad: el proceso de digestión anaerobia se realiza en ausencia de oxígeno por lo que resulta necesario conseguir la estanqueidad en el interior del reactor mediante las pinzas.
5. Salida inferior de descarga: válvula del reactor empleada para la descarga y limpieza del digestor.
6. Calentador: equipo encargado de proporcionar el calor suficiente al circuito interno de agua de la batería de digestores.
7. Bomba de agua: el agua del interior del circuito necesita moverse para conseguir la temperatura en el interior del reactor deseada y para ello se utiliza una bomba.
8. Circuito de agua de calefacción.
9. Cuadro de control.
10. Bolsa Tedlar de acumulación de biogás generado en digestores para su análisis mediante el analizador de gases.
11. Contador *Milligascounters*® (Dr. Ing. Ritter Apparatebau GMBH & Co. KG; Bochum, Alemania). El principio de medida en el que se basan es el desplazamiento de volumen mediante burbujeo del biogás producido. Se encuentran conectados al analizador de gases para el correspondiente recuento del volumen de gas producido, el cuál será analizado una vez acumulado un volumen determinado (4251 mL).
12. Medidor *Awite*® *serie 6 gas Analyzer* (Awite Bioenergie GmbH, Langenbach, Alemania) de composición de biogás generado: gracias a sus sensores y

electroválvulas se puede conocer en tiempo real la composición del biogás generado. Los sensores que contiene dicho medidor son los siguientes:

- a. Sensor de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): son dos sensores diferenciados, aunque ambos son sensores infrarrojos de dos haces y poseen compensación de temperatura y presión. Su rango de medida es de 0% a 100%.
- b. Sensor de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ): se trata de sensores electroquímicos en los tres casos con un rango de medida de 0 ppm a 5000 ppm para  $\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , y de 0% a 25% para  $\text{O}_2$ . Puesto que el biogás no debe contener  $\text{O}_2$  en su composición se empleará este último sensor como medida de control.

#### **4.2.2. Planta piloto de biodigestión anaerobia e instalación completa de gases.**

Los experimentos de digestión anaerobia realizados en laboratorio son repetidos a nivel de planta piloto para estudiar el efecto de escala que puede tener lugar en los resultados obtenidos. La planta piloto de biogás, que dispone el centro de investigación, posee una capacidad total de  $2 \text{ m}^3$  y un volumen útil de  $1,5 \text{ m}^3$ . A diferencia de los reactores de laboratorio, posee un aislamiento externo para evitar que las condiciones ambientales puedan afectar a la temperatura del proceso de digestión ya que se encuentra ubicado al exterior. El material del que se encuentra construido el reactor es de acero inoxidable y de forma cilíndrica, tal y como los reactores de laboratorio. Los sistemas de agitación y calefacción de la planta piloto son ligeramente distintos a los sistemas que poseen los digestores anaerobios. El eje de agitación se encuentra dispuesto de forma inclinada en el interior del reactor y su velocidad se puede controlar manualmente desde el panel de control mediante un potenciómetro. La calefacción del digestor consiste en un mecanismo compuesto por un circuito interno de tubos en forma de serpentín por el que circula agua caliente cuyo calor es suministrado a través de un calentador. Los gases generados se acumulan en el espacio superior del digestor donde se dispone de una cavidad con capacidad de deformación debido a la presencia de una membrana de material plástico. La instalación de gases se encuentra conectada mediante tubos de material plástico y consta de un contador de gases para evaluar la producción diaria de





Cada una de los elementos identificados en la Figura 4.13 se especifica seguidamente:

1. Salida de gas del digestor: orificio de salida de biogás generado, conectado mediante tubos plásticos al contador automático.
2. Salida toma-muestra.
3. Tornillo sinfín: sirve para el alimento del material sólido al interior del digestor.
4. Motor de agitación: responsable de aportar la potencia necesaria al eje del digestor para conseguir la agitación del sustrato solicitada.
5. Tanque de almacenamiento de purín.
6. Trampa de agua: situada entre la salida de gases y el contador automático para evitar el paso del agua condensada al resto del circuito de gases. Contiene llave para medidas de composición de biogás intermedias.
7. Contador Ritter.
8. Compresor de biogás.
9. Gasómetro: lugar de almacenamiento de biogás.
10. Tanque de entrada de material al digestor: está compuesto por una válvula automática y otra manual. Se emplea en los experimentos realizados en semi-continuo.
11. Tanque de salida de material del digestor: contiene una válvula automática y otra manual. Se emplea en los experimentos realizados en semi-continuo.
12. Válvula de descarga del reactor: para descarga y limpieza del mismo.
13. Panel de control: se puede manejar la velocidad de agitación, programar la temperatura del sustrato a digerir y la alimentación y extracción de sustrato al reactor.
14. Membrana plástica de almacenamiento de biogás generado.

La medida de los gases generados en la planta piloto de biogás mostrada en la Figura 4.13 se realizaron con el medidor Sewerin portátil de gases (Figura 4.14), el cual

permite la determinación de la composición del biogás generado a través de la succión de éste y una serie de sensores internos que determinan los siguientes compuestos gaseosos:

- Metano y dióxido de carbono: de 0 a 100% en volumen, con un error de medición de 1,5 % obtenido a través de un sensor infrarrojo.
- Oxígeno: mediante un sensor electroquímico con un error de medición de 3% realiza medidas en el rango de 0 a 25%.
- Ácido sulfhídrico: en el rango de medida de 0 a 2000 ppm obtenido mediante un sensor electroquímico y un error de medida de 3%.

El aprovechamiento energético del biogás generado se realiza empleando una caldera como la que se presenta en la Figura 4.14.



**Figura 4.14.** Equipo de medición de composición de biogás portátil (derecha) y caldera de combustión de biogás (izquierda).

#### **4.2.3. Procedimiento experimental.**

Se pueden distinguir dos métodos de trabajo en función del tipo de régimen del experimento que se vaya a ensayar, ya sea de tipo batch o semi-continuo.

En el caso de las experiencias en modo batch o discontinuo se realiza una carga al inicio del experimento con una parte de la misma de inóculo y otra parte del material en

estudio en una proporción aproximada de 2:1, 1:2 ó 1:1 en peso (sobre SV), respectivamente. El inóculo y el material o sustrato a degradar se caracterizan previamente. Una vez el digestor se ha cargado con la mezcla de inóculo y sustrato se debe asegurar que el digestor se encuentra totalmente estanco y se inicia el recuento del biogás generado a través de los contadores Ritter. Diariamente se toma nota de los volúmenes de biogás producidos en cada experiencia, así como de la composición del mismo, si ha sido analizado (el analizador Awite realiza una medición de la composición del biogás cada 4,251 L generados). Una vez el experimento de digestión anaerobia apenas genera volumen de biogás se da por terminado y se puede proceder a la descarga del digestor y a la limpieza del mismo. La mezcla extraída del mismo es analizada de la misma forma que los sustratos de partida para comparar algunos parámetros importantes como pueden ser DQO, Sólidos Totales o Sólidos Volátiles. Todos los experimentos de tipo batch se realizan por triplicado para cada sustrato y con un ensayo de control que contiene la misma cantidad de inóculo que los experimentos batch que se están realizando y enrasado hasta el volumen final de reacción con agua. De esta forma se puede obtener de forma neta la producción de biogás generado por el sustrato en cuestión.

Los experimentos realizados en régimen semi-continuo se inician a partir de un sustrato degradado en el que existe una concentración de la población de microorganismos responsables de la producción de metano bastante elevada. Dicho material de partida es caracterizado para conocer las condiciones iniciales del experimento. Diariamente se alimenta el reactor con una determinada cantidad de sustrato (o mezcla de ellos) denominada VCO si se expresa en base de Sólidos Volátiles en peso. Con motivo de mantener el volumen constante en el interior del digestor, se extrae previamente la misma cantidad de sustrato que se alimenta. Esta operación se realiza tres veces al día a lo largo de la primera mitad del día para evitar un cambio importante en el biodigestor que pueda afectar a las bacterias anaerobias. El procedimiento seguido para la extracción o alimentación del material orgánico se lleva a cabo manualmente, empleando una jeringa que se introduce en una de las válvulas situadas en la tapa del digestor. Esta operación se debe realizar cuidadosamente ya que la apertura y cierre de la válvula no permita la entrada de oxígeno al interior del reactor. En el caso de las experiencias llevadas a cabo en planta piloto, se extrae la cantidad establecida diariamente mediante la válvula de descarga del digestor o la salida toma muestra

situada en la pared del mismo. Una vez se ha procedido a sustraer una parte del material degradado, se introduce el material sólido mediante el tornillo sinfín accionado hidráulicamente y la cantidad de purín o material líquido se alimenta al reactor repartido en tres veces en la primera mitad de la mañana a través del tanque de alimentación, bombeando el sustrato hacia el interior. En estas experiencias se recogen muestras semanales para evaluar diferentes parámetros que permitan realizar un seguimiento del proceso. Este modo de experimentos tiene una duración mayor a los experimentos discontinuos y se suelen mantener en funcionamiento hasta que se haya logrado alcanzar al menos dos veces el tiempo de retención hidráulico correspondiente a la VCO y el volumen del reactor estudiado. La medición de los gases producidos en este tipo de experiencias se lleva a cabo de forma similar a los experimentos tipo batch. Finalmente, el experimento generará un material degradado denominado digestato que puede ser aprovechado como abono en suelos si las condiciones físico-químicas son las adecuadas. Por ello, se lleva a cabo una caracterización completa en la que se incluye una determinación de aquellos macroelementos y microelementos fundamentales.

#### **4.2.4. Ensayos de digestión anaerobia tipo batch.**

##### ***4.2.4.1. Ensayo batch S, T y A: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos.***

Los ensayos de digestión anaerobia tipo batch se han realizado en los reactores de laboratorio por triplicado empleando una mezcla compuesta por una parte de inóculo y el resto del sustrato a estudiar. La experiencia ha sido repetida posteriormente en planta piloto para evaluar la influencia del tamaño del reactor en el proceso de digestión anaerobia. En la Tabla 4.1 se detallan las condiciones iniciales de los experimentos que se han desarrollado en esta Tesis doctoral.

A cada experimento se le asociará a partir de ahora una letra y un número para referirse a él y facilitar de esta forma el análisis de resultados que se efectúa en el siguiente apartado. Cada letra corresponde al experimento de un sustrato distinto mientras que los números 1 a 3 se refieren a las tres repeticiones llevadas a cabo por sustrato evaluado, siendo el número 4 aquél perteneciente al experimento en planta piloto en régimen batch o discontinuo.

**Tabla 4.1.** Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de sorgo, triticale y aceite de colza.

Experimento	Sustrato empleado	Volumen reactor, L	Inóculo, g SV	Sustrato, g SV	Tiempo, d
S1	<i>Sorgo</i>	5	47	54	30
S2		5	47	54	30
S3		5	47	54	30
S4		1500	12052	12458	40
T1	<i>Triticale</i>	4,5	31	100	25
T2		4,5	24	82	30
T3		4,5	31	100	30
T4		1500	7920	8400	28
A1	<i>Aceite de colza</i>	5,0	24	50	87
A2		4,5	94	39	42
A3		4,5	94	39	42
A4		1500	22000	22000	40

#### 4.2.4.2. Ensayo batch B: biomasa microalgal.

Los experimentos tipo batch correspondientes a biomasa microalgal se han realizado por triplicado a escala de laboratorio partiendo de las condiciones iniciales que se presentan en la Tabla 4.2. Seguidamente, se ha desarrollado una experiencia en planta piloto en similares condiciones a las tenidas en cuenta en laboratorio, reflejada asimismo en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de biomasa microalgal.

Experimento	Sustrato empleado	Volumen reactor, L	Inóculo, g SV	Sustrato, g SV	Tiempo, d
B1	<i>Biomasa microalgal</i>	5	30	44	30
B2		5	30	44	30
B3		5	48	44	30
B4		1500	6218	12600	48

#### 4.2.4.3. Ensayo batch P y R: residuos agroindustriales.

Del mismo modo que los sustratos evaluados en los ensayos S, T, A y B, los residuos agroindustriales empleados como sustratos de estudio en este trabajo (ensayos P y R) se han evaluado teniendo en cuenta las condiciones de partida presentadas en la Tabla 4.3, ya sea para las experiencias realizadas a nivel de laboratorio o planta piloto.

**Tabla 4.3.** Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de purín y rastrojo de maíz.

Experimento	Sustrato empleado	Volumen reactor, L	Inóculo, g SV	Sustrato, g SV	Tiempo, d
<b>P1</b>	<i>Purín</i>	5	32	52	30
<b>P2</b>		5	32	52	30
<b>P3</b>		5	32	52	30
<b>P4</b>		1500	7325	10514	40
<b>R1</b>	<i>Rastrojo de maíz</i>	5	51	21	30
<b>R2</b>		5	51	21	30
<b>R3</b>		5	51	21	30
<b>R4</b>		1500	38780	22750	34

Para cada uno de los ensayos tipo batch presentados anteriormente, las condiciones iniciales en las que han tenido lugar son muy importantes, éstas van a ayudar a comprender y llevar a cabo un análisis de los resultados que se va a extraer de dichos ensayos.

#### ***4.2.5. Ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo.***

Los ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo emplean una nomenclatura formada por cada una de las letras de las que se compone la mezcla de sustratos que se está evaluando en cada caso. El número identificativo de cada experimento define la Velocidad de Carga Orgánica (VCO) ensayada. Todas las experiencias desarrolladas evalúan el sustrato cultivo energético sorgo dulce con una serie de sustratos en diversas proporciones y estudian la influencia de la VCO.

##### ***4.2.5.1. Ensayo en régimen semi-continuo SP: cultivo energético sorgo dulce y purín de cerdo.***

La serie de experimentos SP analiza un barrido de la VCO de 1 a 4 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> usando sorgo dulce y purín de cerdo en igual proporción como alimento de los reactores de laboratorio, tal y como aparece detallado en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín.

Experimento	Sustratos empleados (proporción)	VCO, $\text{g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$	Sorgo, $\text{g}^1$	Purín, $\text{g}^2$	Tiempo, d
SP1		0,89	2,7	83,3	64
SP2	<i>Sorgo y purín</i>	1,81	5,4	166,7	64
SP3	<i>(1:1)</i>	2,68	8,1	250,0	64
SP4		3,55	10,7	333,3	64

<sup>1</sup> Peso en base seca.<sup>2</sup> Peso en base húmeda.

#### 4.2.5.2. Ensayo en régimen semi-continuo SB: cultivo energético sorgo dulce y biomasa microalgal autóctona.

Con el objetivo de llevar a cabo un cotejo entre los resultados extraídos en ensayos realizados con purín de cerdo y biomasa microalgal autóctona con cultivo energético sorgo, se efectúa el ensayo SB. Las condiciones iniciales de las que parte cada ensayo se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal.

Experimento	Sustratos empleados (proporción)	VCO, $\text{g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$	Sorgo, $\text{g}^1$	Biomasa microalgal, $\text{g}^1$	Tiempo, d
SB1	<i>Sorgo y</i>	1	2,7	3,9	64
SB2	<i>biomasa</i>	2	5,4	7,9	64
SB3	<i>microalgal</i>	3	8,1	11,5	64
SB4	<i>(1:1)</i>	4	10,7	15,4	64

<sup>1</sup> Peso en base seca.

La mezcla sorgo-biomasa microalgal ha sido disuelta en 100 mL de agua en cada experimento estudiado para facilitar la alimentación al digestor.

#### 4.2.5.3. Ensayo en régimen semi-continuo SBP: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona y purín de cerdo.

Un escenario de estudio intermedio entre los ensayos SP y SB es el analizado en este caso mediante el ensayo SBP. La composición de la mezcla alimentada al reactor se reparte en partes iguales en cuanto a sorgo, y biomasa microalgal y purín, a su vez



presente en idéntica proporción. La cantidad concreta correspondiente a los sustratos estudiados en el ensayo SBP se detalla en la Tabla 4.6 para cada VCO evaluada.

**Tabla 4.6.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín.

Experimento	Sustratos empleados (proporción)	VCO, g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Sorgo, g <sup>1</sup>	Biomasa microalgal, g <sup>1</sup>	Purín, g <sup>2</sup>	Tiempo, d
SBP1	<i>Sorgo, biomasa</i>	1,14	2,7	1,9	62,5	64
SBP2	<i>microalgal y</i>	2,33	5,4	3,8	125,0	64
SBP3	<i>purín</i>	3,44	8,1	5,8	187,5	64
SBP4	<i>(1:0,5:1)</i>	4,59	10,7	7,7	250,0	64

<sup>1</sup> Peso en base seca.

<sup>2</sup> Peso en base húmeda.

#### 4.2.5.4. Ensayo en régimen semi-continuo SBPT: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo y cultivo energético triticale.

La serie de experimentos SBPT pretende aumentar la variabilidad en el contenido de nutrientes alimentados al digestor anaerobio procedentes de una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale. Las condiciones iniciales de los experimentos desarrollados en este ensayo se reflejan en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale.

Experimento	Sustratos empleados (proporción)	VCO, g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Sorgo, g <sup>1</sup>	Biomasa microalgal, g <sup>1</sup>	Purín, g <sup>2</sup>	Triticale, g <sup>1</sup>	Tiempo, d
SBPT1	<i>Sorgo, biomasa</i>	0,98	1,3	1,9	62,5	1,3	64
SBPT2	<i>microalgal,</i>	1,94	2,7	3,9	125,0	2,7	64
SBPT3	<i>purín y triticale</i>	2,91	4,0	5,8	187,5	4,0	64
SBPT4	<i>(1:1:1:1)</i>	4,00	5,4	7,7	250,0	5,4	64

<sup>1</sup> Peso en base seca.

<sup>2</sup> Peso en base húmeda.

**4.2.5.5. Ensayo en régimen semi-continuo SBPTR: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo, cultivo energético triticale y rastrojo de maíz.**

En el ensayo llevado a cabo SBPTR se introduce un sustrato más en la mezcla alimentada al digestor anaerobio, rastrojo de maíz. Los cinco sustratos sometidos a estudio se encuentran en la mezcla en igual cantidad por lo que se trata de un alimento en el cuál la proporción de sustrato vegetal predomina sobre los sustratos no vegetales. En la Tabla 4.8 se detallan las cantidades exactas empleadas de sustratos para la elaboración de la mezcla para cada VCO estudiada.

**Tabla 4.8.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz.

Experimento	Sustratos empleados (proporción)	VCO, $\text{g SV L}_D^{-1} \text{d}^{-1}$	Sorgo, $\text{g}^1$	Biomasa microalgal, $\text{g}^1$	Purín, $\text{g}^2$	Triticale, $\text{g}^1$	Rastrojo de maíz, $\text{g}^1$	Tiempo, d
SBPTR1	Sorgo, biomasa	1	1,1	1,5	28,6	1,1	1,1	64
SBPTR2	microalgal, purín,	2	2,2	3,1	57,1	2,1	2,1	64
SBPTR3	triticale y rastrojo de	3	3,2	4,6	85,7	3,2	3,2	64
SBPTR4	maíz (1:1:1:1)	4	4,3	6,1	114,3	4,2	4,2	64

<sup>1</sup> Peso en base seca.

<sup>2</sup> Peso en base húmeda.

**4.2.5.6. Ensayo en régimen semi-continuo STP: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale y purín de cerdo.**

Los ensayos en régimen semi-continuo STP y STPA se han llevado a cabo en reactores de laboratorio y en planta piloto. En la Tabla 4.9 se presentan dos experimentos que han tenido lugar en digestores anaerobios de laboratorio y un experimento desarrollado en planta piloto. El ensayo STP que se ha desarrollado en planta piloto reproduce las condiciones iniciales que muestra la Tabla 4.9. Es importante mencionar que el ensayo en planta piloto ha sido evaluado en un rango de VCO variando la proporción entre los tres sustratos en estudio a lo largo de la experiencia.

**Tabla 4.9.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín.

Experimento	Escala	Sustrato			VCO, g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
		Purín, %	Sorgo, %	Triticale, %	
STP1	Laboratorio	69	16	15	1,17
STP2		46	33	21	1,05
STP3-4	Planta piloto	74-59	13-21	13-20	0,88-1,15

**4.2.5.7. Ensayo en régimen semi-continuo STPA: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale, purín de cerdo y aceite de colza.**

La serie de ensayos STPA está compuesta por dos tipos de experiencias a diferente escala: laboratorio y planta piloto. En ambas experiencias se ha incluido un nuevo sustrato en la mezcla que se ha empleado como alimento en los digestores anaerobios con el objetivo de potenciar los rendimientos de metano obtenidos. Las condiciones iniciales relativas a la VCO empleada en cada caso y la proporción de cada uno de los cuatro sustratos alimentados se muestran en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale, purín y aceite de colza.

Experimento	Escala	Sustrato				VCO, g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
		Purín, %	Sorgo, %	Triticale, %	A. colza, %	
STPA1	Laboratorio	38	34	38	10	0,68
STPA2-3-4	Planta piloto	27-18-46	33-26-17	25-25-17	25-21-20	1,08-1,31-1,42

**4.3. Métodos analíticos.**

Los métodos analíticos llevados a cabo en este trabajo se detallan de forma particular para cada parámetro a determinar en concreto. Todos los análisis realizados de las muestras tomadas en cada ensayo se rigen por un procedimiento específico que aparece referenciado en cada caso. Por otra parte, los análisis de cada muestra se han realizado

por triplicado o por duplicado en función de la variación observada en los resultados obtenidos del método analítico.

#### 4.3.1. Sólidos totales y sólidos volátiles (ST y SV)

El procedimiento de análisis de sólidos totales consiste en el secado de la muestra en estufa (JP Selecta Digiheat, USA) a 105 °C durante 24 h para obtener por gravimetría el resultado deseado. En el caso de sólidos volátiles se determinan calcinando la muestra a 550 °C en un horno mufla (Hobersal 12PR300CCH, España) durante 1 h para finalmente determinar la diferencia de peso. Ambos análisis siguen la metodología de análisis establecida por la APHA [113].

#### 4.3.2. Alcalinidad

La alcalinidad de las muestras se determina mediante una volumetría con ácido clorhídrico 0,1 N según aparece reflejado en la metodología APHA [113]. Previamente, la muestra se centrifuga a una velocidad de 4000 rpm durante 10 minutos y se toma la parte sobrenadante de la misma para realizar el análisis volumétrico. El punto final de la valoración viene marcado por un valor de pH menor a 4,5, que indica que la especie bicarbonato en el medio de digestión ha sido desplazada a dióxido de carbono.

#### 4.3.3. Demanda química de oxígeno (DQO)

El parámetro DQO en muestras de sustratos orgánicos se evalúa mediante la medición fotométrica de la concentración de Cromo (III) tras sufrir una oxidación con dicromato potásico, ácido sulfúrico y sulfato de plata. Se determina empleando el kit NANOCOLOR<sup>®</sup> (referencia 985 028) compuesto por tubos de ensayo de vidrio con una cantidad fija de los reactivos indicados anteriormente. Se introducen 200 µL de muestra en un tubo de ensayo del kit para que tenga lugar la reacción durante 2 horas. Para ello se emplea un digestor NANOCOLOR<sup>®</sup> VARIO C2 Macherey Nagel (Figura 4.15) a 148 °C. Seguidamente, se realiza la medición de la muestra digerida una vez se encuentre

totalmente fría en un fotómetro digital PF-12 (Macherey Nagel GmbH & Co.KG, Duren Alemania) (Figura 4.15) de acuerdo a una adaptación del método 410.4 de la U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*) [114].



**Figura 4.15.** Fotómetro PF-12 Macherey Nagel para la medición de DQO y nitrógeno amoniacal en muestras de sustratos y digestor Vario C2 NANOCOLOR<sup>®</sup> Macherey Nagel para la digestión previa.

#### 4.3.4. Nitrógeno amoniacal

La medida fotométrica de indofenol en muestras orgánicas es el objetivo final perseguido por esta técnica analítica adaptada del método E 4500-NH<sub>3</sub> B de la U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*) [114]. El amonio a un valor de pH cercano a 12,6 reacciona con hipoclorito y salicilato, en presencia de un catalizador (nitroprusiato de sodio) para dar como producto de la reacción indofenol azul. De forma similar a la analítica desarrollada para la determinación de la DQO, se procede en el caso del nitrógeno amoniacal. Para ello se utiliza el kit NANOCOLOR<sup>®</sup> (referencia 985 006). El tiempo de reacción de la muestra, con el reactivo preparado del tubo de ensayo correspondiente al kit es de 15 minutos a una temperatura de 25 °C [114]. La medida fotométrica de la muestra se realiza en el fotómetro citado anteriormente.

#### 4.3.5. pH y potencial redox

Para hacer la medición de pH y potencial redox del medio de la muestra a analizar se emplean electrodos específicos conectados a un pHmetro (Crison Basic 20, España) marca Crison, sumergiéndolos directamente sobre la misma. Si la muestra a estudiar es

sólida se lleva a cabo una dilución 1:5 (muestra:agua) que ha sido sometida a agitación alrededor de 2 h para llevar a cabo la medición de la parte superior obtenida tras decantar el sólido.

#### **4.3.6. Ácidos grasos volátiles (AGV)**

Los ácidos grasos volátiles se refieren a todos aquellos ácidos grasos de cadena corta, esto es los ácidos acético, propiónico, butírico y valérico o los isómeros derivados de ellos. Es muy importante su determinación ya que si se acumulan pueden llegar a inhibir la etapa metanogénica en el proceso de digestión anaerobia. Para llevar a cabo el procedimiento de análisis de los ácidos grasos volátiles totales se requiere que la muestra se encuentre totalmente limpia, para ello se centrifuga a 4000 rpm durante 10 minutos. El método a usar es la volumetría de la muestra con ácido sulfúrico a 0.05 M y cuyo objetivo consiste en lograr alcanzar tres puntos finales de pH: 5, 4,3 y 4 de acuerdo al método volumétrico establecido por Liebetrau et al. [115].

#### **4.3.7. Análisis elemental**

Para llevar a cabo este análisis, las muestras sólidas son secadas mientras que las muestras líquidas se analizan en su estado original para evitar sobretodo la pérdida del posible nitrógeno amoniacal en sustratos de origen ganadero. El análisis elemental (C, H, N, S) se realiza por combustión en dos hornos que trabajan a diferente temperatura (horno a 950 °C para determinar C, H y N y horno a 1350 °C para determinar S) y posterior detección del gas generado. Se emplea un analizador elemental (TruSpec CHNS Leco 4084, USA) que usa detectores de conductividad térmica e infrarrojos tal y como marca la normativa UNE-EN ISO 16948 para análisis de muestras de biomasa [116].

#### **4.3.8. Determinación de lípidos y proteínas**

El contenido en lípidos y proteínas para una muestra de sustrato orgánica se determina por los procedimientos de análisis *Bligh & Dyer* y determinación de nitrógeno total por análisis elemental (detallado en el apartado anterior) para lípidos y proteínas, respectivamente mejorados por Ohemeng-Ntiamoah y Datta [117]. El método *Bligh & Dyer* consiste en un procedimiento de extracción en el que se utiliza una mezcla de disolventes cloroformo:metanol 1:2 v/v y, a continuación, únicamente cloroformo con el fin de extraer la parte lipídica existente en la muestra analizada, cuyo resultado se obtiene por gravimetría. En el caso de la muestra de biomasa microalgal, la determinación del contenido en lípidos se realiza mediante un extractor Soxhlet empleando como disolvente hexano. En cuanto a la determinación de proteínas, se requiere el análisis del contenido en nitrógeno total en la muestra. Esto se debe a que al resultado obtenido de nitrógeno total se le aplica un factor de conversión de 6.25 para su transformación a proteínas. El contenido en nitrógeno total del purín de cerdo está compuesto por nitrógeno orgánico y amoniacal. Este último no se puede contabilizar como proteína para las bacterias por lo que se aplica el factor de conversión mencionado con anterioridad sobre el contenido en nitrógeno orgánico [45].

#### **4.3.9. Análisis de macroelementos y microelementos**

La técnica empleada para el análisis de cada uno de los macroelementos (Na, Ca, Mg, K, P, Fe) y microelementos (Cu, Cr, Ni, Cd, Zn, Mn) analizados es la Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplado por Inducción (ICP-OES). El equipo utilizado para dicho fin es un espectrómetro (Varian 715 ES, Australia) con configuración radial. Las muestras que se analizan en este trabajo poseen alto contenido orgánico y poseen una alta turbidez (aquellas de carácter líquido), lo que hace necesaria una digestión previa de las mismas. Para ello, el equipo usado es un microondas (Milestone Start D, Italia) en el que se trabaja con un programa de temperatura establecido según la normativa UNE-EN ISO 16967 y 16968 [118, 119]. Esta normativa es aquella que se toma como referencia para el análisis de cada uno de los elementos a evaluar en este trabajo.

#### *4.4. Tratamiento de resultados obtenidos.*

Los resultados obtenidos a lo largo de este estudio científico han sido sometidos a un análisis estadístico mediante el software correspondiente en cada caso. Se ha llevado a cabo una división entre la evaluación de los resultados obtenidos aplicando una estadística a ensayos de tipo batch y semi-continuo, y la simulación de los resultados procedentes de ensayos tipo batch.

##### *4.4.1. Análisis estadístico de resultados de ensayos de digestión anaerobia tipo batch y semi-continuo.*

###### *4.4.1.1. Comparación de medias muestrales (ANOVA)*

Para llevar a cabo un cotejo entre medias muestrales se ha efectuado un análisis basado en la varianza, más conocido como análisis ANOVA. Se ha establecido una serie de parámetros en cada una de las experiencias tipo batch desarrolladas, de forma que se han podido identificar si existen relaciones entre dichas experiencias en función de los resultados obtenidos de los análisis estadísticos de aquellos parámetros seleccionados.

Los dos requisitos necesarios para un adecuado análisis ANOVA se corresponden con: una distribución normal de la población (empleando la prueba de Kolmogorov-Smirnov o Shapiro-Wilk en función del número de individuos de la población (N),  $N > 50$  ó  $N = 50$ , respectivamente, con un nivel de probabilidad del 95% ( $p < 0,05$ )), y una homogeneidad de varianzas entre los distintos grupos (corroborada por la prueba de Levene,  $p < 0,05$ ).

Para la determinación de los ensayos o experiencias diferentes entre sí, se ha utilizado la Técnica de Separación de Medias (se ha empleado la prueba de Rangos Múltiples de Duncan,  $p < 0,05$ ).

Los ensayos llevados a cabo en régimen semi-continuo han sido evaluados mediante análisis ANOVA de forma individualizada, estudiando en cada caso las variables más influyentes en la producción de biogás o metano para cada una de las VCO desarrolladas (alcalinidad, nitrógeno amoniacal, ácidos grasos volátiles (AGV), sólidos



volátiles (SV), DQO y relación C/N). La Tabla 4.11 detalla los parámetros sometidos a análisis ANOVA en los ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo.

**Tabla 4.11.** Condiciones de análisis ANOVA para ensayos de digestión anaerobia en semi-continuo.

Ensayo	Parámetros	VCO, g <sup>*</sup> SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
		1	2	3	4
SP	Alcalinidad, nitrógeno	1	2	3	4
SB		1	2	3	4
SBP	amoniacal, AGV, SV, DQO y relación C/N	1	2	3	4
SBPT		1	2	3	4
SBPTR		1	2	3	4

#### 4.4.1.2. Estudio cinético de degradación mediante regresión lineal en experimentos tipo batch

En los experimentos de digestión anaerobia tipo batch realizados con los sustratos sorgo, biomasa microalgal, purín de cerdo, triticale, rastrojo de maíz y aceite de colza, se ha llevado a cabo un ajuste cinético adaptado al volumen de metano producido. Se trata de determinar aquellos parámetros cinéticos que indican cómo transcurre la velocidad de la degradación de forma general, puesto que en apartados posteriores se detalla cómo dicha degradación puede ser simulada a mayor nivel de detalle. Para ello se han empleado tres modelos cinéticos (Primer Orden, modificado de Gompertz y de Cone).

En primer lugar, para el modelo cinético de Primer Orden se ha tomado el volumen máximo acumulado de metano en cada una de las réplicas llevadas a cabo en todos los ensayos tipo batch. Después, se ha procedido al ajuste de resultados, de acuerdo a la expresión (6), seleccionada por diversos autores para el mismo propósito [120-122]:

$$G = G_m [1 - e^{-kt}] \quad (6)$$

donde  $G$  es el volumen de metano (NmL) después de un tiempo  $t$  (d),  $G_m$  es el máximo volumen acumulado (NmL) en un tiempo de digestión infinito y  $k$  es la constante de velocidad específica observada del proceso general ( $d^{-1}$ ).

En segundo lugar, el modelo cinético modificado de Gompertz, empleado entre otros autores por Sousa y col. [123], es un modelo empírico que permite la estimación de importantes parámetros cinéticos de la digestión anaerobia como son la fase de latencia o la producción de metano específica. La ecuación por la que se rige dicho modelo se corresponde con la expresión (7):

$$G = G_m \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{\mu_m e}{G_m} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (7)$$

donde  $\lambda$  (d) es la fase de latencia,  $\mu_m$  (NmL CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) es la velocidad de producción de metano máxima y  $e$  es el número de Euler.

Finalmente, el modelo de Cone es capaz de estimar la velocidad de producción específica de metano y el comportamiento de la producción de metano mediante la constante de forma ( $n$ ) que indica la presencia o ausencia de fase de latencia. La expresión utilizada por Sousa y col. [123] es la siguiente:

$$G = \frac{G_m}{1+(kt)^{-n}} \quad (8)$$

donde  $k$  ( $d^{-1}$ ) es la constante de velocidad de producción de metano y  $n$  es la constante del modelo de Cone (adimensional).

El ajuste de los resultados a las expresiones (6), (7) y (8) se realizó mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados a través del software SPSS 15.0, con un intervalo de confianza del 95%.

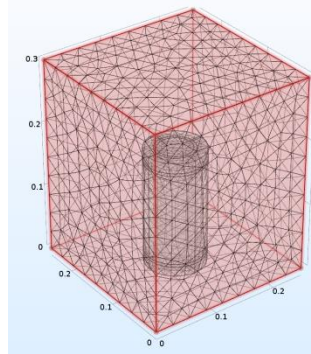
**4.4.1.3. *Análisis de interacciones entre parámetros mediante correlaciones en experimentos tipo semi-continuo***

El estudio de correlaciones entre aquellos parámetros analizados en un proceso de digestión anaerobia en régimen semi-continuo resulta muy importante desde el punto de vista del seguimiento del mismo. Con este estudio se pueden detectar posibles interrelaciones entre los resultados disponibles que pueden servir de mucha utilidad a la hora de mantener el proceso de digestión anaerobia en las mejores condiciones, y alejarlo de posibles inhibiciones. El estudio de correlación entre parámetros se realizó a través de representaciones lineales de un parámetro frente a otro y extrayendo su coeficiente de regresión lineal ( $R^2$ ). Valores de  $R^2$  por encima de 0,7 se han considerado como una magnitud de correlación de moderada a alta. Se han evaluado las correlaciones entre los parámetros reducción de DQO, reducción de SV, alcalinidad, nitrógeno amoniacal, AGV y rendimiento de metano para diferentes VCO y para diferentes mezclas de sustrato en el alimento.

**4.4.2. *Análisis de modelización de resultados de ensayos de digestión anaerobia tipo batch.***

Para la resolución del modelo ADM1 se ha empleado el Método de los Elementos Finitos (MEF), según el cual la idea básica consiste en encontrar la solución de un problema complejo reemplazándolo por la suma de problemas más sencillos. De esta forma, mediante la resolución del método, sería posible encontrar una solución que se aproxime a la solución exacta. En el Método de los Elementos finitos, el dominio que se desea estudiar está dividido en muchos subdominios interconectados entre sí. Se asume que la variación de las propiedades que se desean conocer (concentración, desplazamiento, tensión, temperatura, presión o velocidad) puede ser aproximada por una función sencilla. Estas funciones de aproximación (también denominadas modos de interpolación) se definen en función de los valores que adoptan las variables del problema en los nodos. Las ecuaciones diferenciales se expresan en función de los valores en los nodos. Resolviendo estas ecuaciones, que generalmente pueden expresarse de forma matricial, se pueden obtener los valores que toman la variable en los nodos y con las funciones de interpolación en cualquier punto del continuo. En la

figura siguiente se muestra, a modo de ejemplo, la desratización de un sistema formado por un reactor de acero en una estufa.



**Figura 4.16.** Discretización de un sistema formado por un reactor de acero en una estufa.

En la presente Tesis Doctoral el programa informático utilizado para analizar el modelo ADM ha sido COMSOL Multiphysics, permite el estudio de los procesos de transferencia de masa, momento y energía a través de la resolución, mediante empleo de elementos finitos, de las ecuaciones diferenciales que se indican a continuación:

Ecuación de continuidad (Transporte de masa) para procesos no reactivos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0$$

Ecuación de continuidad (Transporte de masa) para procesos reactivos:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c_i) + \vec{u} \cdot \nabla c_i = r_i$$

$$r_i = -\frac{dc_i}{dt} = -A_{0_i} \cdot \exp\left(\frac{-E a_i}{R \cdot T}\right) \cdot c_i$$

Ecuación de Navier-Stokes (Transporte de momento):

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \vec{u} = \nabla \cdot (-p \cdot \mathbf{I} + \tau) + \vec{F}$$

Primer Principio de la Termodinámica (transporte energía):

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot C_p \cdot \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + Q$$

donde:

- $\rho$  representa la densidad [ $\text{kg m}^{-3}$ ].
- $C_p$  es el calor específico a presión constante [ $\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$ ].
- $T$  es la temperatura absoluta [K].
- $u$  es el vector velocidad [ $\text{m s}^{-1}$ ].
- $Q$  contiene otros flujos de calor distintos del viscoso [ $\text{W m}^{-3}$ ].
- $p$  es la presión [Pa].
- $\tau$  es el tensor de tensiones viscosas [Pa].
- $F$  es el vector de fuerza volumétrica [ $\text{N m}^{-3}$ ].

A continuación, se detallan los pasos que se han seguido para desarrollar el modelo de ADM1 en COMSOL.

1. Introducción de los parámetros.

En la figura 4.17 se muestra la sección correspondiente a la introducción de los parámetros del modelo. En la Tabla 5.25 se presentan algunos de los parámetros iniciales introducidos.

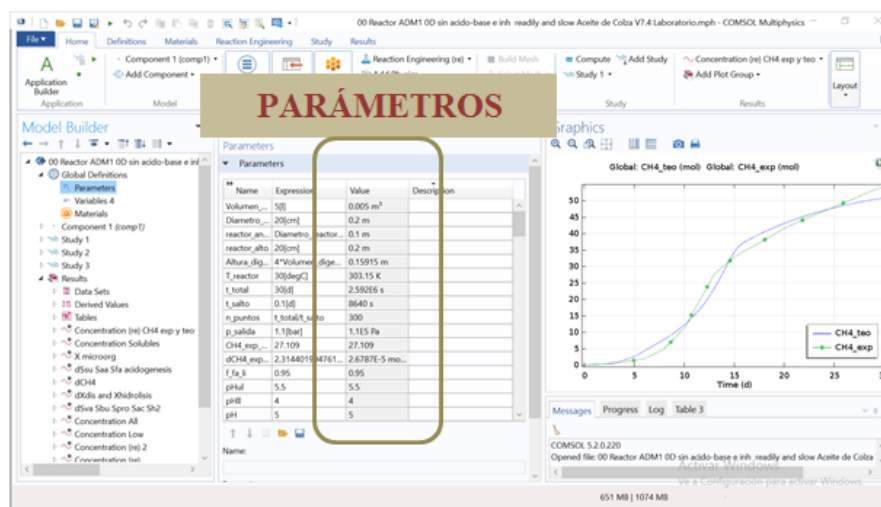


Figura 4.17. Introducción de parámetros del modelo en el programa COMSOL.

2. Introducción de las constantes cinéticas y las velocidades de reacción.

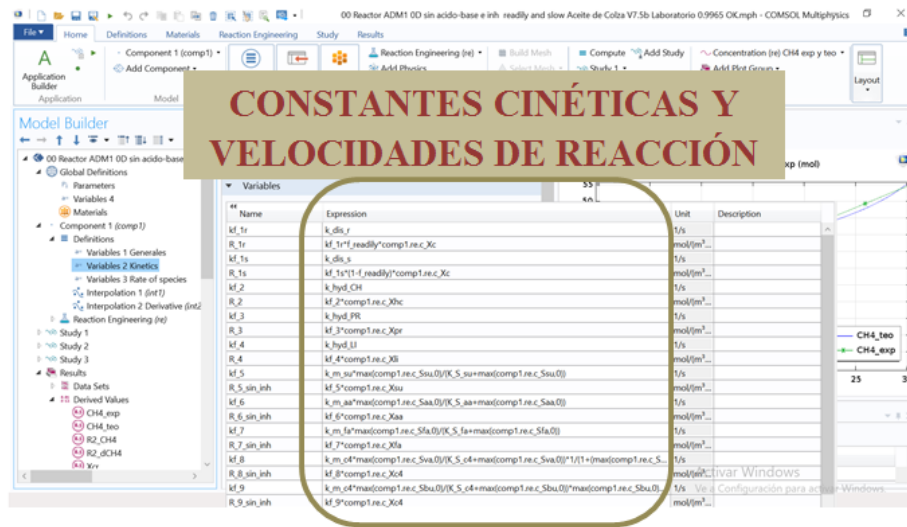


Figura 4.18. Constantes cinéticas y velocidades de reacción empleadas en el modelo ADM1.

3. Introducción de las ecuaciones cinéticas de las distintas especies.

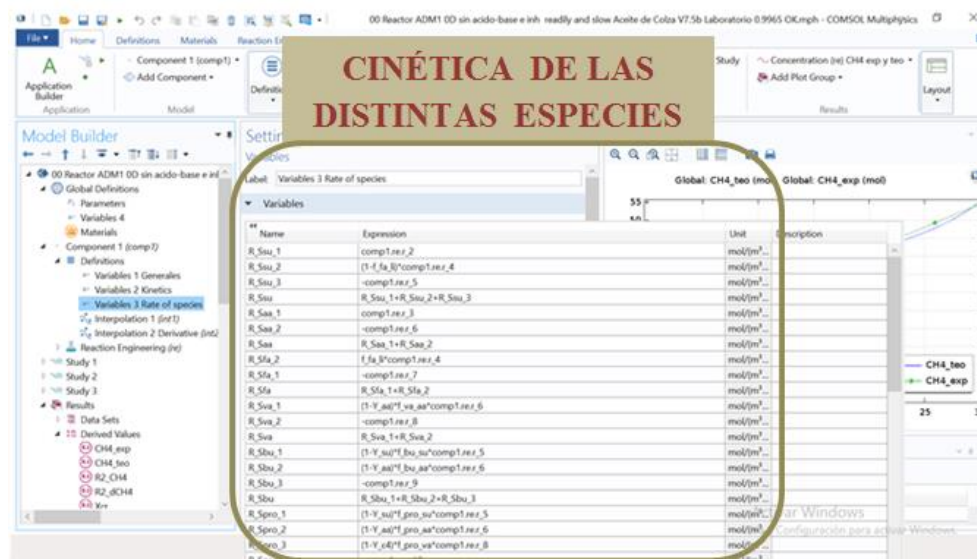
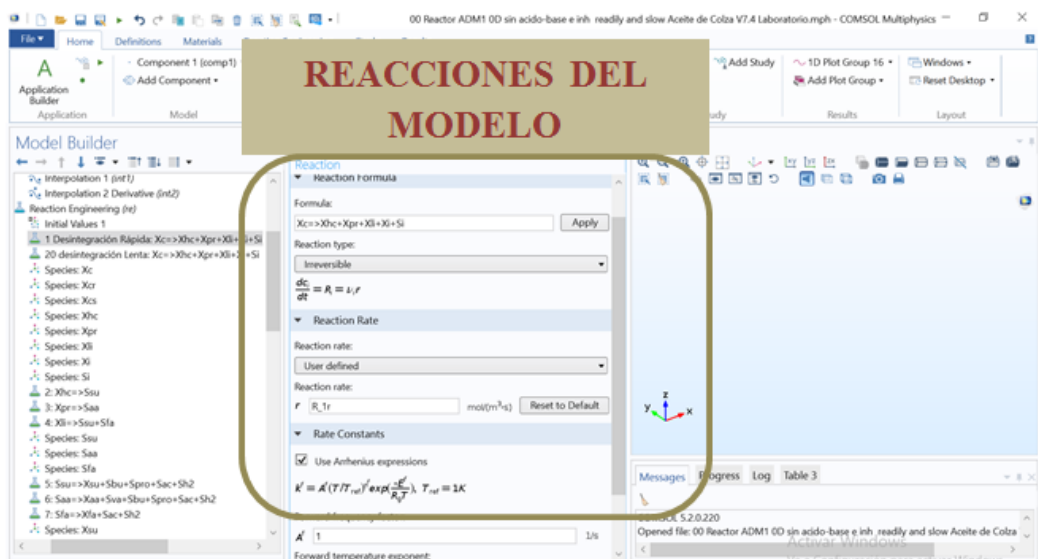


Figura 4.19. Cinéticas de las distintas especies estudiadas en el proceso de digestión anaerobia de acuerdo al modelo ADM1.

#### 4. Introducción de las reacciones.



**Figura 4.20.** Reacciones empleadas en el modelo ADM1.

#### 5. Método de cálculo.

Una vez definido el modelo en su conjunto, se elige el método de cálculo, definiendo el motor de cálculo. Hay que indicar que como los reactores utilizados, tanto en laboratorio como en planta piloto, contaban con agitación se consideró que el sistema presentaba una composición homogénea en cada instante. La consecuencia práctica es que se puede trabajar con un modelo 0D (adimensional), por tanto no hay que realizar un mallado previo al cálculo. En este estudio el motor de cálculo utilizado fue MUMPS, el cual presenta una gran versatilidad.

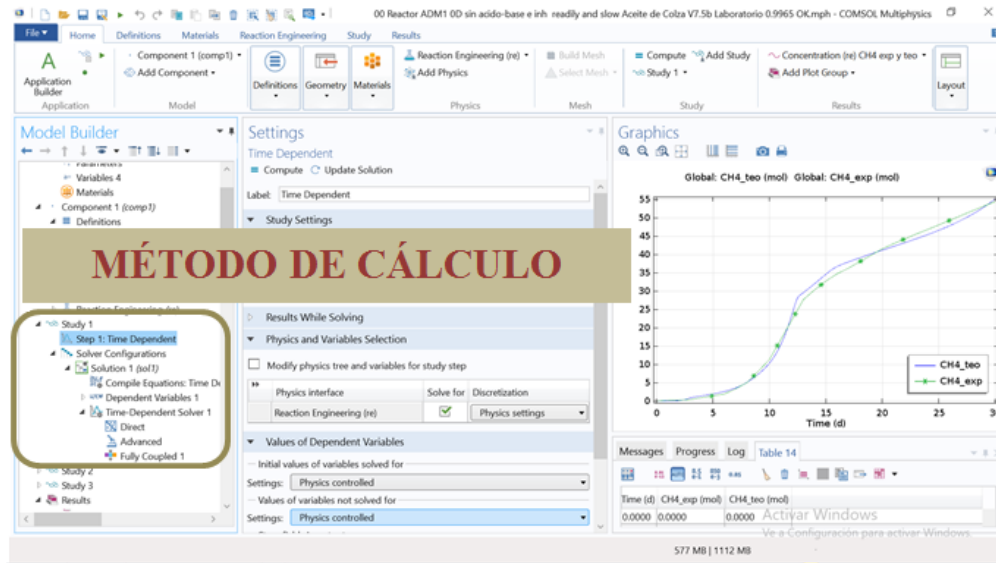
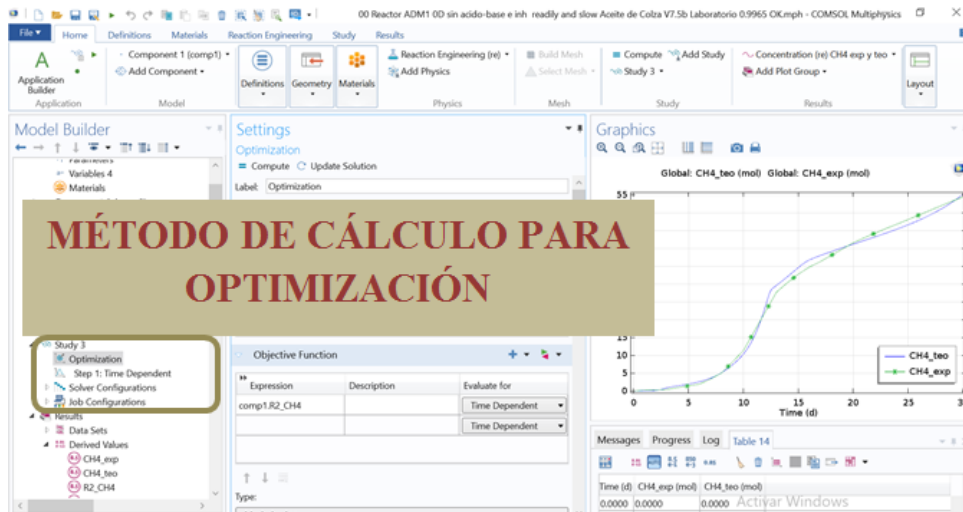


Figura 4.21. Elección del motor de cálculo en el modelo estudiado.

## 6. Optimización.

Una vez que se han seleccionado en el paso anterior unos parámetros que den lugar a un ajuste razonable (en este caso se ha considerado un valor de  $R^2 > 0,8$ ) se ha realizado un proceso de optimización para depurar los valores finales de los parámetros. Para ello, se ha utilizado el módulo de optimización que permite seleccionar las variables que se van a modificar, así como su rango de variación. El programa dispone de diferentes métodos de ajuste, como Levenberg-Marquardt, Monte Carlo, SNOPT, etc. En el presente trabajo se ha utilizado el método de optimización BOBYQA. El proceso de optimización requiere una notable potencia de computación y puede llevar horas.





**Figura 4.22.** Elección de método de cálculo de optimización para depurar los resultados finales.

En concreto el modelo ADM1 [124] fue usado para simular el comportamiento de las especies formadas en el proceso de digestión anaerobia mediante la evolución del volumen de biogás/metano producido en los ensayos tipo batch desarrollados en este Trabajo de Tesis con los sustratos sorgo (S), aceite de colza (A), biomasa microalgal (B) y rastrojo de maíz (R). El modelo se empleó para estimar los parámetros cinéticos y las concentraciones iniciales de las fracciones sólidas y solubles de los ensayos tipo batch desarrollados en laboratorio y planta piloto con los sustratos que se han mencionado anteriormente. Para ello, la DQO total inicial de cada sustrato (S, A, B y R) fue dividida en 15 fracciones de acuerdo a las premisas de partida siguientes tomadas para desarrollar el modelo del proceso:

- a) El modelo permite la división entre aquellas fracciones biodegradables del compuesto complejo particulado consideradas como de rápida y lenta degradación ( $X_{cr}$  y  $X_{cl}$ , respectivamente). Sin embargo, en este estudio no se ha hecho diferenciación alguna entre ambas fracciones.
- b) Carbohidratos, proteínas y lípidos particulados para los cuales la hidrólisis es la etapa limitante ( $X_{CH}$ ,  $X_{PR}$  y  $X_{Li}$ , respectivamente).
- c) Carbohidratos, proteínas y lípidos particulados para los cuales la hidrólisis no es la etapa limitante ( $X_{ms}$ ,  $X_{aa}$  y  $X_{AGL}$ , respectivamente).

- d) Materiales inertes (incluidos como  $X_i$ ).
- e) Fracción soluble para la cual la hidrólisis es la etapa limitante, incluyendo carbohidratos ( $S_{CH}$ ), proteínas ( $S_{PR}$ ) y lípidos ( $S_{Li}$ ).
- f) Fracciones de ácidos grasos volátiles (AGV) incluyendo ácido valérico ( $S_{va}$ ), ácido propiónico ( $S_{pr}$ ), ácido butírico ( $S_{bu}$ ) y ácido acético ( $S_{ac}$ ).

Las diferentes ecuaciones del proceso se presentan en la Tabla 4.13. Los valores iniciales de la mayoría de los parámetros usados para la optimización fueron tomados de Batstsonne y col. [42].

**Tabla 4.12.** Proceso bioquímico y ecuaciones cinéticas del modelo ADM1.

Nombre del proceso	Ecuación del velocidad del proceso (g DQO L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
Desintegración del sustrato compuesto particulado de biodegradabilidad rápida ( $X_{cr}$ )	$k_{des\_Xcr} \cdot f_r \cdot X_c$
Desintegración del sustrato compuesto particulado de biodegradabilidad lenta ( $X_{cs}$ )	$k_{des\_Xcl} \cdot (1 - f_r) \cdot X_c$
Hidrólisis de carbohidratos	$k_{h\_XCH} \cdot X_{CH}$
Hidrólisis de proteínas	$k_{h\_XPR} \cdot X_{PR}$
Hidrólisis de lípidos	$k_{h\_XLi} \cdot X_{Li}$
Consumo de azúcares	$k_{ms} \cdot \frac{S_{ms}}{K_s + S_{ms}} \cdot X_{ms} \cdot I_1$
Consumo de aminoácidos	$k_{aa} \cdot \frac{S_{aa}}{K_s + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_1$
Consumo de ácidos grasos de cadena larga	$k_{AGL} \cdot \frac{S_{AGL}}{K_s + S_{AGL}} \cdot X_{AGL} \cdot I_2$
Consumo de valerato	$k_{c4} \cdot \frac{S_{va}}{K_s + S_{va}} \cdot X_{c4} \cdot \frac{1}{1 + S_{bu}/S_{va}} \cdot I_2$
Consumo de butirato	$k_{c4} \cdot \frac{S_{bu}}{K_s + S_{bu}} \cdot X_{c4} \cdot \frac{1}{1 + S_{va}/S_{bu}} \cdot I_2$
Consumo de propionato	$k_{pr} \cdot \frac{S_{pr}}{K_s + S_{pr}} \cdot X_{pr} \cdot I_2$
Consumo de acetato	$k_{ac} \cdot \frac{S_{ac}}{K_s + S_{ac}} \cdot X_{ac} \cdot I_3$
Consumo de hidrógeno	$k_{H2} \cdot \frac{S_{H2}}{K_s + S_{H2}} \cdot X_{H2} \cdot I_1$
Decaimiento de $X_{ms}$	$k_{dec\_Xms} \cdot X_{ms}$
Decaimiento de $X_{aa}$	$k_{dec\_Xaa} \cdot X_{aa}$
Decaimiento de $X_{AGL}$	$k_{dec\_XAGVL} \cdot X_{AGL}$
Decaimiento de $X_{c4}$	$k_{dec\_Xc4} \cdot X_{c4}$
Decaimiento de $X_{pro}$	$k_{dec\_Xpr} \cdot X_{pr}$
Decaimiento de $X_{ac}$	$k_{dec\_Xac} \cdot X_{ac}$
Decaimiento de $X_{H2}$	$k_{dec\_XH2} \cdot X_{H2}$

#### ***4.5. Estudio económico***

El estudio energético y económico realizado en este trabajo de Tesis se ha basado en los resultados obtenidos en experimentos de digestión anaerobia desarrollados en planta piloto en régimen semi-continuo con sustrato purín de cerdo (P0), y experimentos de co-digestión anaerobia llevados a cabo con mezcla de purín de cerdo, sorgo, triticale y aceite de colza (SPTA2) como sustratos.

## 5. Resultados

Se recogen en este capítulo de resultados los valores obtenidos en todos los ensayos batch y en régimen semi-continuo llevados a cabo en este trabajo de Tesis para procesos de digestión anaerobia.

### *5.1. Ensayos batch desarrollados en laboratorio.*

#### *5.1.1. Ensayo batch S, T y A: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos*

Los ensayos de digestión anaerobia tipo batch se han llevado a cabo en los reactores de laboratorio por triplicado empleando una mezcla compuesta por una parte de inóculo y el resto del sustrato a estudiar. En las Tablas 5.1 a 5.9 se presentan los resultados obtenidos de los análisis realizados sobre los materiales de partida a digerir (inóculo y sustrato: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos), la evolución del volumen de biogás y metano recogida durante las experiencias desarrolladas, y las características físico-químicas del digestato obtenido al finalizar el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 5.1. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de sorgo (S1).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S1)	7,97	5685	1,48	48794	1469	31,77	2,71

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	2929	15	439	439
2	2976	15	446	886
3	3799	66	2507	3393
4	3799	66	2507	5900
5	3799	66	2507	8408
6	854	70	598	9006
7	1239	70	867	9873
8	1099	70	769	10642
9	1874	70	1312	11954
10	1574	65	1023	12977
11	1574	65	1023	14000
12	1574	65	1023	15023
13	1275	65	829	15852
14	854	65	555	16407
15	903	62	560	16967
16	674	62	418	17385
17	581	62	360	17745
18	581	62	360	18105
19	581	62	360	18466
20	553	62	343	18808
21	582	62	361	19169
22	536	62	332	19502
23	562	62	348	19850
24	445	62	276	20126
25	445	62	276	20402
26	445	62	276	20678
27	445	62	276	20954
28	409	62	254	21207
29	491	62	304	21512
30	536	62	332	21844

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S1)	6,87	5405	0,52	16000	2840	26,10	2,63

Tabla 5.2. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de sorgo (S2).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S2)	7,97	5685	1,48	48794	1469	31,77	2,71

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	7154	5	358	358
2	3425	13	445	803
3	5262	72	3789	4592
4	5262	72	3789	8380
5	5262	72	3789	12169
6	1850	72	1332	13501
7	1384	72	996	14497
8	1335	66	881	15378
9	2372	63	1494	16873
10	1980	64	1267	18140
11	1980	64	1267	19407
12	1980	64	1267	20674
13	1209	64	774	21448
14	1102	64	705	22153
15	946	56	530	22683
16	1234	56	691	23374
17	653	56	366	23740
18	653	56	366	24106
19	653	56	366	24471
20	386	56	216	24687
21	369	56	207	24894
22	292	56	164	25058
23	214	56	120	25177
24	214	56	120	25297
25	214	56	120	25417
26	214	56	120	25537
27	214	56	120	25657
28	305	56	171	25828
29	288	56	161	25989
30	299	52	155	26144

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S2)	7,13	5405	0,69	16000	3120	26,60	2,84

Tabla 5.3. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de sorgo (S3).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S3)	7,68	7248	1,83	48977	1407	27,86	2,06

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	7164	14	1003	1003
2	4084	15	613	1616
3	5182	72	3731	5347
4	5182	72	3731	9078
5	5182	72	3731	12809
6	1538	72	1107	13916
7	1604	72	1155	15071
8	1627	66	1074	16145
9	2863	66	1890	18034
10	1545	64	989	19023
11	1545	64	989	20012
12	1545	64	989	21001
13	1351	66	892	21892
14	1066	66	704	22596
15	1453	58	843	23439
16	828	58	480	23919
17	628	58	364	24283
18	628	58	364	24647
19	628	58	364	25012
20	535	58	310	25322
21	594	58	345	25666
22	613	58	356	26022
23	604	58	350	26372
24	504	58	292	26665
25	504	58	292	26957
26	504	58	292	27249
27	504	58	292	27542
28	344	58	200	27741
29	348	58	202	27943
30	250	58	145	28088

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S3)	7,66	6907	1,25	8500	3600	25,40	2,19



Tabla 5.4. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de triticale (T1).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Triticale (T1)</b>	5,28	5769	2,63	42466	511	39,92	1,28

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	5294	7	371	371
2	5376	46	2473	2844
3	5376	46	2473	5317
4	5376	46	2473	7789
5	5376	46	2473	10262
6	6903	54	3728	13990
7	6180	66	4079	18069
8	5173	68	3518	21586
9	4202	69	2899	24485
10	4202	69	2899	27384
11	4202	69	2899	30283
12	3084	61	2128	32411
13	3232	61	1972	34382
14	3290	56	1842	36224
15	3652	56	2045	38270
16	4472	56	2504	40774
17	4472	56	2504	43278
18	4472	64	2862	46140
19	4032	64	2580	48721
20	1164	65	757	49477
21	1053	65	684	50162
22	971	65	631	50793
23	323	65	210	51003
24	323	65	210	51213
25	323	65	210	51423

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Triticale (T1)</b>	7,47	8675	0,89	20000	2500	27,02	2,43

Tabla 5.5. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de triticale (T2).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Triticale (T2)</b>	7,88	6774	2,13	35685	2182	37,20	1,75

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	5378	9	484	484
2	4316	19	820	1304
3	5168	33	1705	3010
4	6448	42	2708	5718
5	6448	55	3546	9264
6	6448	55	580	9844
7	3009	55	1655	11499
8	3009	55	1655	13154
9	2861	53	1516	14671
10	3032	53	1607	16278
11	2478	53	1313	17591
12	2478	57	1412	19003
13	2478	59	1462	20465
14	868	59	512	20978
15	868	59	512	21490
16	1128	54	609	22099
17	1137	54	614	22713
18	886	54	478	23191
19	886	51	452	23643
20	886	51	452	24094
21	723	51	390	24485
22	645	51	329	24814
23	616	50	308	25122
24	567	50	284	25405
25	547	50	273	25679
26	547	50	273	25952
27	547	50	273	26225
28	547	50	273	26499
29	525	50	190	26688
30	454	50	227	26915

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Triticale (T2)</b>	7,68	7897	1,56	25000	2800	32,35	2,15

Tabla 5.6. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de triticale (T3).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Triticale (T3)</b>	5,28	5769	2,63	42466	511	39,92	1,28

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	8052	3	242	775
2	4109	38	1561	2337
3	4109	38	1561	3898
4	4109	38	1561	5460
5	4109	38	1561	7021
6	3611	43	1553	8574
7	4936	52	2567	11140
8	4467	61	2725	13865
9	4850	70	3395	17260
10	4850	70	3395	20655
11	4850	70	3395	24050
12	3437	72	2475	26525
13	1902	73	1388	27913
14	2529	73	1846	29760
15	3208	61	1957	31716
16	3601	56	2017	33733
17	3601	56	2017	35750
18	3601	56	2017	37766
19	4146	60	2488	40254
20	4021	60	2413	42666
21	3592	64	2299	44965
22	1748	64	1119	46084
23	946	64	605	46689
24	946	64	605	47295
25	946	64	605	47900
26	191	64	122	48022
27	259	64	166	48188
28	256	64	164	48352
29	233	64	149	48501
30	386	64	247	48748

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Triticale (T3)</b>	7,49	8392	0,80	25000	2240	27,98	2,29

Tabla 5.7. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de aceite de colza (A1).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Aceite de colza (A1)	7,98	7645	1,48	48663	1090	31,09	2,12

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	625	12	75	75
2	87	12	10	85
3	551	12	66	152
4	1439	12	173	324
5	1439	12	173	497
6	1439	12	173	670
7	1591	32	509	1179
8	1824	32	584	1762
9	2249	48	1080	2842
10	2371	48	1138	3980
11	2759	69	1904	5884
12	2759	69	1904	7787
13	2759	69	1904	9691
14	1335	70	935	10626
15	1192	70	834	11460
16	1008	70	706	12166
17	778	68	529	12695
18	907	68	617	13311
19	907	68	617	13928
20	907	68	617	14545
21	716	68	487	15032
22	710	65	462	15493
23	704	65	458	15951
24	651	65	423	16374
25	692	65	450	16824
26	692	65	450	17274
27	692	65	450	17723
28	697	65	453	18177
29	684	64	438	18614
30	671	64	429	19044
31	703	64	450	19494
32	902	64	577	20071
33	902	64	577	20648
34	902	64	577	21225
35	902	64	577	21803
36	492	64	315	22118
37	525	64	336	22454
38	551	64	353	22806
39	447	64	286	23092
40	447	64	286	23378
41	447	64	286	23665
42	668	64	428	24092
43	548	64	351	24443
44	505	64	323	24766
45	502	64	321	25087
46	391	64	250	25337
47	391	64	250	25588
48	391	64	250	25838
49	363	62	225	26063
50	382	62	237	26300

Resultados

51	386	62	239	26539
52	411	62	255	26794
53	395	62	245	27039
54	395	62	245	27284
55	395	62	245	27529
56	305	62	189	27718
57	334	62	207	27925
58	338	62	210	28134
59	338	62	210	28344
60	376	62	233	28577
61	376	62	233	28810
62	376	62	233	29043
63	369	62	229	29272
64	388	62	241	29513
65	356	62	221	29733
66	369	62	229	29962
67	312	62	193	30156
68	312	62	193	30349
69	312	62	193	30543
70	382	62	237	30779
71	259	62	161	30940
72	256	62	159	31099
73	285	62	177	31275
74	294	62	182	31458
75	294	62	182	31640
76	294	62	182	31822
77	305	62	189	32011
78	288	62	179	32190
79	292	62	181	32371
80	318	62	197	32568
81	280	62	174	32742
82	280	62	174	32915
83	280	62	174	33089
84	308	62	191	33280
85	305	62	189	33469
86	318	62	197	33666
87	288	62	179	33845

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Aceite de colza (A1)</b>	8,47	7107	0,55	20500	1680	23,70	1,88

Tabla 5.8. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de aceite de colza (A2).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Aceite de colza (A2)	7,76	7646	2,02	61747	1328	30,99	2,12

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	298	27	80	80
2	215	27	58	139
3	2971	27	802	941
4	2971	27	802	1743
5	2971	27	802	2545
6	2971	36	1070	3615
7	3150	47	1481	5095
8	2541	59	1499	6594
9	39	66	26	6620
10	1906	66	1258	7878
11	2603	66	1718	9596
12	2603	66	1718	11314
13	2603	64	1666	12980
14	2603	64	1666	14646
15	3541	65	2302	16947
16	3659	65	2378	19326
17	4362	65	2835	22161
18	1949	65	1267	23428
19	1949	66	1286	24714
20	1949	66	1286	26001
21	1949	66	1286	27287
22	4849	65	3152	30439
23	4981	65	3238	33676
24	2266	65	1473	35149
25	1030	65	670	35819
26	1030	65	670	36488
27	1030	65	670	37158
28	1540	65	1001	38159
29	2282	65	1483	39642
30	370	65	241	39883
31	317	65	206	40089
32	38	65	25	40114
33	38	65	25	40139
34	38	65	25	40163
35	88	65	57	40221
36	29	65	19	40239
37	95	65	62	40301
38	62	65	40	40342
39	37	65	24	40366
40	37	65	24	40390
41	37	65	24	40414
42	39	65	25	40439

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Aceite de colza (A2)	8,90	7474	1,21	23000	1320	28,20	2,67

Tabla 5.9. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de aceite de colza (A3).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Aceite de colza (A3)</b>	7,76	7646	2,02	61747	1328	30,99	2,12

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	259	38	98	98
2	447	38	170	268
3	2455	38	933	1201
4	2455	38	933	2134
5	2455	44	1080	3214
6	2455	44	1080	4294
7	2362	59	1394	5688
8	1513	59	893	6581
9	535	67	358	6939
10	1681	67	1126	8065
11	2392	67	1603	9668
12	2392	67	1603	11271
13	2392	67	1603	12873
14	2392	67	1603	14476
15	2475	66	1634	16110
16	3386	66	2235	18344
17	3768	66	2487	20831
18	2609	66	1722	22553
19	2609	67	1748	24301
20	2609	66	1722	26023
21	2609	66	1722	27745
22	2381	66	1571	29316
23	1931	64	1236	30552
24	1432	64	916	31469
25	868	64	556	32024
26	868	64	556	32580
27	868	64	556	33135
28	609	64	390	33525
29	405	64	259	33784
30	321	64	205	33990
31	224	64	143	34133
32	154	64	99	34232
33	154	64	99	34330
34	154	64	99	34429
35	143	64	92	34520
36	87	64	56	34576
37	107	64	68	34644
38	117	64	75	34719
39	109	64	70	34789
40	109	64	70	34859
41	109	64	70	34929
42	62	64	40	34968

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Aceite de colza (A3)</b>	8,90	7556	1,05	31000	2120	28,80	2,69

### 5.1.2. Ensayo batch B: biomasa microalgal

Los experimentos tipo batch correspondientes a biomasa microalgal se han realizado por triplicado a escala de laboratorio partiendo de las condiciones iniciales que se presentan en la Tabla 4.2 del apartado de metodología. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos mencionados (Tablas 5.10 a 5.12).

**Tabla 5.10.** Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de biomasa microalgal (B1).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B1)</b>	7,97	5685	1,48	48794	1469	31,77	2,71

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	432	29	125	125
2	661	29	192	317
3	1602	29	465	782
4	2661	29	772	1553
5	1827	61	1114	2668
6	1827	61	1114	3782
7	1827	61	1114	4897
8	1095	61	668	5565
9	1302	66	859	6424
10	1638	66	1081	7505
11	2351	65	1528	9033
12	2708	69	1869	10902
13	2708	69	1869	12770
14	2708	69	1869	14639
15	1017	69	702	15340
16	958	69	661	16001
17	572	69	395	16396
18	487	69	336	16732
19	447	69	308	17041
20	447	69	308	17349
21	447	69	308	17657
22	409	65	266	17923
23	396	65	257	18181
24	392	65	255	18436
25	402	65	261	18697
26	300	71	213	18910
27	300	71	213	19123
28	300	71	213	19336
29	258	71	183	19519
30	261	71	185	19704

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B1)</b>	6,87	5405	0,52	16000	2840	26,10	2,63



Tabla 5.11. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de biomasa microalgal (B2).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B2)</b>	7,97	5685	1,48	48794	1469	31,77	2,71

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	10	18	2	2
2	883	18	159	161
3	1128	18	203	364
4	2976	29	863	1227
5	742	29	215	1442
6	742	64	475	1917
7	743	64	476	2392
8	1959	64	1254	3646
9	625	64	400	4046
10	1642	64	1051	5097
11	2207	64	1412	6509
12	2129	68	1448	7957
13	2129	68	1448	9405
14	2129	68	1448	10853
15	1498	69	1034	11886
16	1648	69	1137	13023
17	670	69	462	13486
18	736	69	508	13994
19	676	69	466	14460
20	676	69	466	14926
21	676	69	466	15393
22	804	69	555	15948
23	716	65	465	16413
24	690	65	449	16862
25	634	65	412	17274
26	500	65	325	17599
27	500	65	325	17924
28	500	65	325	18249
29	399	65	259	18508
30	373	51	190	18698

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B2)</b>	7,13	5405	0,69	16000	3120	26,60	2,84

Tabla 5.12. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de biomasa microalgal (B3).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B3)</b>	7,68	7248	1,83	48977	1407	27,86	2,06

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	2215	35	775	
2	2215	35	775	775
3	2215	35	775	1551
4	4076	54	2201	2326
5	4583	63	2887	4527
6	3974	66	2623	7414
7	2132	66	1407	10037
8	2280	62	1414	11444
9	2280	62	1414	12858
10	2280	62	1414	14271
11	2872	62	1781	15685
12	1079	64	691	17465
13	859	64	550	18156
14	885	64	566	18706
15	655	64	419	19272
16	656	64	420	19691
17	656	64	420	20111
18	523	64	335	20531
19	500	64	320	20866
20	494	64	316	21186
21	556	64	356	21502
22	520	62	322	21858
23	520	62	322	22180
24	520	62	322	22503
25	505	62	313	22825
26	505	62	313	23138
27	487	62	302	23451
28	431	62	267	23753
29	453	62	281	24020
30	453	62	281	24301

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B3)</b>	7,66	6907	1,25	8500	3600	25,40	2,19

### 5.1.3. Ensayo batch P y R: residuos agroindustriales.

Del mismo modo que los sustratos evaluados en los ensayos anteriores (S, T, A y B), los residuos agroindustriales empleados como sustratos en este trabajo de Tesis (P y R) se han evaluado teniendo en cuenta las condiciones de partida presentadas en la Tabla 4.3 del apartado de metodología. Los resultados obtenidos de las experiencias llevadas a cabo se presentan en las Tablas 5.13 a 5.18.

**Tabla 5.13.** Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de purín (P1).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Purín (P1)</b>	7,60	8280	1,70	28884	5286	31,06	2,72

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	919	20	184	184
2	1151	41	472	656
3	700	41	287	943
4	643	41	264	1206
5	643	41	264	1470
6	643	41	264	1734
7	546	59	322	2056
8	562	59	332	2387
9	425	59	251	2638
10	389	59	230	2868
11	346	59	204	3072
12	346	59	204	3276
13	346	59	204	3480
14	330	59	195	3675
15	304	59	179	3854
16	294	59	173	4028
17	340	59	201	4228
18	291	59	172	4400
19	291	59	172	4572
20	291	59	172	4743
21	314	59	185	4928
22	307	59	181	5110
23	291	59	172	5281
24	301	59	178	5459
25	292	59	172	5631
26	292	59	172	5803
27	292	59	172	5976
28	288	59	170	6146
29	311	57	177	6323
30	396	56	222	6545

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Purín (P1)</b>	8,35	8695	1,36	28000	3660	30,71	2,61

Tabla 5.14. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de purín (P2).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Purín (P2)	7,59	8280	1,70	28884	5299	31,11	2,72

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	845	20	169	169
2	1082	40	433	602
3	664	40	266	867
4	659	40	264	1131
5	659	40	264	1395
6	659	40	264	1658
7	574	54	310	1968
8	496	54	268	2236
9	343	54	185	2421
10	382	54	206	2628
11	359	54	194	2821
12	359	54	194	3015
13	359	54	194	3209
14	373	54	201	3411
15	386	54	208	3619
16	405	54	219	3838
17	476	54	257	4095
18	408	54	220	4315
19	408	54	220	4535
20	408	54	220	4756
21	395	54	213	4969
22	353	54	191	5160
23	318	54	172	5331
24	331	54	179	5510
25	273	54	147	5657
26	273	54	147	5805
27	273	54	147	5952
28	250	54	135	6087
29	246	54	133	6220
30	396	56	222	6442

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Purín (P2)	8,45	10189	1,55	34000	5220	30,69	2,69

Tabla 5.15. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de purín (P3).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Purín (P3)	7,59	8280	1,70	28884	5299	31,11	2,72

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	149	20	30	30
2	329	41	135	165
3	329	54	178	342
4	329	54	178	520
5	518	54	280	800
6	214	54	116	915
7	324	54	175	1090
8	360	54	194	1285
9	319	54	172	1457
10	319	54	172	1629
11	319	54	172	1801
12	305	54	165	1966
13	331	54	179	2145
14	188	54	102	2246
15	337	54	182	2428
16	222	54	120	2548
17	222	54	120	2668
18	222	54	120	2788
19	350	54	189	2977
20	337	54	182	3159
21	311	54	168	3327
22	88	54	48	3374
23	285	54	154	3528
24	285	54	154	3682
25	285	54	154	3836
26	191	54	103	3939
27	259	54	140	4079
28	256	54	138	4217
29	233	54	126	4343
30	386	55	212	4556

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Purín (P3)	8,35	9894	1,56	29500	5100	30,61	2,61

Tabla 5.16. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de rastrojo de maíz (R1).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Rastrojo maíz (R1)</b>	7,44	7594	1,43	23770	1822	28,98	2,81

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1439	17	245	245
2	1344	17	228	473
3	1812	17	308	781
4	2201	43	946	1728
5	2201	43	946	2674
6	2201	43	946	3620
7	1609	43	692	4312
8	1638	62	1016	5328
9	1406	62	872	6200
10	184	62	114	6314
11	1578	65	1026	7339
12	1578	65	1026	8365
13	1578	65	1026	9391
14	827	65	538	9928
15	782	65	508	10437
16	677	54	366	10802
17	693	54	374	11176
18	534	54	288	11465
19	534	54	288	11753
20	534	54	288	12042
21	540	54	292	12333
22	523	54	282	12616
23	423	54	228	12844
24	412	50	206	13050
25	315	50	158	13207
26	315	50	158	13365
27	315	50	158	13522
28	291	50	146	13668
29	268	50	134	13802
30	255	50	128	13929

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Rastrojo maíz (R1)</b>	8,40	6505	0,84	14000	2300	29,00	2,74

Tabla 5.17. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de rastrojo de maíz (R2).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Rastrojo maíz (R2)	7,44	7594	1,43	23770	1822	28,98	2,81

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	3020	10	302	302
2	2184	10	218	520
3	3223	10	322	843
4	4471	55	2459	3302
5	4471	55	2459	5761
6	4471	55	2459	8220
7	2641	66	1743	9963
8	2689	66	1775	11738
9	2621	66	1730	13468
10	1471	66	971	14438
11	1566	55	861	15300
12	1566	55	861	16161
13	1566	55	861	17022
14	1215	50	608	17630
15	1231	50	616	18245
16	949	50	475	18720
17	988	50	494	19214
18	570	50	285	19499
19	570	50	285	19784
20	570	50	285	20069
21	356	50	178	20247
22	279	50	140	20386
23	292	50	146	20532
24	91	50	46	20578
25	5	50	3	20580
26	5	50	3	20583
27	5	50	3	20585
28	3	50	2	20587
29	0	0	0	20587
30	0	0	0	20587

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Rastrojo maíz (R2)	8,54	6538	0,65	17500	1700	27,27	2,93

Tabla 5.18. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de rastrojo de maíz (R3).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Rastrojo maíz (R3)</b>	7,44	7594	1,43	23770	1822	28,98	2,81

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	2162	7	151	151
2	1738	7	122	273
3	2743	7	192	465
4	4021	62	2493	2958
5	4021	62	2493	5451
6	4021	62	2493	7944
7	1693	62	1050	8994
8	2326	70	1628	10622
9	2513	70	1759	12381
10	2109	65	1371	13752
11	1630	59	962	14714
12	1630	59	962	15675
13	1630	59	962	16637
14	1597	59	942	17579
15	1243	59	733	18313
16	1063	52	553	18865
17	1033	52	537	19403
18	815	50	408	19810
19	815	50	408	20218
20	815	50	408	20625
21	649	51	331	20956
22	561	51	286	21242
23	515	51	263	21505
24	518	51	264	21769
25	448	51	228	21997
26	448	51	228	22226
27	448	51	228	22454
28	410	51	209	22663
29	377	51	192	22856
30	338	51	172	23028

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Rastrojo maíz (R3)</b>	8,31	6625	0,68	12000	1780	29,32	2,62



## 5.2. *Ensayo batch desarrollados en planta piloto*

Todos los sustratos sometidos a digestión anaerobia en reactores de laboratorio, ya sean cultivos energéticos, productos procedentes de ellos, biomasa microalgal o residuos agroindustriales, han sido testados en las mismas condiciones en una planta piloto de biogás. Seguidamente se indican los resultados obtenidos en cada caso.

### 5.2.1. *Ensayo batch S, T y A: cultivos energéticos o productos procedentes de ellos*

Los sustratos conocidos como S, T y A han experimentado una evolución en sus parámetros que aparece reflejada en las Tablas 5.19 a 5.21, partiendo de unas condiciones iniciales que se especificaron en la Tabla 4.1 del apartado de metodología de este estudio.

Tabla 5.19. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de sorgo en planta piloto (S4).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S4)	5,46	11937	1,67	22377	2966	37,04	1,85

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	1808	7	127	127
2	477	13	62	189
3	1132	48	543	732
4	1132	48	543	1275
5	1132	48	543	1819
6	1659	55	912	2731
7	1401	55	771	3502
8	588	55	323	3825
9	490	57	279	4104
10	771	61	470	4575
11	771	61	470	5045
12	771	61	470	5515
13	901	61	550	6065
14	799	61	487	6552
15	384	60	230	6783
16	445	59	263	7045
17	320	58	186	7231
18	320	58	186	7416
19	320	58	186	7602
20	391	57	223	7825
21	300	57	171	7996
22	177	57	101	8097
23	271	56	152	8249
24	196	58	114	8362
25	196	58	114	8476
26	196	58	114	8590
27	202	55	111	8701
28	160	54	86	8787
29	113	54	61	8848
30	139	54	75	8923
31	124	55	68	8991
32	124	55	68	9060
33	124	55	68	9128
34	88	56	49	9177
35	88	56	49	9226
36	88	56	49	9276
37	88	56	49	9325
38	79	56	44	9369
39	79	56	44	9413
40	79	56	44	9458

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Sorgo (S4)	7,33	9230	0,92	18000	5780	31,30	3,04

Tabla 5.20. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de triticale en planta piloto (T4).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
<b>Triticale (T4)</b>	6,80	10127	1,08	26151	1109	22,15	0,54

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	124	41	51	51
2	232	45	104	155
3	638	47	300	455
4	631	51	322	777
5	804	66	531	1308
6	804	66	531	1838
7	804	66	531	2369
8	994	72	716	3085
9	904	73	660	3744
10	934	73	682	4426
11	1137	79	830	5256
12	756	79	597	5853
13	756	79	597	6450
14	756	79	597	7047
15	763	80	603	7650
16	700	80	560	8210
17	457	80	366	8576
18	281	80	225	8800
19	585	80	468	9268
20	585	80	468	9736
21	585	80	468	10204
22	412	80	330	10533
23	519	80	415	10948
24	622	80	498	11446
25	263	80	210	11656
26	91	79	72	11728
27	91	79	72	11800
28	91	79	72	11871

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
<b>Triticale (T4)</b>	8,10	5340	0,45	12000	1520	0,65	0,13

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda

Tabla 5.21. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de aceite de colza en planta piloto (A4).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
<b>Aceite de colza (A4)</b>	8,71	9145	1,64	16000	2000	0,73	0,19

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	246	46	113	113
2	1409	46	648	761
3	1409	46	648	1410
4	1409	46	648	2058
5	1699	57	968	3026
6	2898	66	1913	4939
7	3836	75	2877	7816
8	4642	78	3621	11437
9	3974	79	3139	14576
10	3974	79	3139	17715
11	3974	79	3139	20855
12	1412	78	1115	21970
13	2691	78	2099	24069
14	1035	78	807	24876
15	987	79	770	25646
16	635	78	502	26148
17	635	78	495	26643
18	635	78	495	27138
19	315	77	243	27381
20	254	77	196	27577
21	224	77	175	27751
22	188	76	143	27894
23	153	76	116	28010
24	153	76	116	28127
25	153	76	116	28243
26	133	75	100	28343
27	102	75	77	28419
28	123	75	92	28511
29	151	74	112	28623
30	139	74	103	28726
31	139	74	103	28828
32	139	74	103	28931
33	141	73	103	29034
34	144	73	105	29139
35	138	73	101	29240
36	152	73	111	29351
37	152	72	109	29460
38	152	72	109	29569
39	152	72	109	29678
40	57	72	41	29719

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
<b>Aceite de colza (A4)</b>	8,04	4827	0,58	116000	1070	0,67	0,07

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda

### 5.2.2. Ensayo batch B: biomasa microalgal

Adicionalmente a los experimentos tipo batch correspondientes a biomasa microalgal realizados por triplicado a escala de laboratorio, especificados en las Tablas 5.10 a 5.12 de este mismo capítulo, y partiendo de las condiciones iniciales que se presentan en la Tabla 4.2 del apartado de metodología, se presenta la experiencia desarrollada en planta piloto con dicho sustrato (Tabla 5.22).

**Tabla 5.22.** Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de biomasa microalgal en planta piloto (B4).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Biomasa microalgal (B4)</b>	7,36	7885	3,77	30357	844	34,38	5,83

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	194	5	9	9
2	194	5	9	18
3	194	7	14	32
4	194	10	19	51
5	194	12	23	74
6	194	15	9	84
7	194	17	33	117
8	194	26	50	167
9	194	34	66	233
10	547	40	186	419
11	547	49	219	638
12	547	58	268	906
13	529	60	307	1213
14	305	64	183	1396
15	326	65	209	1605
16	306	68	199	1803
17	128	65	83	1887
18	128	65	83	1970
19	128	65	83	2053
20	98	67	66	2119
21	87	67	57	2175
22	96	66	63	2239
23	102	66	67	2306
24	76	70	53	2359
25	76	68	52	2411
26	76	67	51	2462
27	70	66	46	2508
28	48	66	32	2540
29	23	63	14	2554
30	23	63	14	2569
31	23	63	14	2583
32	23	63	14	2598
33	23	63	14	2612
34	23	66	15	2627
35	38	66	25	2652

36	31	66	20	2673
37	40	67	27	2700
38	43	67	29	2728
39	43	67	29	2757
40	43	67	29	2786
41	24	66	16	2802
42	24	66	16	2818
43	36	66	24	2841
44	36	66	24	2865
45	34	66	22	2888
46	34	66	22	2910
47	34	66	22	2933
48	22	66	15	2947

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Biomasa microalgal (B4)	8,11	13083	0,88	21500	4080	41,90	2,58

### 5.2.3. Ensayo batch P y R: residuos agroindustriales.

Los residuos agroindustriales P y R también han sido evaluados en planta piloto según las condiciones iniciales de la Tabla 3 correspondiente al apartado de metodología de este trabajo de Tesis. En las Tablas 5.23 y 5.24 se reflejan los resultados obtenidos en las experiencias desarrolladas con los sustratos anteriormente citados.

Tabla 5.23. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de purín en planta piloto (P4).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Purín (P4)	7,81	6109	1,11	14844	1705	0,84	0,16

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	232	22	51	51
2	268	34	91	142
3	374	60	224	366
4	374	60	224	591
5	374	60	224	815
6	442	62	274	1089
7	456	65	296	1385
8	478	67	320	1705
9	491	69	339	2044
10	422	69	291	2336
11	422	69	291	2627
12	422	69	291	2918
13	268	68	185	3103
14	324	67	220	3324
15	307	66	206	3529
16	265	65	175	3704
17	265	65	172	3877
18	265	65	172	4049
19	265	65	172	4222
20	240	63	151	4373
21	245	63	159	4532
22	232	63	146	4678
23	216	63	103	4781
24	163	63	103	4884
25	163	63	103	4986
26	163	63	95	5081
27	150	63	95	5176
28	151	63	93	5269
29	147	63	93	5361
30	148	63	93	5454
31	129	63	81	5536
32	129	63	81	5617
33	129	63	81	5698
34	137	63	86	5784
35	116	63	73	5857
36	105	63	66	5923
37	99	63	62	5986
38	92	63	58	6044
39	92	63	58	6101
40	92	63	58	6159

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Purín (P4)	6,83	9874	0,90	13000	2080	0,98	0,25

Tabla 5.24. Experimentos de digestión anaerobia tipo batch de rastrojo de maíz en planta piloto (P4).

Sustrato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Rastrojo maíz (R4)	7,19	3316	4,00	63298	946	29,42	2,28

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	52	21	11	11
2	1304	57	743	754
3	1304	57	743	1497
4	1304	57	743	2241
5	1354	62	839	3080
6	1087	63	228	3309
7	904	62	560	3869
8	899	63	566	4435
9	657	60	394	4830
10	657	58	394	5224
11	657	57	381	5605
12	416	59	237	5843
13	500	59	295	6138
14	500	59	295	6433
15	331	57	195	6628
16	331	57	188	6816
17	331	57	188	7004
18	331	57	188	7193
19	502	58	291	7484
20	324	57	185	7669
21	329	57	188	7856
22	275	56	154	8010
23	235	56	132	8142
24	235	56	132	8274
25	235	56	132	8405
26	69	57	39	8445
27	294	56	165	8609
28	179	58	104	8713
29	153	58	89	8802
30	104	58	60	8862
31	104	58	60	8922
32	104	59	61	8984
33	104	59	61	9045
34	81	56	45	9090

Digestato/ Parámetro	pH	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Rastrojo maíz (R4)	8,58	3763	1,04	50000	940	40,98	2,08



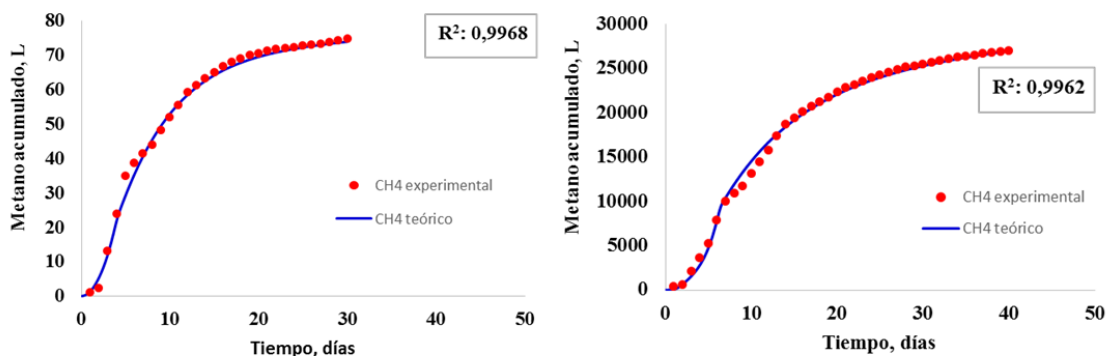
## 5.3. Ajuste a modelo ADMI

Los ensayos batch (realizados en laboratorio y planta piloto) correspondientes a los sustratos S, R, B y A han sido simulados para estimar la evolución de las reacciones ocurridas en los compuestos a lo largo del proceso de digestión anaerobia. Para ello se han estimado una serie de variables relacionadas con los parámetros cinéticos y las concentraciones iniciales de los compuestos o las fracciones solubles mediante el modelo teórico ADMI. Tomando como premisas de partida todas las consideraciones detalladas en el apartado de metodología, se han obtenido los valores correspondientes a cada variable especificada del modelo (Tabla 5.25).

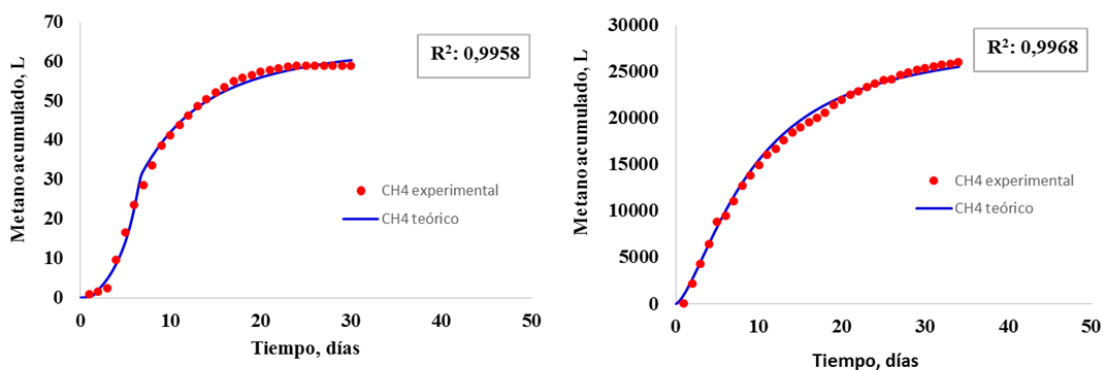
**Tabla 5.25.** Valores de concentraciones de compuestos o fracciones solubles y constantes cinéticas para experimentos batch desarrollados con S, R, A y B.

Concentraciones, $kg\ DQO\ m^{-3}$	S (lab.)	S (p.p.)	R (lab.)	R (p.p.)	A (lab.)	A (p.p.)	B (lab.)	B (p.p.)
X <sub>C</sub>	18,62	21,00	23,56	31,20	9,66	11,51	21,83	12,6
X <sub>Li</sub>	0	0	0	0	40,00	60,54	0	0
X <sub>CH</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0
X <sub>PR</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0
X <sub>ms</sub>	4,92·10 <sup>-2</sup>	1,05·10 <sup>-2</sup>	4,82·10 <sup>-3</sup>	1,03·10 <sup>-1</sup>	4,75·10 <sup>-4</sup>	5,03·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-1</sup>	1,00·10 <sup>-4</sup>
X <sub>aa</sub>	2,22·10 <sup>-2</sup>	1,42·10 <sup>-2</sup>	2,67·10 <sup>-2</sup>	1,42·10 <sup>-1</sup>	5,57·10 <sup>-4</sup>	5,42·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-1</sup>	1,00·10 <sup>-4</sup>
X <sub>AGL</sub>	3,41·10 <sup>-1</sup>	1,19·10 <sup>-2</sup>	1,23·10 <sup>-2</sup>	1,93·10 <sup>-1</sup>	1,93·10 <sup>-4</sup>	1,93·10 <sup>-1</sup>	1,00·10 <sup>-1</sup>	1,16·10 <sup>-4</sup>
X <sub>C4</sub>	2,25·10 <sup>-1</sup>	1,16·10 <sup>-2</sup>	2,06·10 <sup>-2</sup>	1,16·10 <sup>-1</sup>	1,90·10 <sup>-3</sup>	6,16·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-1</sup>	1,83·10 <sup>-4</sup>
X <sub>pr</sub>	6,94·10 <sup>-1</sup>	3,34·10 <sup>-1</sup>	2,57·10 <sup>-2</sup>	5,34·10 <sup>-1</sup>	9,54·10 <sup>-4</sup>	1,53·10 <sup>-1</sup>	1,00·10 <sup>-1</sup>	1,00·10 <sup>-4</sup>
X <sub>ac</sub>	4,62·10 <sup>-2</sup>	1,43·10 <sup>-2</sup>	1,29·10 <sup>-2</sup>	4,90·10 <sup>-1</sup>	1,23·10 <sup>-3</sup>	7,43·10 <sup>-2</sup>	6,00·10 <sup>-2</sup>	5,25·10 <sup>-4</sup>
X <sub>H2</sub>	1,36·10 <sup>-1</sup>	1,95·10 <sup>-2</sup>	1,17·10 <sup>-2</sup>	4,95·10 <sup>-1</sup>	3,48·10 <sup>-4</sup>	4,95·10 <sup>-1</sup>	1,00·10 <sup>-1</sup>	1,20·10 <sup>-4</sup>
f <sub>CH</sub> X <sub>C</sub>	0,78	0,78	0,51	0,51	0,04	0,04	0,15	0,15
f <sub>PR</sub> X <sub>C</sub>	0,14	0,14	0,07	0,07	0,80	0,80	0,50	0,50
f <sub>Li</sub> X <sub>C</sub>	0,04	0,04	0,02	0,02	0,15	0,10	0,15	0,15
f <sub>Xi</sub> X <sub>C</sub>	0,04	0,04	0,40	0,40	0,00	0,00	0,20	0,20
S <sub>ms</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	2,40·10 <sup>-3</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-7</sup>
S <sub>aa</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-5</sup>
S <sub>AGL</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	9,80·10 <sup>-3</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	1,13·10 <sup>-7</sup>
S <sub>va</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	5,45·10 <sup>-3</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	7,00·10 <sup>-3</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	1,34·10 <sup>-4</sup>
S <sub>du</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	0,90·10 <sup>-2</sup>	1,15·10 <sup>-43</sup>
S <sub>pr</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	7,00·10 <sup>-3</sup>	7,00·10 <sup>-3</sup>	7,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-7</sup>
S <sub>ac</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	10,50·10 <sup>-3</sup>	10,50·10 <sup>-3</sup>	1,50·10 <sup>-2</sup>	2,50·10 <sup>-4</sup>
S <sub>H2</sub>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,70·10 <sup>-3</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-6</sup>	1,00·10 <sup>-2</sup>	0,96·10 <sup>-4</sup>
<i>Constantes cinéticas, d<sup>-1</sup></i>								
k <sub>des</sub> X <sub>C</sub>	0,183	0,137	0,183	0,137	0,250	0,045	0,154	0,125
k <sub>h</sub> X <sub>CH</sub>	0,616	0,501	0,616	0,501	1,010	0,758	1,010	2,270
k <sub>h</sub> X <sub>PR</sub>	0,246	0,171	0,246	0,171	0,185	0,300	0,427	0,257
k <sub>h</sub> X <sub>Li</sub>	0,132	0,092	0,132	0,092	0,150	0,225	0,082	0,122
k <sub>ms</sub>	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
k <sub>aa</sub>	49,996	49,996	49,996	49,996	49,996	49,996	50,000	50,000
k <sub>AGL</sub>	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
k <sub>ac</sub>	8,003	8,003	8,003	8,003	8,003	8,003	8,003	8,003
k <sub>C4</sub>	20,011	20,011	20,011	20,011	20,011	20,011	20,000	20,000
k <sub>pr</sub>	13,501	13,501	13,500	13,500	13,500	13,500	13,500	13,500
k <sub>H2</sub>	35,001	35,001	35,001	35,001	35,001	35,001	35,000	35,000
K <sub>dec</sub>	0,938·10 <sup>-2</sup>	4,543·10 <sup>-2</sup>	6,150·10 <sup>-2</sup>	4,250·10 <sup>-2</sup>	15,00·10 <sup>-2</sup>	15,00·10 <sup>-2</sup>	2,000·10 <sup>-2</sup>	3,000·10 <sup>-2</sup>

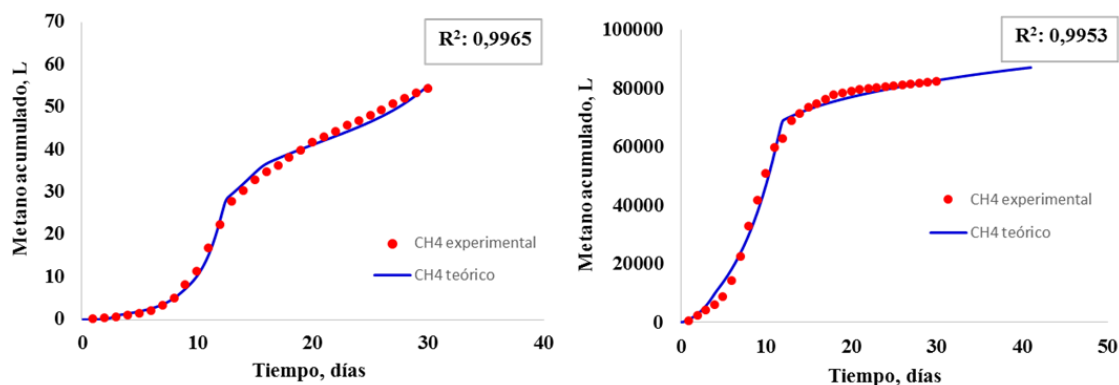
Los coeficientes de ajuste obtenidos de cada ensayo evaluado se refieren a la diferencia existente entre el volumen de metano acumulado a lo largo del tiempo experimental y teórico. A continuación, se presentan cada una de las gráficas (Figuras 5.1 a 5.4) extraídas de los ajustes realizados.



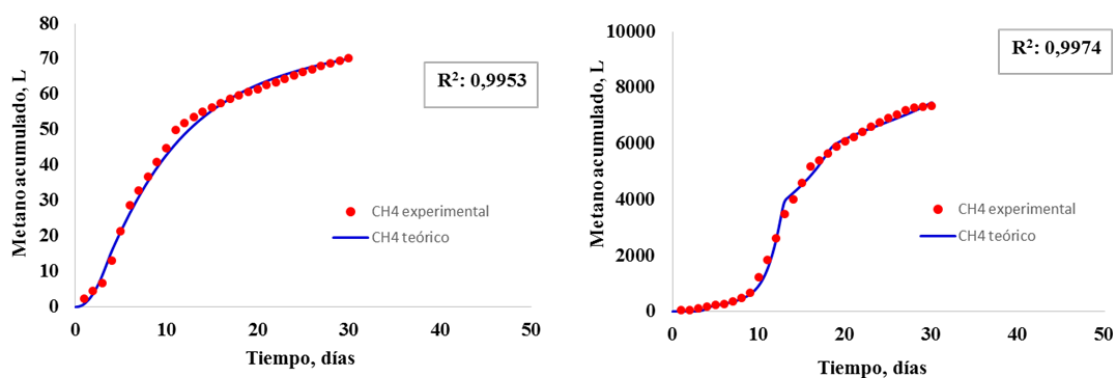
**Figura 5.1.** Representación de la evolución del volumen de metano acumulado a lo largo del tiempo experimental y teórico, de acuerdo al modelo ADM1, para los ensayos batch realizados con S en laboratorio (izquierda) y planta piloto (derecha).



**Figura 5.2.** Representación de la evolución del volumen de metano acumulado a lo largo del tiempo experimental y teórico, de acuerdo al modelo ADM1, para los ensayos batch realizados con R en laboratorio (izquierda) y planta piloto (derecha).



**Figura 5.3.** Representación de la evolución del volumen de metano acumulado a lo largo del tiempo experimental y teórico, de acuerdo al modelo ADM1, para los ensayos batch realizados con R en laboratorio (izquierda) y planta piloto (derecha).



**Figura 5.4.** Representación de la evolución del volumen de metano acumulado a lo largo del tiempo experimental y teórico, de acuerdo al modelo ADM1, para los ensayos batch realizados con R en laboratorio (izquierda) y planta piloto (derecha).

#### 5.4. Ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo

Como se ha especificado en el apartado de metodología de este trabajo de Tesis, los ensayos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo emplean una nomenclatura formada por cada una de las letras de las que se compone la mezcla de sustratos que se está evaluando en cada caso, y el número identificativo de cada experimento define la Velocidad de Carga Orgánica (VCO) ensayada. Todas las experiencias desarrolladas

evalúan el sustrato cultivo energético sorgo dulce con una serie de sustratos en diversas proporciones y estudian la influencia de la VCO.

#### **5.4.1. Ensayo en régimen semi-continuo SP: cultivo energético sorgo dulce y purín de cerdo**

La serie de experimentos SP analiza un barrido de la VCO de 1 a 4 g SV  $L_D^{-1} d^{-1}$  usando sorgo dulce y purín de cerdo en igual proporción como alimento de los reactores de laboratorio (Tabla 4.4 de capítulo de metodología). Del mismo modo que se ha procedido en los ensayos de tipo batch presentados anteriormente, se presentarán cada una de las experiencias de digestión anaerobia en régimen semi-continuo para los experimentos SP1 a SP4 (Tablas 9.3 a 9.5 del Apéndice).

#### **5.4.2. Ensayo en régimen semi-continuo SB: cultivo energético sorgo dulce y biomasa microalgal autóctona**

Con el objetivo de llevar a cabo un cotejo entre los resultados extraídos en ensayos realizados con purín de cerdo y biomasa microalgal autóctona con cultivo energético sorgo, se efectúa el ensayo SB. Las condiciones iniciales de las que parte dicho ensayo se muestran en la Tabla 4.5 del capítulo de metodología. Los resultados obtenidos se reflejan en las Tablas 9.7 a 9.10 del Apéndice y corresponden a los experimentos SB1 a SB4.

#### **5.4.3. Ensayo en régimen semi-continuo SBP: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona y purín de cerdo**

Un escenario de estudio intermedio entre los ensayos SP y SB es el analizado en este caso mediante el ensayo SBP. La composición de la mezcla alimentada al reactor se reparte en partes iguales en cuanto a sorgo, y biomasa microalgal y purín, a su vez presente en idéntica proporción. La cantidad concreta correspondiente a los sustratos estudiados en el ensayo SBP se encuentra detallada en la Tabla 4.6 del capítulo de

metodología para cada VCO evaluada. Los resultados correspondientes a los experimentos SBP1 a SBP4 se muestran en las Tablas 9.11 a 9.14 del Apéndice.

**5.4.4. Ensayo en régimen semi-continuo SBPT: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo y cultivo energético triticale**

La serie de experimentos SBPT pretende aumentar la variabilidad en el contenido de nutrientes alimentados al digester anaerobio procedentes de una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale. Las condiciones iniciales de los experimentos desarrollados en este ensayo se reflejan en la Tabla 4.7 del apartado de metodología. Los resultados de los experimentos SBPT1 a SBPT4 realizados se muestran en las Tablas 9.15 a 9.18 del Apéndice.

**5.4.5. Ensayo en régimen semi-continuo SBPTR: cultivo energético sorgo dulce, biomasa microalgal autóctona, purín de cerdo, cultivo energético triticale y rastrojo de maíz**

En el ensayo llevado a cabo SBPTR se introduce un sustrato más en la mezcla alimentada al digester anaerobio, rastrojo de maíz. Los cinco sustratos sometidos a estudio se encuentran en la mezcla en igual proporción, por lo que se trata de un alimento en el cuál la proporción de sustrato vegetal predomina sobre los sustratos no vegetales. En la Tabla 4.8 del apartado de metodología se detallan las cantidades exactas empleadas de sustratos para la elaboración de la mezcla para cada VCO estudiada. Los resultados obtenidos de los experimentos SBPTR1 a SBPTR4 se reflejan en las Tablas 9.19 a 9.22 del Apéndice.

**5.4.6. Ensayo en régimen semi-continuo STP: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale y purín de cerdo**

Los ensayos en régimen semi-continuo STP se han llevado a cabo en reactores de laboratorio (Tablas 9.23 y 9.24 del Apéndice) y en planta piloto (Tabla 9.25 del Apéndice). En la Tabla 8 se presentaron dos experimentos que tuvieron lugar en

digestores anaerobios de laboratorio y un experimento desarrollado en planta piloto dividido en dos partes en el apartado de metodología de este trabajo. Los experimentos de laboratorio tienen lugar con una proporción de sorgo, triticale y purín diferente entre sí, y una VCO parecida para evaluar la influencia de los sustratos lignocelulósicos y el purín en las producciones de metano. El ensayo STP que se ha desarrollado en planta piloto reproduce las condiciones iniciales que muestra la Tabla 4.8. Es importante mencionar que el ensayo en planta piloto ha sido dividido en dos partes para evaluar valores VCO diferentes.

**5.4.7. Ensayos en régimen semi-continuo STPA: cultivo energético sorgo dulce, cultivo energético triticale, purín de cerdo y aceite de colza.**

La serie de ensayos STPA está compuesta por dos experiencias realizadas a diferente VCO, uno de ellos llevado a cabo en laboratorio y otro en planta piloto (dividida en tres partes que difieren en la VCO estudiada). En ambas experiencias se ha incluido un nuevo sustrato en la mezcla que se ha empleado como alimento en los reactores con el objetivo de potenciar los rendimientos de metano obtenidos. Las condiciones iniciales relativas a la VCO empleada en cada caso y la proporción de cada uno de los cuatro sustratos alimentados se muestran en la Tabla 4.9, y la evolución de las producciones de biogás y metano obtenidas se presenta en las Tablas 9.26 y 9.27 del Apéndice.

***5.5. Analítica de ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio***

En las Tablas que se encuentran seguidamente se especifican los valores obtenidos en cada uno de los parámetros analizados de los sustratos estudiados en este trabajo de Tesis (Tabla 5.26), así como de las muestras tomadas a lo largo de los ensayos realizados en régimen semi-continuo (Tablas 5.27 a 5.51).

**Tabla 5.26.** Parámetros analizados en sustratos empleados como alimento en experimentos de digestión anaerobia en régimen batch y semi-continuo en laboratorio.

Sustrato	Parámetro						
	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
Sorgo seco	3,64	-	-	93,10	936000	<30	65,78
Sorgo húmedo	5,61	-	-	19,39	195000	30	63,83
Triticale seco	4,71	-	-	93,30	584000	254	47,50
Triticale húmedo	4,66	-	-	50,63	560000	92	44,65
Aceite de colza	6,80	-	-	100	>3000000	-	74,00
Biomasa microalgal	7,64	319	2616	65,00	1500000	214	6,02
Purín	7,68-8,44	880-7353	10096-12870	0,43-3,60	11000-57000	1920-6080	6,41-4,56
Rastrojo de maíz seco	5,80	-	-	94,76	988000	140	64,18
Rastrojo de maíz húmedo	3,66	-	-	30,86	540000	<30	43,80

Sustrato	Composición						
	Proteínas, %	Carbohidratos, %	Lípidos, %	N*, %	Na*, ppm	K*, ppm	P*, ppm
Sorgo seco	4,06	93,84	2,10	0,64	600	9427	1650
Sorgo húmedo	-	-	-	0,65	-	-	-
Triticale seco	5,69	92,89	1,42	0,91	212	6519	1919
Triticale húmedo	-	-	-	0,99	-	-	-
Aceite de colza	0	0	100	-	7	35	26
Biomasa microalgal	41,63	55,77	2,60	6,66	1368	5559	18942
Purín	14,06	85,32	0,62	4,37-9,82	651-1154	1978-4191	228-2391
Rastrojo de maíz seco	6,75	92,65	0,60	0,68	347	17178	2816
Rastrojo de maíz húmedo	-	-	-	1,08	-	-	-

Sustrato	Composición						
	Fe*, ppm	Mg*, ppm	Ca*, ppm	Cd*, ppm	Cr*, ppm	Ni*, ppm	Cu*, ppm
Sorgo seco	744	2657	2853	<2	36	16	<5
Triticale seco	702	1947	4276	32	21	9	26
Aceite de colza	16	149	127	30	<5	<5	<5
Biomasa microalgal	2201	2074	29415	<2	<5	<5	22
Purín	25-220	211-1469	485-3024	<2	<5	<5	7-137
Rastrojo de maíz seco	1675	1844	3925	<2	<5	<5	<5

\*Sobre base seca

**Tabla 5.27.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP1).

Experimento SP1				VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %
M1	7,84	3213	9275	0,84	27000	3840	9,91
M2	7,88	1745	9774	1,79	29000	3240	4,04
M3	7,71	1941	12036	3,46	66500	4375	12,30
M4	7,22	1329	10263	1,80	43000	2780	11,21
M5	7,27	2346	11090	2,04	20000	3740	12,08
M6	7,43	2230	10791	2,61	55000	3800	11,12

**Tabla 5.28.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP2).

Experimento SP2				VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %
M1	7,86	1049	10840	5,05	57500	2540	24,05
M2	8,00	948	9811	3,61	35000	3040	27,46
M3	7,92	392	10850	2,31	35000	1280	14,30
M4	8,32	973	10325	5,45	42000	2340	17,98
M5	7,92	1219	9176	3,09	48000	1760	20,96
M6	8,41	4443	7320	6,46	31000	1660	17,52

**Tabla 5.29.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP3).

Experimento SP3				VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %
M1	7,77	1762	10751	4,58	39000	2480	14,34
M2	8,49	1381	9504	6,02	46000	3440	24,84
M3	7,74	1615	8635	4,34	44000	2000	15,86
M4	8,91	748	10577	6,77	72000	3240	16,53
M5	8,15	931	9504	5,10	57500	2980	17,61
M6	8,05	1211	7925	5,55	39500	1480	12,75

**Tabla 5.30.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP4).

Experimento SP4				VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,52	3283	8436	4,60	51500	3460	39,45
M2	8,30	1807	9549	5,90	49000	3180	25,94
M3	7,94	1172	10124	3,71	53000	2220	16,77
M4	8,52	962	8570	7,23	77000	3200	15,82
M5	8,56	1132	9419	5,45	78000	3440	16,19
M6	9,17	1226	7596	4,91	52000	1800	13,23



**Tabla 5.31.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB1).

Experimento SB1				VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,16	2847	7394	2,73	82000	1400	16,72
M2	7,55	1094	9581	3,19	46000	1440	15,90
M3	7,47	3360	9327	1,99	64500	2100	11,68
M4	7,52	2079	9120	2,77	21500	2300	7,01
M5	7,89	979	8367	3,13	46500	2800	6,51
M6	7,94	1028	10880	1,50	40000	1440	9,43

**Tabla 5.32.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB2).

Experimento SB2				VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	6,96	3140	8596	3,16	64500	2880	15,09
M2	7,16	1886	10373	3,10	72000	1920	19,55
M3	7,67	3067	9341	4,04	75000	1380	14,24
M4	7,97	2234	9712	3,84	27000	1960	6,61
M5	7,75	1551	7962	3,61	53500	2520	6,62
M6	7,35	2514	7814	2,59	69000	2280	9,47

**Tabla 5.33.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB3).

Experimento SB3				VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,17	3521	8072	3,33	50000	2500	13,72
M2	8,06	1337	10129	4,27	55500	2480	18,91
M3	7,08	2422	8520	3,81	150000	1500	13,99
M4	7,40	3857	9866	3,92	24000	4940	6,85
M5	7,71	1994	9790	3,31	92000	3900	6,62
M6	7,49	3353	8961	3,02	97500	2640	10,43

**Tabla 5.34.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB4).

Experimento SB4				VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	6,79	3365	8033	2,96	49000	4500	15,04
M2	8,16	1259	9499	2,74	63500	2020	18,51
M3	6,94	3625	9326	4,65	122500	1980	10,50
M4	7,42	2832	9966	3,13	29000	4620	6,80
M5	7,66	2502	10503	5,32	96500	6400	6,38
M6	7,83	1501	12078	3,99	107000	2520	8,58

**Tabla 5.35.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP1).

Experimento SBP1				VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,88	559	8200	3,62	39000	2160	10,96
M2	7,88	1149	8999	2,66	47500	1480	7,88
M3	8,13	1076	11355	2,58	60500	2780	9,37
M4	7,82	1585	10144	5,29	75000	3745	11,48
M5	7,86	6190	14327	5,57	94500	2740	-
M6	8,10	1732	15308	5,35	87000	3300	12,33

**Tabla 5.36.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP2).

Experimento SBP2				VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,72	1593	11290	3,99	82000	4220	8,75
M2	7,79	1582	12397	4,68	102500	3840	8,76
M3	8,26	1029	12665	4,34	95000	4960	8,76
M4	8,22	1694	13605	4,10	137000	4240	11,16
M5	8,16	1514	14279	6,08	103000	4050	-
M6	7,91	2660	13035	5,85	102500	3900	12,99

**Tabla 5.37.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP3).

Experimento SBP3				VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,87	1189	10632	4,55	113500	5360	8,12
M2	7,80	1857	13990	4,87	121000	5260	8,86
M3	8,01	1045	13151	4,30	92500	4460	9,81
M4	8,05	3392	16365	5,64	130000	3880	11,61
M5	7,84	2380	14274	7,30	130000	5980	-
M6	7,37	2478	17091	5,46	128000	3800	13,06

**Tabla 5.38.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP4).

Experimento SBP4				VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,94	1211	10101	5,58	140500	4840	8,28
M2	7,55	552	12024	4,84	115500	4440	8,44
M3	7,76	2090	13065	4,28	143500	3880	9,98
M4	7,94	2154	13763	5,40	114000	3600	11,06
M5	7,65	1304	12222	5,54	122000	3680	-
M6	8,12	2963	16167	5,02	125000	3600	12,30

**Tabla 5.39.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT1).

Experimento SBPT1				VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,95	3092	12558	5,92	80000	4260	11,42
M2	7,76	5184	13737	4,76	110000	3640	13,57
M3	7,89	6632	14118	6,35	92000	3460	12,30
M4	7,46	6714	12453	6,22	83500	4000	13,65
M5	8,06	4064	14113	3,81	71700	2880	12,75
M6	7,78	4212	14460	6,81	119000	2900	12,32

**Tabla 5.40.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT2).

Experimento SBPT2				VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,69	2850	14477	7,05	113500	4720	13,09
M2	7,84	4313	14985	6,73	89000	4360	13,09
M3	7,67	5548	14967	5,82	114000	3600	12,29
M4	7,41	9127	15831	7,15	135000	4160	12,52
M5	8,03	3783	14895	4,34	97000	3460	12,50
M6	7,62	4253	14541	7,76	101500	4250	11,88

**Tabla 5.41.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT3).

Experimento SBPT3				VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,60	3545	15554	7,19	132000	4480	12,94
M2	7,69	4215	16036	7,72	98000	5920	13,99
M3	7,84	6935	18576	8,10	120000	4680	13,08
M4	7,61	3290	14214	6,55	96000	5420	12,38
M5	8,15	3087	14729	5,42	122000	3720	11,84
M6	7,91	4097	16156	7,19	87000	3640	12,03

**Tabla 5.42.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT4).

Experimento SBPT4				VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,85	4602	15721	7,90	150000	4720	12,74
M2	7,93	4854	16933	7,74	126000	5800	13,88
M3	7,65	5237	14271	8,64	125500	3720	13,88
M4	7,23	6419	15300	7,64	112500	4200	12,94
M5	8,20	4423	15118	6,36	133000	5200	12,45
M6	7,83	5321	15367	5,83	98500	2820	11,94

**Tabla 5.43.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR1).

Experimento SBPTR1				VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,61	2087	14948	4,62	103500	3600	11,90
M2	7,50	4532	14050	4,12	62000	3160	11,89
M3	7,88	2412	17931	4,46	66000	3340	12,78
M4	7,38	1487	13276	8,04	126000	2720	13,77
M5	7,82	4862	12971	7,23	104000	4580	13,14
M6	8,55	1770	14805	3,28	56000	2160	15,82

**Tabla 5.44.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR2).

Experimento SBPTR2				VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,44	3776	17489	4,31	99000	3100	15,08
M2	8,05	5948	13158	3,74	63000	2800	11,04
M3	7,88	1840	12408	6,03	70500	3020	13,81
M4	7,15	2915	15338	8,27	113050	4040	13,60
M5	7,26	4646	13022	6,74	89500	3320	11,99
M6	8,29	2319	13865	4,19	87000	2200	12,02

**Tabla 5.45.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR3).

Experimento SBPTR3				VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,51	3013	13437	4,35	96000	2720	10,74
M2	7,96	5665	12253	4,17	79000	2420	13,61
M3	6,44	3290	13870	4,34	86000	3740	13,20
M4	7,27	5877	13962	7,63	111500	4640	13,39
M5	8,02	3950	14846	7,69	87000	3660	13,58
M6	7,93	1549	13651	4,16	89000	3200	12,47

**Tabla 5.46.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR4).

Experimento SBPTR4				VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,56	3332	12379	4,83	87000	3460	10,36
M2	7,37	2444	11781	5,77	107000	3080	11,13
M3	7,61	3467	12963	5,40	133000	4040	12,14
M4	7,74	3181	12512	6,12	102000	2900	13,44
M5	7,87	3265	13560	6,80	113500	5720	13,99
M6	7,78	1539	15202	5,92	100000	3040	10,33

**Tabla 5.47.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín (STP1).

Experimento STP1				VCO : 1,17 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	8,51	1763	10921	0,92	17000	2000	7,54
M2	7,70	687	10711	0,79	71000	2120	6,58
M3	8,47	468	8271	0,79	14000	2010	10,91
M4	8,11	505	9177	0,57	24000	2160	9,27
M5	7,64	951	8518	0,59	21000	2200	13,62
M6	7,41	158	9979	1,21	14000	2000	11,04

**Tabla 5.48.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín (STP2).

Experimento STP2				VCO : 1,05 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,85	1330	11863	1,23	78000	5160	11,85
M2	7,76	1125	10176	2,29	68000	3240	11,50
M3	8,71	3087	12507	4,50	97000	4480	11,50
M4	7,77	888	16117	1,98	77000	3800	11,84
M5	7,58	780	10329	1,04	27000	3520	7,99
M6	8,24	831	11102	1,98	29000	2200	7,95

**Tabla 5.49.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale, purín y aceite de colza (STPA1).

Experimento STPA1				VCO : 0,68 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,96	4133	10787	1,36	44000	3920	10,06
M2	8,07	1313	10384	1,42	64000	3280	9,75
M3	8,10	669	10731	1,93	77000	3800	12,72
M4	7,60	566	9762	1,09	38000	2800	9,27
M5	8,37	1177	10838	3,06	32000	2320	8,85
M6	8,54	402	15122	2,74	35000	2280	7,03

### 5.6. *Analítica de ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en planta piloto (STP3-4 y STPA2-3-4)*

En las Tablas 5.49 y 5.50 se pueden ver reflejados los resultados obtenidos en los análisis de los parámetros que han sido analizados para las muestras tomadas en las experiencias que han tenido lugar en la planta piloto.

**Tabla 5.50.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín (STP3-4).

Experimento STP3-4				VCO : 0,88-1,15 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,83	488	9224	1,29	22000	4700	9,38
M2	8,30	1211	11639	1,55	37000	3520	12,65
M3	7,58	456	11050	1,20	27000	3120	11,22
M4	7,79	962	12349	3,39	19000	4240	8,84
M5	8,07	311	9778	1,00	27000	5480	9,21
M6	7,64	479	10984	0,78	24000	3360	16,24

**Tabla 5.51.** Parámetros analizados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale, purín y aceite de colza (STPA2-3-4).

Experimento STPA2-3-4				VCO : 1,08-1,31-1,42 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>			
Parámetro							
Muestra	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C/N
M1	7,24	902	11130	0,80	16000	2560	5,51
M2	7,79	708	9000	0,65	13000	2320	5,19
M3	7,60	900	10571	0,64	12000	2640	5,59
M4	8,54	406	10000	0,59	10000	2125	7,83
M5	7,44	388	9406	0,50	11000	3240	9,59
M6	7,70	837	9332	0,53	14000	2920	10,04

### 5.7. Estudio económico

Los datos iniciales relativos a dichos experimentos, empleados en el análisis energético y económico se detallan en la Tabla 5.52.

**Tabla 5.52.** Condiciones de partida para la evaluación energética y económica de los experimentos P0 y STPA2.

Experimento	Volumen reactor, m <sup>3</sup>	Carga alimentada, L d <sup>-1</sup>	Carga alimentada, g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Rendimiento de metano, L g SV <sup>-1</sup>	TRH, d
P0		50	0,68	108	30
STPA2	1,5	54*	1,08	644	28

\* Cantidad total de mezcla de residuos considerando la densidad de sorgo y triticale como 0,8 kg L<sup>-1</sup> y 0,92 kg L<sup>-1</sup> para el sustrato aceite de colza [125].

Se presentan en las Tablas 5.53 y 5.54 los resultados procedentes del estudio energético y económico de una hipotética planta de biogás de 70 m<sup>3</sup> de capacidad en dos condiciones de operación diferentes desarrolladas en régimen semi-continuo.

**Tabla 5.53.** Estudios energético y económico de una planta de biogás en funcionamiento en régimen semi-continuo y alimentada por purín.

<b>Estudio energético</b>			
<b>Datos de partida (base cálculo: 1 año)</b>			
<i>Tiempo funcionamiento, h</i>	<i>Cantidad alimentada, m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup></i>	<i>SV<sub>Tmedio</sub> alimento, %</i>	<i>PCI metano, kcal Nm<sup>-3</sup></i>
8000	2,3	2,04	8535
<b>Volumen total generado metano, L d<sup>-1</sup></b>		<b>5141</b>	
<b>Energía térmica generada, kWh</b>		<b>40,82</b>	
<b>Estudio económico</b>			
<b>Características gasóleo tipo B</b>			
<i>Precio, € L<sup>-1</sup></i>	<i>PCI, kcal kg<sup>-1</sup></i>	<i>Densidad, kg L<sup>-1</sup></i>	
0,80	10,20	845	
<b>Ahorro combustible diario, € d<sup>-1</sup></b>		<b>3,70</b>	
<b>Ahorro combustible anual, € d<sup>-1</sup></b>		<b>1234</b>	
<b>Recuperación inversión, año</b>		<b>121,59</b>	

**Tabla 5.54.** Estudios energético y económico de una planta de biogás en funcionamiento en régimen semi-continuo y alimentada por una mezcla de purín, triticale, sorgo y aceite de colza.

<b>Estudio energético</b>			
<b>Datos de partida (base cálculo: 1 año)</b>			
<i>Tiempo funcionamiento, h</i>	<i>Cantidad alimentada, m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup></i>	<i>SV<sub>Tmedio</sub> alimento, %</i>	<i>PCI metano, kcal Nm<sup>-3</sup></i>
8000	2,5	3,00	8535
<b>Volumen total generado metano, L d<sup>-1</sup></b>		<b>48300</b>	
<b>Energía térmica generada, kWh</b>		<b>383,55</b>	
<b>Estudio económico</b>			
<b>Características gasóleo tipo B</b>			
<i>Precio, € L<sup>-1</sup></i>	<i>PCI, kcal kg<sup>-1</sup></i>	<i>Densidad, kg L<sup>-1</sup></i>	
0,80	10,20	845	
<b>Ahorro combustible diario, € d<sup>-1</sup></b>		<b>34,78</b>	
<b>Ahorro combustible anual, € d<sup>-1</sup></b>		<b>11591</b>	
<b>Recuperación inversión, año</b>		<b>14,67</b>	

## 6. Discusión de resultados

### 6.1. Discusión de resultados 1: Sustratos estudiados

De acuerdo con la Tabla 5.26 del capítulo de resultados, se detallan algunos aspectos a tener en cuenta en relación a la caracterización de los sustratos empleados en los ensayos llevados a cabo. A lo largo de todo el apartado se va a hacer referencia a los resultados presentes en la Tabla mencionada anteriormente, por este motivo no se especificará el capítulo en el que se encuentra ya que se considera redundante. El análisis de los resultados obtenidos de la caracterización previa de los sustratos empleados va a servir para entender los comportamientos observados con posterioridad en los procesos de digestión anaerobia. Se ha de aclarar que los sustratos de origen vegetal (sorgo, triticale y rastrojo de maíz) se han caracterizado en base húmeda (sustrato sometido a tratamiento mecánico (triturado) y bioquímico (ensilado)), y en base seca (sustrato sometido a tratamiento mecánico (molienda) y térmico (secado a 105°C)) por separado, al ser empleados en ensayos batch y semi-continuo, respectivamente.

Uno de los principales motivos por los que se emplean los sustratos de origen vegetal (sorgo, triticale y rastrojo de maíz) en este tipo de procesos bioquímicos es por su elevada relación C/N, y su elevado contenido en Demanda Química de Oxígeno (DQO), diversos autores han desarrollado trabajos de investigación con ellos [92-95, 98], y es una práctica habitual su uso en las plantas de biogás para incrementar la producción de metano. En la Tabla 5.26, se pueden observar valores de DQO y relación C/N elevados si se cotejan con aquellos correspondientes al purín. Por una parte, los valores de DQO mostrados en la Tabla anteriormente citada correspondientes a los sustratos sorgo y rastrojo de maíz secos ( $936000 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$  y  $988000 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ , respectivamente) se encuentran muy cercanos a los valores obtenidos por Liu y col. [125]  $1180 \text{ g O}_2 \text{ L}^{-1}$  para rastrojo de maíz. Por otra parte, los valores relativos a la relación C/N indicados en la Tabla 5.26 (65,78, 47,50 y 64,18 para sorgo, triticale y rastrojo de maíz secos, respectivamente) se encuentran por encima de valores recogidos por diversos autores, concretamente Zhang y col. establece un valor de 42,27 para la relación C/N del sorgo. No obstante, como ya se ha mencionado en anteriores apartados, el proceso de digestión



anaerobia no requiere de elevados valores de ratio C/N para el correcto funcionamiento del mismo (valores adecuados según Speece y col. [67] corresponden a un rango de 15-30, o bien 20-30, de acuerdo con Zhou y col. [44]), por ello se emplean otros sustratos en co-digestión con este tipo de materiales vegetales carbonados que regulen la relación existente entre C y N, como son el purín de cerdo y la biomasa microalgal, con valores de contenido en N más altos [78] que aquellos mostrados en sustratos de origen vegetal. El contenido en sólidos volátiles totales en los sustratos lignocelulósicos referido a los sustratos secos corresponde a 93,10 % para el sorgo y 94,76 % para el rastrojo de maíz, valores muy similares a los obtenidos por otros autores, 92,06 % para el sorgo según Zhang y col. [126], 95,5 % para el rastrojo de maíz [125], y 24,9 % sobre base húmeda para el triticale, de acuerdo con Garuti y col. [128], inferior al triticale empleado en este trabajo (50,63 %). Cuanto mayor sea la concentración en sólidos volátiles de los sustratos seleccionados, mayor será la cantidad de alimento para suministrar a las bacterias productoras de biogás [54]. Por otro lado, el pH de los sustratos vegetales comentados anteriormente se encuentra en valores ácidos (3,64, 4,71 y 5,80 para el sorgo, triticale y rastrojo de maíz, respectivamente), lo cual significa que por sí solos no pueden desarrollar el proceso de producción de biogás en condiciones adecuadas, ya que los valores requeridos para los microorganismos específicos de dicho proceso rondan la neutralidad [32].

El aceite de colza posee un valor de DQO muy elevado y un contenido en C muy alto, motivo por el cual se utiliza como co-sustrato para compensar los bajos valores de ratio C/N en sustratos como el purín o la biomasa microalgal. El contenido en N del aceite de colza es inexistente ya que se trata de un sustrato de carácter exclusivamente oleoso, el contenido en lípidos correspondiente a dicho sustrato [129] e indicado en la Tabla 5.26 supone el 100%. Sin embargo, su elevado contenido en sólidos volátiles permite que los resultados esperados de la co-digestión anaerobia con otro sustrato rico en N sean excelentes, como ya ha sido demostrado por algunos autores como Kougias y col. [75].

En concreto, la biomasa microalgal empleada en esta Tesis como sustrato para obtener biogás, se puede encuadrar en una situación intermedia entre aquellos tipos de sustratos responsables de proporcionar C a los microorganismos que degradan la materia orgánica, y además aquellos que proporcionan N puesto que el contenido en ambos nutrientes es elevado. Sin embargo, cuando se establece una relación entre los valores que posee la biomasa microalgal de C y N, no se obtienen resultados adecuados para un

proceso de digestión anaerobia óptimo [122]. La relación C/N obtenida en los análisis realizados a la biomasa microalgal es de 6,02, ligeramente más bajo que los valores típicos presentados en el trabajo desarrollado por Wirth y col. [130] en torno a 10. El alto contenido en N de 6,66 % correspondiente a la biomasa microalgal estudiada en este trabajo de Tesis conlleva que los valores de relación C/N sean bajos. En cuanto al valor del contenido en lípidos obtenido en biomasa microalgal (2,60 %) se ha de mencionar que se encuentra por debajo de los valores presentados en bibliografía (20 %) [80]. Los valores obtenidos por trabajos realizados en CICYTEX mediante un método modificado de *Bligh & Dyer*, presentan valores medios de 8,63 % para la biomasa microalgal seca y triturada. Este sustrato posee una composición muy variable dependiendo de su origen [78], por lo que en este estudio según sus características en cuanto a composición se refiere (procedentes de sus condiciones de producción), se le ha equiparado al purín de cerdo a la hora de diseñar ensayos.

El residuo purín de cerdo, es aquel sustrato en el cuál los microorganismos encargados de producir biogás y metano se desarrollan por excelencia, debido a su elevado contenido en N (4,37-9,82 % frente a 2,9 % establecido en el estudio realizado por Wang y col. [131] o 10,60 % obtenido en los análisis realizados por Arias y col. [132]) y alcalinidad (10096-12870 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, Yin y col. [133] publican concentraciones de alcalinidad de 5093 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>). La alcalinidad es el parámetro responsable de amortiguar aquellos valores ácidos que puedan provocar otros sustratos en co-digestión con él [47] como se ha comentado anteriormente de los sustratos de origen vegetal. El sustrato purín de cerdo se trata de un residuo cuya composición puede oscilar notablemente en función de diversos aspectos, ya sean de carácter humano (limpieza de las camas de los animales), ambiental (épocas lluviosas) e incluso del propio animal que genera el residuo (alimentación, ingesta de medicamentos) [72]. Se puede observar como en la Tabla 5.26 se han establecido rangos de valores para cada parámetro analizado puesto que se han recogido resultados situados en los intervalos mostrados. Los valores del parámetro DQO para el purín de cerdo se sitúan muy por debajo de aquellos obtenidos para el resto de sustratos. En el caso del residuo purín de cerdo autores como Astals y col. [134] o Hidalgo y col. [135], cuyos valores de concentración de DQO presentados en sus trabajos de investigación son de 33700 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> y 54163 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, respectivamente, están situados en el rango de valores obtenidos en este trabajo de 11000-57000 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. Lo mismo sucede con la relación C/N resultante

mostrada en la Tabla 5.26 del capítulo de resultados (6,41-4,56) debido a que los valores de DQO se encuentran directamente relacionados con el contenido en materia orgánica (C) [45], y de ahí su baja relación C/N. En bibliografía se pueden destacar valores de relación C/N muy dispares desde 15,15 [134] hasta 1,11 [133] pasando por valores intermedios como 13,60 [131]. La composición del purín de cerdo en proteínas (14,06 %) se sitúa en valores similares a los obtenidos por otros autores (11,43 %) [45].

Existen dos parámetros importantes que se deben evaluar cuando se pretende emplear purín de cerdo en procesos de digestión anaerobia: el nitrógeno amoniacal y los ácidos grasos volátiles (AGV). Dichos parámetros se comportan como inhibidores del proceso mencionado en determinadas concentraciones (2000-3000 mg L<sup>-1</sup> N-NH<sub>4</sub> [61-63], 5000 mg L<sup>-1</sup> N-NH<sub>4</sub> [53], y 2000-3000 mg L<sup>-1</sup> AGV, [65-66], 4000 mg L<sup>-1</sup> AGV [53]). En este caso particular, en el rango de valores presentado en la Tabla 5.26 aquellos situados en el límite superior se encuentran por encima de las concentraciones consideradas como inhibidoras ya que son 880-7353 mg L<sup>-1</sup> para el parámetro AGV, y 1920-6080 mg L<sup>-1</sup> para el nitrógeno amoniacal. Esto les ocurre a otros autores como Risberg y col. [136], que utilizaron el purín de cerdo para sus ensayos con una concentración de AGV de 3600 mg L<sup>-1</sup> o Corbalas-Robles y col. [137] que presentaron valores de nitrógeno amoniacal para el purín de cerdo de 3490 mg L<sup>-1</sup>. Como consecuencia de la presencia de inhibidores en el medio de digestión, una insuficiente relación C/N para el desarrollo de los microorganismos responsables de la producción de biogás, y la existencia de una baja concentración de DQO del residuo purín de cerdo [138], es necesaria la mezcla del mismo con otro sustrato que le complemente sus carencias para producir una sinergia de todos los parámetros.

En definitiva, los sustratos estudiados en este trabajo de Tesis se han utilizado con dos fines distintos, sustratos con un contenido en N adecuado para los microorganismos responsables del proceso de digestión anaerobia (purín de cerdo y biomasa microalgal), y sustratos con elevado contenido en DQO, sólidos volátiles y relación C/N, necesario para suministrar una cantidad de materia orgánica suficiente a los microorganismos mencionados con anterioridad.

**6.2. Discusión de resultados 2: Ensayo batch desarrollados en laboratorio y planta piloto**

**6.2.1. Ensayos tipo batch desarrollados en laboratorio**

De acuerdo a los análisis estadísticos desarrollados para los ensayos de tipo batch llevados a cabo en laboratorio para todos los sustratos evaluados en esta Tesis, se va a discutir el resultado obtenido del análisis de varianzas (ANOVA) de medias muestrales aplicado a los parámetros: rendimiento de metano, reducción de SV, reducción de DQO, alcalinidad final, nitrógeno amoniacal final (N-NH<sub>4f</sub>).

En primer lugar, se han sometido los datos a la prueba de Kolmogorov-Smirnov y se ha comprobado que la distribución de los datos es la normal. Seguidamente se ha procedido a verificar la homogeneidad de varianzas entre los distintos ensayos tipo batch tratados, según la prueba de Levene. En esta segunda fase, el parámetro alcalinidad final no ha superado la prueba y ha sido descartado, por lo que se procede a continuación a desgranar el resto de parámetros sometidos a análisis ANOVA. En la Tabla 6.1 se concentran de forma resumida los resultados extraídos del análisis de varianza para cada uno de los ensayos tipo batch evaluados.

**Tabla 6.1.** Resultados correspondientes a análisis ANOVA de ensayos tipo batch realizados en laboratorio en mono-digestión para diversos parámetros.

Experimento	Parámetro			
	Rendimiento CH <sub>4</sub> , NL kgSV <sup>-1</sup>	Reducción SV, %	Reducción DQO, %	N-NH <sub>4f</sub> , mg L <sup>-1</sup>
S	419±62	49,91±16,92	27,24±12,08	1785±334
	b	b	b	a
T	373±12	60,38±12,99	41,33±11,48	2513±280
	b	b	bc	ab
A	740±140	50,32±11,44	56,81±6,54	1707±401
	c	b	c	a
B	306±38	60,42±7,45	72,35±8,91	3187±384
	b	b	d	b
P	102±23	9,55±2,23	2,49±1,00	4660±868
	a	a	a	c
R	345±73	49,31±7,16	39,00±11,71	1927±326
	b	b	b	a

Letras diferentes en los resultados obtenidos para cada parámetro indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95 %, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos de cada sustrato. Las medias han sido separadas mediante el test de Duncan para un nivel de confianza del 95 %.

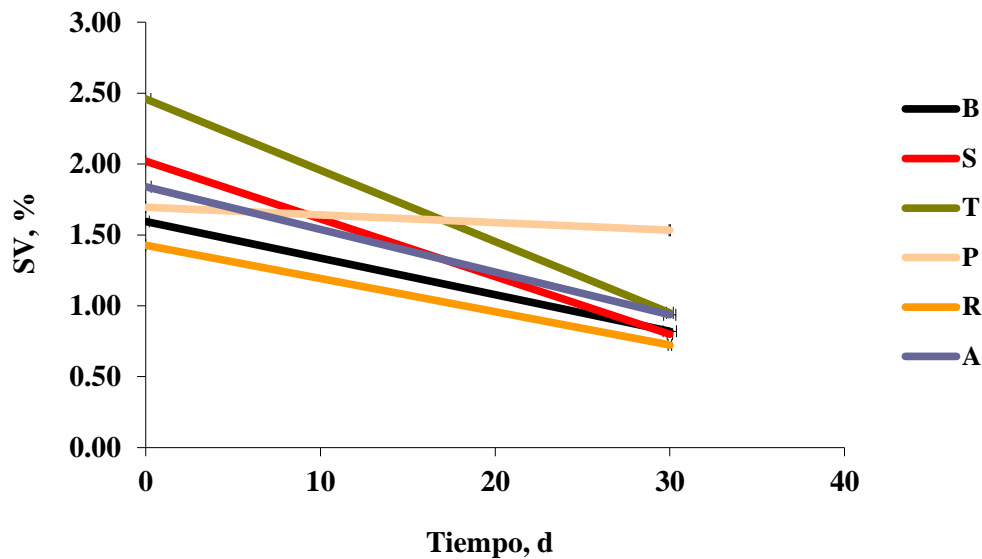
Los resultados extraídos del programa estadístico SPSS.5 han sido trasladados a la Tabla 6.1, en la misma se pueden observar los valores medios obtenidos en aquellos parámetros que han superado las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levene, esto es todos los analizados excepto la alcalinidad final. Los valores medios correspondientes a cada sustrato estudiado pertenecen a los tres experimentos que se han llevado en régimen batch en laboratorio en idénticas condiciones. A continuación, se procede a discutir los resultados obtenidos para cada sustrato en cada uno de los parámetros analizados.

En cuanto a los rendimientos de metano obtenidos en el proceso de digestión anaerobia de cada uno de los sustratos en mono-digestión se establecen tres grupos claramente diferenciados. El primero de ellos corresponde a aquel sustrato menos productivo, purín de cerdo cuyo rendimiento se sitúa en  $102 \pm 23 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ , se trata de un residuo con unas concentraciones de SV muy variables, por este motivo se pueden encontrar valores de rendimientos de metano diversos. Garuti y col. [128] establecen valores de  $250 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para el purín de cerdo con unas condiciones iniciales de SV totales de 12,17 %, frente a un contenido de 2,72 % del purín evaluado en este trabajo. Kalamaras y Kotsopoulos [89] obtienen valores de rendimientos de metano de  $174 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  en sus experiencias, empleando un residuo de purín con un contenido en SV total de 7,60 %. En el segundo grupo de sustratos, establecido según el rendimiento de metano medio obtenido, se encuentran el resto de sustratos, excepto el aceite de colza, englobado únicamente en un tercer grupo, como el más productivo de todos, con rendimientos de metano de  $740 \pm 140 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ . Si se compara el rendimiento de metano correspondiente al aceite de colza con resultados obtenidos por otros científicos se sitúa ligeramente por encima,  $704 \text{ L CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  presentan el investigador Kougias y col. [75]. El segundo grupo de sustratos mencionado anteriormente, se encuentra compuesto por aquellos sustratos con producciones parecidas ( $419 \pm 62 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para el sorgo,  $373 \pm 12 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para el triticale,  $306 \pm 38 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para la biomasa microalgal, y  $345 \pm 73 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para el rastrojo de maíz) y bastante acordes con los resultados obtenidos por otros autores para este tipo de sustratos. Los cultivos energéticos, tales como sorgo y triticale han sido investigados por diversos autores en el campo de la digestión anaerobia, se han publicado rendimientos de metano de  $325 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para el triticale, según Garuti y col.

[128] o valores de rendimientos de metano situados entre 342-404 NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>, según el trabajo realizado por Cantale y col., [92]. Sawatdeenarunat y col. [94] han presentado en su revisión bibliográfica de digestión anaerobia de biomasa lignocelulósica unos valores de rendimiento de metano para el sorgo de 286-319 NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> y 319-335 NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> para el triticale. Para residuos lignocelulósicos como el rastrojo de maíz, Lui y col. [125] obtienen valores de 306 L CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> de rendimiento de metano, algo más bajo que la media obtenida en este trabajo, al igual que ocurre en la revisión bibliográfica realizada por Croce y col. [101] cuyos valores más elevados en cuanto a potencial de metano asociado al rastrojo de maíz son de 264 L CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>. En el caso de biomasa microalgal, los rendimientos de metano asociados a las especies *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* (predominantes en la población de microalgas empleada en este trabajo), Ganesh Saratale y col. [138] los sitúan en valores de 240 L CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> y 180 L CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>, respectivamente; por otro lado, en la revisión bibliográfica realizada por Ward y col. [83] se presentan rendimientos de metano situados en un intervalo de 189 a 403 L CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> y de 290 NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>, para las especies *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus sp.*, respectivamente. Cabe destacar el rendimiento en metano de la biomasa microalgal, por debajo del resto de sustratos lignocelulósicos, a pesar de tener concentraciones de DQO mayores que los mismos. Este hecho se puede explicar como consecuencia del pretratamiento térmico al que ha sido sometido la biomasa microalgal, el cual ha provocado una disminución en los SV totales de partida, algo que no ha ocurrido en los sustratos vegetales (probablemente como consecuencia de su estructura lignocelulósica más difícil de romper). Un estudio presentado por nuestro grupo en el Congreso de Bioenergía en Portalegre [139] llevó a cabo una evaluación de ensayos tipo batch desarrollados con biomasa microalgal similar a la presentada en el trabajo de Tesis y se obtuvieron rendimientos de metano ligeramente inferiores a aquellos ensayos llevados a cabo con sustrato de biomasa microalgas fresca.

Por otra parte, el análisis ANOVA al que se ha sometido al parámetro reducción SV separa a los sustratos estudiados en dos grupos, uno de ellos corresponde únicamente al purín, con el valor más bajo, 9,55 %. En el otro grupo se encuentran englobados el resto de sustratos evaluados, no diferencia al sustrato aceite de colza de los demás, de hecho, no es el que posee las reducciones más elevadas de SV, sino que son el triticale y la biomasa microalgal. La Figura 6.1 muestra la tendencia seguida en el parámetro Sólidos

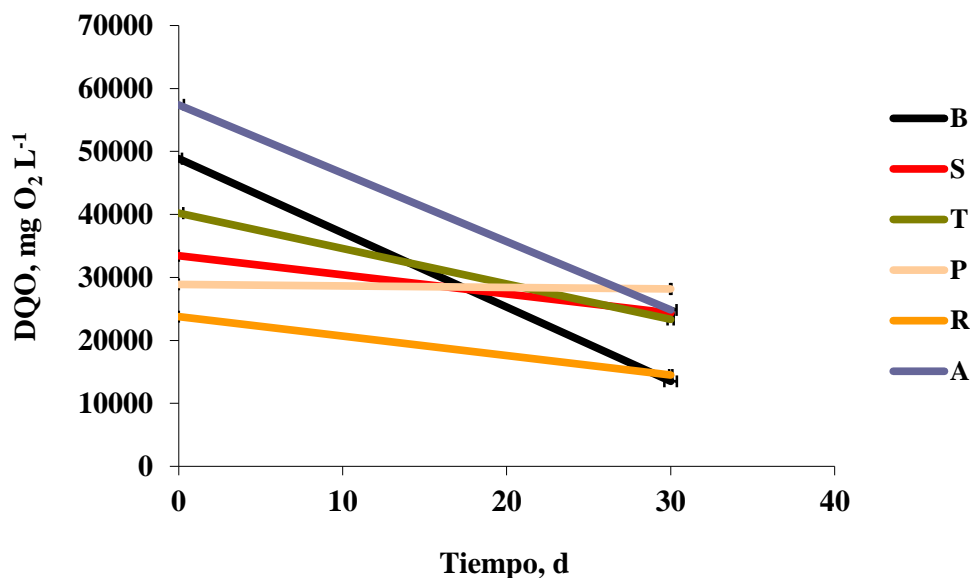
Volátiles (SV) para cada sustrato evaluado. Puede apreciarse que la reducción en SV de los sustratos tiene la secuencia T>S>A>B>R.



**Figura 6.1.** Evolución de valores medios obtenidos en el parámetro sólido volátil en cada ensayo desarrollado con diferentes sustratos.

Sin embargo, los sustratos son diferenciados en diversos grupos cuando se evalúa su reducción en DQO, ordenando a los sustratos de menor a mayor en un grupo correspondiente al purín de cerdo, seguidamente y en conjunto se encuentran los sustratos sorgo y rastrojo de maíz, a continuación, el triticale, en una situación intermedia entre los sustratos lignocelulósicos y el aceite de colza cuya reducción es mayor, y por último nuevamente el sustrato biomasa microalgal. Se representa gráficamente en la Figura 6.2 la evolución sufrida por el parámetro DQO en cada ensayo desarrollado. Se observa un comportamiento parecido en las reducciones calculadas para los parámetros SV y DQO al inicio y final del experimento, pero la secuencia de reducción es diferente para estos dos parámetros. No obstante, aquel sustrato que mayores reducciones obtiene en los parámetros anteriormente citados a lo largo del proceso de digestión anaerobia, no se corresponde con aquel que posee mayor rendimiento de metano. Esto probablemente se deba al pretratamiento recibido por cada sustrato antes de someterse al proceso de digestión anaerobia. Mientras que los sustratos purín de cerdo y aceite de colza no recibieron pretratamiento alguno, salvo una mera homogeneización del líquido viscoso o heterogéneo, los sustratos de origen vegetal

(sorgo, triticale y rastrojo de maíz) fueron sometidos a un pretratamiento mecánico y un posterior ensilado, y la biomasa microalgal fue secada a 105 °C (pretratamiento térmico) y convertida en polvo.



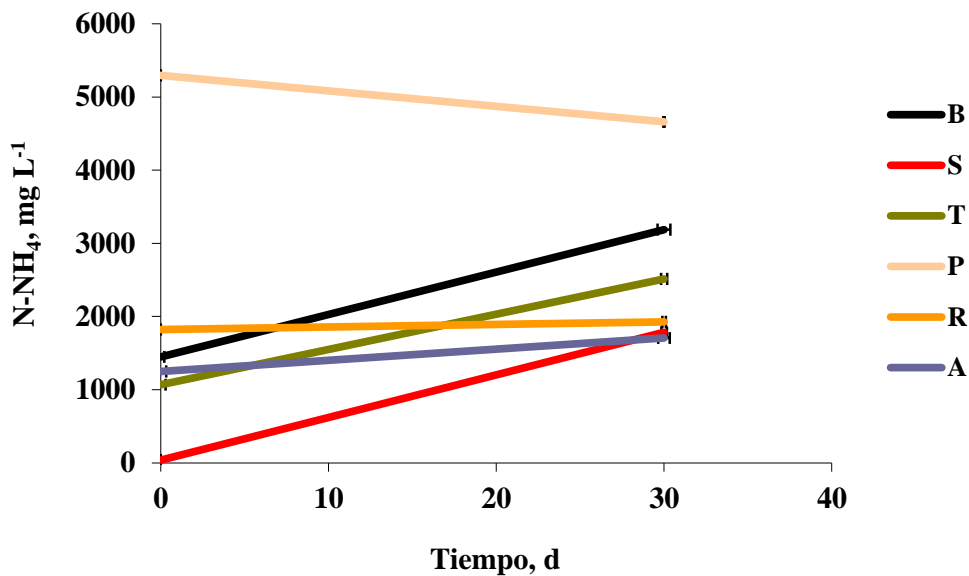
**Figura 6.2.** Evolución de valores medios obtenidos en el parámetro DQO en cada ensayo desarrollado con diferentes sustratos.

Este hecho lleva a pensar que el pretratamiento térmico ayudó a la degradación de la materia orgánica de la biomasa microalgal (como consecuencia de sus altos valores en reducción de SV y DQO) pero los valores iniciales de partida de los parámetros en cuestión (principalmente el contenido en SV) se vieron mermados por el secado a 105 °C. Otros autores [138] obtuvieron mejoras bastante significativas en sus producciones con biomasa de microalgas *Scenedesmus* tras un pretratamiento a temperaturas menores (70 °C y 90 °C).

En la evaluación del nitrógeno amoniacal final (Figura 6.3) de los experimentos desarrollados se muestra la tendencia esperada, evoluciones del parámetro prácticamente constante (en aceite de colza y rastrojo de maíz) o en ligero ascenso (biomasa microalgal, sorgo y triticale), debido a que parte del nitrógeno total presente en los sustratos puede pasar a nitrógeno amoniacal. Sin embargo, en el caso concreto del purín de cerdo, los valores iniciales de nitrógeno amoniacal son bastante más elevados que en el resto de sustratos estudiados y se encuentran muy cercanos a valores

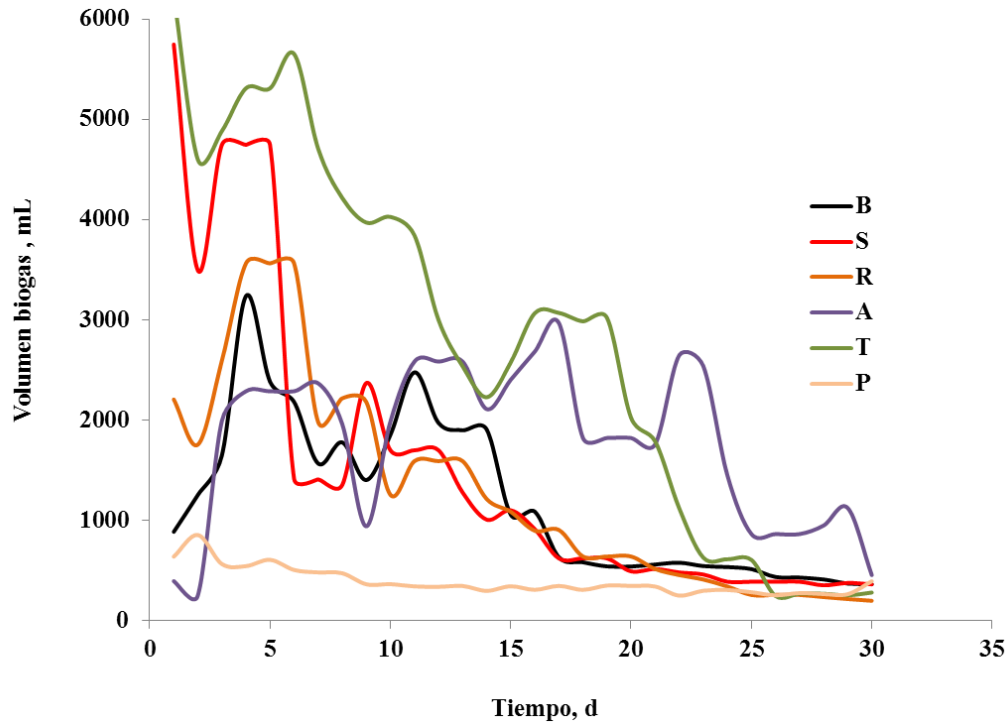


inhibitorios del proceso de digestión anaerobia ( $5000 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NH}_4$  [53]). En el ensayo con purín de cerdo probablemente la propia alcalinidad del medio haya permitido una amortiguación en los valores de pH del medio, de forma que se haya producido un ligero descenso en la concentración de nitrógeno amoniacal a lo largo del proceso. Los sustratos purín y biomasa microalgal, cuyos valores iniciales en concentración de nitrógeno amoniacal son mayores, son diferenciados en dos grupos, siendo mayor el valor final para el purín de cerdo [73, 134]. Dichos sustratos a su vez se diferencian del resto de sustratos estudiados en otro grupo con valores de nitrógeno amoniacal menores.



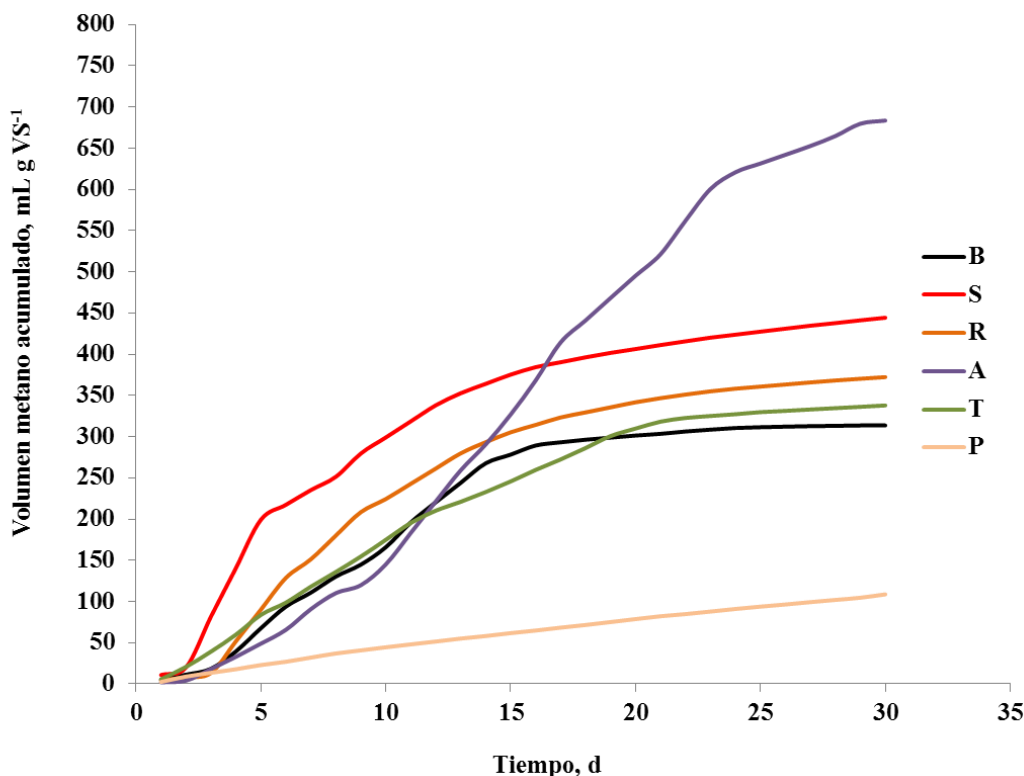
**Figura 6.3.** Evolución de valores medios obtenidos en el parámetro nitrógeno amoniacal en cada ensayo desarrollado con diferentes sustratos.

A continuación, se muestran tanto la evolución del volumen de biogás generado a lo largo del proceso de digestión anaerobia en los sustratos estudiados, como el rendimiento de metano acumulado en las Figuras 6.4 y 6.5, respectivamente.



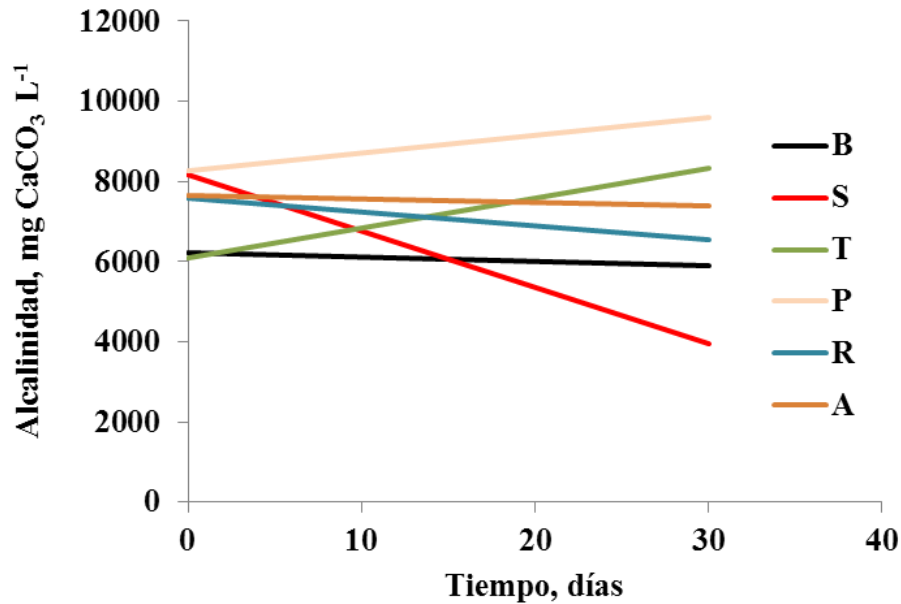
**Figura 6.4.** Evolución de valores medios obtenidos en volumen de biogás en cada ensayo desarrollado con diferentes sustratos. Los resultados representados corresponden a valores medios de tres réplicas.

Una evolución de volumen de biogás prácticamente constante, sin valores iniciales elevados, así como una menor pendiente en la representación de los valores de volumen de metano acumulado, probablemente indican que el sustrato posee una constante de degradación cinética baja, como le ocurre al aceite de colza. Sin embargo, la tendencia observada en el resto de sustratos estudiados es bastante parecida entre ellos, a excepción del purín de cerdo cuyo rendimiento de metano se encuentra muy por debajo de todos ellos.



**Figura 6.5.** Rendimiento de metano acumulado medio diario en cada ensayo desarrollado con diferentes sustratos. Los resultados representados corresponden a valores medios de tres réplicas.

Seguidamente, se presenta una evolución gráfica del parámetro alcalinidad correspondiente a cada sustrato estudiado (Figura 6.6). Se puede observar como en los ensayos B, R y A realizados, la alcalinidad se mantiene prácticamente constante a lo largo del proceso de digestión anaerobia. En el ensayo P por el contrario la alcalinidad aumenta, como se intuía anteriormente que podía haber ocurrido al comentar la evolución en ligero descenso del nitrógeno amoniacal. Sin embargo, la evolución opuesta observada para los ensayos T y S entre sí en el parámetro alcalinidad, tratándose de sustratos de origen similar lleva a pensar que el proceso de digestión anaerobia ha transcurrido de forma diferente. En el ensayo S los valores iniciales de los parámetros DQO,  $SV_T$  y nitrógeno amoniacal han sido menores a los valores de partida del ensayo T. Para los microorganismos metanogénicos el medio de digestión ha sido más hostil en el ensayo T con respecto al ensayo S, por este motivo tal vez la capacidad amortiguadora de la alcalinidad haya tenido que aumentar a lo largo del proceso de digestión anaerobia.



**Figura 6.6.** Evolución de valores medios obtenidos en el parámetro alcalinidad en cada ensayo desarrollado con diferentes sustratos.

El motivo principal de presentar ilustraciones gráficas de los parámetros representados en las Figuras 6.1 a 6.6 es afianzar las ideas más importantes que se pueden extraer del comportamiento de los sustratos en el proceso de digestión anaerobia, como consecuencia de sus características físico-químicas iniciales. Se puede decir que:

1. La reducción experimentada en los parámetros, sólido volátil y DQO para cada sustrato es evidente y bastante acusada para todos ellos, no tanto para el purín de cerdo como se puede observar en las Figuras 6.1 y 6.2. Este hecho lleva aparejado rendimiento de metano más bajo para el sustrato mencionado.
2. Valores de nitrógeno amoniacal al final del proceso de digestión anaerobia por debajo de los límites considerados como inhibitorios para el mismo, en cada sustrato evaluado, a pesar de los valores de partida (Figura 6.3). De nuevo el purín de cerdo se sitúa en valores finales de concentración de nitrógeno amoniacal diferentes al resto de sustratos y superando los valores límite ya mencionados con anterioridad,  $3 \text{ g L}^{-1}$  como máximo [61-63].
3. El parámetro alcalinidad final para los sustratos biomasa microalgal y triticale se mantiene constante o en ligero aumento, aun teniendo contenidos en nitrógeno amoniacal cercanos a los valores inhibitorios para el proceso de digestión

anaerobia. Por este motivo, los rendimientos de metano obtenidos se sitúan en valores bastante buenos. El contenido en nitrógeno amoniacal al final del proceso de digestión anaerobia desarrollado para el purín de cerdo es muy elevado, cercano a  $5 \text{ g L}^{-1}$ . No obstante, el proceso de digestión anaerobia ha tenido lugar, es posible que valores de concentración de alcalinidad elevados sean capaces de amortiguar aquellas inhibiciones que puedan surgir en el medio.

A partir de todas estas tendencias resulta más sencillo diseñar las series de experimentos en régimen semi-continuo, que se corresponden con los apartados siguientes del estudio de Tesis. No obstante, se han de cotejar previamente los ensayos batch de digestión anaerobia para cada sustrato evaluado en un digestor de mayor dimensión (planta piloto).

#### **6.2.2. Ensayos tipo batch desarrollados en planta piloto**

Los ensayos de tipo batch llevados a cabo anteriormente han sido trasladados a un reactor de mayores dimensiones con el objetivo de establecer similitudes o diferencias en el comportamiento de los parámetros analizados. En la Tabla 6.2 se detallan aquellos parámetros evaluados en el apartado anterior.

Si se pretende llevar a cabo una adecuada comparación entre experimentos desarrollados en digestores anaerobios de laboratorio y planta piloto, para estudiar la influencia del tamaño del reactor, lo adecuado es que los sustratos evaluados sean exactamente iguales. En el caso de este trabajo de Tesis, aquellos experimentos en los que se consiguió emplear un sustrato idéntico fueron el aceite de colza y el sorgo. En el caso del rastrojo de maíz, purín y triticale, los materiales de partida poseían valores de humedad muy diferentes en ambas situaciones ensayadas, y en el experimento en planta piloto de biomasa microalgal, la especie predominante era *Scenedesmus sp.* liofilizada cosechada en una planta de generación de microalgas situada en Almería. Por todo ello, es muy difícil establecer tendencias entre los diferentes tamaños de reactor para cada sustrato. Sin embargo, si se centra la atención en los sustratos sorgo y aceite de colza, en ambos casos se observan rendimientos de metano muy parecidos ( $397 \text{ NLCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  frente a  $419 \text{ NLCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  y  $655 \text{ NLCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  frente a  $740 \text{ NLCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ , respectivamente).

Por otra parte, los rendimientos de metano más bajos (asociados a los ensayos de los sustratos rastrojo de maíz y biomasa microalgal) poseen unos valores en la reducción de DQO menores. Al igual que ocurre en los ensayos llevados a cabo en laboratorio, el purín de cerdo es aquel que posee las reducciones menores en cuanto a sólido volátil y DQO, aún sin poseer aquel rendimiento de metano menor. Esto es así, debido a que los valores de partida del sustrato en el contenido de los sólidos volátiles y la concentración de DQO son mucho más bajos que en el resto de sustratos, por lo tanto la disminución sufrida resultará mucho menor. El rendimiento de metano obtenido en el ensayo llevado a cabo con purín de cerdo en planta piloto se encuentra dentro del intervalo de valores normal considerado por otros autores ( $67\text{-}557 \text{ NL kg SV}^{-1}$ ) [141].

Se superan las concentraciones consideradas como inhibitorias para el nitrógeno amoniacal final en el caso de los ensayos llevados a cabo con el sustrato biomasa microalgal. Sin embargo, los sustratos con mayor capacidad tampón (mayor alcalinidad), purín y biomasa microalgal, sufren un aumento considerable en la alcalinidad del medio a lo largo del proceso, comportamiento similar al comentado en los ensayos llevados a cabo en laboratorio. Este incremento del parámetro alcalinidad es posible que compense la elevada concentración final en nitrógeno amoniacal que posee el ensayo de biomasa microalgal. De hecho, el rendimiento de metano, aunque es más bajo al obtenido en los ensayos llevados a cabo en laboratorio, se encuentra dentro de los valores mencionados por otros autores,  $106\text{-}209 \text{ NL kg SV}^{-1}$  [141] ó  $228 \text{ NL kg SV}^{-1}$ , de acuerdo a la revisión bibliográfica llevada a cabo por Jankowska y col. [82].

El rendimiento del ensayo llevado a cabo con rastrojo de maíz mostrado en la Tabla 6.2 ( $151 \text{ NL kg SV}^{-1}$ ) se sitúa cercano a los valores de rendimientos obtenidos en bibliografía por algunos autores. Croce y col. [101] obtienen un valor de  $132 \text{ L kg SV}^{-1}$  para el rendimiento de metano de maíz, mientras que Khatri y col. [103] presentan un valor de  $303 \text{ LCH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para paja de maíz, algo más elevado y alejado del resultado obtenido en este trabajo de Tesis para el ensayo llevado a cabo en planta piloto, pero bastante cercano al obtenido en los ensayos en laboratorio con dicho sustrato.

**Tabla 6.2.** Parámetros evaluados en experimentos de digestión anaerobia tipo batch desarrollados en planta piloto para los sustratos S, T, A, B, P y R estudiados.

Parámetro	Sustrato					
	S	T	A	B	P	R
pH <sub>i</sub>	5,46	6,80	7,65	7,36	7,81	7,19
pH <sub>f</sub>	7,33	8,10	8,04	8,11	6,83	8,58
Alcalinidad <sub>i</sub>	11937	10127	8998	7885	6109	3316
Alcalinidad <sub>f</sub>	9230	5340	4827	13083	9874	3763
N-NH <sub>4i</sub> , mg L <sup>-1</sup>	2966	1109	1669	844	1705	946
N-NH <sub>4f</sub> , mg L <sup>-1</sup>	2780	1520	1070	4080	2080	940
Red. SV, %	45	63	82	77	19	74
Red. DQO, %	20	54	86	29	12	21
Rend. CH <sub>4</sub> , L kg SV <sup>-1</sup>	397	-	655	182	322	151

El rendimiento de biogás obtenido por el triticale (900 L kg SV<sup>-1</sup>) ha presentado un valor superior al alcanzado por otros autores, Cantale y col. [92] obtienen un valor máximo en rendimiento de biogás de 707 NL kg SV<sup>-1</sup>. El motivo por el cual no se ha indicado el resultado de producción generada en metano para el triticale es que los valores obtenidos por el analizador de metano no se consideraron fiables, ya que son bastante diferentes a los obtenidos en ensayos de laboratorio y por otros autores.

### 6.2.3. Estudio cinético de producciones en ensayos batch en laboratorio y planta piloto

La cinética del proceso de digestión anaerobia en ensayos de tipo batch se ha evaluado para la evolución del volumen de metano acumulado con el tiempo de acuerdo a los tres modelos cinéticos especificados en apartados anteriores de este trabajo (modelo de primer orden, modelo modificado de Gompertz y modelo de Cone). La constante cinética de producción de metano marca la velocidad de generación de metano pero no por ello se ha de establecer una relación directa con los valores de rendimientos finales obtenidos. En la Tabla 6.3 se presentan todos los parámetros cinéticos obtenidos de los

ajustes realizados sobre la producción de metano para cada uno de los modelos cinéticos en cada caso.

**Tabla 6.3.** Parámetros estimados de acuerdo a los modelos cinéticos para la producción de metano en ensayos de digestión anaerobia batch con los diferentes sustratos.

Ensayo	Modelo cinético (parámetros del modelo)								
	Primer orden		Modificado Gompertz				Cone		
	$k_p, d^{-1}$	$R^2$	$\mu_m, NL CH_4 kg VS^{-1}d^{-1}$	$\lambda, d$	$R^2$	$K_c, d^{-1}$	$n$	$R^2$	
<b>S1</b>	0,099	0,990	1,263	0,313	0,970	0,132	2,029	0,982	
<b>S2</b>	0,141	0,987	1,875	0,208	0,979	0,158	2,493	0,981	
<b>S3</b>	0,119	0,991	1,851	0,050	0,959	0,157	1,984	0,984	
<b>S4</b>	0,090	0,974	0,493	1,481	0,987	0,105	2,152	0,990	
<b>T1</b>	0,083	0,921	3,339	1,922	0,996	0,114	2,142	0,974	
<b>T2</b>	0,107	0,973	1,643	0,372	0,990	0,131	2,380	0,973	
<b>T3</b>	0,065	0,882	3,983	4,632	0,957	0,088	1,933	0,976	
<b>T4</b>	0,065	0,880	0,754	4,266	0,994	0,087	2,424	0,990	
<b>A1</b>	0,032	0,971	0,657	3,939	0,962	0,039	2,220	0,976	
<b>A2</b>	0,022	0,883	3,279	7,848	0,956	0,060	2,336	0,985	
<b>A3</b>	0,035	0,866	2,352	6,120	0,989	0,068	2,264	0,981	
<b>A4</b>	0,068	0,997	1,725	0,609	0,947	0,115	2,775	0,988	
<b>B1</b>	0,106	0,902	1,397	3,806	0,993	0,104	2,684	0,974	
<b>B2</b>	0,075	0,852	1,273	5,569	0,986	0,083	3,235	0,970	
<b>B3</b>	0,106	0,985	1,444	0,104	0,974	0,137	2,068	0,981	
<b>B4</b>	0,067	0,981	0,128	5,360	0,969	0,066	2,770	0,964	
<b>P1</b>	0,060	0,992	0,281	0,556	0,983	0,088	1,433	0,991	
<b>P2</b>	0,054	0,994	0,282	1,079	0,985	0,081	1,380	0,991	
<b>P3</b>	0,050	0,967	0,200	2,638	0,982	0,077	1,846	0,990	
<b>P4</b>	0,062	0,961	0,267	2,551	0,988	0,082	2,060	0,992	
<b>R1</b>	0,094	0,927	0,922	2,798	0,993	0,109	2,187	0,977	
<b>R2</b>	0,138	0,920	2,032	2,699	0,990	0,145	2,747	0,969	
<b>R3</b>	0,109	0,957	1,599	2,447	0,982	0,116	2,701	0,979	
<b>R4</b>	0,086	0,992	0,509	0,806	0,970	0,145	1,311	0,995	



El análisis de parámetros cinéticos estimados para cada uno de los sustratos estudiados mostrado en la Tabla 6.3 indica una mayor velocidad en la producción de metano obtenida para el sustrato sorgo y rastrojo de maíz, seguido de triticale y biomasa microalgal, y finalmente purín y aceite de colza.

El modelo de primer orden no se ajusta bien al volumen de metano producido en los ensayos T3, T4, A2, A3 y B2. La constante de velocidad de producción de metano más alta corresponde a los experimentos realizados con sorgo y rastrojo de maíz (los valores medios calculados de los resultados presentados en la Tabla 3 para los ensayos llevados a cabo en laboratorio son de  $0,120 \text{ d}^{-1}$  y  $0,114 \text{ d}^{-1}$  para el modelo de primer orden, y  $0,149 \text{ d}^{-1}$  y  $0,123 \text{ d}^{-1}$  para el modelo de Cone, respectivamente). Se pueden observar valores bajos en el parámetro representativo de la fase de latencia ( $\lambda$ ) perteneciente al modelo modificado de Gompertz en los ensayos llevados a cabo en laboratorio con sorgo y rastrojo de maíz (valores medios para los ensayos de laboratorio de 0,190 d y 2,648 d, respectivamente). Los valores del parámetro  $\lambda$  correspondientes al sustrato purín en ensayos de laboratorio obtienen una media de 1,424 d, aunque la variabilidad entre sus tres réplicas es bastante evidente lo que puede generar cierta confusión en cuanto a la fiabilidad del valor medio obtenido. Herrmann y col. [142] han llevado a cabo una investigación sobre el guisante ensilado en el que el valor presentado en el parámetro  $\lambda$  fue de 3,45 d, superior a los valores obtenidos en este trabajo para sustratos vegetales, ya que el triticale ha presentado un valor medio para sus experiencias desarrolladas en laboratorio de 3,106 d. En cuanto al parámetro  $n$  del modelo de Cone, Sousa y col. [123] han publicado valores entre 0,75 y 1,98 para bagazo de caña de azúcar dependiendo del inóculo empleado. Si los valores presentados en la Tabla 3 son comparados con aquellos obtenidos por el autor anteriormente citado para el parámetro  $n$ , la mayoría de ellos son superados excepto en los ensayos de purín desarrollados en laboratorio y el ensayo R4, pero todos ellos se encuentran situados en el mismo orden. En cuanto a los valores de velocidad de producción máxima de metano ( $\mu_m$ ) del modelo modificado de Gompertz, aquellos valores más elevados se asocian a los sustratos que han obtenido mayores rendimientos de metano en ensayos de laboratorio (A>S>R>B>P). No obstante, se observan unos valores estimados de  $\mu_m$  más elevados en el sustrato triticale que en el resto de sustratos estudiados.

Además, los ensayos más productivos no se asocian a aquellos con velocidades de producción más altas. Los ensayos evaluados con el sustrato aceite de colza en laboratorio han obtenido los valores medios más altos en rendimiento de metano ( $740 \text{ NL kg SV}^{-1}$ ) estimándose los valores en el parámetro de constante de velocidad de producción de metano más bajos entre todos los estudiados, como se refleja en la Tabla 3 ( $0.030 \text{ d}^{-1}$  y  $0.055 \text{ d}^{-1}$  como valores medios de los ensayos realizados en laboratorio para los modelos de Primer Orden y de Cone, respectivamente). Este hecho puede deberse a la elevada concentración en el parámetro DQO, el bajo contenido en micronutrientes y la composición lipídica que posee el sustrato aceite de colza. Todo ello hace que la producción de metano sea baja por parte de los microorganismos metanogénicos. Estudios realizados por Thanikal y col. [144] han obtenido valores en las constantes de velocidad de producción de metano menores a  $0,02 \text{ d}^{-1}$  para grasas. Resultados encontrados en literatura [141] para paja de trigo ( $0,06 \text{ d}^{-1}$ ) se encuentran ligeramente por debajo de los resultados obtenidos en los parámetros de constante de velocidad estimados para los diferentes modelos en sustratos de origen vegetal en este trabajo de Tesis. Por otro lado, los valores de constante de velocidad de producción de metano mostrados en la Tabla 6.3 ( $0,096 \text{ d}^{-1}$  y  $0,108 \text{ d}^{-1}$  para modelos de Primer Orden y de Cone, respectivamente) para la biomasa microalgal son ligeramente menores que los obtenidos en los estudios llevados a cabo por Zhen y col. [145] para las especies *Scenedesmus* sp. y *Chlorella* sp. ( $0,119 \text{ d}^{-1}$ ). En cuanto a la cinética desarrollada en el sustrato purín de cerdo ya evaluada por Llabrés-Luengo y Mata-Álvarez [146], los resultados obtenidos en la constante cinética correspondiente a cada uno de los experimentos desarrollados no superaba en ningún caso los  $0,02 \text{ d}^{-1}$ , algo que sí que sucede en este estudio.

Al cotejar los parámetros cinéticos estimados para los ensayos llevados a cabo en planta piloto, la tendencia observada en las constantes cinéticas calculadas para cada sustrato es similar, una mayor degradación por parte de los sustratos lignocelulósicos sorgo y rastrojo de maíz, seguida de la biomasa microalgal y el triticale, y finalmente el purín. En este caso el aceite de colza no se sitúa como el más lento en cuanto a la velocidad de producción de metano.

Aquellos sustratos evaluados en planta piloto en las mismas condiciones que en biodigestores de laboratorio (sorgo y aceite de colza) muestran algunas diferencias en el comportamiento de los parámetros cinéticos estimados reflejados en la Tabla 6.3. En

ensayos de sorgo las constantes cinéticas de velocidad de producción de metano obtenidas para el ensayo realizado en planta piloto (S4) son menores a las relativas a ensayos de laboratorio ( $0,090 \text{ d}^{-1}$  y  $0,105 \text{ d}^{-1}$  frente a  $0,120 \text{ d}^{-1}$  y  $0,149 \text{ d}^{-1}$  para los modelos de Primer Orden y de Cone, respectivamente). No obstante, según algunos autores como Pagés y col. [120] la constante de velocidad de producción de metano obtenida para el sorgo fue de  $0,29 \text{ d}^{-1}$ , lo que quiere decir que la degradación que ha tenido lugar en los reactores de laboratorio y en planta piloto ha sido más lenta que la ocurrida en los digestores empleados por Pagés y col., a pesar de haber obtenido elevados rendimientos de metano. En el caso del sustrato aceite de colza se muestra el comportamiento opuesto en los parámetros cinéticos obtenidos en planta piloto y laboratorio con respecto al comportamiento mencionado para el sustrato sorgo. La constante de velocidad de producción de metano se ha incrementado cuando la experiencia ha sido trasladada a planta piloto ( $0,068 \text{ d}^{-1}$  y  $0,115 \text{ d}^{-1}$  en planta piloto frente  $0,030 \text{ d}^{-1}$  and  $0,055 \text{ d}^{-1}$  en laboratorio, para los modelos de Primer Orden y de Cone, respectivamente).

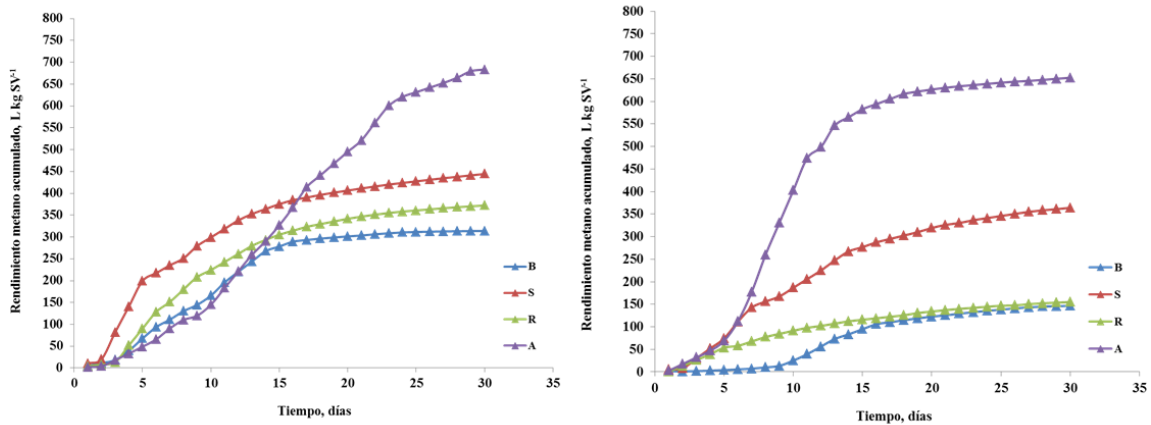
### ***6.3. Discusión de resultados 3: Modelización de resultados obtenidos de ensayos batch con sustratos S, A, B y R***

La simulación llevada a cabo del proceso de digestión anaerobia en los ensayos batch realizados en este trabajo de Tesis, ha permitido obtener una serie de concentraciones de compuestos intermedios o fracciones solubles, y de constantes cinéticas detalladas en la Tabla 5.25. Es muy importante conocer la composición en hidratos de carbono, lípidos y proteínas de los sustratos a estudiar para iniciar el cálculo del modelo a partir de unos valores de partida, los cuales se han extraído de la Tabla 5.26. De aquí que para el sustrato A se presente un elevado valor de  $X_{Li}$  en los ensayos desarrollados en laboratorio y planta piloto, como consecuencia del carácter lipídico del aceite. Sin embargo, para los sustratos vegetales S y R se presenta un comportamiento diferente en la desintegración de sus compuestos complejos, el sustrato S contiene mayor contenido en carbohidratos que el sustrato R al tratarse de una variedad dulce con elevado contenido en azúcares. De aquí que la fracción soluble  $f_{CH}X_C$  sea superior en el sustrato

S que en el sustrato R (0,78 frente a 0,51). Por otro lado, el elevado valor de la fracción soluble  $f_{PR}X_C$  (0,50) se debe al importante contenido en proteínas inicial del sustrato B.

Otra observación a destacar de la Tabla 5.25 es que los ensayos realizados con menor cantidad de inóculo son aquellos que muestran menores valores en la concentración de material particulado intermedio ( $X_{ms}$ ,  $X_{aa}$ ,  $X_{C4}$ ....), como sucede en el sustrato B en planta piloto. Dicha observación resulta lógica debido a que el material particulado intermedio será a posteriori aquel que se relacione con la concentración de microorganismos en el medio.

En relación a las constantes cinéticas extraídas del modelo ADM1 se presentan velocidades de desintegración de los sustratos estudiados en laboratorio y planta piloto muy similares, excepto en el caso del sustrato A. En este caso particular se han empleado cantidades mayores de sustrato A y menores cantidades de inóculo en el ensayo realizado en planta piloto, aquel que presenta una menor constante cinética con respecto a la obtenida en el ensayo realizado en laboratorio ( $0,045 \text{ d}^{-1}$  frente a  $0,250 \text{ d}^{-1}$ ). A través de este comportamiento se puede deducir la dificultad que presenta el sustrato A para ser desintegrado en sus componentes principales. Atendiendo a las constantes cinéticas de hidrólisis se puede ver observar para todos los sustratos como la velocidad de degradación para hidratos de carbono corresponde a la más alta, seguida de la hidrólisis de las proteínas, y los lípidos, a ambas escalas estudiadas. Un comportamiento similar fue obtenido por García-Gen y col. [124]. Si se observa la Figura 6.7 se puede ver representado como los ensayos llevados a cabo en planta piloto presentan una fase de arraque o latencia mayor a los ensayos realizados en laboratorio. Eso se puede ver reflejado en la mayoría de los valores obtenidos en la mayoría de las constantes cinéticas de hidrólisis mostradas en la Tabla 5.25. Se puede establecer una relación entre los sustratos más productivos (S y A) mostrados en la Figura 6.7 con una menor concentración en compuestos particulados inertes  $f_{Xi}X_C$  (0,04 y 0 para los sustratos S y A, respectivamente) tal y como se muestra en la Tabla 5.25.



**Figura 6.7.** Evolución del rendimiento de metano acumulado para los sustratos estudiados B, S, R y A en laboratorio (izquierda) y planta piloto (derecha).

Se ha obtenido un excelente ajuste de la evolución del volumen de metano acumulado teórico predecido por el modelo, a la evolución experimental obtenida, como muestran las Figuras 5.1 a 5.4. En todos los casos el valor de  $R^2$  obtenido ha superado a 0,995. Mottet y col. [147] obtienen ajustes algo menores para lodos activados sin pretratar y pretratados a 110 °C ( $R^2$  de 0,992 en ambos casos) y 220 °C ( $R^2$  de 0,989).

#### 6.4. *Discusión de resultados 4: Ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio*

En este apartado se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de cinco series de experimentos en régimen semi-continuo y llevadas a cabo en reactores de laboratorio, los cuales difieren entre sí en la mezcla de sustratos alimentada a dicho reactor anaerobio. Además, se han evaluado en cada una de las series cuatro VCO diferentes. En primer lugar, se detalla, seguidamente, en la Tabla 6.4 la producción de metano final correspondiente a cada experimento desarrollado, expresándolo en dos unidades diferentes ( $X_1$  y  $X_2$ ).

Se puede observar en la Tabla 6.4 un incremento en el volumen de metano diario producido al aumentar la VCO en cada una de las series de experimentos desarrollados, si los resultados se refieren al volumen del reactor.

**Tabla 6.4.** Rendimientos de metano obtenidos en experimentos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R mezclados en diferentes proporciones en el alimento a diferente VCO.

Experimento	Variable				X <sub>2</sub> /X <sub>3</sub>
	X <sub>1</sub> , mLCH <sub>4</sub> L <sub>D</sub> <sup>-1</sup>	X <sub>2</sub> , LCH <sub>4</sub> kg SV <sub>ad</sub> <sup>-1</sup>	t, días	X <sub>3</sub> , LCH <sub>4</sub> kg SV <sub>ad</sub> <sup>-1</sup>	
SP1 (0,89)	210,20	236,13	55		90,65
SP2 (1,81)	294,62	162,88	68		62,53
SP3 (2,68)	438,43	163,92	77	260,50	62,93
SP4 (3,55)	771,28	217,43	59		83,47
SB1	231,36	231,36	71		63,82
SB2	393,22	196,61	84		54,24
SB3	576,91	192,30	90	362,50	53,05
SB4	681,94	170,49	66		47,03
SBP1 (1,14)	197,17	173,03	57		62,77
SBP2 (2,33)	333,31	142,99	58		51,87
SBP3 (3,44)	463,92	135,06	65	275,67	48,99
SBP4 (4,59)	679,60	148,13	64		53,74
SBPT1 (0,98)	202,50	206,99	83		69,00
SBPT2 (1,94)	405,84	209,34	91		69,78
SBPT3 (2,91)	534,03	183,70	92	300	61,23
SBPT4 (4,00)	731,94	183,02	96		61,01
SBPTR1	139,75	139,75	49		45,23
SBPTR2	312,47	156,24	119		50,56
SBPTR3	509,69	169,90	93	309	54,98
SBPTR4	650,89	162,72	93		52,66

El valor de VCO evaluado en cada experimento aparece entre paréntesis excepto en las series de experimentos SB y SBPTR, debido a que sus valores coinciden con 1, 2, 3 y 4 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>

Al expresar los resultados de producción de metano referidos a la cantidad de sólidos volátiles adicionados, la tendencia presentada en la Tabla 6.4 no es la misma y difiere entre las series estudiadas. Para las series SP y SBP el comportamiento observado en la producción de metano muestra un descenso a medida que aumenta la VCO, produciéndose una subida de nuevo en el valor más alto de VCO estudiado, sin embargo, este último valor producido de metano no supera el alcanzado en el experimento evaluado con la VCO más baja. La tendencia experimentada por las series SB y SBPT es a disminuir ligeramente su producción de metano cuando la VCO estudiada aumenta, tal y como se observa en estudios desarrollados por otros autores [148]. Por último, la serie SBPTR muestra un aumento en la producción obtenida de metano con el incremento de la VCO, descendiendo levemente en la producción de metano correspondiente al experimento evaluado con la mayor VCO.

A pesar de haberse producido un comportamiento bastante diferente en la serie de experimentos SBPTR, los resultados obtenidos en producciones de metano referidos a cantidad adicionada de mezcla de sustratos, no se sitúan entre los más elevados. Una mayor variabilidad de sustratos en la mezcla alimentada al reactor podría provocar un incremento en los rendimientos de metano [142]. En este estudio de Tesis no ocurre este efecto, probablemente debido a que la relación entre los sustratos responsables de un aporte amortiguador del medio (purín y biomasa microalgal), y el resto de sustratos vegetales (sorgo, triticale y rastrojo de maíz) no ha sido 1:1 (como ha ocurrido en cada una de las series anteriores estudiadas).

Si se calcula un promedio de los rendimientos de metano obtenidos por serie de experimentos se obtienen los valores siguientes: 195,09 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup>, 197,69 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup>, 149,80 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup>, 195,76 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup>, 157,15 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup>, para las series SP, SB, SBP, SBPT y SBPTR, respectivamente.

En el caso de sustratos de origen vegetal, resultados recogidos por Croce y col. [14] obtenidos a partir de paja de trigo corresponden a un rendimiento de metano de 178 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup> para una VCO de 1 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, valor superado en varios experimentos realizados en diferentes series de experimentos en este trabajo, ya que al producirse una co-digestión de los sustratos se espera un incremento en los rendimientos obtenidos. Herrmann y col. [143] obtienen resultados medios de 295,5 L kg SV<sub>ad</sub><sup>-1</sup> para una serie de experimentos de microalgas (45 %) mezcladas con remolacha (55 %) previamente

ensilada, que comparada con la serie similar de este trabajo de Tesis SB resulta mucho más productiva. No obstante, al especificar los rendimientos de metano de cada una de las VCO estudiadas en el trabajo de Herrmann y col., se presenta una inhibición por parte del experimento llevado a cabo con una VCO de  $4 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ , algo que no sucede en el experimento SB4, cuyo rendimiento aparece en la Tabla 6.4 ( $170,49 \text{ L kg SV}_{\text{ad}}^{-1}$ ).

Se aprecian valores muy similares en cuanto a rendimiento de metano se refiere para todas las series de experimentos excepto para las series SBP y SBPTR. Ambas series de experimentos no se han llevado a cabo con una mezcla de alimento en proporción 1:1 entre sustratos purín y biomasa microalgal, y sustratos vegetales, como consecuencia de la variabilidad en el contenido de los sólidos volátiles del purín a lo largo del tiempo. Para la serie SBP la cantidad de sustrato vegetal (sorgo) en la mezcla alimentada al reactor es menor que el contenido en los sustratos biomasa microalgal y purín juntos, mientras que para la serie SBPTR la proporción de sustratos vegetales (sorgo, triticale y rastrojo de maíz) es mayor con respecto a los sustratos purín y biomasa microalgal en la mezcla total alimentada al reactor.

En cuanto a la concentración media de metano en el volumen total de biogás generado en cada experimento, los valores obtenidos se sitúan en un intervalo muy pequeño entre 48 % y 54 %.

Una VCO de  $1 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  conlleva valores de rendimientos de metano más elevados en las series SP, SB y SBP. No sucede lo mismo para las series de experimentos SBPT y SBPTR estudiadas, cuyos rendimientos de metano resultan más altos con VCO de  $2 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  y  $3 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente. Este hecho se puede deber a la sinergia conseguida gracias al aporte de un mayor número de sustratos (nutrientes), lo cual provoca una respuesta positiva frente a una posible inhibición [142].

En segundo lugar, a partir de los valores teóricos calculados ( $X_3$ ) en la Tabla 6.4, (procedente de los resultados correspondientes a los ensayos batch desarrollados en la primera parte de este trabajo de Tesis) se establece una comparativa con los rendimientos reales obtenidos ( $X_2$ ) en cada una de las series de experimentos en régimen semi-continuo evaluados. Las series de experimentos que presentan rendimientos de metano más cercanos a los valores teóricos son la SP, seguida de la SBPT.



Por otro lado, se ha realizado un seguimiento del proceso de digestión anaerobia para cada experimento llevado a cabo. Para ello, se han analizado una serie de parámetros a lo largo del tiempo, y se han sometido los resultados obtenidos de los mismos a un tratamiento estadístico consistente en un análisis ANOVA. A continuación, se muestran en la Tabla 6.5 los valores medios correspondientes a todos los experimentos realizados en cada una de las series estudiadas con diversas mezclas de sustratos.

El análisis ANOVA mostrado en la Tabla 6.5 establece grupos formados entre experimentos de cada serie en función de los resultados obtenidos en los parámetros analizados. Si existen diferencias significativas entre experimentos se representan con diferentes letras.

En relación a los parámetros SV y DQO de las muestras de digestato extraídas a lo largo del proceso y para diferentes VCO, se detecta una tendencia a incrementar su valor a medida que aumenta la carga orgánica, como cabría esperar. En este caso se establecen diferencias significativas en las series de experimentos SP y SBPT en los resultados obtenidos del tratamiento estadístico del parámetro SV, y entre la serie SBP y SBPT en el parámetro DQO.

En cuanto al parámetro AGV no existen diferencias significativas entre experimentos de cada serie estudiada. No obstante, se ha de destacar una notable elevada concentración de AGV para las series SBPT y SBPTR, sobrepasando en la serie SBPT los valores umbrales considerados como inhibitorios del proceso,  $4000 \text{ mg L}^{-1}$  [53]. Sin embargo, existen estudios en los que se recogen los resultados de experiencias de plantas de digestión anaerobia en funcionamiento [53], en los cuales se puede observar como al sobrepasar los límites el proceso no tiene que sufrir inhibición. La explicación a este comportamiento de los microorganismos metanogénicos se encuentra en el acomodamiento de los mismos a VCO más elevadas, de forma que se consigue una mayor estabilidad y los rendimientos de metano no se encuentran tan afectados por la concentración de AGV en el medio.

**Tabla 6.5.** Análisis ANOVA de parámetros evaluados en experimentos de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R en diferentes proporciones en el alimento y modificando la VCO.

Experimento	SV, %	DQO, %	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Ratio C/N	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>
<b>SP1 (0,89)</b>	2,09±0,88 a	40083±18034	2134±641	10,11±1,73	3630±550 b	10538±987
<b>SP2 (1,81)</b>	4,33±1,16 b	41417±9932	1504±312	20,38±4,76	2103±651 a	9720±675
<b>SP3 (2,68)</b>	5,30±1,36 b	49667±12828	1275±391	16,99±4,34	2603±760 a	9483±797
<b>SP4 (3,55)</b>	5,39±1,39 b	60083±13559	1597±875	21,23±5,38	2883±699 ab	8949±910
<b>SB1</b>	2,99±0,67	49583±21080	1898±634	11,21±4,37	1913±580	9112±1175
<b>SB2</b>	3,64±0,54	60167±17896	2399±735	11,93±5,21	2157±523	8966±1015
<b>SB3</b>	4,39±0,47	78167±44646	2514±869	11,75±4,77	2993±1223	9223±830
<b>SB4</b>	4,47±0,80	77917±36375	2747±1005	10,97±4,85	3673±1786	9900±1348
<b>SBP1 (1,14)</b>	4,18±1,40	67250±22026 a	2049±425	10,58±1,78	2701±755 a	11389±2878
<b>SBP2 (2,33)</b>	5,29±1,01	103667±11479 b	1679±257	10,26±1,93	4202±1035 b	12879±1031
<b>SBP3 (3,44)</b>	5,35±0,68	119167±43792 bc	2057±334	10,51±2,02	4790±777 b	14250±2320
<b>SBP4 (4,59)</b>	5,11±0,50	126750±13758 c	1712±843	10,19±1,72	4007±1279 b	12890±2350
<b>SBPT1 (0,98)</b>	6,65±1,79 a	92700±18368 a	4983±1468	12,67±0,85	3523±564	13573±852 a
<b>SBPT2 (1,94)</b>	6,48±1,06 ab	108333±16241 ab	4979±2199	12,56±0,46	4092±498	14949±484 b
<b>SBPT3 (2,91)</b>	7,59±1,06 b	109167±17848 ab	4194±1413	12,71±0,80	4643±908	15878±1522 b
<b>SBPT4 (4,00)</b>	7,66±1,05 b	124250±17581 b	5143±716	12,97±0,78	4410±1068	15452±872 b
<b>SBPTR1</b>	5,29±1,89	86250±28656	3439±1976	13,22±1,47	3260±694	14664±1786
<b>SBPTR2</b>	5,55±1,88	87008±21119	3574±1545	12,92±1,49	3080±606	14213±1893
<b>SBPTR3</b>	5,39±1,97	91416±11254	3891±1337	12,83±1,11	3397±798	13670±845
<b>SBPTR4</b>	5,81±1,00	107083±13945	2871±805	11,90±1,56	3707±1069	13066±1204

Desviación estándar de 6 muestras tomadas a lo largo del proceso

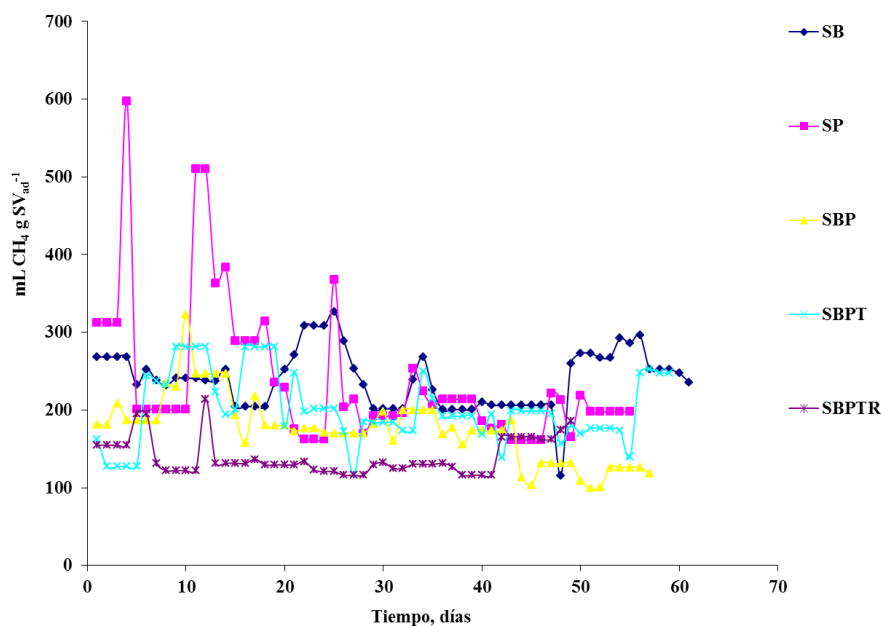
El valor de VCO evaluado en cada experimento aparece entre paréntesis excepto en las series de experimentos SB y SBPT debido a que sus valores coinciden con 1, 2, 3 y 4 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>

Para el nitrógeno amoniacal sucede lo mismo, se puede ver en la Tabla 6.5 como las concentraciones de dicho parámetro son notablemente más altas para las series SBP y SBPT. Según algunos autores habrían sobrepasado en gran medida las concentraciones consideradas como inhibitorias del proceso (2000-3000 mg L<sup>-1</sup>, [61-63]), otros autores sitúan el valor umbral de las concentraciones de nitrógeno amoniacal en 5000 mg L<sup>-1</sup> [53]. Independientemente de la teoría, tal y como se ha comentado para el parámetro AGV, la estabilidad del proceso dependerá de la adaptación de los microorganismos metanogénicos a cargas elevadas de sustratos. Las diferencias significativas resultantes del análisis efectuado al parámetro nitrógeno amoniacal para la serie SP se deben al empleo de un sustrato purín diferente para el experimento SP1 con respecto al resto de experimentos de su misma serie. Sin embargo, en la serie de experimentos SBP sí que se puede destacar la diferencia significativa presentada en el experimento evaluado con una VCO más baja, al compararlo con el resto de experimentos de su misma serie. En esta serie se combina un sustrato de origen lignocelulósico (sorgo) con dos sustratos en los que se ha demostrado en ensayos en régimen batch previos, una concentración de nitrógeno amoniacal final elevada. Adicionalmente, se ha de recordar que la proporción en la que se han estudiado como alimento al reactor no ha sido 1:1 sorgo:biomasa+purín.

Por otro lado, el parámetro ratio C/N mostrado en la Tabla 6.5 no muestra tendencias claras en las diferentes series de experimentos estudiadas.

Finalmente, la alcalinidad presenta mayores valores lógicamente para aquellas series de experimentos que contienen los sustratos B y P en su mezcla alimento, al igual que ocurre en el parámetro nitrógeno amoniacal estudiado. Además, en el parámetro alcalinidad mostrado en la Tabla 6.5, la serie SBPT presenta diferencias significativas estableciendo dos grupos conformados por el experimento correspondiente a una VCO de 1 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> del resto de experimentos de su misma serie.

A continuación, con el objetivo de visualizar la evolución seguida por el volumen de metano generado en cada experimento se ha representado la evolución del rendimiento de metano producido a lo largo del tiempo, agrupados por VCO evaluada (Figura 6.7). El comportamiento observado para diferentes VCO es exactamente igual, por lo que se ha decidido presentar la evolución del rendimiento de metano producido para una sola VCO.

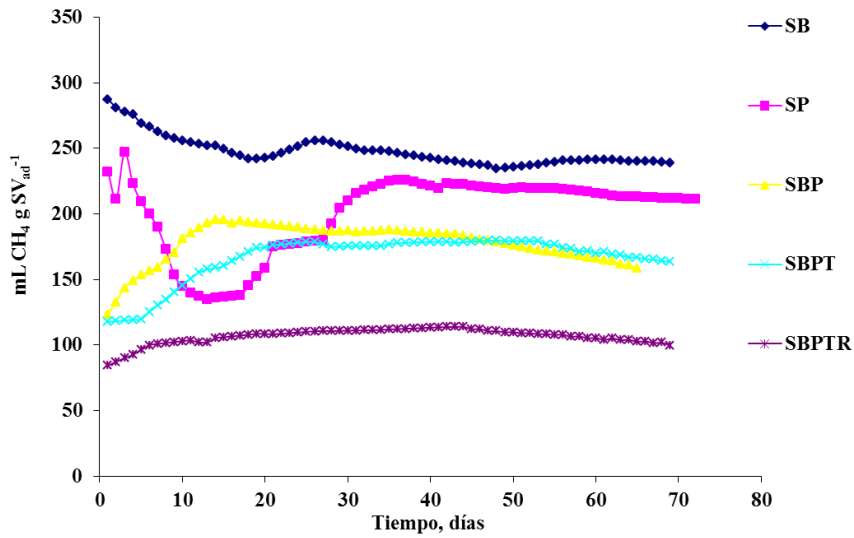


**Figura 6.8.** Evolución de la producción de metano en el proceso de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R en diferentes proporciones en el alimento para una VCO de  $1 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ .

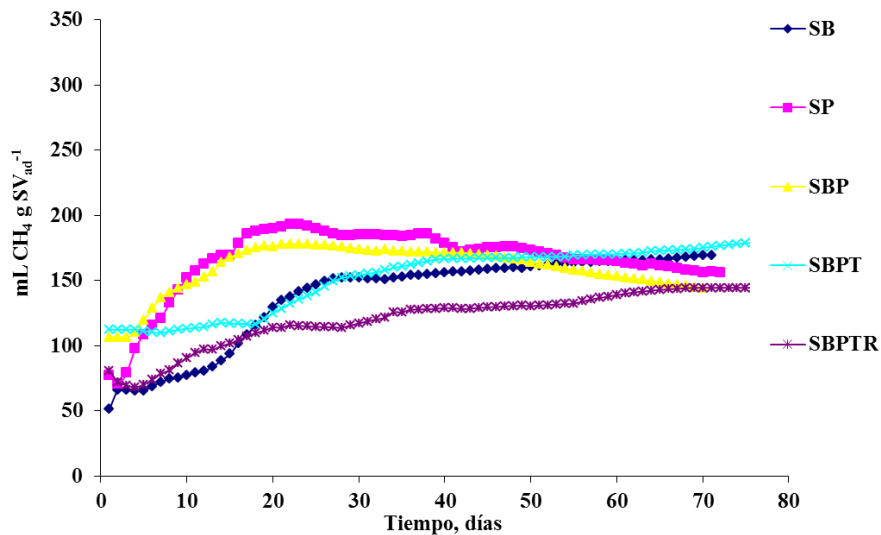
Seguidamente, se muestra la evolución del rendimiento de metano acumulado para cada serie de experimentos evaluada separando cuatro Figuras (Figuras 6.8 a 6.11) para distinguir la VCO estudiada.

Las series de experimentos SBP y SBPTR son aquellas en las que se muestran los valores de rendimientos de metano más bajos a una VCO estudiada de  $1 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  y  $2 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ , consecuencia quizás de la proporción evaluada en el alimento entre los sustratos biomasa y purín con respecto a los sustratos lignocelulósicos, diferente a 1:1 (proporción que sí fue estudiada en las series SP, SB y SBPT). Sin embargo, la serie de experimentos SBPTR al evaluar las VCO  $3 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  y  $4 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ , no se sitúa entre las series de experimentos menos productivas, mientras que la serie SBP continúa siendo aquella que menores rendimientos de metano muestra, principalmente a partir de los 30 días. El comportamiento de la serie SBPTR a medida que aumenta la VCO parece indicar una mejor asimilación de los nutrientes aportados por el alimento compuesto por los cinco sustratos, por parte de los microorganismos metanogénicos. Una mayor cantidad de sustratos en el alimento recibido por los microorganismos

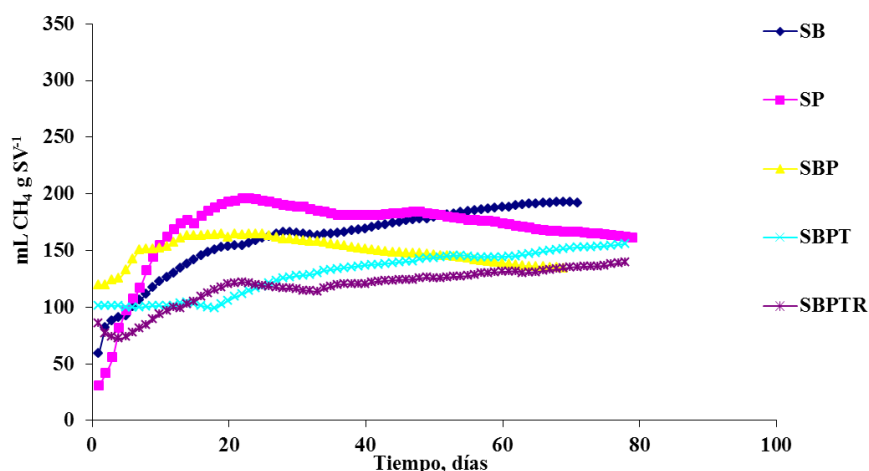
provoca una sinergia que favorece la estabilidad en la producción de metano a lo largo del tiempo. [142].



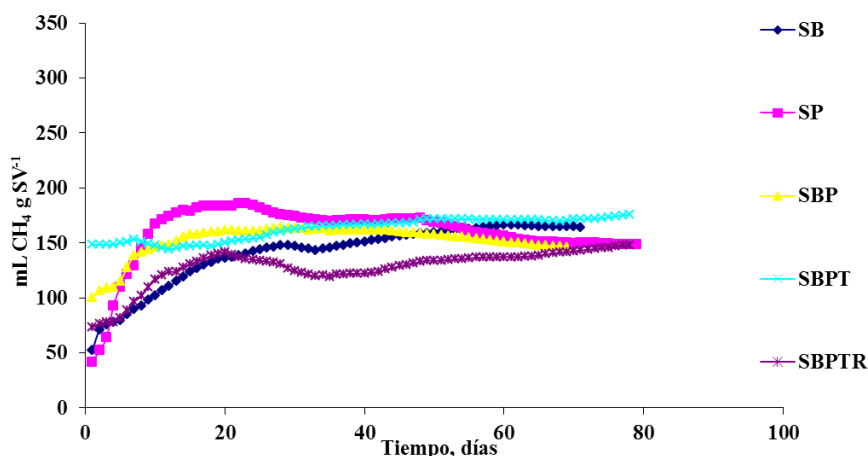
**Figura 6.9.** Evolución del rendimiento de metano acumulado obtenido en el proceso de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R en diferentes proporciones en el alimento para una VCO de  $1 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ .



**Figura 6.10.** Evolución del rendimiento de metano acumulado obtenido en el proceso de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R en diferentes proporciones en el alimento para una VCO de  $2 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ .



**Figura 6.11.** Evolución del rendimiento de metano acumulado obtenido en el proceso de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R en diferentes proporciones en el alimento para una VCO de  $3 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ .



**Figura 6.12.** Evolución del rendimiento de metano acumulado obtenido en el proceso de digestión anaerobia en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio para los sustratos S, T, B, P y R en diferentes proporciones en el alimento para una VCO de  $4 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ .

Analizando las Figuras 6.8 a 6.11 de forma exhaustiva (excepto para VCO de  $1 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) se puede observar una evolución del rendimiento de metano constante o en ligero aumento para las series de experimentos SB, SBPT y SBPTR, lo cual indica un desarrollo adecuado del proceso de digestión anaerobia. En cambio, para las series de experimentos SP y SBP la tendencia mostrada en la evolución del rendimiento de metano es ligeramente descendente. La justificación a este comportamiento ocurrido en

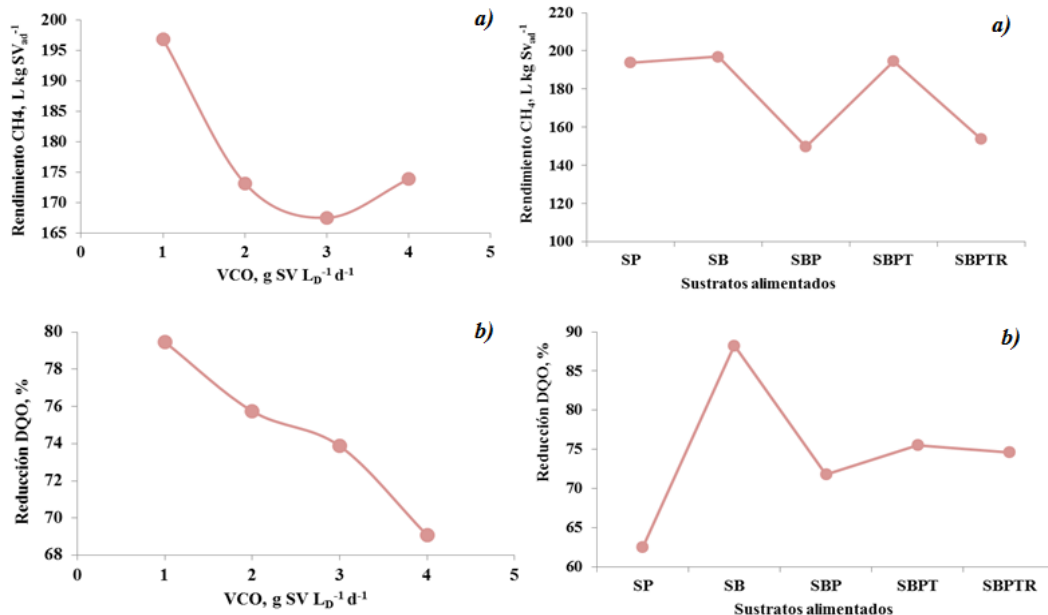
los experimentos SP y SBP quizás se encuentre en la elevada aportación del purín a la mezcla alimento estudiada, sustrato con menor concentración en DQO que el resto de sustratos (Tabla 5.25 del capítulo de resultados). Este hecho conlleva menor cantidad de materia orgánica suministrada a los microorganismos y producciones de metano más bajas.

La evolución del rendimiento de metano para una VCO de  $1 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ , presentada en la Figura 6.8, se ha de comentar aparte. A pesar de observarse un comportamiento parecido en las series de experimentos realizados a los mostrados en las Figuras 6.9 a 6.11 correspondientes a otras VCO estudiadas, la diferencia entre cada una de las series es mucho mayor. Se muestra claramente en la Figura 6.8, como aquellas series de experimentos en las cuales el sustrato S se encuentra en mayor cantidad en el alimento (SB y SP) son las más productivas. Ya se definió al principio de este capítulo (ver Tabla 6.1) como el rendimiento de metano del sustrato S en ensayos discontinuos o batch era el que obtuvo valores más elevados ( $419 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ ) de todos los empleados en el alimento de las series estudiadas. A medida que aumenta la VCO, en las series de experimentos SB y SP la materia orgánica aportada a los microorganismos metanogénicos resulta excesiva, motivo por el cual en las Figuras 6.9 a 6.11 el rendimiento de metano disminuye y se acerca a los valores obtenidos en las series SBP, SBPT y SBPTR.

Si se evalúan las principales interacciones entre los parámetros analizados en este trabajo de Tesis para las cinco series de experimentos en función de la VCO o de la mezcla de sustratos estudiada como alimento (serie de experimentos) se obtienen las Figuras que se presentan seguidamente (Figuras 6.12 a 6.15). Se puede decir que la VCO posee una relación inversa con los parámetros reducción de DQO y SV (Figuras 6.12 y 6.13), comportamiento esperado si se tiene en cuenta que el rendimiento de metano es decreciente a medida que aumenta la VCO hasta llegar a un valor de  $3 \text{ g SV L}_D^{-1}$ , posteriormente se produce un ligero aumento. En la Figura 6.13 además se observa una fuerte interacción directa entre el nitrógeno amoniacal y la VCO, la cual indica que a medida que se incrementa la VCO, la concentración en nitrógeno amoniacal es más elevada. La interacción observada entre el parámetro alcalinidad y la VCO es bastante fuerte y creciente hasta una VCO de  $3 \text{ g SV L}_D^{-1}$ , valor a partir del cual comienza a disminuir la alcalinidad. Este hecho quizás indique el umbral máximo de capacidad tampón del medio, que se sitúa en valores de VCO mayores a  $3 \text{ g SV L}_D^{-1}$ . Los valores

de los parámetros C/N y AGV no muestran interacción con la VCO, además permanecen bastante inalterados al modificarse la misma.

Al analizar las series de experimentos desarrolladas de forma independiente, se observa una fuerte interacción directa en los parámetros alcalinidad y nitrógeno amoniacal, estudiados, y el aumento en el número de sustratos en la mezcla empleada como alimento, excepto en la última serie, SBPTR. Esta observación se debe al predominio en la mezcla SBPTR de sustratos lignocelulósicos, los cuales poseen menor alcalinidad y nitrógeno amoniacal. No se observan interacciones claras en el resto de parámetros, aunque se ha de destacar el comportamiento de la serie SBPT en el parámetro reducción de SV ya que rompe la notable tendencia de dicho parámetro a aumentar a medida que aumenta el número de sustratos en la mezcla alimento. Este acontecimiento anómalo coincide con los picos de los parámetros inhibidores del proceso de digestión anaerobia, nitrógeno amoniacal y AGV en la serie SBPT. El rendimiento de metano se mantiene en valores muy parecidos para todas las series evaluadas, al igual que el ratio C/N, con la salvedad de poseer un valor más elevado de ratio C/N en la serie SP, quizás como consecuencia no del elevado contenido en C de la mezcla sino del bajo contenido en N.



**Figura 6.13.** Principales efectos e interacciones de diferentes mezclas de sustratos en el alimento y a diferentes VCO para los parámetros rendimiento de metano (a) y reducción DQO (b).



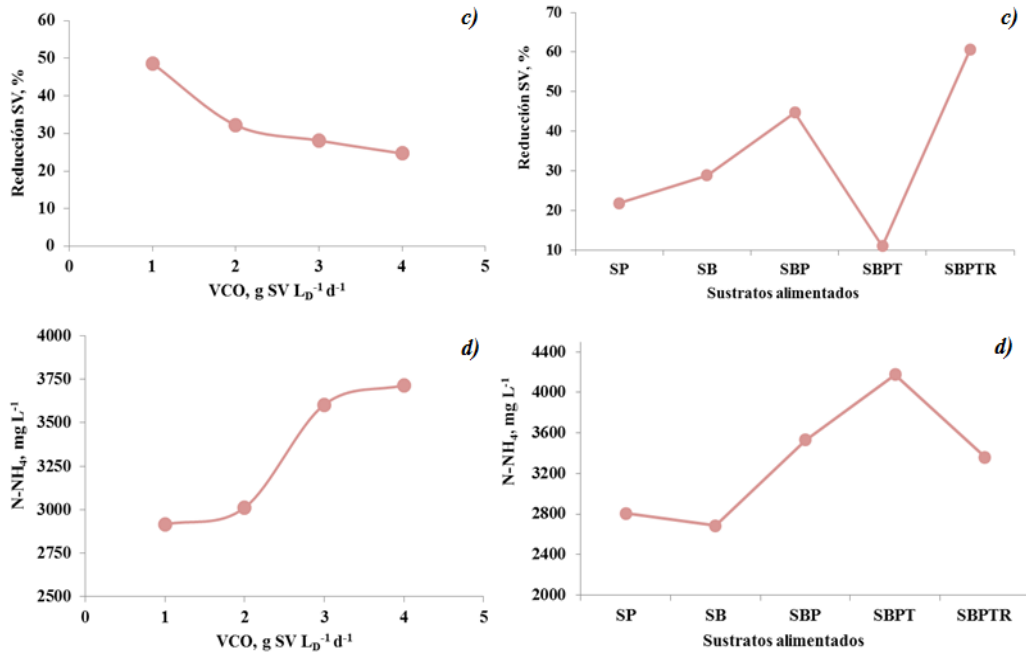


Figura 6.14. Principales efectos e interacciones de diferentes mezclas de sustratos en el alimento y a diferentes VCO para los parámetros reducción SV (c) y nitrógeno amoniacal (d).

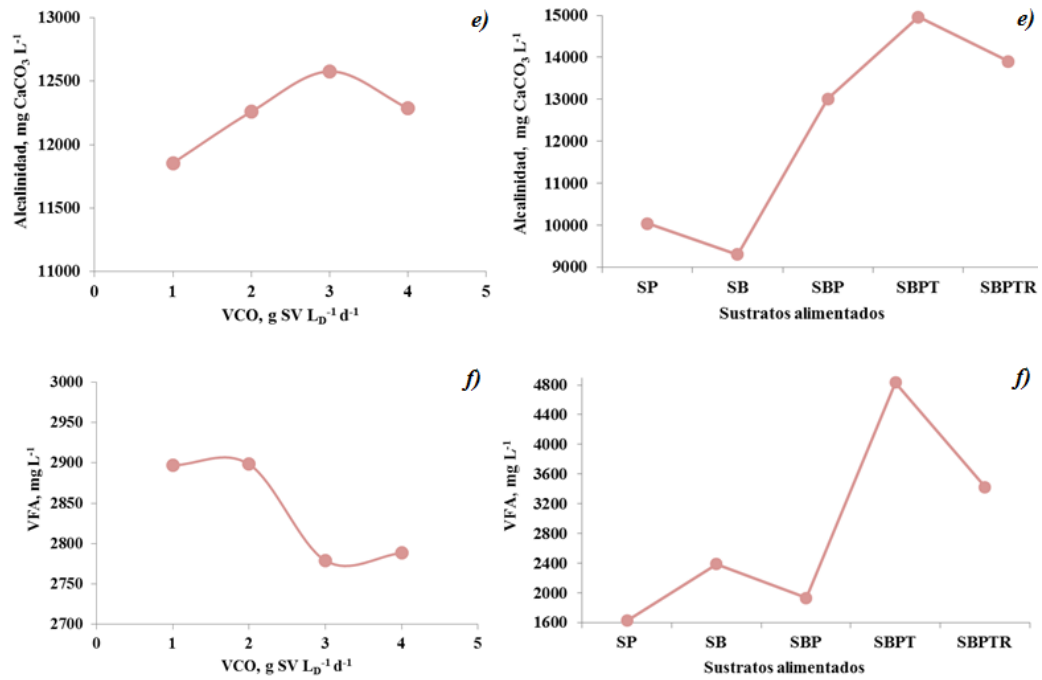
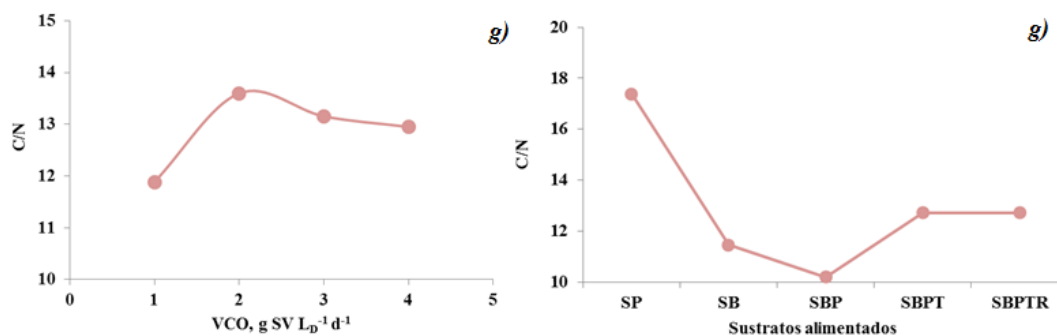


Figura 6.15. Principales efectos e interacciones de diferentes mezclas de sustratos en el alimento y a diferentes VCO para los parámetros alcalinidad (e) y AGV (f).



**Figura 6.16.** Principales efectos e interacciones de diferentes mezclas de sustratos en el alimento y a diferentes VCO para el parámetro ratio C/N (g).

En consonancia con el análisis de las interacciones existentes entre cada uno de los parámetros estudiados y la VCO o la mezcla de sustratos alimentados al digester, se han efectuado correlaciones entre dichos parámetros para corroborar los principales efectos mencionados. Las Tablas 6.6 y 6.7 muestran aquellos valores de regresión lineal obtenidos entre parámetros evaluándolos a diferentes VCO y para cada serie de experimentos desarrollado.

**Tabla 6.6.** Valores de correlación lineal entre parámetros analizados para diferentes VCO (valores en negrita indican correlaciones de magnitud moderada a alta entre variables)

	A	B	C	D	E	F
A	1					
B	<b>0,8241</b>	1				
C	0,3744	<b>-0,7313</b>	1			
D	0,4112	0,5625	0,5575	1		
E	<b>-0,8012</b>	0,6910	0,5329	<b>-0,9605</b>	1	
F	0,4803	<b>0,8657</b>	<b>-0,9175</b>	0,4112	0,4613	1

A: Reducción DQO, %, B: Reducción SV, %, C: Alcalinidad, mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, D: AGV, mg L<sup>-1</sup>, E: N-NH<sub>4</sub>, mg L<sup>-1</sup>, F: Rendimiento metano, L kg SV<sup>-1</sup>.

**Tabla 6.7.** Valores de correlación lineal entre parámetros analizados para diferentes series de experimentos (valores en negrita indican correlaciones de magnitud moderada a alta entre variables)

	A	B	C	D	E	F
A	1					
B	0,0014	1				
C	0,0208	0,0213	1			
D	0,0709	0,0509	0,5693	1		
E	0,0101	0,0270	<b>0,8814</b>	0,6093	1	
F	0,0325	<b>0,7592</b>	0,0510	0,2096	0,0179	1

A: Reducción DQO, %, B: Reducción SV, %, C: Alcalinidad, mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, D: AGV, mg L<sup>-1</sup>, E: N-NH<sub>4</sub>, mg L<sup>-1</sup>, F: Rendimiento metano, L kg SV<sup>-1</sup>.

De acuerdo a los valores de los coeficientes de regresión lineal mostrados en las Tablas 6.6 y 6.7, se ha de destacar la existencia de una fuerte relación directa entre los parámetros rendimiento de metano y reducción de SV, tanto si se distingue entre diferentes VCO o diferentes mezclas de sustratos alimentados al biodigestor. También existe una relación directa entre las reducciones de DQO y SV para las VCO evaluadas en este trabajo de Tesis. La fuerte relación mostrada en la Tabla 6.7 entre los parámetros alcalinidad y nitrógeno amoniacal apunta al empleo de sustratos con mayores concentraciones en ambos parámetros, como son el purín y la biomasa microalgal, a mayor contenido en los mismos, ambos parámetros aumentan.

Por otro lado, la fuerte relación inversa que se detecta entre los parámetros rendimiento de metano y alcalinidad para diferentes VCO, probablemente se deba a que a mayores rendimientos de metano (conseguidos con sustratos más carbonados, lignocelulósicos) la alcalinidad va disminuyendo como consecuencia de la ausencia de dicho carácter tampón por parte de los sustratos lignocelulósicos. Este razonamiento explica además la interacción inversa obtenida entre la alcalinidad y la reducción de SV (directamente relacionada con el rendimiento de metano).

#### *6.5. Discusión de resultados 5: Ensayos en régimen semi-continuo desarrollados en laboratorio y planta piloto para estudiar la influencia del aceite de colza*

Experimentos desarrollados en laboratorio en régimen semi-continuo han sido reproducidos en una planta piloto para llevar a cabo una comparativa en los rendimientos de metano obtenidos en diferentes tamaños de biodigestores. Asimismo, se ha introducido un nuevo sustrato a la mezcla alimentada al reactor de origen oleico, aceite de colza. En la Tabla 6.8 se detallan las condiciones de los experimentos evaluados en este capítulo, así como los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Los experimentos llevados a cabo en planta piloto se han dividido en dos ensayos (STP) y tres ensayos (STPA) como consecuencia de la VCO estudiada en cada momento.

**Tabla 6.8.** Parámetros evaluados en experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo desarrollados en laboratorio y planta piloto para los sustratos S, T, P y A estudiados, evaluando la influencia del sustrato A en la producción.

Experimento (VCO)	Proporción Sustratos (P-S-T-A)	Variable		t, días	[CH <sub>4</sub> ] <sub>media</sub> , %
		X <sub>1</sub> , mL (L*) CH <sub>4</sub> L <sub>D</sub> <sup>-1</sup>	X <sub>2</sub> , mL (L*) CH <sub>4</sub> g SV <sub>ad</sub> <sup>-1</sup>		
STP1 (laboratorio, 1,17)	69-16-15	153,27	131,19	66	63,68
STP2 (laboratorio, 1,05)	46-33-21	606,42	580,28	55	56,20
STP3 (piloto, 0,88)	74-13-13	296,33	336,79	24	70,42
STP4 (piloto, 1,15)	59-21-20	485,96	422,13	55	58,02
STPA1 (laboratorio, 0,68)	38-34-38-10	471,33	695,56	38	59,00
STPA2 (piloto, 1,08)	27-33-25-25	695,12	643,61	29	62,79
STPA3 (piloto, 1,31)	18-26-25-21	794,96	609,04	26	68,62
STPA4 (piloto, 1,42)	46-17-17-20	770,18	542,40	24	68,96
P1 (laboratorio, 0,96)	-	124,77	130,25	65	54,25
P2 (laboratorio, 1,47)	-	197,76	134,50	53	57,34

\* En el caso de experimentos desarrollados en planta piloto el volumen de metano se expresa en litros.

X<sub>1</sub>: volumen de metano medio diario obtenido por litro de biodigestor.

X<sub>2</sub>: volumen de metano medio diario obtenido por litro de biodigestor y gramo de SV adicionado (rendimiento de metano).

Al comparar los rendimientos de metano obtenidos en los experimentos mostrados con algunos trabajos científicos, se comprueba que son mejorados de forma notable. Dareioti y Kornaros [88] investigaron la influencia del tiempo de retención hidráulica en la producción de metano empleando un reactor con sistema de dos etapas y un alimento compuesto por sorgo ensilado, suero de queso y purín líquido de vaca, el rendimiento de metano obtenido fue de 326 mL CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> y 310 mL CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> para unas VCO de 1,9 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> y 2,9 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente. Experimentos desarrollados con aceite de colza realizados por Kleyböcker y col. [76] para monitorear diversos parámetros cuando se emplea sobrecarga de dicho sustrato obtuvieron resultados de rendimientos de metano situados en el rango entre 580-810 mL CH<sub>4</sub> d<sup>-1</sup> L<sub>D</sub><sup>-1</sup> g SV<sup>-1</sup> evaluando un rango de VCO entre 1,2-8,7 g SV L<sub>D</sub><sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. En este trabajo de Tesis se han estudiado VCO menores a las investigadas por otros autores, quizás ese motivo sea el responsable de obtener rendimientos de metano mayores que los presentados por otros autores.

Las ideas que se pueden extraer de los resultados incluidos en la Tabla 6.8 de este capítulo son múltiples. Si se comparan los resultados obtenidos en los experimentos

STP1 y STP3 desarrollados en laboratorio y planta piloto, respectivamente, pero cuyas proporciones en los sustratos empleados en la mezcla alimentada (sorgo-triticale-purín) y la VCO son muy parecidas, se puede apreciar como los rendimientos de metano ( $X_2$ ) aumentan al cambiar el tamaño del biodigestor de laboratorio a planta piloto, en concreto 2,5 veces.

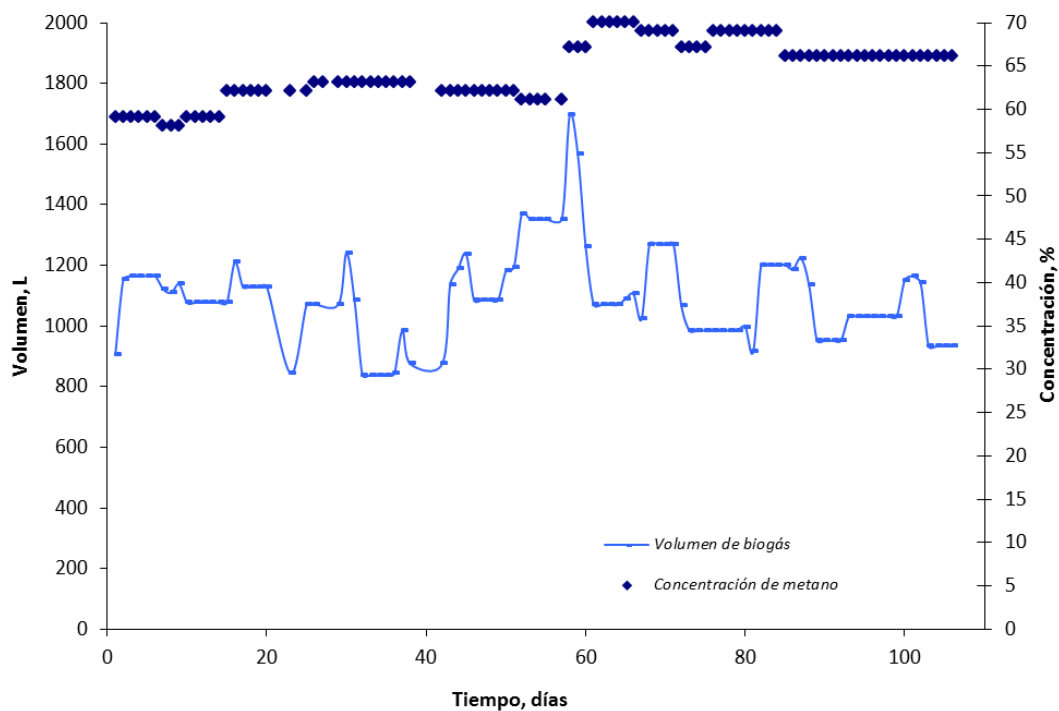
En cuanto a los rendimientos pertenecientes a los experimentos STP2 y STP4 (pareja de experimentos con similares proporciones en la mezcla alimentada y parecidas VCO entre sí) se puede apreciar un incremento en los mismos si se coteja con los resultados correspondientes a los experimentos STP1 y STP3. Esto quiere decir que al aumentar el contenido en sustratos con gran aporte de carbono (sorgo y triticale), disminuyendo por tanto el contenido en purín en la mezcla alimentada, se consigue incrementar el rendimiento en metano, como ya se ha comentado en anteriores capítulos y es mencionado por diversos autores [92-95, 98]. Sin embargo, el experimento STP4 desarrollado en planta piloto no muestra una producción de metano mayor que su experimento similar en laboratorio, STP2. Esto podría indicar que la proporción más adecuada de sustrato purín con respecto al resto de sustratos debe encontrarse lo más cercana posible al 50% para optimizar los rendimientos de metano.

El experimento STPA 1 posee una proporción de purín en la mezcla alimentada al reactor por debajo del 50%, a pesar de ello el rendimiento de metano obtenido es muy elevado,  $695,56 \text{ mL CH}_4 \text{ g SV}^{-1}$ , probablemente el nuevo sustrato introducido en la mezcla alimentada (aceite de colza) mejore notablemente las producciones de metano. Kabouris y col., [149] han llevado a cabo experimentos en régimen semi-continuo realizando una comparativa entre experimentos alimentados con lodos activados frente a experimentos que se alimentaban con una mezcla de dichos lodos y grasas y aceites usados (52 % lodos- 48 % grasas y aceites usados). El resultado obtenido fue similar al observado en este trabajo, 2,95 veces incrementados los rendimientos obtenidos empleando aceites y grasas usados, con unos valores de rendimientos de metano de  $449 \text{ mL CH}_4 \text{ g SV}^{-1}$  frente a  $152 \text{ mL CH}_4 \text{ g SV}^{-1}$  obtenido para experimentos alimentados con lodos. La VCO empleada por los autores mencionados anteriormente son de  $2,45 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$  y  $4,35 \text{ g SV L}_D^{-1} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente, para los experimentos sin aceites y grasas en la mezcla alimentada y con ellas. En este caso las VCO estudiadas son mayores que en todas las experiencias mostradas en la Tabla 6.8, y además los rendimientos obtenidos no superan el valor mencionado en dicho trabajo.

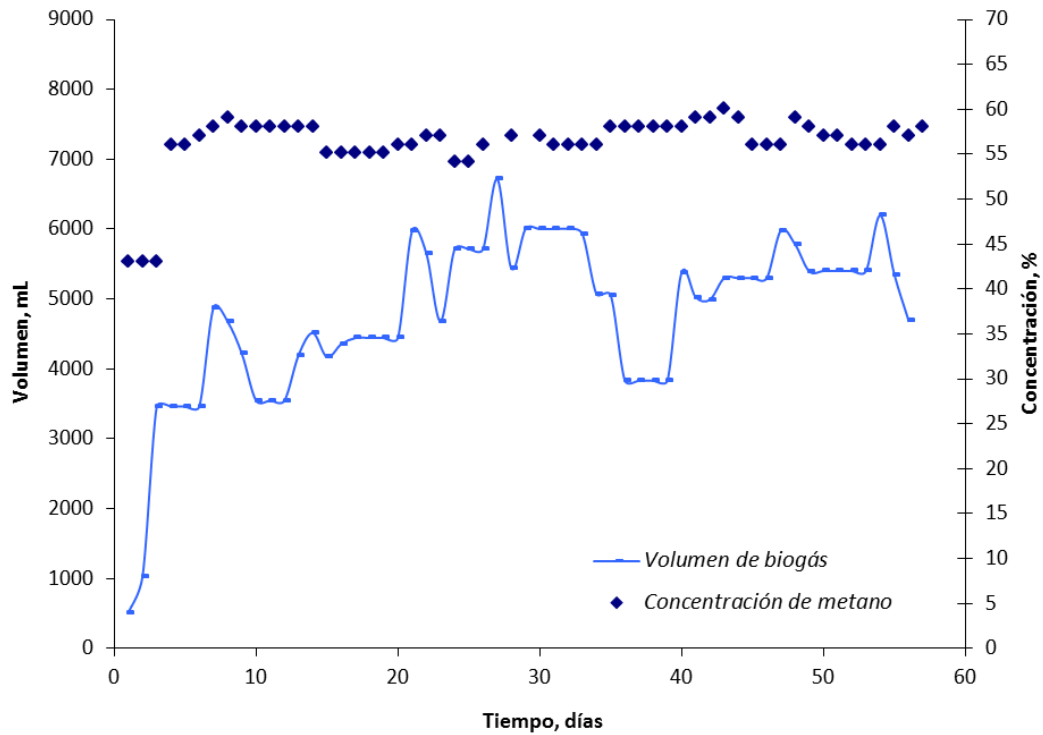
Se puede apreciar como un aumento en la VCO empleada en los experimentos desarrollados con aceite de colza supone un aumento en los valores de rendimiento de metano, esto es disminución en los volúmenes obtenidos en biogás.

Finalmente, tal y como ha evaluado Kabouris y col., se han de cotejar aquellos experimentos con similares condiciones desarrollados con aceite de colza y sin ella. Se puede observar como la influencia del nuevo sustrato en los rendimientos de metano obtenidos es positiva, se obtiene un incremento del 20% entre los experimentos STP2 y STPA1 desarrollados en laboratorio. En lo relativo a los experimentos llevados a cabo en planta piloto se obtiene un incremento del 30% en los rendimientos de metano correspondientes a los experimentos STP4 y STPA4.

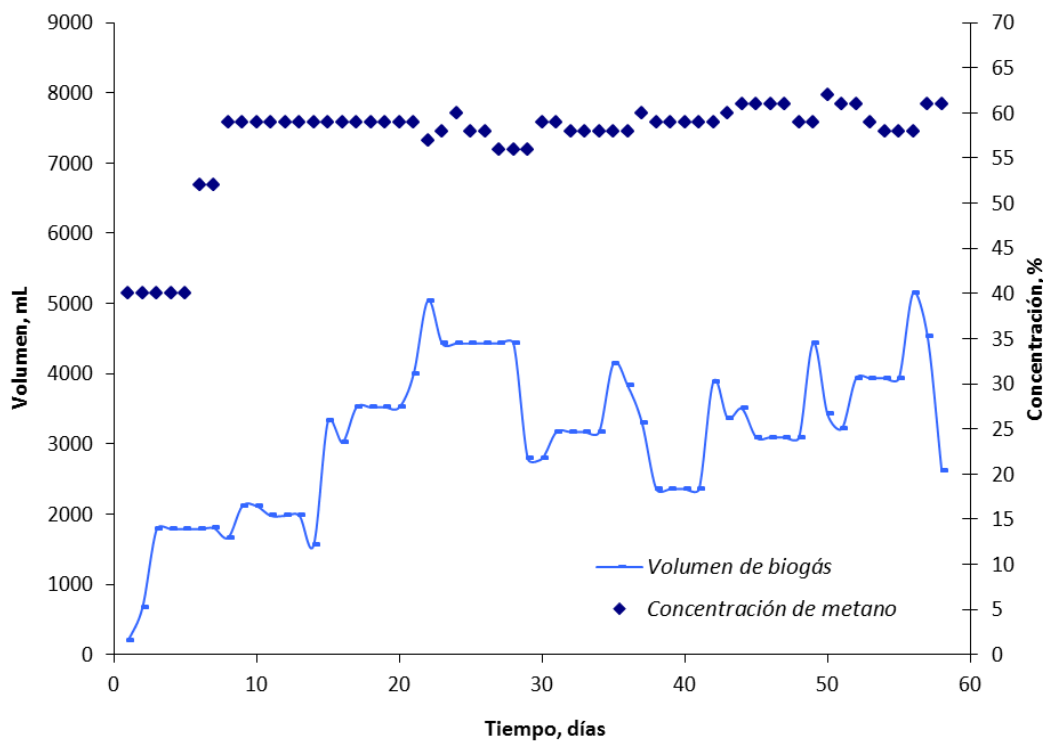
Seguidamente se ilustra la evolución experimentada por las variables volumen de biogás y concentración de metano en dicho biogás en las Figuras 6.16 a 6.20.



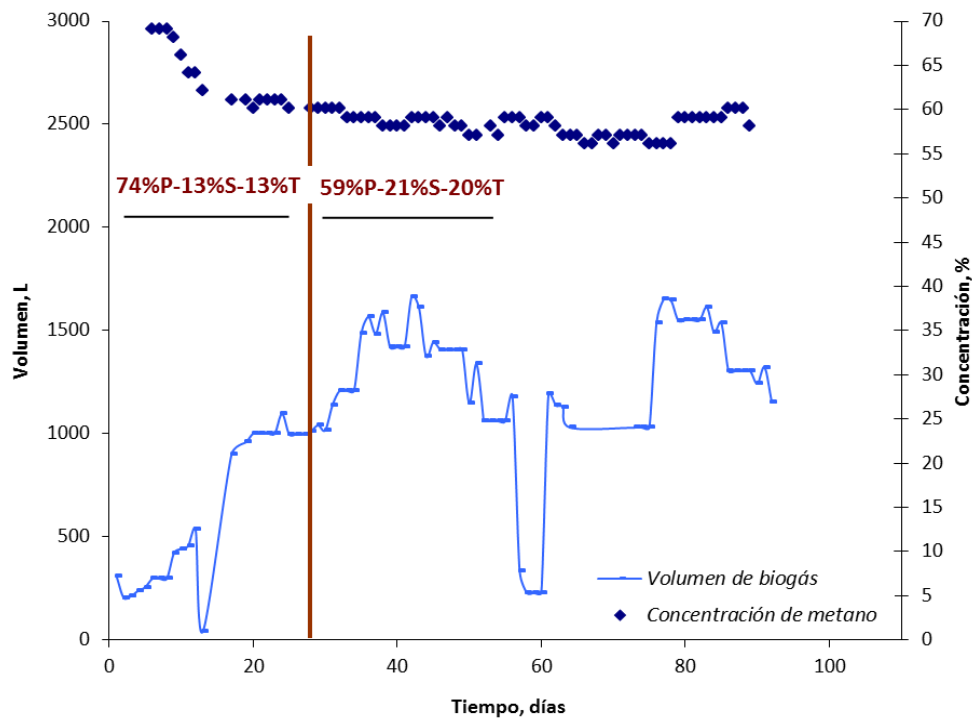
**Figura 6.17.** Evolución del volumen de biogás y la concentración de metano obtenidos por el experimento STP1.



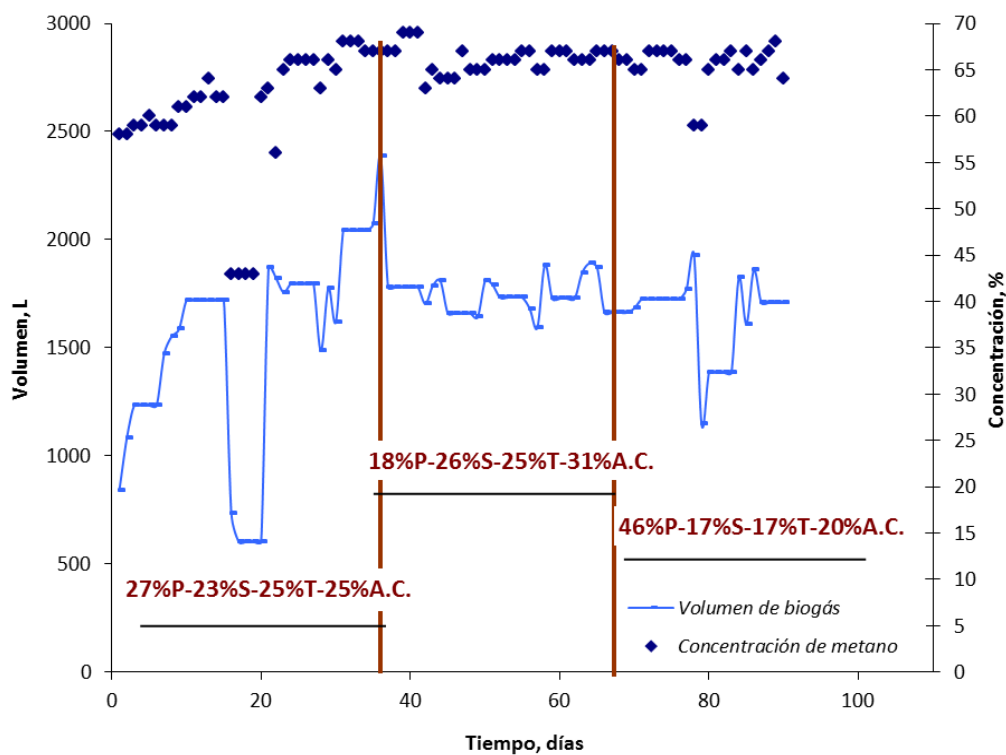
**Figura 6.18.** Evolución del volumen de biogás y la concentración de metano obtenidos por el experimento STP2.



**Figura 6.19.** Evolución del volumen de biogás y la concentración de metano obtenidos por el experimento STPA1.



**Figura 6.20.** Evolución del volumen de biogás y la concentración de metano obtenidos por la experiencia desarrollada en planta piloto sin aceite de colza dividida en los experimentos STP3 y STP4.



**Figura 6.21.** Evolución del volumen de biogás y la concentración de metano obtenidos por la experiencia desarrollada en planta piloto con aceite de colza dividida en los experimentos STPA2, STPA3 y STPA4.



Con el objetivo de estudiar la influencia del aceite de colza en los diferentes experimentos desarrollados, a continuación, se lleva a cabo un estudio de las variables más representativas en el proceso de co-digestión anaerobia para aquellos experimentos con similares condiciones en la mezcla alimentada. En este caso se han seleccionado como parejas de experimentos sin y con aceite de colza, STP2 con STPA1 a nivel de laboratorio, y STP3-4 con STPA2-3-4 a nivel de planta piloto. Esta última pareja abarca todas las experiencias a nivel de planta piloto, aunque se explicarán por partes. Para comenzar se representan gráficamente los rendimientos de metano acumulado para las parejas de experimentos mencionadas con anterioridad en las Figuras 6.21 y 6.22.

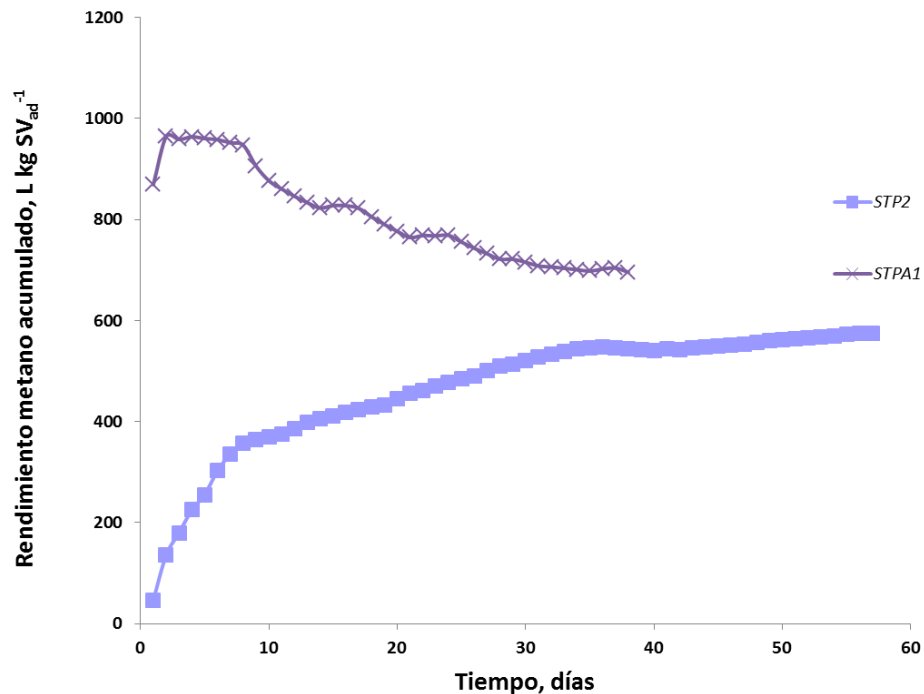
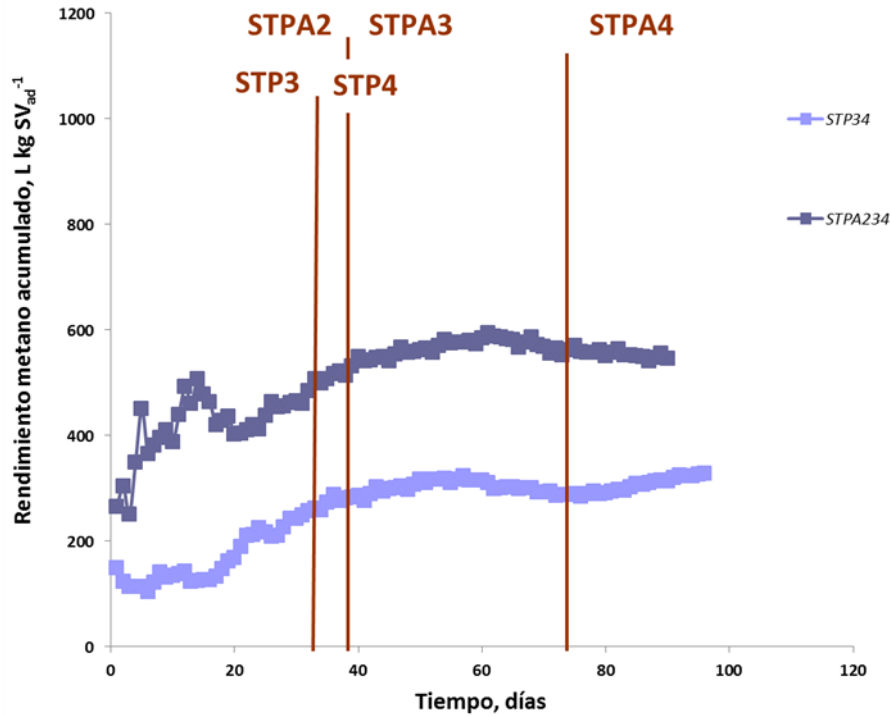


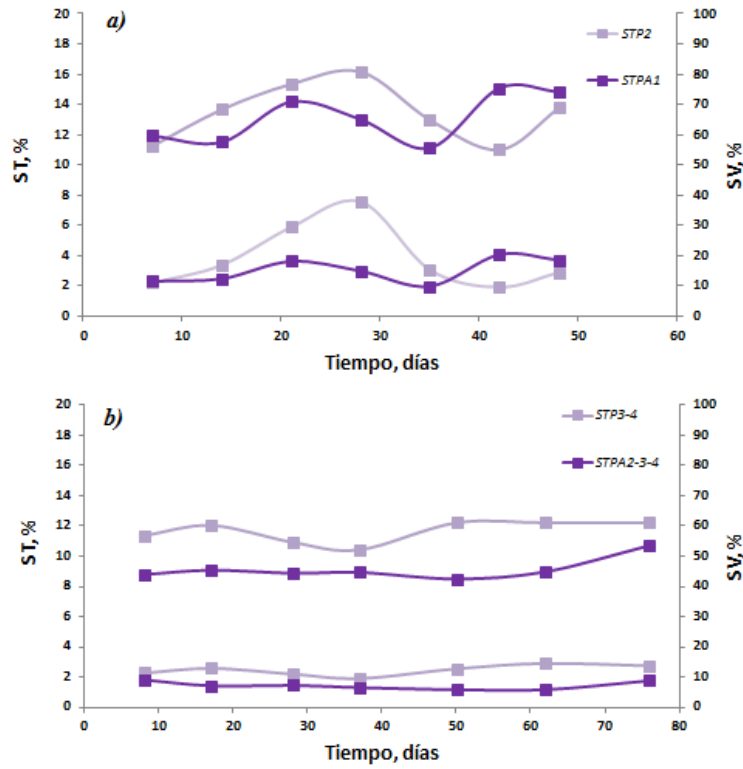
Figura 6.22. Rendimiento de metano acumulado a lo largo de los experimentos desarrollados en laboratorio STP2 y STPA1.



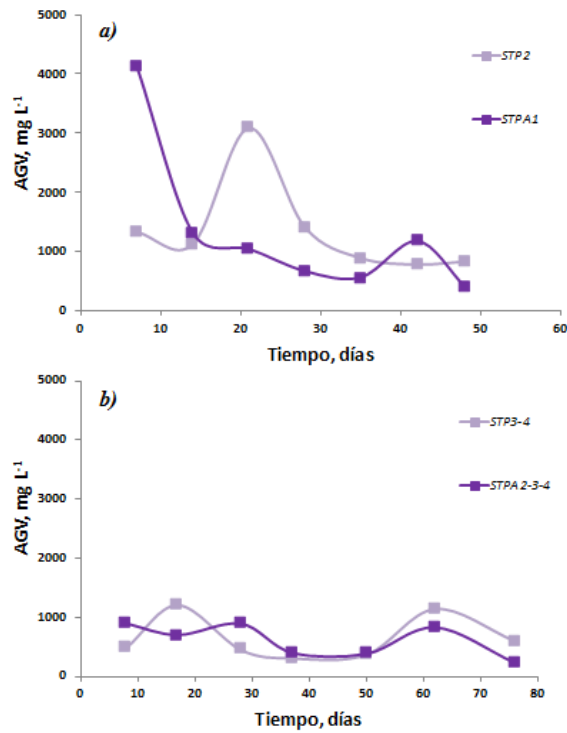
**Figura 6.23.** Rendimiento de metano acumulado a lo largo de los experimentos desarrollados en planta piloto STP3-4 y STPA2-3-4.

Se observa claramente como los experimentos llevados a cabo con aceite de colza, tanto a nivel de laboratorio como de planta piloto, son mucho más productivos en la generación de metano que aquellos que no contienen dicho sustrato.

Seguidamente, se representa en diferentes Figuras (6.23 a 6.26) la evolución de los parámetros ST, SV, nitrógeno amoniacal, AGV, pH y alcalinidad del medio a lo largo del proceso de co-digestión anaerobia, con el objetivo de controlar el mismo a lo largo del tiempo y poder detectar algún valor anómalo que repercuta en la producción de biogás o metano.

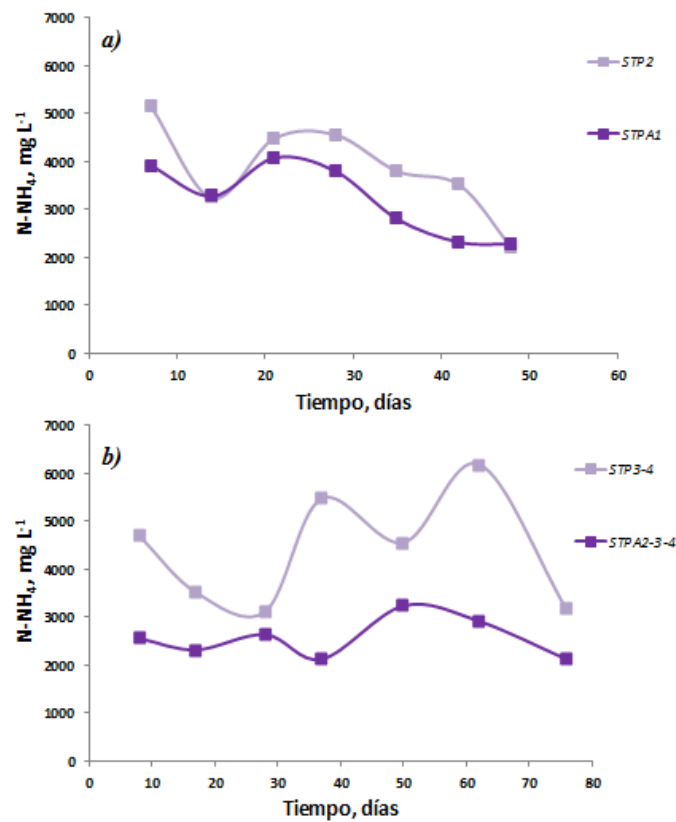


**Figura 6.24.** Evolución de los parámetros ST (valores abajo) y SV (valores arriba) a lo largo del tiempo para los experimentos desarrollados en laboratorio STP2 y STPA1 (a), y para los experimentos desarrollados en planta piloto STP3-4 y STPA2-3-4 (b).



**Figura 6.25.** Evolución del parámetro AGV a lo largo del tiempo para los experimentos desarrollados en laboratorio STP2 y STPA1 (a), y para los experimentos desarrollados en planta piloto STP3-4 y STPA2-3-4 (b).

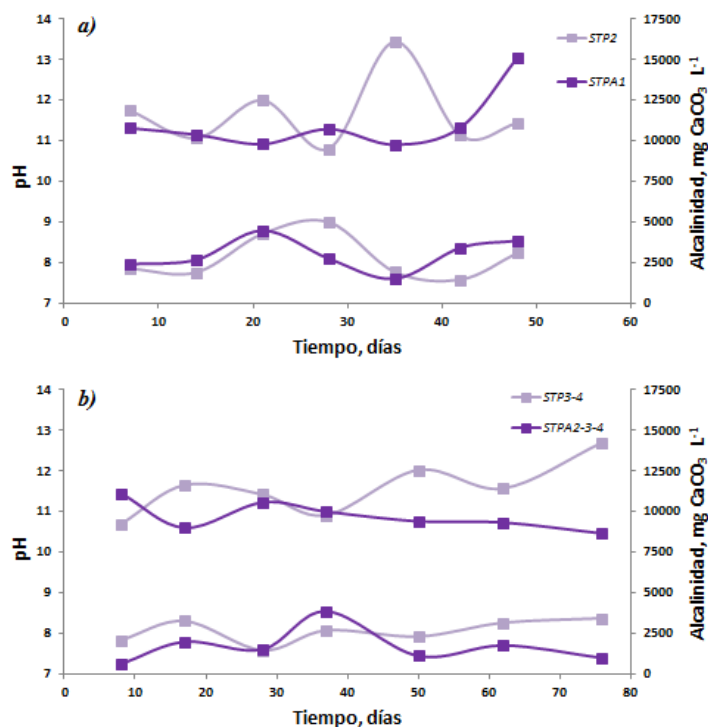
La tendencia observada en los parámetros ST, SV y AGV a lo largo del proceso no muestra diferencias entre experimentos desarrollados en laboratorio y planta piloto, a la misma vez que tampoco se observan diferentes comportamientos en dichos parámetros para aquellos experimentos en régimen semi-continuo alimentados con mezclas de sustratos que contienen aceite de colza y sin ella. Por norma general, los valores obtenidos en los análisis de los parámetros representados en las Figuras 6.23 y 6.24 permanecen sin variaciones bruscas.



**Figura 6.26.** Evolución del parámetro N-NH<sub>4</sub> a lo largo del tiempo para los experimentos desarrollados en laboratorio STP2 y STPA1 (a), y para los experimentos desarrollados en planta piloto STP3-4 y STPA2-3-4 (b).

El contenido en nitrógeno amoniacal evaluado a lo largo del proceso muestra valores más elevados en el caso del experimento STP3-4 (sin aceite de colza en la mezcla alimentada) desarrollado en planta piloto que el experimento STPA2-3-4 (con aceite de colza en la mezcla alimentada). Probablemente la mayor proporción de purín en el alimento en el experimento desarrollado en planta piloto sin aceite de colza sea la

responsable del comportamiento observado. Sin embargo, los experimentos desarrollados en laboratorio muestran contenidos en nitrógeno amoniacal muy parecidos entre sí a lo largo del proceso. De igual modo, la tendencia observada en los parámetros pH y alcalinidad del medio no presenta diferencias entre aquellos experimentos desarrollados en planta piloto y laboratorio, ni entre experimentos alimentados con una mezcla cuya composición posee aceite de colza o no la posee.



**Figura 6.27.** Evolución de los parámetros pH (valores abajo) y alcalinidad (valores arriba) del medio a lo largo del tiempo para los experimentos desarrollados en laboratorio STP2 y STPA1 (a), y para los experimentos desarrollados en planta piloto STP3-4 y STPA2-3-4 (b).

Para realizar un análisis más exhaustivo de comparación entre las medias obtenidas para cada uno de los parámetros representados gráficamente se lleva a cabo un análisis ANOVA de las variables alcalinidad, AGV y nitrógeno amoniacal correspondientes a los experimentos STP2, STPA1, STP3-4 y STPA2-3-4. La Tabla 6.9 recoge los resultados obtenidos del tratamiento estadístico de las variables mencionadas anteriormente.

**Tabla 6.9.** Análisis ANOVA de los parámetros alcalinidad, N-NH<sub>4</sub> y AGV para los experimentos STP2, STPA1, STP3-4 y STPA2-3-4.

Parámetro	Valores medios				Diferencias entre valores medios
	Experimento	STP2	STPA1	STP3-4	
Alcalinidad, mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	11659	11061	11421	9727	No significativa
N-NH <sub>4</sub> , mgL <sup>-1</sup>	3851	3211	4391	2561	Significativa
AGV, mgL <sup>-1</sup>	1150	1329	655	625	No significativa
Ratio AGV/alcalinidad	0,10	0,12	0,06	0,06	

Se puede verificar la diferencia observada entre los valores obtenidos en el contenido en nitrógeno amoniacal para los distintos experimentos sometidos a tratamiento estadístico (Tabla 6.9). El experimento STP3-4 no llega a superar los valores umbrales de concentración de nitrógeno amoniacal marcado por algunos autores [53], y además posee un ratio AGV/alcalinidad por debajo de 0,40, condición que asegura que el sistema se encuentra tamponado según Gómez y col. [150].

Con el objetivo de cumplir con los criterios que marca la economía verde y circular, se lleva a cabo un estudio de caracterización detallado de los digestatos obtenidos en los experimentos desarrollados en este estudio (Tabla 6.10).

**Tabla 6.10.** Caracterización del digestato obtenido en los experimentos desarrollados en laboratorio y planta piloto, y empleando aceite de colza en el alimento y sin emplearla.

Parámetro	STP1	STP2	STPA1	STP3-4	STPA2-3-4
ST, %	1,49	3,54	3,69	1,91	1,45
SV, %	50,23	78,77	74,15	55,88	54,44
DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	37000	37000	35000	15000	29000
AGV, mg L <sup>-1</sup>	691	588	402	500	1404
Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	10012	11306	15122	9939	9976
N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	2280	2360	2280	2480	2320
pH	8,30	8,37	8,54	7,19	8,33
Potencial redox, mV	-416	-364	-357	-402	-386
Ratio C/N	2,60/0,25	1,58/0,25	1,60/0,23	1,02/0,24	3,26/0,21
Ca, ppm	439±2	1296±9	415±12	550±11	445±5
Fe, ppm	28±1	115±2	51±2	72±2	28±4
K, ppm	2707±22	1743±4	7409±25	847±8	2807±51
Mg, ppm	143±1	694±1	259±2	417±4	269±1
Na, ppm	761±15	1259±25	1536±22	1899±17	802±8
P, ppm	386±5	477±22	158±14	280±16	359±11
Cd, ppm	<2	<2	<2	6±1	<2
Cr, ppm	<5	<5	<5	<5	<5
Cu, ppm	6,9±0,3	104±2	54±1	223±3	6,4±0,1
Ni, ppm	<5	<5	<5	9±4	<5
Al, ppm	22±1	72±3	37±5	24±1	19±1

El ratio C/N y todos los elementos han sido medidos sobre materia húmeda

El objetivo perseguido al llevar a cabo una caracterización del digestato procedente de los experimentos de co-digestión anaerobia es su evaluación como posible fertilizante agrícola. Los principales parámetros de calidad de un fertilizante comercial son el contenido en materia orgánica, en nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Los contenidos en P y K son comúnmente expresados como óxidos,  $P_2O_5$  y  $K_2O$  [151]. Procediendo a las conversiones oportunas, los valores de  $K_2O$  oscilan entre 0,10-0,89 %, los de N entre 0,21-0,25 % y los valores de  $P_2O_5$  se sitúan en un rango que va desde 0,04% a 0,09 %. Todos los resultados obtenidos en los óxidos de P y K son comparables a contenidos obtenidos por otros autores, Reyes [152] presenta en su trabajo unos valores de 0,50 % para  $K_2O$  y N, y 0,30 % para  $P_2O_5$ , en muestras de purines de cerdo digeridos con un 75 % de humedad. Bernal y col. [150] obtuvieron contenidos en N de 0,40 % para purín de cerdo y 0,15 % para diversos sustratos sólidos orgánicos, además los valores publicados de  $K_2O$  y  $P_2O_5$  fueron de 0,42 % y 0,18 %, respectivamente, para el sustrato purín de cerdo. Valores de 1,21 % y 0,01 % para los óxidos de K y P, respectivamente, consiguieron los autores Bueno y col. [153]. Como consecuencia de ello, el digestato puede ser considerado como un residuo que posee unas características muy variables dependiendo del origen del sustrato digerido.

Una forma práctica de calcular el aporte en nutrientes que puede proporcionar un biofertilizante procedente del digestato generado en los experimentos en planta piloto sería el siguiente:

1. Se considera el experimento STPA2-3-4 por tratarse de aquel que mayores rendimientos obtiene en planta piloto. Esto quiere decir que un volumen de 1500 L de digestato será generado en 28 días (TRH).
2. La dosis a aportar de digestato corresponde a  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , lo cual quiere decir que en 28 días se podrá abonar una parcela de  $500 \text{ m}^2$ .
3. La composición del biofertilizante con el que se abona la parcela de  $500 \text{ m}^2$  será de 0,21 % en N (3,15 kg N), de 0,08 % en  $P_2O_5$  (1,2 kg  $P_2O_5$ ) y de 0,34 % en  $K_2O$  (5,1 kg  $K_2O$ ) considerando que todos los nutrientes estuvieran disponibles para la planta, pero esto no sucede. Tal y como se indica en la Tabla 6.11 se detalla el procedimiento de cálculo comentado anteriormente, y se tienen en cuenta una serie de requisitos.

**Tabla 6.11.** Fases en el procedimiento de cálculo de la dosis y composición de digestato (procedente del experimento STPA2-3-4) aplicado a un ensayo de cereal de primavera determinado [153].

<b>FASES DE CÁLCULO</b>	<b>N</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
1. <i>Nutrientes totales en digestato STPA2-3-4 (%)</i>	0,21	0,08	0,34
2. <i>Nutrientes disponibles en digestato STPA2-3-4 (%)*</i>	0,12	0,05	0,31
3. <i>Nutrientes aportados por el digestato equivalentes a fertilizante comercial (kg ha<sup>-1</sup>)**</i>	1,80	0,75	4,70

\*Disponibilidad de nutrientes para la planta 55 %, 64 % y 92 % [154]

\*\*30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> [154], en experimento STPA2-3-4 se dispone de 1,5 m<sup>3</sup> para 0,05 ha

Por otro lado, según indica la Tabla 6.12 de clasificación de digestatos para su uso como biofertilizante de acuerdo al Real Decreto 999/2017, se puede decir que los digestatos procedentes de experimentos desarrollados STP1, STPA1 y STPA2-3-4 se clasifican como fertilizantes de tipo A, mientras que el digestato procedente del experimento STP2 pertenece a una clase de fertilizante B.

**Tabla 6.12.** Clasificación de digestatos obtenidos basada en la concentración de metales pesados según el RD 999/2017 [155].

	<b>Metales pesados (ppm)</b>				<b>Clasificación fertilizantes</b>		
	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>RD 999/2017</b>	3	300	400	100			X
	2	250	300	90		X	
	0.7	70	70	25	X		
<b>Digestatos de experimentos</b>							
<i>STP1</i>	<2	<5	6,9	<5		<b>A</b>	
<i>STP2</i>	<2	<5	104	<5		<b>B</b>	
<i>STP3-4</i>	6	<5	223	9			<b>No clasificado</b>
<i>STPA1</i>	<2	<5	54	<5		<b>A</b>	
<i>STPA2-3-4</i>	<2	<5	6,4	<5		<b>A</b>	

Sin embargo, el digestato resultante del experimento STP3-4 llevado a cabo en planta piloto no se encuentra dentro de la clasificación establecida por el RD anteriormente mencionado, probablemente el purín empleado en este momento poseía unos valores de Cd por encima de lo permitido. La variabilidad en la clasificación establecida en la Tabla 6.12, no es fruto nada más que de los purines que se empleen en cada momento, ya que el resto de sustratos empleados en este tipo de experimentos no presentan elevadas concentraciones de Cd, Cu, Cr y Ni, además de emplearse en todos los experimentos el mismo material.



### **6.6. *Discusión de resultados 6: Estudio económico***

Teniendo en cuenta los resultados procedentes de los experimentos desarrollados en planta piloto (Tabla 5.51 del capítulo de resultados de este Trabajo de Tesis), se han extrapolado los mismos para una planta de biogás de 70 m<sup>3</sup> de capacidad con el objetivo de efectuar un análisis energético y económico para un tipo de instalación que resulta muy factible en la región extremeña, dada su extensión y localización de las explotaciones porcinas.

El análisis energético realizado ha sido basado en la potencia térmica del reactor o digester tomado como modelo, suponiendo que el tiempo de funcionamiento anual del mismo es de 8000 h. El análisis energético de tipo eléctrico no se ha llevado a cabo ya que necesita una purificación del biogás generado, y además los rendimientos obtenidos por un motor son del 40-45 % frente a rendimientos del 60 % obtenidos por calderas de biogás [105]. No obstante, la caldera instalada en la planta piloto tomada como referencia, y en la cual se efectúan experimentos de investigación posee un rendimiento del 90%, con una potencia en el quemador de 20 kW. El poder calorífico del metano de 8535 kcal Nm<sup>-3</sup> [9], junto a los resultados facilitados en la Tabla 51 del capítulo de resultados, procedentes de experimentos llevados a cabo con anterioridad han servido para determinar la potencia térmica del digester de 70 m<sup>3</sup> alimentado con purín y con mezcla de sustratos.

Se ha estimado un precio de 0,80 € L<sup>-1</sup> de combustible de tipo diésel B para efectuar los cálculos de ahorro económico en la explotación porcina. La inversión inicial de la instalación de biogás se ha considerado de 150000 €, contando con un reactor de 70 m<sup>3</sup> de capacidad, con agitación y control de temperatura, un gasómetro de almacenamiento de biogás, una caldera de 20 kW de potencia (funcionando con biogás generado) para suministrar el calor requerido en gran parte o en su totalidad en la explotación porcina, así como las tuberías o demás dispositivos que forman parte de la instalación en sí misma. En el caso particular de llevar a cabo un proceso de co-digestión anaerobia con sustratos en estado sólido, se requiere un tornillo sinfín lo que conlleva un incremento de la inversión inicial mencionada subiendo a 170000 €.

Los resultados mostrados en las Tablas 5.52 y 5.53 relativos al estudio económico y energético de una hipotética planta de biogás (70 m<sup>3</sup>), ponen de manifiesto los

beneficios aportados por un proceso de co-digestión anaerobia frente a una mono-digestión. Se puede observar como la energía térmica conseguida en un reactor funcionando continuamente se incrementa cerca de 10 veces si se emplea una adecuada mezcla de sustratos en el alimento suministrado al mismo. En el caso de un proceso de digestión anaerobia simple, la adición diaria de una cantidad igual a 2,3 m<sup>3</sup> de purín con una concentración de SV total de 2,04 % es capaz de generar 5141 L de metano al día, cantidad que se puede traducir en una energía térmica de 40,82 kWh. Estos valores se elevan notablemente a 48300 L de metano y 383,55 kWh de energía térmica en idénticas condiciones con la única salvedad de adicionar al alimento una parte de sustratos vegetales y otra parte de sustrato de carácter oleico en muy pequeña proporción, lo cual consigue incrementar la concentración de SV totales en la mezcla.

En términos económicos las diferencias mencionadas se convierten en factores claves a la hora de hacer viable un proyecto. En este trabajo se ha optado por evaluar el ahorro económico que supone esta instalación en cuanto a gasto de combustible diésel. Si se considera un precio de 0,80 € L<sup>-1</sup> para el combustible empleado en las instalaciones responsables de generar calor a la explotación porcina, el ahorro que se estará consiguiendo con la instalación de la planta de biogás, teniendo en cuenta la potencia térmica generada será el siguiente:

1. Proceso de mono-digestión anaerobia: 3,70 € diarios y 1234 € anuales.
2. Proceso de co-digestión anaerobia: 34,78 € diarios y 11591 € anuales.

Estos resultados suponen un retorno de la inversión inicial de 150000 € considerada en el primer caso, de 121,59 años, y de 14,67 años en el segundo caso. Definitivamente, el proceso de mono-digestión resulta inviable desde el punto de vista económico.

Existen ejemplos de plantas de biogás a pequeña escala funcionando en mono-digestión y co-digestión anaerobia como es la planta 1 detallada en la Tabla 6.13 presentada dentro del proyecto biogas3 [156] o las plantas 2 y 3 estudiadas por Wandera y col. [157].

**Tabla 6.13.** Ejemplos de tipologías y condiciones de funcionamiento de diferentes plantas de biogás.

<b>Experimento</b>	<b>Planta 1</b>	<b>Planta 2</b>	<b>Planta 3</b>
<i>Sustrato alimentado</i>	Residuos vegetales y lodos EDAR mataderos	Purín de cerdo	Purín de pollo y de cerdo
<i>Tamaño digestor, m<sup>3</sup></i>	870	320	1000
<i>Potencia térmica, kWh</i>	-	12,39	23,32
<i>Valorización digestor</i>	Caldera 80 kW agua caliente y caldera 1000 kW vapor	Uso doméstico en cocinas	Uso doméstico en cocinas
<i>Inversión, €</i>	425000	-	-
<i>Periodo de retorno, años</i>	7-8	-	-

La Tabla 6.13 de resultados encontrados en literatura muestra potencias térmicas menores para las plantas 2 y 3 con respecto a la potencia térmica obtenida en la planta simulada en este estudio (40,82 kWh) en mono-digestión con purín de cerdo. Es posible que tamaños mayores en los digestores no aumenten de forma proporcional su eficiencia en cuanto a energía térmica se refiere. La planta de 70 m<sup>3</sup> evaluada en este Trabajo de Tesis, muestra valores mayores de potencia térmica con respecto a los resultados obtenidos en la planta 2 (trabajando en mono-digestión) y la planta 3 alimentada con mezcla de purines. Si se cotejan los resultados mostrados en la Tabla 5.53 con la planta 1 (alimentada por una mezcla de sustratos) se puede ver como el periodo de retorno es mayor en el caso de la planta de 70 m<sup>3</sup> estudiada en la Tabla 5.53. No obstante, se deberían considerar los ingresos relativos a toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas a la atmósfera o aquellos relacionados con la venta de digestato. De esta forma, el periodo de retorno de la inversión de la hipotética planta de biogás, simulada en este Trabajo, se encontraría más cercano al presentado en la planta 1 de la Tabla 6.13.

## 7. Conclusiones

El análisis de sustratos de diverso origen y composición en el campo de la digestión anaerobia ha conseguido establecer unas premisas de partida para potenciar la generación de biogás y cumplir con una economía verde y circular. A continuación, se concluye el Trabajo de Tesis con las principales ideas extraídas del mismo de una forma concisa y clara:

1. El análisis de varianza llevado a cabo sobre los ensayos de tipo batch evaluados en los diferentes sustratos muestra tres grupos claramente diferenciados en cuanto al rendimiento de metano se refiere: el sustrato purín de cerdo ( $102 \pm 23$  NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>) en el primer grupo (menos productivo), el sustrato aceite de colza ( $740 \pm 140$  NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>) en el tercer grupo (más productivo), y el resto de sustratos estudiados en el segundo grupo: sorgo ( $419 \pm 62$  NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>), triticale ( $373 \pm 12$  NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>), rastrojo de maíz ( $345 \pm 73$  NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>) y biomasa microalgal ( $306 \pm 38$  NL CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>). Todos los rendimientos son del mismo orden a los obtenidos por autores que trabajan en el mismo campo.
2. La cinética evaluada sobre la evolución del volumen de metano acumulado con el tiempo de acuerdo a una reacción de primer orden linealizada, marca una velocidad de generación de metano más elevada para los sustratos sorgo y rastrojo de maíz ( $0,1145$  d<sup>-1</sup> y  $0,1138$  d<sup>-1</sup>, respectivamente), seguido de biomasa microalgal, triticale, purín y aceite de colza ( $0,0955$  d<sup>-1</sup>,  $0,0773$  d<sup>-1</sup>,  $0,0542$  d<sup>-1</sup>,  $0,0298$  d<sup>-1</sup>, respectivamente).
3. Una comparativa entre los rendimientos de metano obtenidos a diferente escala (planta piloto y laboratorio) muestra una acertada similitud entre los sustratos sorgo y aceite de colza ( $397$  NLCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> frente a  $419$  NLCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> y  $655$  NLCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> frente a  $740$  NLCH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup>, respectivamente, para planta piloto y laboratorio) ya que son los sustratos que se emplearon en idénticas condiciones de partida.

4. Una modelización de acuerdo al modelo ADM1 de los resultados obtenidos en ensayos batch realizados con sustratos S, R, B, y A a escala de laboratorio y planta piloto, ha permitido una adecuada estimación de la evolución de las reacciones ocurridas en los compuestos a lo largo del proceso de digestión anaerobia, gracias a sus elevados coeficientes de regresión ( $R^2 > 0,995$ ).
5. Se aprecian valores medios muy similares en cuanto a rendimiento de metano se refiere para todas las series de experimentos llevados a cabo en régimen semi-continuo, excepto para las series SBP y SBPTR (195,09 L kg  $SV_{ad}^{-1}$ , 197,69 L kg  $SV_{ad}^{-1}$ , 149,80 L kg  $SV_{ad}^{-1}$ , 195,76 L kg  $SV_{ad}^{-1}$ , 157,15 L kg  $SV_{ad}^{-1}$ , para las series SP, SB, SBP, SBPT y SBPTR, respectivamente). Ambas series de experimentos (SBP y SBPTR) no se han llevado a cabo con una mezcla de alimento en proporción 1:1 entre sustratos purín y biomasa microalgal, y sustratos vegetales, como consecuencia de la variabilidad en el contenido de los sólidos volátiles del purín a lo largo del tiempo. Para la serie SBP la cantidad de sustrato vegetal (sorgo) en la mezcla alimentada al reactor es menor que el contenido en los sustratos biomasa microalgal y purín juntos, mientras que para la serie SBPTR la proporción de sustratos vegetales (sorgo, triticale y rastrojo de maíz) es mayor con respecto a los sustratos purín y biomasa microalgal en la mezcla total alimentada al reactor.
6. De la evaluación de VCO llevada a cabo en cada una de las series de experimentos en régimen semi-continuo se deduce que una VCO de 1 g  $SV L_D^{-1} d^{-1}$  conlleva valores de rendimientos de metano más elevados en las series SP, SB y SBP, mientras que las series de experimentos SBPT y SBPTR estudiadas presentan rendimientos de metano más altos con VCO de 2 g  $SV L_D^{-1} d^{-1}$  y 3 g  $SV L_D^{-1} d^{-1}$ , respectivamente. Este hecho se puede deber a la sinergia conseguida gracias al aporte de un mayor número de sustratos (nutrientes), lo cual provoca una respuesta positiva frente a una posible inhibición como aparece en bibliografía.
7. El parámetro AGV considerado como inhibitorio del proceso de digestión anaerobia es sobrepasado en los resultados obtenidos para las series de experimentos SBPT, y bastante elevado para la serie SBPTR. Sin embargo, según la teoría, un adecuado acomodamiento de los microorganismos

- metanogénicos a VCO más altas puede provocar una estabilidad en el proceso, que no conlleve consecuencias negativas en los rendimientos de metano obtenidos. No se supera el valor umbral del parámetro nitrógeno amoniacal en ninguna de las series de experimentos evaluadas en régimen semi-continuo.
8. Las interacciones observadas entre cada uno de los parámetros evaluados en las cinco series de experimentos en régimen semi-continuo estudiadas recogen dos ideas principales: una fuerte relación inversa entre los parámetros reducción de DQO y SV a medida que aumenta la VCO, hasta un valor de  $3 \text{ g SV L}_D^{-1}\text{d}^{-1}$  y una fuerte relación creciente entre los parámetros nitrógeno amoniacal y alcalinidad con la VCO empleada, en el caso de la alcalinidad hasta un valor de  $3 \text{ g SV L}_D^{-1}\text{d}^{-1}$ .
  9. La influencia del sustrato aceite de colza en la mezcla alimentada al digestor es positiva tanto a nivel de laboratorio (incrementos del 20%) y planta piloto (incrementos del 30%).
  10. El análisis ANOVA llevado a cabo sobre los parámetros alcalinidad, AGV y nitrógeno amoniacal para las experiencias llevadas a cabo con y sin aceite de colza, en laboratorio y planta piloto, exclusivamente presenta diferencias significativas para el nitrógeno amoniacal, no obstante los valores obtenidos se encuentran por debajo de los valores considerados como inhibitorios, presentando todas las experiencias un ratio AGV/alcalinidad por debajo de 0,40 como ocurre en trabajos realizados por otros autores.
  11. Una caracterización de digestatos obtenidos en experimentos desarrollados en laboratorio y planta piloto con diferentes muestras alimentadas presenta la siguiente composición: valores de  $\text{K}_2\text{O}$  que oscilan entre 0,10-0,89 %, valores de N entre 0,20-0,25 %, y valores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  situados en un rango que va desde 0,04% a 0,09 %. Todos los resultados obtenidos para N y los óxidos de P y K son comparables a contenidos obtenidos por otros autores. En cuanto a la clasificación de dichos digestatos de acuerdo al RD 999/2017 para su uso como biofertilizantes se pueden establecer como fertilizantes de clase A o B, localizándose uno de ellos fuera de la clasificación establecida al presentar valores de Cd por encima de los límites que marca la ley.

12. El estudio energético realizado sobre una planta de biogás de 70 m<sup>3</sup> muestra una producción de energía térmica diaria cerca de 10 veces mayor (383,55 kWh frente a 40,82 kWh) para un proceso de co-digestión anaerobia empleando una mezcla alimentada de sorgo, triticale, purín de cerdo y aceite de colza, frente a una mono-digestión anaerobia llevada a cabo con purín de cerdo, ambas en régimen semi-continuo.
13. En el estudio económico se han empleado las mismas condiciones de partida que en el estudio energético y se ha concluido en unos tiempos de retorno de la inversión inviables para el proceso de mono-digestión anaerobia, y de 14,67 años para el proceso de co-digestión anaerobia.

## 8. Bibliografía

- [1] Muñoz Valero J.A., Ortiz Cañavate J., Vázquez Minguela J. (1987). Técnica y aplicaciones agrícolas de la biometanización. Serie Técnica-Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.
- [2] Coombs J. (1990). The present and future of anaerobic digestion, en Wheatley, A., Ed. Anaerobic Digestion: a Waste Treatment Technology. Critical Reports in Applied Chemistry. (31), pp. 1-42.
- [3] Angelidaki I., Ahring B.K. (1997a). Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future. III curso de Ingeniería Ambiental, pp. 336-342. Lleida, octubre.
- [4] Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). 11 Noviembre de 2011.
- [5] BP Statistical Review of World Energy, 2016. London.
- [http://www.bp.com/es\\_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2016/bp-statistical-review-world-energy-2016.html](http://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2016/bp-statistical-review-world-energy-2016.html) (accedido Mayo 2017).
- [6] European Commission, Joint Research Centre, General guide for life cycle assessment- Detailed guidance, in: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, first ed., European Commission Joint Research Centre, Luxembourg, 2010. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCDHandbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> (accedido Marzo 2017).
- [7] European Commission, Joint Research Centre, Recommendations for life cycle impact assessment in the European context, in: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, first ed., 2011. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf> (accedido Marzo 2017).
- [8] Agostini A., Battini F., Padella M., Giuntoli J., Baxter D., Marelli L., Amaducci S. (2016). Economics of GHG emissions mitigation via biogas production from Sorghum,



maize and dairy farm manure digestion in the Po valley, *Biomass and Bioenergy* 89, pp.58-66.

[9] Ministerio de Industria y Turismo- IDAE (2007). *Biomasa: digestores anaerobios. Energía de la Biomasa*. Madrid.

[10] Flotats X. (2000<sub>2</sub>). *Perspectivas de futuros desarrollos e iniciativas en la gestión y tratamiento de purines*. RETEMA, Marzo-Abril, pp. 37-47.

[11] Díaz M. C., Espitia S.A., Molina F. (2002). *Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología*. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Biotecnología. 1<sup>a</sup> ed. Bogotá.

[12] Mohammadreza K., Gameiro T., Costa M.E.V., Capela I. (2016). *Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes – An overview of the developments and improvement opportunities*. *Chemical Engineering Journal* 298, pp. 162-182.

[13] Gonzalez-Fernandez C., Sialve B., Molinuevo-Salces B. (2015). *Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs*. *Bioresource Technology* 198, pp. 896-906.

[14] Croce S., Wei Q., D'Imporzano G., Dong R., Adani F (2016). *Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance*. *Biotechnology Advances* 34, pp.1289-1304.

[15] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). (2009). *El sector porcino en Extremadura, seminario sectorial*. Dirección general de explotaciones agrarias y calidad alimentaria.

[16] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), Asociación Interprofesional del Cerdo Ibérico (ASICI). (2013). *Datos cerdo Riber 2013*. Registro Informativo de Organismos Independientes de Control del Ibérico (RIBER).

[17] Secretaría General Técnica. Subdirección General de Estadística. (2015). *Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). Resultados definitivos Noviembre 2015 sector porcino*:

[http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/resultados\\_definitivos\\_nov15\\_porcino\\_parawebmagrama\\_tcm7-414427.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/resultados_definitivos_nov15_porcino_parawebmagrama_tcm7-414427.pdf)

(accedido día 30 Junio 2017).

[18] DEA, Danish Energy Agency. Progress Report on the Economy of Centralized Biogas Plants. February 1995.

[19] Flotats X. (2000<sub>1</sub>). La planta de biogás de Mas El Cros: evaluación de 16 años de funcionamiento. Residuos, (54), pp. 54-60.

[20] Dupas G. (2000). Enjeux de la généralization de la couverture étanche des fosses à lisier en France. Cycle de conférences du Réseau Waste for Energy. Chambre de Commerce et d'Industrie, Tarbes, 12 mai. Publication en CD-ROM.

[21] Esteban P. (1999). La producción de energía en la Planta Experimental de Tratamiento de excretas ganaderas de Almazán. IFAES.

[22] Martínez-Almela J., Campos E., Almirall M., Flotats X., Barrera J. (2001). Digestión anaerobia de la fracción sólida de purines de cerdo, separada mediante el proceso SELCO-Ecopurín. AnaporcCientífico, 1 (1), pp. 41-51.

[23] Islas-Espinoza M., de las Heras A., Vázquez-Chagoyán J.C., Salem A.Z.M (2017). Anaerobic cometabolism of fruit and vegetable wastes using mammalian fecal inoculums: Fast assessment of biomethane production. Journal of Cleaner Production 141, pp. 1411- 1418.

[24] Mani S., Sundaram J., Das K.C. (2016). Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter. Biomass and Bioenergy 93, pp. 158-167.

[25] Smith C.B., Parmenter K.E. (2016). Chapter 1: Introduction in Energy Management Principles (Second Edition) pp. 1-12.

[26] Dussud F-X., Joassard I., Wong F., Duvernoy J., Morel R. (2016). Cifras claves del mundo: Francia y Mundo. Servicio de Observación y Estadísticas. Paris.

[27] Asociación Española de Biogás (2016). Informe Estadístico 2016 de la Asociación Europea de Biogás (EBA): El sector del Biogás continúa su crecimiento en Europa. Madrid.

<http://www.aebig.org/aebig/informe-estadistico-2016-la-asociacion-europea-biogas-eba-sector-del-biogas-continua-crecimiento-europa/> (accedido día 1 Enero 2017).

[28] Asociación Española de Biogás (AEBIG). Plantas de biogás en Alemania (2016). <http://www.aebig.org/aebig/plantas-biogas-alemania/> (accedido día 28 Junio 2017).

[29] Álvarez E., Ortiz I. (2016). La transición energética en Alemania [Energiewende], Política, Transformación Energética y Desarrollo Industrial, Orkestra.

[30] Maggioni L. R&D CIB. (2017). Biomethane in Italy, Biosrf Fuelling Biomethane, Budapest.

[31] Ferry J.G. (2011). Fundamentals of methanogenic pathways that are key to the biomethanation of complex biomass. *Current Opinion in Biotechnology* 22, pp.351-357.

[32] Mortier N., Velghe F., Verstichel S. (2016). Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion. Chapter 4: The Food, Feed, Fibre, Fuel (4F) Economy, Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products, pp. 69-124.

[33] Ramos J.L. Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. Procedente de diferentes procesos. Tesis doctoral. (2014). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.

[34] Bharathiraja B., Sudharsanaa T., Bharghavi A., Jayamuthunagai J., Praveenkumar R. (2016). Biohydrogen and Biogas – An overview on feedstocks and enhancement process. *Fuel* 185, pp. 810-828.

[35] Montañez L.E., García M., Peña Y, Oropeza R, Balagurusamy N., (2017). 9 – Microbiology and Biochemistry of Anaerobic Treatment. Chapter 9: Biological Treatment of Industrial Effluents, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, pp. 231-259.

[36] Nettmann E., Bergmann I., Pramschüfer S., Mundt K., Plogsties V., Herrmann C., Klocke M. (2010). Polyphasic Analyses of Methanogenic Archaeal Communities in Agricultural Biogas Plants, *Applied and Environmental Microbiology* 76 (8), pp. 2540-2548.

- [37] Abendroth C., Hahnke S., Klocke M., Luschig O. (2016) Potential pitfalls of FISH microscopy as assessment method for anaerobic digesters, *BioRxiv*, pp. 1-18.
- [38] Guangyin Z., Xueqin L., Takuro K., Gopalakrishnan K., Kaiqin X. (2016). Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation, *Chemical Engineering Journal* 299, pp. 332-341.
- [39] Derbal K., Bencheikh-lehocine M., Cecchi F., Meniai A-H., Pavan P. (2009). Application of the IWA ADM1 model to simulate anaerobic co-digestion of organic waste with waste activated sludge in mesophilic condition, *Bioresource Technology* 100, pp. 1539-1543.
- [40] Parker W.J. (2005). Application of the ADM1 model to advanced anaerobic digestion, *Bioresource Technology* 96, pp. 1832-1842.
- [41] Razaviarani V., Buchanan I.D. (2015). Calibration of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) for steady-state anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste, *Chemical Engineering Journal* 266, pp. 91-99.
- [42] Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H., Vavilin V.A. (2002) The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1), *Water Science and Technology* 45 n°10, pp. 65-73.
- [43] Organización Panamericana de la Salud - CEPIS (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima.
- [44] Zhou J., Zhang R., Liu F., Yong X., Wu X., Zheng T., Jiang M., Jia H. (2016). Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. *Bioresource Technology* 217, pp. 44-49.
- [45] Campos A.E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante co-digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis doctoral. Universidad de Lleida.
- [46] Latif M.A., Mehta C.M., Batstone D.J. (2017). Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water research*. 113, pp. 42-49.

- [47] Somridhivej B., Boyd C.E. (2016). An assessment of factors affecting the reliability of total alkalinity measurements. *Aquaculture* 459, pp. 99-109.
- [48] Campos A.E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante la co-digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria, Tesis doctoral, Universitat de Lleida, Lleida.
- [49] Fannin K.F. (1987). Start-up, operation, stability, and control, in *Anaerobic digestion of biomass*. Editado por Chynoweth, D. y Isaacson, R. Elsevier applied science LTD.
- [50] Flotats X., Campos E., Palatsi J., Bonmatí X. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria. *Porci; Monografías de actualidad*, 65, pp. 51-65.
- [51] Martí N. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Ed. Boca Ratón, Florida, U.S.A.
- [52] Lorenzo Y., Obaya M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos, Parte I:ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar). *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XXXIX, 1, pp. 35-48, Ciudad de La Habana, Cuba.
- [53] Drosig B. (2013). Process monitoring in biogas plant. International Energy Agency (IEA) Bioenergy. Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas.
- [54] Rittman B.E., McCarty P.L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, Ed. McGrawHill, Biodesign Institute at Arizona State University.
- [55] Kugelman I.J., Chin K.K. (1971). Toxicity synergism, and antagonism in anaerobic waste treatment processes. *Anaerobic biological treatment processes*.
- [56] Ward A.J., Lewis D.M., Green F.B. (2014). Anaerobic digestion of algae biomass: A review. *Algal Research* 5, pp. 204–214.
- [57] Hayes T.D., Theis T.L. (1978). The distribution of heavy metals in anaerobic digestion. *Journal water pollution control federation*. 50 (1), pp., 31-72.

- [58] Lens P.N.L., Visser A., Janssen A.J.H., Hulshoff Pol L.W., Lettinga G. (1998). Biotechnological treatment of sulphate-rich wastewaters, *Critical Review Environmental Science Technology*, 28 (1), pp. 41-88.
- [59] Rosenkranz F. (2013). Estudio del comportamiento de reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectores negativos, Tesis doctoral, Universidad Pontificia Católica de Valparaíso y Universidad de Santiago de Compostela, Chile.
- [60] Zeeman G., Wiegant W.M., Koster-Treffers M.E., Lettinga G. (1985). The influence of total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure. *Agricultural Wastes*. 14, pp. 19-35.
- [61] Flotats X., Bonmatí A., Campos E., Antúnez M. (1999). Ensayos en discontinuo de co-digestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. *Información Tecnológica*. Vol. 10 (1), pp. 79-85.
- [62] Van Velsen A.F.M. (1979). Adaptation of methanogenic sludge to high ammonia-nitrogen concentrations. *Water Research*. Vol. 13, pp. 995- 999.
- [63] Parkin G.F., Owen W.F. (1986). Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *J. Environ. Eng.*, 112, pp. 867-920.
- [64] Hayes T.D., Theis T.L. (1978). The distribution of heavy metals in anaerobic digestion, *Journal water pollution control federation*. Vol. 50 (1), pp. 31-72.
- [65] Ahring B.K., Sandberg M., Angelidaki I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied microbiological Biotechnology*. 43 (3), pp. 559-565. *Advances in chemistry series*, 105. American chemical society. Washington D.C.
- [66] Lorenzo Y., Obaya M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I<sup>o</sup> ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XXXIX, núm. 1, pp. 35-48 Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Ciudad de La Habana, Cuba.
- [67] Speece R.E. (1987). *Nutrient Requirements in Anaerobic Digestion of biomass*. Edited by Chynowth D. Y and Isaacson, R. Elsevier applied science LTD.

[68] Van Lier J.B. (1995). Temperature optima of thermophilic methanogenic sludge: implications for reactor start-up and operation, in Thermophilic anaerobic wastewater treatment; temperature aspects and process stability. Tesis doctoral. Universidad de Wageningen.

[69] Martí N. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Boca Raton, Florida, U.S.A.

[70] Fernández B. (2011). Jornada biogás-Apersue Materias primas, pretratamientos, co-digestión. Centro Tecnológico de Gestión Integral de Residuos Orgánicos (GIRO) Tárrega, España.

[71] Serrano E.M. (2001). Aplicación agronómica de purín de cerdo y de un polielectrolito: efectos en el cultivo de hierba de centeno y en las aguas de drenaje, XXXVIII curso internacional de edafología y biología vegetal, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla.

[72] Iguácel F. (2011). Fertilización con purines porcinos y otros estiércoles, ponencia Centro de Transferencia Agroalimentaria, Huesca.

[http://www.unizar.es/centros/eps/doc/purines\\_porcinos.pdf](http://www.unizar.es/centros/eps/doc/purines_porcinos.pdf) (accedido día 25 Mayo 2017).

[73] Mao C., Yongzhong F., Xiaojiao W., Guangxin Ren. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, Renewable and Sustainable Energy Reviews 45, pp. 540-555.

[74] Chamy R., Ramos C. (2011). Factors in the determination of methanogenic potential of manure, Bioresource Technology 102, pp. 7673-7677.

[75] Kougias P.G., Boe K., Einarsdottir E.S., Angelidaki I. (2015). Counteracting foaming caused by lipids or proteins in biogas reactors using rapeseed oil or oleic acid as antifoaming agents. Water research 79, pp. 119-127.

[76] Kleyböcker A., Liebrich M., Verstraete V., Kraume M., Würdemann H. (2012). Early warning indicators for process failure due to organic overloading by rapeseed oil in one-stage continuously stirred tank reactor, sewage sludge and waste digester. Bioresource Technology 123, pp. 534-541.

- [77] Luo G., Talebnia F., Karakashev D., Xie L., Zhou Q., Angelidaki I. (2012). Enhanced bioenergy recovery from rapeseed plant in a biorefinery concept. *Bioresource Technology* 102, pp. 1433-1439.
- [78] Band C.J. (1999). Tesis: Efecto de la composición bioquímica de microalgas sobre el valor nutritivo de dos cepas de *Artemia*, Instituto Politécnico Nacional Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR), La Paz, Uruguay.
- [79] Zhen G. Lu X., Kobayashi T., Kumar G., Xu K. (2016). Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: Kinetic modelling and synergistic impact evaluation, *Chemical Engineering Journal* 299, pp. 332-341.
- [80] Hernández-Pérez A., Labbé J.I. (2014). Microalgas, cultivos y beneficios, revista de *Biología Marina y Oceanografía* 49:2, pp. 157-173.
- [81] Santos A.M., González-Arechavala Y., Martín-Sastre C. (2014). Usos y aplicaciones potenciales de las microalgas, *Anuales de mecánica y electricidad*, Enero-Febrero 2014, pp. 20-28.
- [82] Jankowska E. Sahu, A.K., Oleskowicz-Popiel P. (2017). Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, pp. 692-709.
- [83] Ward A.J., Lewis D.M. Green F.B. (2014). Anaerobic digestion of algae biomass: A review, *Algal Research* 5, pp. 204-214.
- [84] Teixeira Franco R., Buffière P., Bayard R. (2016). Ensiling for biogas production: Critical parameters. A review. *Biomass and Bioenergy* 94, pp. 94-104.
- [85] Vallati A. (2001). Sorgo. Estación experimental Agropecuaria Bordenave, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria):  
[http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/maiz\\_sorgo/12-descripcion\\_sorgo.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/maiz_sorgo/12-descripcion_sorgo.pdf) (accedido 24 Febrero 2017).
- [86] Zeledón H.S., Hernández M.A., Ayala Morán J.E., Guzmán de Serrano R.F., Borja C.A., Alvarado de Torres M., Calderón V.R. (2007). Guía Técnica del Sorgo, 1ª Edición, Ed.: Digitales Diversas, La Libertad, El Salvador.



- [87] Carrasco N., Zamora M., Melin A. (2011). Manual de sorgo. 1<sup>a</sup> ed.- Chacra Experimental Integrada Barrow: ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- [88] Dareioti M.A., Kornaros M. (2015). Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time, *Bioresource Technology* 175, pp. 553-562.
- [89] Kalamaras S.D., Kotsopoulos T.A. (2014). Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe, *Bioresource Technology* 172, pp. 68-75.
- [90] Sambusiti C., Ficara E., Malpei F., Steyer J.P., Carrère H. (2013). Benefit of sodium hydroxide pretreatment of ensiled sorghum forage on the anaerobic reactor stability and methane production, *Bioresource Technology* 144, pp. 149-155.
- [91] Mellado M., Matus I., Madariaga R. (2008). Antecedentes sobre el triticale en Chile y otros países, Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
- [92] Cantale C., Petrazzuolo F., Correnti A., Farneti A., Felici F., Latini A., Galeffi P. (2016). Triticale for Bioenergy Production, Florence “Sustainability of Well-Being International Forum”. 2015: Food for Sustainability and not just food, FlorenceSWIF2015. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 8, pp. 609-616.
- [93] Braun R., Weiland P., Wellinger A. (2011). Biogas from Energy Crop Digestion. International Energy Agency (IEA) Bioenergy. Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas.
- [94] Sawatdeenarunat C., Surendra K.C., Takara D., Oechsner H., Khanal S.K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology* 178, pp. 178-186.
- [95] Herrmann C., Idler C., Heiermann M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource Technology* 206, pp. 23-35.

- [96] Sinclair R., Wege L., Romero A. (1992). Potencial del rastrojo de maiz con leguminosa en la alimentación de ganado de engorde, *Agronomía Mesoamericana* 3, pp. 45-57.
- [97] González S.S. (1999). Aprovechamiento de esquilmos y subproductos en la alimentación del ganado. Sistema de Agronegocios Pecuarios, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación, Montecillo, Edo. De México.
- [98] YuQian L., ChunMei L., Akiber C. W., HaiRong Y., DeXun Z., YanPing L. XiuJin, L. (2017). Serial completely stirred tank reactors for improving biogas production and substance degradation during anaerobic digestion of corn stover, *Bioresource Technology* 235, pp. 380-388.
- [99] Hassan M., Ding W., Umar M., Rasool G. (2017). Batch and semi-continuous anaerobic co-digestion of goose manure with alkali solubilized wheat straw: A case of carbon to nitrogen ratio and organic loading rate regression optimization. *Bioresource Technology* 230, pp. 24-32.
- [100] Solé-Bundó M., Eskicioglu C., Garfí M., Carrère H., Ferrer I. (2017). Anaerobic co-digestion of microalgal biomass and wheat straw with and without thermo-alkaline pretreatment. *Bioresource Technology* 237, pp. 89-98.
- [101] Croce S., Wei Q., D'Imporzano G., Dong R., Adani F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances* 34, pp. 1289-1304.
- [102] Bolado-Rodríguez S., Toquero C., Martín-Juárez J., Travaini R., García-Encina P.A. (2016). Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. *Bioresource Technology* 201, pp. 182-190.
- [103] Khatri S., Wu S., Kizito S., Zhang W., Li J., Dong R. (2015). Synergistic effect of alkaline pretreatment and Fe dosing on batch anaerobic digestion of maize straw. *Applied Energy* 158, pp. 55-64.

[104] IRENA (2017). Biogas for road vehicles: Technology brief, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

[105] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos (2010). El sector del biogás agroindustrial en España, Madrid.

[106] Baldé H., VanderZaag A.C., Burt S.D., Wagner-Riddle C., Crolla A., Desjardins, R.L., MacDonald D.J. (2016). Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant, *Bioresource Technology* 216, pp. 914-922.

[107] Muscolo A., Settineri G., Papalia T., Attinà E., Basile C., Panuccio M.R. (2017). Anaerobic co-digestion of recalcitrant agricultural wastes: Characterizing of biochemical parameters of digestate and its impacts on soil ecosystem, *Science of the Total Environment* 586, pp. 746-752.

[108] Risberg K., Cederlund H., Pell M., Arthurson V., Schnürer A. (2017). Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity, *Waste Management* 61, pp. 529-538.

[109] Irañeta J. (2012). Valoración agronómica del purín, estiércol y compost, ponencia INTIA, Sergal S. Coop., Vitoria.

<http://www.lursail.net/verdocumento.asp?iddoc=6183> (accedido 20 Mayo 2017).

[110] Real Decreto 1255/2010, de 8 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 949/2009, de 5 de junio, por el que se establecen las bases reguladoras de las subvenciones estatales para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de Biodigestión de Purines. BOE 260, 27/10/2010.

[111] Agencia Andaluza de la Energía (2011). Estudio básico del biogás. Consejería de Economía, Innovación y Ciencia, Junta de Andalucía.

[112] Bolívar H.M. Factibilidad de proyectos de inversión para plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala usando como sustratos purines y chumberas [*Opuntia ficus indica* (l) Miller]. Tesis doctoral. (2017). Universidad de Extremadura. Escuela de Ingeniería Industrial.

- [113] APHA. (2012). American Public Health Association. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 22 ed., Washington, DC.
- [114] Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. EPA-600/4-79-020. U.S., Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring and Support Laboratory, 1983.
- [115] Liebetrau J., Pfeiffer D., Thrän D. (2012). Messmethoden-sammlung Biogas-Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. Schriftenreihe des BMU-Förderprogrammes, “Energetische Biomassenutzung”- Band 7, DBFZ, Leipzig, Germany.
- [116] Norma UNE-EN 16948 (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación de contenido total de C, H y N. Método instrumental.
- [117] Ohemeng-Ntiamoah J., Datta T. (2018). Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion, *Bioresource Technology* 247, pp. 697-704.
- [118] Norma UNE-EN 16967 (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos mayoritarios Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na y Ti.
- [119] Normativa UNE-EN 16967 (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos minoritarios.
- [120] Pagés J., Pereda I., Lundin M., Sárvári I. (2011). Co-digestion of different waste mixture from agro-industrial activities: kinetic evaluation and synergetic effects, *Bioresource Technology*, 102, pp. 10834-10840.
- [121] Jiménez A.M., Borja R., Martín A. (2004). A comparative kinetic evaluation of the anaerobic digestion of untreated molasses and molasses previously fermented with *Penicillium decumbens* in batch reactors, *Biochemical Engineering*, 18, pp. 121-132.
- [122] Beltrán J., González T., García J. (2008). Kinetics of the biodegradation of green table olive wastewaters by aerobic and anaerobic treatments, *Journal of Hazardous Materials*, 154, pp. 839-845.
- [123] Sousa Lima D.R., Herrera Adarme O.F., Lobo Baêta B.E., Alves Gurgel L.V., de Aquino S.F. (2018). Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection

on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: a kinetic analysis. *Industrial Crops Product*, 111, pp. 684-693.

[124] García-Gen S., Sousbie P., Rangaraj G., Lema J.M., Rodríguez J., Steyer J-P., Torrijos M. (2015). Kinetic modelling of anaerobic hydrolysis of solid wastes, including disintegration processes, *Waste Management*, 35, pp. 96-104.

[125] Norma del CODEX para aceites vegetales especificados. (1999). CODEX STAN 210-1999.

[126] Liu X., Bayard R., Benbelkacem H., Buffière P., Gourdon R. (2015). Evaluation of the correlations between biodegradability of lignocellulosic feedstocks in anaerobic digestion process and their biochemical characteristics, *Biomass and Bioenergy*, 81, pp. 534-543.

[127] Zhang Z., Zhang G., Li W., Li Ch., Xu G. (2016). Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, pp. 9153-9158.

[128] Garuti M., Langone M., Fabbri C., Piccinini S. (2018). Methodological approach for trace elements supplementation in anaerobic digestion: Experience from full-scale agricultural biogas plants, *Journal of Environmental Management*, 223, pp. 348-357.

[129] Zhou H., Löffler D., Kranert M. (2011). Model-based predictions of anaerobic digestion for agricultural substrates for biogas production, *Bioresource Technology*, 102, pp. 10819-10828.

[130] Wirth R., Lakatos G., Böjti T., Maróti G., Bagi Z., Rákhely G., Kovács K.L. (2018). Anaerobic gaseous biofuel production using microalgal biomass-A review, *Anaerobe*, 52, pp. 1-8.

[131] Wang Y., Li G., Chi M., Su Y., Zhang J., Jiang S., Cui Z. (2018). Effects of co-digestion of cucumber residues to corn stover and pig manure ratio on methane production in solid state anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 250, pp. 328-336.

- [132] Arias O., Viña S., Uzal M., Soto M. (2017). Composting of pig manure and forest green waste amended with industrial sludge, *Science of the Total Environment*, 586, pp. 1228-1236.
- [133] Ni P., Lyu T., Sun H., Dong R., Wu S. (2017). Liquid digestate recycled utilization in anaerobic digestion of pig manure: Effect on methane production, system stability and heavy metal mobilization, *Energy*, 141, pp. 1695-1704.
- [134] Astals S., Musence R.S., Bai X., Tannock S., Tait S., Pratt S., Jensen P.D. (2015). Anaerobic co-digestion of pig manure and algae: Impact of intracellular algal products recovery on co-digestion performance, *Bioresource Technology*, 181, pp. 97-104.
- [135] Hidalgo D., Martín-Marroquín J.M., Corona F. (2018). The effect of feed composition on anaerobic co-digestion of animal-processing by-products, *Journal of Environmental Management*, 216, pp. 105-110.
- [136] Risberg K., Cederlund H., Pell M., Arthurson V., Schnürer A. (2017). Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity, *Waste Management*, 61, pp. 529-538.
- [137] Corbalas-Robles L., Sastafiana W.N.D., Van linden V., Volcke E.I.P., Schaubroek T. (2018). Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application – a trade-off story, *Resource, Conservation & Recycling*, 131, pp. 86-98.
- [138] Ganesh Saratale R., Kumar G., Banu R., Xia A., Periyasamy S., Dattatraya Saratale G. (2018). A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation, *Bioresource Technology*, 262, pp. 319-332.
- [139] Parralejo A.I., Royano L., González J., González J.F. (2015). Estudo da influência do tratamento térmico e a proporção de substrato nativo de microalgas colhidas em Extremadura para a produção de metano, *Congreso Bioenergía Portugal, Portalegre*, 2015.
- [140] González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J.P. (2012). Thermal pretreatment to improve methane production of *Scenedesmus* biomass, *Biomass and bioenergy*, 40, pp.105-111.

- [141] Zahan Z., Othman M.Z., Muster T.H. (2018). Anaerobic digestion/co digestion kinetic potentials of different agroindustrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation, *Waste Management*, 71, pp. 663-674.
- [142] Zahan Z., Georgious S., Muster T.H., Othman M.Z. (2018). Semi-continuous anaerobic co-digestion of chicken litter with agricultural and food wastes: A case study on the effect of carbon/nitrogen ratio, substrates mixing ratio and organic loading, *Bioresource Technology*, 270, pp. 245-254.
- [143] Herrmann C., Kalita N., Wall D., Xia A., Murphy J.D. (2016). Optimised biogas production from microalgae through co-digestion with carbon rich co-substrate. *Bioresour. Technol.* 214, pp. 328–337.
- [144] Thanikal J.V., Torrijos M., Rizwan S.M., Hatem Yazidi R., Senthil K., Sousbie P. (2015). Anaerobic Co-Digestion of Vegetable Waste and Cooked Oil in Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR), *Int'l Journal of Advances in Agricultural & Environmental Eng.*, 2, pp. 2349-1531.
- [145] Zhen G., Lu X., Kobayashi T., Kumar G., Xu K. (2016). Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: Kinetic modelling and synergistic impact evaluation, *Chemical Engineering Journal*, 299, pp. 332-341.
- [146] Llabrés-Luengo P., Mata-Álvarez J. (1987). Kinetic study of anaerobic digestion of straw-pig manure mixtures, *Biomass*, 14, pp. 129-142.
- [147] Mottet A., Ramirez I., Carrère H., Déléris S., Vedrenne F., Jimenez J., Steyer J.P. (2013). New fractionation for a better bioaccessibility description of particulate organic matter in a modified ADM1 model, *Chemical Engineering Journal*, 228, pp. 871-881.
- [148] Pellerá F-M., Gidarakos E. (2017). Anaerobic digestion of solid agroindustrial waste in semi-continuous mode: Evaluation of mono-digestion and co-digestion systems. *Waste Management*, 68, pp. 103-119.
- [149] Kabouris J.C., Tezel U., Spyros G., Pavlostathis G., Engelmann M., Dulaney J., Gillette R.A., Todd A.C. (2009). Methane recovery from the anaerobic co-digestion of municipal sludge and FOG. *Bioresource Technology*, 100, pp. 3701-3705.

[150] Gómez E., Martín J., Michael F.C. (2011). Effects of organic loading rate on reactor performance and archaeal community structure in mesophilic anaerobic digesters treating municipal sewage sludge, *Waste Manage. Res.* 29, pp. 1117 - 1123.

[151] Bernal M.P., Albuquerque J.A., Bustamante M.A., Clemente R. (2011). Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización (PROBIOGAS), pp. 13.

[152] Reyes E.A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 24, pp. 64.

[153] Bueno D., Nabel M., Jablonowski N.D. (2014). Biogas-digestate as nutrient source for biomass production of *Sida hermaphrodita*, *Zea mays L.* and *Medicago sativa L.*, *Energy Procedia* 59, pp. 120 - 126.

[154] Agriculture & Horticulture Development Board (AHDB). (2017). Nutrient Management Guide (RB209), Section 2: Organic materials, pp. 35.

[155] Real Decreto 999/2017, de 24 de Noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de Junio, sobre productos fertilizantes.

[156] Gómez P. (2015). Producción sostenible de biogás a pequeña escala a partir de residuos de la agroindustria para el autoabastecimiento energético. *Biogas3*, AINIA, Webinar.

[157] Wandera S.M., Qiao W., Algapani D.E., Bi S., Yin D., Qi X., Liu Y., Dach J., Dong R. (2018). Searching for possibilities to improve the performance of full scale agricultural biogas plants. *Renewable Energy* 116, pp. 720-727.



## **9. Apéndice**

En el presente apéndice se muestran datos de los coeficientes bioquímicos y ecuaciones cinéticas tenidos en cuenta para el modelado de los resultados de acuerdo al modelo ADM1 (Tablas 9.1 y 9.2). Seguidamente, se presentan tablas que contienen datos de aquellas experiencias de digestión anaerobia desarrolladas en régimen semi-continuo. El volumen de datos que se han de presentar en cada Tabla es elevado como consecuencia de la duración de este tipo de experimentos, motivo por el cual se ha decidido exponer los resultados en un apéndice.

**Tabla 9.1.** Coeficientes bioquímicos de velocidad ( $\gamma_{i,j}$ ) y ecuaciones de velocidad cinética ( $\rho_j$ ) para componentes solubles (i=1-12; j=1-19).

Componente	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Velocidad ( $\rho_j$ , kg DQO m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )	
j	Proceso	S <sub>ms</sub>	S <sub>aa</sub>	S <sub>AGL</sub>	S <sub>va</sub>	S <sub>bu</sub>	S <sub>pr</sub>	S <sub>ac</sub>	S <sub>H2</sub>	S <sub>CH4</sub>	S <sub>IC</sub>	S <sub>IN</sub>	S <sub>I</sub>		
1	Desintegración													$f_{st} \cdot X_c$	$k_{des} \cdot X_c \cdot X_c$
2	Hidrólisis de carbohidratos	1													$k_{h, XCH} \cdot X_{CH}$
3	Hidrólisis de proteínas		1												$k_{h, XPR} \cdot X_{PR}$
4	Hidrólisis de lípidos	1-f <sub>li</sub>		f <sub>li</sub>											$k_{h, XLI} \cdot X_{LI}$
5	Consumo de azúcares	-1				(1-Y <sub>ms</sub> )f <sub>bu,ms</sub>	(1-Y <sub>ms</sub> )f <sub>pr,ms</sub>	(1-Y <sub>ms</sub> )f <sub>ac,ms</sub>	(1-Y <sub>ms</sub> )f <sub>H2,ms</sub>		$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i \gamma_{i,5}$	-(Y <sub>ms</sub> )N <sub>bac</sub>			$k_{ms} \cdot \frac{S_{ms}}{K_s + S_{ms}} \cdot X_{ms} \cdot I_1$
6	Consumo de aminoácidos		-1		(1-Y <sub>aa</sub> )f <sub>va,aa</sub>	(1-Y <sub>aa</sub> )f <sub>bu,aa</sub>	(1-Y <sub>aa</sub> )f <sub>pr,aa</sub>	(1-Y <sub>aa</sub> )f <sub>ac,aa</sub>	(1-Y <sub>aa</sub> )f <sub>H2,aa</sub>		$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i \gamma_{i,6}$	$\frac{N_{aa}}{(Y_{aa})N_{bac}}$			$k_{aa} \cdot \frac{S_{aa}}{K_s + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_1$
7	Consumo de ácidos grasos de cadena larga			-1				(1-Y <sub>AGL</sub> ) 0.7	(1-Y <sub>AGL</sub> ) 0.3						$k_{AGL} \cdot \frac{S_{AGL}}{K_s + S_{AGL}} \cdot X_{AGL} \cdot I_2$
8	Consumo de Valerato				-1		(1-Y <sub>C4</sub> ) 0.54	(1-Y <sub>C4</sub> ) 0.31	(1-Y <sub>C4</sub> ) 0.15						$k_{m,C4} \cdot \frac{S_{va}}{K_s + S_{va}} \cdot X_{C4}$ $\frac{1}{1 + S_{bu}/S_{va}} \cdot I_2$
9	Consumo de Butirato					-1		(1-Y <sub>C4</sub> ) 0.8	(1-Y <sub>C4</sub> ) 0.2						$k_{m,C4} \cdot \frac{S_{bu}}{K_s + S_{bu}} \cdot X_{C4}$ $\frac{1}{1 + S_{va}/S_{bu}} \cdot I_2$
10	Consumo de Propionato						-1	(1-Y <sub>pr</sub> ) 0.57	(1-Y <sub>C4</sub> ) 0.43		$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i \gamma_{i,10}$	-(Y <sub>pr</sub> )N <sub>bac</sub>			$k_{m,pr} \cdot \frac{S_{pr}}{K_s + S_{pr}} \cdot X_{pr} \cdot I_2$
11	Consumo de Acetato							-1		(1-Y <sub>ac</sub> )	$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i \gamma_{i,11}$	-(Y <sub>ac</sub> )N <sub>bac</sub>			$k_{m,ac} \cdot \frac{S_{ac}}{K_s + S_{ac}} \cdot X_{ac} \cdot I_3$
12	Consumo de Hidrógeno								-1	(1-Y <sub>H2</sub> )	$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i \gamma_{i,12}$	-(Y <sub>H2</sub> )N <sub>bac</sub>			$k_{m,H2} \cdot \frac{S_{H2}}{K_s + S_{H2}} \cdot X_{H2} \cdot I_1$
13	Decaimiento de X <sub>ms</sub>														$k_{dec} \cdot X_{ms} \cdot X_{ms}$
14	Decaimiento de X <sub>aa</sub>														$k_{dec} \cdot X_{aa} \cdot X_{aa}$
15	Decaimiento de X <sub>li</sub>														$k_{dec} \cdot X_{AGL} \cdot X_{AGL}$
16	Decaimiento de X <sub>C4</sub>														$k_{dec} \cdot X_{C4} \cdot X_{C4}$
17	Decaimiento de X <sub>pr</sub>														$k_{dec} \cdot X_{pr} \cdot X_{pr}$
18	Decaimiento de X <sub>ac</sub>														$k_{dec} \cdot X_{ac} \cdot X_{ac}$
19	Decaimiento de X <sub>H2</sub>														$k_{dec} \cdot X_{H2} \cdot X_{H2}$
		Monosacáridos (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Aminoácidos (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Ácidos grasos de cadena larga (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Valerato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Butirato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Propionato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Acetato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Hidrógeno gas (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Metano gas (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Carbono inorgánico (kmoleC m <sup>-3</sup> )	Nitrogeno inorgánico (kmolecN m <sup>-3</sup> )	Inertes solubles (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Factores inhibitorios (I <sub>1</sub> , I <sub>2</sub> e I <sub>3</sub> ) no empleados en este estudio	

**Tabla 9.2.** Coeficientes bioquímicos de velocidad ( $\gamma_{i,j}$ ) y ecuaciones de velocidad cinética ( $\rho_j$ ) para componentes particulados (i=13-24; j=1-19).

Componente	i	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Velocidad ( $\rho_j$ , kg DQO m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )
j	Proceso	$X_c$	$X_{CH}$	$X_{PR}$	$X_{LI}$	$X_{su}$	$X_{aa}$	$X_{AGL}$	$X_{C4}$	$X_{pr}$	$X_{ac}$	$X_{H2}$	$X_i$	
1	Desintegración	-1	$f_{CH}X_c$	$f_{PR}X_c$	$f_{LI}X_c$								$f_iX_c$	$k_{des} X_c \cdot X_c$
2	Hidrólisis de carbohidratos		-1											$k_{h\_XCH} \cdot X_{CH}$
3	Hidrólisis de proteínas			-1										$k_{h\_XPR} \cdot X_{PR}$
4	Hidrólisis de lípidos				-1									$k_{h\_XLI} \cdot X_{LI}$
5	Consumo de azúcares					$Y_{ms}$								$k_{ms} \cdot \frac{S_{ms}}{K_s + S_{ms}} \cdot X_{ms} \cdot I_1$
6	Consumo de aminoácidos						$Y_{aa}$							$k_{aa} \cdot \frac{S_{aa}}{K_s + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_1$
7	Consumo de ácidos grasos de cadena larga							$Y_{AGL}$						$k_{AGL} \cdot \frac{S_{AGL}}{K_s + S_{AGL}} \cdot X_{AGL} \cdot I_2$
8	Consumo de Valerato								$Y_{C4}$					$k_{m,C4} \cdot \frac{S_{va}}{K_s + S_{va}} \cdot X_{C4} \cdot \frac{1}{1 + S_{bu}/S_{va}} \cdot I_2$
9	Consumo de Butirato								$Y_{C4}$					$k_{m,C4} \cdot \frac{S_{bu}}{K_s + S_{bu}} \cdot X_{C4} \cdot \frac{1}{1 + S_{va}/S_{bu}} \cdot I_2$
10	Consumo de Propionato									$Y_{pr}$				$k_{m,pr} \cdot \frac{S_{pr}}{K_s + S_{pr}} \cdot X_{pr} \cdot I_2$
11	Consumo de Acetato										$Y_{ac}$			$k_{m,ac} \cdot \frac{S_{ac}}{K_s + S_{ac}} \cdot X_{ac} \cdot I_3$
12	Consumo de Hidrógeno											$Y_{H2}$		$k_{m,H2} \cdot \frac{S_{H2}}{K_s + S_{H2}} \cdot X_{H2} \cdot I_1$
13	Decaimiento de $X_{ms}$	1				-1								$k_{dec} X_{ms} \cdot X_{ms}$
14	Decaimiento de $X_{aa}$	1					-1							$k_{dec} X_{aa} \cdot X_{aa}$
15	Decaimiento de $X_{LI}$	1						-1						$k_{dec} X_{AGL} \cdot X_{AGL}$
16	Decaimiento de $X_{C4}$	1							-1					$k_{dec} X_{C4} \cdot X_{C4}$
17	Decaimiento de $X_{pr}$	1								-1				$k_{dec} X_{pr} \cdot X_{pr}$
18	Decaimiento de $X_{ac}$	1									-1			$k_{dec} X_{ac} \cdot X_{ac}$
19	Decaimiento de $X_{H2}$	1										-1		$k_{dec} X_{H2} \cdot X_{H2}$
		Monosacáridos (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Aminoácidos (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Ácidos grasos de cadena larga (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Valerato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Butirato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Propionato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Acetato total (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Hidrógeno gas (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Metano gas (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Carbono inorgánico (kmolecC m <sup>-3</sup> )	Nitrógeno inorgánico (kmolecN m <sup>-3</sup> )	Inertes solubles (kg DQO m <sup>-3</sup> )	Factores inhibitorios (I <sub>1</sub> , I <sub>2</sub> e I <sub>3</sub> ) no empleados en este estudio

**Tabla 9.3.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP1).

Experimento SP1			VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,12	566	9643	1,74	25000	2160	32,7	2,07

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1575	48	756	1150
2	1347	48	647	2095
3	543	48	261	3672
4	0	48	0	4428
5	667	48	320	5184
6	967	48	464	5940
7	967	55	532	6587
8	967	55	532	6847
9	967	55	532	6847
10	967	55	532	7168
11	967	54	522	7632
12	967	54	522	8164
13	2160	51	1102	8695
14	2160	51	1102	9227
15	2160	51	1102	9759
16	4212	50	2106	10281
17	1360	52	707	10803
18	1360	52	707	11905
19	1360	52	707	13007
20	1360	52	707	14108
21	1360	52	707	16214
22	1360	52	707	16921
23	4707	49	2306	17629
24	4707	49	2306	18336
25	3154	52	1640	19043
26	3400	51	1734	19750
27	2664	49	1305	20457
28	2664	49	1305	22764
29	2664	49	1305	25070
30	2842	50	1421	26710
31	2129	50	1065	28444
32	2073	50	1037	29750
33	1622	49	795	31055
34	1498	49	734	32361
35	1498	49	734	33782
36	1498	49	734	34846
37	3326	50	1663	35883
38	1844	50	922	36677
39	1975	49	968	37411
40	1566	49	767	38145
41	1776	49	870	38879
42	1776	49	870	40542
43	1776	49	870	41464
44	1776	50	888	42432
45	2286	50	1143	43199
46	2024	50	1012	44070
47	1863	50	932	44940
48	1931	50	966	45810
49	1931	50	966	46698
50	1931	50	966	47841

51	1931	50	966	48853
52	1854	50	927	49785
53	1763	50	882	50750
54	1808	50	904	51716
55	1580	51	806	52681
56	1580	51	806	53647
57	1580	51	806	54574
58	1580	51	806	55455
59	2171	51	1107	56359
60	2086	51	1064	57165
61	1622	51	827	57971
62	2139	51	1091	58777
63	1899	52	987	59582
64	1899	52	987	60690

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	8,31	806	14747	2,95	79500	3800	33,7	2,72

**Tabla 9.4.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP2).

Experimento SP2			VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Inóculo</b>	7,95	3793	8293	3,97	78500	3520	39,87	1,95

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1300	50	650	650
2	1073	50	537	1187
3	1630	50	815	2002
4	2564	50	1282	3284
5	2564	50	1282	4566
6	2564	50	1282	5848
7	2564	50	1282	7130
8	3479	52	1809	8939
9	3427	54	1851	10789
10	3666	54	1980	12769
11	3340	54	1804	14572
12	3340	54	1804	16376
13	3340	54	1804	18180
14	3340	53	1770	19950
15	2658	54	1435	21385
16	5262	50	2631	24016
17	4803	53	2546	26562
18	3552	52	1847	28409
19	3552	50	1776	30185
20	3552	50	1776	31961
21	3552	50	1776	33737
22	3879	50	1940	35676
23	3217	50	1609	37285
24	2832	50	1416	38701
25	2422	48	1163	39863
26	2422	48	1163	41026
27	2422	48	1163	42188
28	2422	48	1163	43351
29	3319	48	1593	44944
30	3410	49	1671	46615
31	3587	48	1722	48337
32	2991	48	1436	49772
33	2991	48	1436	51208
34	2991	48	1436	52644
35	2991	48	1436	54079
36	2991	49	1466	55545
37	3113	48	1494	57039
38	2620	48	1258	58297
39	3231	50	1616	59912
40	2907	47	1366	61279
41	3389	47	1593	62872
42	2707	47	1272	64144
43	2707	47	1272	65416
44	2707	47	1272	66688
45	2707	47	1272	67961
46	2642	48	1268	69229
47	2544	49	1247	70475
48	2548	49	1249	71724
49	2262	49	1108	72832
50	2262	47	1063	73895

51	2262	47	1063	74959
52	3692	47	1735	76694
53	3316	47	1559	78252
54	3461	47	1627	79879
55	3461	48	1661	81540
56	2457	48	1179	82720
57	2457	48	1179	83899
58	2457	48	1179	85078
59	2457	49	1204	86282
60	4470	49	2190	88473
61	2152	49	1054	89527
62	2485	47	1168	90695
63	2069	47	972	91667
64	2069	50	1035	92702

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,82	1229	10723	0,62	52000	3000	37,80	1,79

**Tabla 9.5.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP3).

Experimento SP3			VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Inóculo</b>	8,17	6244	10084	5,39	81500	3720	39,58	2,34

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	807	48	387	387
2	1374	48	660	1047
3	2174	48	1044	2090
4	4178	48	2005	4096
5	4178	48	2005	6101
6	4178	48	2005	8107
7	4178	53	2214	10321
8	5657	53	2998	13319
9	5615	54	3032	16351
10	5553	56	3110	19461
11	5432	55	2988	22449
12	5432	55	2988	25436
13	5432	55	2988	28424
14	5432	49	2662	31086
15	3282	53	1739	32825
16	6859	50	3430	36254
17	6273	53	3325	39579
18	5498	54	2969	42548
19	5498	54	2969	45517
20	5498	54	2969	48486
21	5498	50	2749	51235
22	6137	50	3069	54303
23	4850	51	2474	56777
24	4300	50	2150	58927
25	4291	48	2060	60987
26	4291	48	2060	63046
27	4291	46	1974	65020
28	4291	46	1974	66994
29	4309	48	2068	69062
30	4196	49	2056	71118
31	4867	47	2287	73406
32	3552	49	1740	75146
33	3552	49	1740	76887
34	3552	49	1740	78627
35	3552	49	1740	80368
36	3552	46	1634	82002
37	3632	49	1780	83781
38	3690	46	1697	85479
39	3882	46	1786	87265
40	3882	46	1786	89050
41	3882	46	1786	90836
42	3882	46	1786	92622
43	4688	47	2203	94825
44	4458	47	2095	96920
45	4044	47	1901	98821
46	4351	47	2045	100866
47	4351	47	2045	102911
48	4351	47	2045	104956
49	4351	47	2045	107001
50	4782	47	2248	109248



51	4695	48	2254	111502
52	4743	47	2229	113731
53	4420	47	2077	115809
54	4420	47	2077	117886
55	4420	47	2077	119963
56	5579	47	2622	122586
57	5009	48	2404	124990
58	4985	47	2343	127333
59	4985	47	2343	129676
60	3895	48	1870	131545
61	3895	48	1870	133415
62	3895	48	1870	135285
63	3895	45	1753	137037
64	4027	45	1812	138849

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,96	1278	10193	0,95	78000	3320	36,85	1,51

**Tabla 9.6.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y purín (SP4).

Experimento SP4			VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Inóculo</b>	7,59	6473	7008	6,44	107500	4460	39,80	2,17

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1516	46	697	697
2	2278	46	1048	1745
3	3159	46	1453	3198
4	5890	51	3004	6202
5	5890	51	3004	9206
6	5890	51	3004	12210
7	5890	50	2945	15155
8	8153	53	4321	19476
9	8337	53	4419	23895
10	7791	54	4207	28102
11	7319	48	3513	31615
12	7319	48	3513	35128
13	7319	48	3513	38641
14	7319	48	3513	42154
15	5877	53	2821	44975
16	7491	53	3970	48946
17	6862	49	3362	52308
18	5681	55	3125	55433
19	5681	55	3125	58557
20	5681	55	3125	61682
21	5681	55	3125	64806
22	7789	48	3739	68545
23	6713	50	3357	71901
24	4355	51	2221	74122
25	4375	48	2100	76222
26	4375	48	2100	78322
27	4375	48	2100	80422
28	4375	48	2100	82522
29	5236	48	2513	85036
30	5327	48	2557	87593
31	4763	48	2286	89879
32	4979	50	2490	92368
33	4979	50	2490	94858
34	4979	50	2490	97347
35	4979	50	2490	99837
36	4979	48	2390	102227
37	5304	46	2440	104667
38	5297	50	2649	107315
39	4092	50	2046	109361
40	4092	50	2046	111407
41	4092	52	2128	113535
42	4092	52	2128	115663
43	5858	46	2695	118358
44	5414	46	2490	120848
45	5032	46	2315	123163
46	5109	47	2401	125564
47	5109	47	2401	127965
48	5109	47	2401	130366
49	5109	43	2197	132563
50	5132	45	2309	134873

51	5084	48	2440	137313
52	5226	47	2456	139769
53	4100	46	1886	141655
54	4100	46	1886	143541
55	4100	46	1886	145427
56	4060	46	1868	147295
57	5592	45	2516	149811
58	5290	48	2539	152350
59	5290	48	2539	154890
60	4079	47	1917	156807
61	4079	47	1917	158724
62	4079	47	1917	160641
63	4079	49	1999	162640
64	5297	45	2384	165023

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,70	1354	10820	0,94	50000	3840	37,20	1,63

**Tabla 9.7.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB1).

Experimento SB1			VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Inóculo</b>	8,31	891	14747	2,95	79500	3800	33,66	2,72

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	2583	52	1343	6907
2	2240	52	1165	8071
3	2341	54	1264	9336
4	2247	53	1191	10526
5	2189	53	1160	11687
6	2189	55	1204	12891
7	2189	55	1204	14095
8	2189	55	1204	15299
9	2165	55	1191	16489
10	2158	55	1187	17676
11	2296	55	1263	18939
12	1860	55	1023	19962
13	1860	55	1023	20985
14	1860	55	1023	22008
15	1860	55	1023	23031
16	2217	53	1175	24206
17	2338	54	1263	25468
18	2515	54	1358	26827
19	3026	51	1543	28370
20	3026	51	1543	29913
21	3026	51	1543	31456
22	3026	54	1634	33090
23	2678	54	1446	34537
24	2345	54	1266	35803
25	2155	54	1164	36967
26	1868	54	1009	37975
27	1868	54	1009	38984
28	1868	54	1009	39993
29	1868	54	1009	41001
30	2214	54	1196	42197
31	2443	55	1344	43541
32	2057	55	1131	44672
33	1823	55	1003	45675
34	1823	55	1003	46677
35	1823	55	1003	47680
36	1823	55	1003	48683
37	1909	55	1050	49733
38	1909	54	1031	50763
39	1909	54	1031	51794
40	1909	54	1031	52825
41	1909	54	1031	53856
42	1909	54	1031	54887
43	1909	54	1031	55918
44	1909	54	1031	56949
45	1069	54	577	57526
46	2407	54	1300	58826
47	2481	55	1365	60190
48	2481	55	1365	61555
49	2481	54	1340	62894
50	2481	54	1340	64234

51	2708	54	1462	65696
52	2554	56	1430	67127
53	2695	55	1482	68609
54	2292	55	1261	69870
55	2292	55	1261	71130
56	2292	55	1261	72391
57	2292	54	1238	73628
58	2181	54	1178	74806
59	2250	54	1215	76021
60	1939	54	1047	77068
61	2085	54	1126	78194
62	2085	55	1147	78194
63	2085	54	1126	79341
64	2085	55	1147	79320

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Digestato</b>	7,16	1350	5634	2,69	5200	1820	32,3	3,36

La mezcla sorgo-biomasa microalgal ha sido disuelta en 100 mL de agua en cada experimento estudiado para facilitar la alimentación al digestor.

**Tabla 9.8.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB2).

Experimento SB2			VCO : 2 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,33	325	8695	1,36	28000	3660	29,82	2,74

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1551	42	651	3276
2	2060	42	865	4141
3	2302	39	898	5039
4	2211	42	929	5967
5	1899	42	798	6765
6	1899	51	968	7733
7	1899	51	968	8702
8	1899	51	968	9670
9	2120	59	1251	10921
10	2508	59	1480	12401
11	2721	60	1633	14033
12	3974	56	2225	16259
13	3974	56	2225	18484
14	3974	58	2305	20789
15	3974	58	2305	23094
16	4745	60	2847	25941
17	4395	54	2373	28314
18	3662	55	2014	30328
19	4054	53	2149	32477
20	4054	53	2149	34626
21	4054	53	2149	36774
22	4054	53	2149	38923
23	3574	53	1894	40817
24	3368	53	1785	42602
25	2914	54	1574	44176
26	2686	53	1424	45599
27	2686	53	1424	47023
28	2686	54	1450	48473
29	2686	51	1370	49843
30	3313	54	1789	51632
31	3401	54	1837	53469
32	3626	53	1922	55391
33	3318	52	1725	57116
34	3318	52	1725	58841
35	3318	52	1725	60567
36	3318	53	1759	62325
37	3424	53	1815	64140
38	3424	53	1815	65955
39	3424	53	1815	67769
40	3424	53	1815	69584
41	3424	53	1815	71399
42	3424	53	1815	73214
43	3424	52	1780	74994
44	3424	52	1780	76774
45	2544	53	1348	78123
46	4012	53	2126	80249
47	3744	53	1984	82233
48	3744	53	1984	84218

49	3744	51	1909	86127
50	3744	51	1909	88037
51	3594	52	1869	89906
52	3548	52	1845	91751
53	3489	53	1849	93600
54	3388	53	1796	95395
55	3388	52	1762	97157
56	3388	52	1762	98919
57	3388	52	1762	100681
58	3368	52	1751	102432
59	3800	52	1751	104183
60	3610	53	2014	106197
61	3924	52	1877	108075
62	3924	52	2040	110115
63	3924	52	2040	112155
64	3924	51	2001	114157

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Digestato</b>	8,05	1490	6723	4,23	66000	1600	34,22	3,30

La mezcla sorgo-biomasa microalgal ha sido disuelta en 100 mL de agua en cada experimento estudiado para facilitar la alimentación al digestor.

**Tabla 9.9.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB3).

Experimento SB3			VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Inóculo</b>	8,45	310	10189	1,55	34000	5220	30,69	2,69

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1870	53	991	4616
2	2654	53	1407	6022
3	2974	48	1428	7450
4	3052	49	1495	8945
5	2804	59	1654	10600
6	2804	59	1654	12254
7	2804	59	1654	13908
8	2804	59	1654	15563
9	3567	55	1962	17525
10	3405	54	1839	19363
11	3457	55	1901	21265
12	3682	55	2025	23290
13	3682	52	1915	25204
14	3682	52	1915	27119
15	3682	53	1951	29071
16	4513	54	2437	31508
17	4581	53	2428	33936
18	4338	54	2343	36278
19	5208	56	2916	39195
20	5208	56	2916	42111
21	5208	56	2916	45027
22	5208	56	2916	47944
23	5975	53	3167	51111
24	5197	54	2806	53917
25	4870	53	2581	56498
26	4132	53	2190	58688
27	4132	53	2190	60878
28	4132	53	2190	63068
29	4132	55	2273	65341
30	5446	53	2886	68227
31	5006	53	2653	70880
32	5265	52	2738	73618
33	5766	49	2825	76443
34	5766	53	3056	79499
35	5766	53	3056	82555
36	5766	50	2883	85438
37	6424	52	3340	88779
38	6424	50	3212	91991
39	6424	50	3212	95203
40	6424	50	3212	98415
41	6424	50	3212	101627
42	6424	50	3212	104839
43	6424	50	3212	108051
44	6424	51	3276	111327
45	4766	52	2478	113805
46	7258	52	3774	117580
47	6720	52	3494	121074
48	6720	52	3494	124568
49	6720	50	3360	127928
50	6720	50	3360	131288



51	6636	53	3517	134805
52	6613	51	3373	138178
53	6198	52	3223	141401
54	6359	52	3307	144708
55	6359	52	3307	148014
56	6359	52	3307	151321
57	6359	52	3307	154628
58	7789	52	4050	158678
59	6516	52	3388	162066
60	5657	51	3323	165389
61	6308	52	2942	168331
62	6308	51	3217	168331
63	6308	51	3217	171548
64	6308	50	3154	171548

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
<b>Digestato</b>	7,94	1598	10068	7,31	116000	3420	34,71	3,30

La mezcla sorgo-biomasa microalgal ha sido disuelta en 100 mL de agua en cada experimento estudiado para facilitar la alimentación al digestor.

**Tabla 9.10.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo y biomasa microalgal (SB4).

Experimento SB4			VCO : 4 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,35	355	9894	1,70	29500	5100	30,71	2,61

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1816	47	854	3974
2	2388	47	1122	5097
3	2628	44	1156	6253
4	2543	46	1170	7423
5	2571	54	1388	8811
6	2571	54	1388	10199
7	2571	59	1517	11716
8	2571	59	1517	13233
9	3217	54	1737	14970
10	3211	54	1734	16704
11	3269	55	1798	18502
12	3307	54	1786	20288
13	3307	53	1753	22041
14	3307	55	1819	23860
15	3307	55	1819	25678
16	4283	52	2227	27906
17	4199	53	2225	30131
18	4507	52	2344	32475
19	4816	54	2601	35075
20	4816	54	2601	37676
21	4816	54	2601	40277
22	4816	54	2601	42877
23	6412	50	3206	46083
24	6610	52	3437	49520
25	5664	54	3059	52579
26	4629	52	2407	54986
27	4629	53	2453	57439
28	4629	53	2453	59893
29	4629	48	2222	62115
30	7070	52	3676	65791
31	6308	52	3280	69071
32	7170	51	3657	72728
33	6756	52	3513	76241
34	6756	53	3581	79822
35	6756	51	3446	83267
36	6756	52	3513	86780
37	7339	51	3743	90523
38	7339	51	3743	94266
39	7339	50	3670	97936
40	7339	52	3816	101752
41	7339	52	3816	105568
42	7339	51	3743	109311
43	7339	51	3743	113054
44	7339	51	3743	116797
45	5207	53	2760	119557
46	8314	50	4157	123714
47	7340	50	3670	127384
48	7340	50	3670	131054
49	7340	50	3670	134724
50	7340	50	3670	138394

51	7919	51	4039	142432
52	7831	50	3916	146348
53	7306	51	3726	150074
54	7650	52	3978	154052
55	7650	52	3978	158030
56	7650	50	3825	161855
57	7650	50	3825	165680
58	5563	50	2782	168461
59	6172	52	2893	171354
60	5265	50	3086	174440
61	6369	51	2685	177125
62	6369	51	3248	177125
63	6369	51	3248	180374
64	6369	49	3121	180374

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,90	3743	9822	7,72	149000	3520	35,77	3,47

La mezcla sorgo-biomasa microalgal ha sido disuelta en 100 mL de agua en cada experimento estudiado para facilitar la alimentación al digestor.

**Tabla 9.11.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP1).

Experimento SBP1			VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	7,45	1326	3206	7,72	57000	1340	31,77	2,90

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1714	53	908	3992
2	1713	53	1044	5036
3	1969	53	933	5969
4	1760	53	932	6901
5	1759	53	932	7833
6	1759	53	932	8766
7	1759	53	1172	9937
8	2211	52	1149	11087
9	2210	52	1616	12702
10	3107	52	1232	13935
11	2370	52	1232	15167
12	2370	52	1232	16399
13	2370	52	1232	17632
14	2370	52	966	18598
15	1857	52	935	19533
16	1799	53	1293	20826
17	2439	53	1070	21895
18	2018	53	1070	22965
19	2018	53	1070	24034
20	2018	51	1029	25063
21	2018	51	1048	26111
22	2054	52	1051	27162
23	2021	52	1017	28179
24	1956	52	1013	29192
25	1948	52	1013	30205
26	1948	52	1013	31218
27	1948	52	1013	32231
28	1948	52	1083	33314
29	2083	52	1178	34492
30	2266	52	952	35444
31	1831	53	1189	36633
32	2243	53	1189	37822
33	2243	53	1189	39011
34	2243	53	1189	40200
35	2243	53	1003	41203
36	1893	53	1055	42258
37	1991	53	925	43184
38	1746	53	1030	44213
39	1943	53	1030	45243
40	1943	53	1030	46273
41	1943	53	1030	47303
42	1943	53	1108	48410
43	2090	53	676	49086
44	1275	53	615	49701
45	1161	53	780	50482
46	1472	53	780	51262
47	1472	53	780	52042
48	1472	53	780	52822
49	1472	52	649	53472
50	1249	52	592	54063

51	1138	52	600	54663
52	1154	52	751	55414
53	1444	52	751	56165
54	1444	52	751	56916
55	1444	52	751	57667
56	1444	52	703	58369
57	1351	52	653	59023
58	1256	52	571	59594
59	1099	52	643	60237
60	1236	52	643	60880
61	1236	52	643	61522
62	1236	52	643	61522
63	1236	52	595	62165
64	1145	52	522	62118

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,85	5799	16418	6,87	100000	2760	33,92	2,75

**Tabla 9.12.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP2).

Experimento SBP2			VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,07	1672	7901	3,99	41400	1600	34,72	3,70

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	3345	52	1739	7724
2	3646	51	1859	9583
3	3402	50	1701	11284
4	3402	50	1701	12985
5	3402	50	1701	14686
6	3402	50	1701	16387
7	3924	50	1962	18349
8	3924	51	2001	20351
9	5268	50	2634	22985
10	4264	51	2175	25159
11	4264	50	2132	27291
12	4264	50	2132	29423
13	4264	49	2089	31513
14	4150	50	2075	33588
15	3777	50	1889	35476
16	5046	50	2523	37999
17	4182	51	2133	40132
18	4182	51	2133	42265
19	4182	49	2049	44314
20	4182	48	2007	46321
21	4195	50	2098	48419
22	3891	50	1946	50364
23	3623	50	1812	52176
24	3623	51	1848	54024
25	3623	51	1848	55871
26	3623	51	1848	57719
27	3623	51	1848	59567
28	4768	49	2336	61903
29	3600	49	1764	63667
30	3976	51	2028	65695
31	3358	51	1713	67407
32	3916	51	1997	69405
33	3916	51	1997	71402
34	3916	51	1997	73399
35	3916	51	1997	75396
36	3816	51	1946	77342
37	3881	52	2018	79360
38	3590	51	1831	81191
39	3221	50	1611	82802
40	3221	50	1611	84412
41	3221	50	1611	86023
42	3221	50	1611	87633
43	3277	50	1639	89272
44	2564	52	1333	90605
45	2204	50	1102	91707
46	2425	51	1237	92944
47	2425	51	1237	94181
48	2425	51	1237	95417
49	2425	51	1237	96654
50	2253	51	1149	97803

51	2224	51	1134	98937
52	2224	52	1156	100094
53	2431	50	1216	101309
54	2431	50	1216	102525
55	2431	50	1216	103740
56	2431	50	1216	104956
57	2309	49	1131	106087
58	2335	51	1191	107278
59	2115	51	1191	108469
60	2022	52	1100	109569
61	2022	52	1051	110620
62	2022	52	1051	111672
63	2022	52	1051	112723
64	2469	52	1051	113774

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,61	1833	14839	6,22	111000	4960	34,43	2,65

**Tabla 9.13.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP3).

Experimento SBP3			VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	7,94	5212	10068	8,24	150000	3600	35,99	3,70

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	5534	51	2822	12807
2	6013	50	3007	15814
3	4800	49	2352	18166
4	4800	48	2304	20470
5	4800	50	2400	22870
6	4800	51	2448	25318
7	5904	50	2952	28270
8	5904	52	3070	31340
9	5861	50	2931	34270
10	4941	50	2471	36741
11	4941	51	2520	39261
12	4941	51	2520	41781
13	4941	51	2520	44300
14	5220	49	2558	46858
15	4060	51	2071	48929
16	7345	52	3819	52748
17	5855	49	2869	55617
18	5855	52	3045	58662
19	5855	50	2928	61589
20	5855	49	2869	64458
21	4692	50	2346	66804
22	4841	50	2421	69225
23	4484	50	2242	71467
24	5243	50	2622	74088
25	5243	50	2622	76710
26	5243	50	2622	79331
27	5243	48	2517	81848
28	4931	50	2466	84313
29	4951	50	2476	86789
30	3891	50	1946	88734
31	4340	53	2300	91035
32	4340	53	2300	93335
33	4340	50	2170	95505
34	4340	50	2170	97675
35	4594	51	2343	100018
36	4319	52	2246	102264
37	4099	52	2131	104395
38	4248	51	2166	106562
39	4248	51	2166	108728
40	4248	52	2209	110937
41	4248	52	2209	113146
42	5106	51	2604	115750
43	4944	52	2571	118321
44	4455	52	2317	120638
45	4307	48	2067	122705
46	4307	48	2067	124772
47	4307	48	2067	126840
48	4307	48	2067	128907
49	3720	52	1934	130841
50	3354	52	1744	132585



51	3302	52	1717	134303
52	3458	51	1764	136066
53	3458	51	1764	137830
54	3458	46	1591	139420
55	3458	46	1591	141011
56	3328	51	1697	142708
57	3315	50	1658	144366
58	3340	51	1703	146069
59	4184	50	2092	148161
60	4184	50	2092	150253
61	4184	50	2092	152345
62	4184	50	2092	152345
63	3574	50	2092	154437
64	3208	50	1787	154437

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	8,00	2166	17227	5,72	94000	2720	33,16	2,54

**Tabla 9.14.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal y purín (SBP4).

Experimento SBP4			VCO : 4 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	7,90	1999	9822	7,76	150000	1560	34,59	3,75

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	7783	49	3814	15345
2	8440	48	4051	19396
3	6681	49	3274	22670
4	6681	48	3207	25876
5	6681	50	3341	29217
6	6681	49	3274	32491
7	6133	50	3067	35557
8	7750	51	3953	39510
9	7750	51	3953	43462
10	7750	51	3953	47415
11	6682	48	3207	50622
12	6682	52	3475	54097
13	6682	52	3475	57571
14	6682	51	3408	60979
15	9004	48	4322	65301
16	7598	50	3799	69100
17	7274	48	3492	72592
18	7274	52	3782	76374
19	7274	53	3855	80229
20	7274	53	3855	84085
21	9568	47	4497	88581
22	9539	48	4579	93160
23	8674	48	4164	97324
24	7182	51	3663	100987
25	7182	52	3735	104721
26	7182	52	3735	108456
27	7182	45	3232	111688
28	8181	50	4091	115778
29	8777	49	4301	120079
30	5262	49	2578	122657
31	7627	52	3966	126623
32	7627	52	3966	130589
33	7627	52	3966	134555
34	7627	46	3508	138064
35	8090	51	4126	142190
36	7993	51	4076	146266
37	8074	49	3956	150222
38	6150	54	3321	153543
39	6150	54	3321	156864
40	6150	50	3075	159939
41	6150	50	3075	163014
42	6810	51	3473	166488
43	6195	52	3221	169709
44	6208	51	3166	172875
45	6167	51	3145	176020
46	6167	51	3145	179165
47	6167	51	3145	182311
48	6167	47	2898	185209
49	5628	51	2870	188079
50	5813	49	2848	190928

51	5780	50	2890	193818
52	5551	50	2776	196593
53	5551	50	2776	199369
54	5551	50	2776	202144
55	5551	44	2442	204587
56	5553	50	2777	207363
57	5531	49	2710	210073
58	5290	49	2592	212665
59	5778	49	2592	215258
60	5778	49	2831	218089
61	5778	49	2831	220920
62	5778	49	2831	220920
63	5505	49	2697	223751
64	5216	49	2556	223617

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	8,08	3133	16052	7,50	101000	3840	33,59	2,73

**Tabla 9.15.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT1).

Experimento SBPT1			VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	7,85	5799	16418	4,55	100000	2760	33,92	2,75

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1118	52	581	3956
2	1122	51	572	4528
3	1240	51	632	5160
4	1240	51	632	5793
5	1240	51	632	6425
6	1240	51	632	7057
7	1326	51	676	7734
8	1326	51	676	8410
9	1808	51	922	9332
10	1414	51	721	10053
11	1414	51	721	10774
12	1414	51	721	11495
13	1414	51	721	12217
14	2269	52	1180	13397
15	2211	52	1150	14546
16	2125	53	1126	15672
17	2569	53	1362	17034
18	2569	53	1362	18396
19	2569	53	1362	19757
20	2569	53	1362	21119
21	2037	53	1080	22198
22	1743	54	941	23140
23	1799	54	971	24111
24	2523	54	1362	25473
25	2523	54	1362	26836
26	2523	54	1362	28198
27	2523	54	1362	29561
28	1609	54	869	30430
29	2220	54	1199	31628
30	1779	54	961	32589
31	1808	54	976	33565
32	1808	54	976	34542
33	1808	54	976	35518
34	1546	54	835	36353
35	1086	52	565	36918
36	814	52	423	37341
37	1719	52	894	38235
38	1618	55	890	39125
39	1618	55	890	40015
40	1618	55	890	40904
41	1618	52	841	41746
42	1618	52	841	42587
43	2322	52	1207	43795
44	1965	53	1041	44836
45	1754	53	930	45766
46	1754	53	930	46695
47	1754	53	930	47625
48	1754	53	930	48555
49	1540	53	816	49371
50	1778	53	942	50313

51	1266	53	671	50984
52	1815	53	962	51946
53	1815	53	962	52908
54	1815	53	962	53870
55	1815	53	962	54832
56	1854	51	946	55777
57	1489	51	759	56537
58	1707	51	871	57407
59	1613	51	823	58230
60	1613	53	855	59085
61	1613	53	855	59940
62	1613	53	855	59940
63	1613	52	839	60795
64	1079	52	561	60779

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,78	4212	14460	6,81	119000	2900	36,10	2,93

**Tabla 9.16.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT2).

Experimento SBPT2			VCO : 2 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	7,61	1833	14839	2,66	111000	4960	34,43	2,65

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	2394	51	1221	6317
2	2364	50	1182	7499
3	2397	51	1222	8721
4	2690	51	1372	10093
5	2690	51	1372	11465
6	2690	51	1372	12837
7	2690	51	1372	14209
8	2690	50	1345	15554
9	3228	49	1582	17136
10	3084	49	1511	18647
11	2624	49	1286	19933
12	2624	49	1286	21218
13	2624	49	1286	22504
14	2624	49	1286	23790
15	3777	52	1964	25754
16	4287	50	2144	27897
17	4107	50	2054	29951
18	4128	52	2147	32098
19	4128	52	2147	34244
20	4128	50	2064	36308
21	4128	50	2064	38372
22	5003	53	2652	41024
23	4575	54	2471	43494
24	4277	53	2267	45761
25	3562	52	1852	47613
26	3562	52	1852	49465
27	3562	51	1817	51282
28	3562	51	1817	53099
29	4000	52	2080	55179
30	4163	54	2248	57427
31	3600	53	1908	59335
32	4150	51	2117	61451
33	4150	51	2117	63568
34	4150	51	2117	65684
35	4150	51	2117	67801
36	3286	51	1676	69477
37	3093	53	1748	71225
38	3299	52	1647	72872
39	3168	53	1679	74551
40	3168	53	1679	76231
41	3168	53	1679	77910
42	3168	53	1679	79589
43	3168	53	1659	81248
44	3131	51	1597	82845
45	3761	51	1918	84763
46	3213	52	1671	86434
47	3213	52	1671	88104
48	3213	52	1671	89775
49	3213	54	1735	91510
50	3015	52	1568	93078

51	3887	55	2138	95216
52	3504	55	1927	97143
53	3399	52	1767	98911
54	3399	52	1767	100678
55	3399	49	1666	102344
56	3399	49	1666	104009
57	4061	51	2071	106080
58	2950	54	1593	107673
59	4127	54	2229	109902
60	3691	53	2187	112089
61	3691	53	1956	114045
62	3691	51	1882	115928
63	3961	51	1882	117810
64	3691	51	2020	119830

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,62	4481	14541	7,76	101500	4250	35,39	2,98

**Tabla 9.17.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT3).

Experimento SBPT3			VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,00	2166	17227	2,66	94000	2720	33,16	2,54

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	3227	52	1678	10185
2	3340	51	1703	11889
3	3442	52	1790	13678
4	3442	52	1790	15468
5	3442	50	1721	17189
6	3442	50	1721	18910
7	3442	50	1721	20631
8	4636	49	2272	22903
9	3778	51	1927	24830
10	2624	51	1338	26168
11	2624	52	1364	27532
12	2624	52	1364	28897
13	2624	52	1364	30261
14	5223	50	2612	32873
15	5320	50	2660	35533
16	5113	52	2659	38192
17	4873	53	2583	40774
18	4873	53	2583	43357
19	4873	52	2534	45891
20	4873	49	2388	48279
21	5660	53	3000	51279
22	5072	55	2790	54068
23	4970	53	2634	56702
24	4492	51	2291	58993
25	4492	51	2291	61284
26	4492	48	2156	63440
27	4492	48	2156	65596
28	5187	52	2697	68294
29	5346	54	2887	71180
30	4432	54	2393	73574
31	4629	53	2453	76027
32	4629	53	2453	78480
33	4629	52	2407	80888
34	4629	52	2407	83295
35	4701	52	2445	85739
36	4507	52	2344	88083
37	4297	51	2191	90274
38	4661	52	2424	92698
39	4661	52	2424	95122
40	4661	52	2424	97545
41	4661	52	2424	99969
42	4661	49	2284	102253
43	7144	49	3501	105754
44	4912	50	2456	108210
45	4787	55	2633	110842
46	4787	55	2633	113475
47	4787	55	2633	116108
48	4787	52	2489	118597
49	4533	52	2357	120955
50	2835	53	1503	122457



51	2582	53	1368	123826
52	4180	52	2174	125999
53	4180	50	2090	128089
54	4180	51	2132	130221
55	4180	52	2174	132395
56	4967	50	2484	134878
57	4452	52	2315	137193
58	5942	50	2971	140164
59	5772	54	3117	143281
60	5772	54	3117	146398
61	5772	54	3117	149515
62	5772	54	3117	149515
63	5772	52	3001	152632
64	6467	49	2828	152516

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,62	2531	16559	7,19	132000	3940	36,84	3,04

**Tabla 9.18.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín y triticale (SBPT4).

Experimento SBPT4			VCO : 4 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,08	3133	16052	4,34	101000	3840	33,59	2,73

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	7274	49	3564	20551
2	7808	49	3826	24377
3	5697	53	3019	27396
4	5697	53	3019	30416
5	5697	53	3019	33435
6	5697	51	2905	36340
7	5697	51	2905	39246
8	7355	48	3530	42776
9	7847	49	3845	46621
10	6668	52	3467	50089
11	6668	52	3467	53556
12	6668	52	3467	57023
13	6668	46	3067	60091
14	6632	50	3316	63407
15	6969	52	3624	67031
16	7439	52	3868	70899
17	6458	51	3294	74192
18	6458	51	3294	77486
19	6458	51	3294	80780
20	6458	51	3294	84073
21	8337	54	4502	88575
22	7847	53	4159	92734
23	7105	55	3908	96642
24	7158	53	3794	100436
25	7158	53	3794	104229
26	7158	53	3794	108023
27	7158	53	3794	111817
28	6189	54	3342	115159
29	6917	53	3666	118825
30	6299	52	3275	122100
31	6876	51	3507	125607
32	6876	51	3507	129114
33	6876	49	3369	132483
34	6876	49	3369	135852
35	6542	52	3402	139254
36	6108	52	3176	142430
37	6400	52	3328	145758
38	7008	52	3644	149402
39	7008	52	3644	153047
40	7008	52	3644	156691
41	7008	46	3224	159914
42	8324	46	3829	163744
43	10848	48	5207	168951
44	8126	51	4144	173095
45	6095	55	3352	176447
46	6095	55	3352	179799
47	6095	55	3352	183152
48	6095	52	3169	186321
49	6535	51	3333	189654
50	6568	52	3415	193069

51	6101	51	3112	196181
52	6228	52	3239	199419
53	6228	52	3239	202658
54	6228	52	3239	205896
55	6228	52	3239	209135
56	5790	50	2895	212030
57	7297	50	3649	215678
58	7008	51	3574	219252
59	5492	50	3504	222756
60	5492	50	2746	225502
61	5492	48	2636	228139
62	5492	48	2636	228139
63	5492	48	2636	230775
64	8553	54	4619	230775

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,71	4931	12929	8,19	150000	4120	35,13	3,03

**Tabla 9.19.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR1).

Experimento SBPTR1			VCO : 1 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,21	5084	19601	3,48	150000	1240	34,04	2,86

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	814	51	415	1709
2	909	51	464	2172
3	543	51	277	2449
4	778	52	405	2854
5	778	52	405	3258
6	778	52	405	3663
7	778	52	405	4067
8	674	52	350	4418
9	1200	52	624	5042
10	952	50	476	5518
11	954	52	496	6014
12	954	52	496	6510
13	954	52	496	7006
14	954	52	496	7502
15	1190	52	619	8121
16	589	52	306	8427
17	987	52	513	8940
18	1490	52	775	9715
19	1490	52	775	10490
20	1490	52	775	11265
21	1490	52	775	12040
22	1880	52	978	13017
23	1880	52	978	13995
24	1269	52	660	14655
25	1175	52	611	15266
26	1175	52	611	15877
27	1175	52	611	16488
28	1175	52	611	17099
29	504	52	262	17361
30	1030	52	536	17896
31	2057	52	1070	18966
32	1265	52	658	19624
33	1265	52	658	20282
34	1265	52	658	20939
35	1265	52	658	21597
36	1340	51	683	22281
37	1007	51	514	22794
38	984	51	502	23296
39	1270	51	648	23944
40	1270	51	648	24591
41	1270	51	648	25239
42	1270	51	648	25887
43	1311	51	669	26555
44	1204	51	614	27169
45	1000	51	510	27679
46	1186	51	605	28284
47	1186	51	605	28889
48	1186	49	581	29470
49	1186	49	581	30051
50	1186	49	581	30633

51	1321	49	647	31280
52	1351	49	662	31942
53	1276	49	625	32567
54	1276	49	625	33192
55	1276	51	651	33843
56	1276	51	651	34494
57	1276	51	651	35145
58	1265	52	658	35802
59	1223	52	636	36438
60	1118	52	581	37020
61	1118	52	581	37601
62	1118	52	581	37601
63	1118	52	581	38182
64	1089	52	566	38182

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	8,08	1254	15735	2,84	51000	3680	37,01	2,34

**Tabla 9.20.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR2).

Experimento SBPTR2			VCO : 2 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	7,11	2405	12688	5,08	110000	3440	32,32	2,94

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1880	50	940	4443
2	2111	50	1056	5498
3	1939	51	989	6487
4	2516	51	1283	7770
5	2516	51	1283	9053
6	2516	52	1308	10362
7	2516	52	1308	11670
8	1799	52	935	12605
9	2636	52	1371	13976
10	2453	51	1251	15227
11	2930	51	1494	16721
12	2930	51	1494	18216
13	2930	51	1494	19710
14	2930	51	1494	21204
15	3133	51	1598	22802
16	2107	52	1096	23898
17	2995	52	1557	25455
18	2032	52	1057	26512
19	2032	52	1057	27569
20	2032	52	1057	28625
21	2032	54	1097	29722
22	2032	54	1097	30820
23	2032	52	1057	31876
24	3070	52	1596	33473
25	3179	52	1653	35126
26	3179	52	1653	36779
27	3179	52	1653	38432
28	3179	52	1653	40085
29	5379	48	2582	42667
30	2750	48	1320	43987
31	3865	50	1933	45920
32	2748	50	1374	47294
33	2748	49	1347	48640
34	2748	52	1429	50069
35	2748	52	1429	51498
36	3862	48	1328	52826
37	2766	50	953	53778
38	1905	52	1497	55275
39	2879	52	1497	56772
40	2879	52	1497	58269
41	2879	50	1440	59709
42	2879	50	1467	61175
43	2933	51	1496	62671
44	2867	51	1462	64133
45	2100	51	1071	65204
46	3029	50	1515	66719
47	3029	50	1515	68233
48	3029	50	1515	69748
49	3029	50	1515	71262
50	3029	50	1515	72777

51	4343	51	2215	74992
52	4307	51	2197	77188
53	3994	51	651	77839
54	3994	51	2037	79876
55	3994	51	2037	81913
56	3994	51	2037	83950
57	3994	51	2037	85987
58	3662	50	1831	87818
59	3407	50	1831	89649
60	3248	53	1806	91455
61	3248	53	1721	93176
62	3248	53	1721	94897
63	3248	53	1721	96619
64	2881	51	1656	98275

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,89	1219	14330	3,53	80000	3940	33,65	2,80

**Tabla 9.21.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR3).

Experimento SBPTR3			VCO : 3 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,59	2308	15694	2,97	71500	2980	37,02	2,91

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	2900	51	1479	7018
2	3075	51	1568	8586
3	2984	51	1522	10108
4	3878	51	1978	12086
5	3878	51	1978	14064
6	3878	50	1939	16003
7	3878	50	1939	17942
8	2741	50	1371	19312
9	4513	51	2302	21614
10	4108	50	2054	23668
11	4822	52	2507	26175
12	4822	52	2507	28683
13	4822	49	2363	31046
14	4822	49	2363	33408
15	5181	52	2694	36102
16	3823	52	1988	38090
17	4497	50	2249	40339
18	2761	50	1381	41719
19	2761	50	1381	43100
20	2761	54	1491	44591
21	2761	54	1491	46082
22	2761	52	1436	47518
23	2761	52	1436	48953
24	3726	49	1826	50779
25	2632	50	1316	52095
26	2632	50	1316	53411
27	2632	54	1421	54832
28	2632	54	1421	56254
29	6804	46	3130	59383
30	5194	50	2597	61980
31	5288	52	2750	64730
32	3695	54	1995	66725
33	3695	54	1995	68721
34	3695	48	1774	70494
35	3695	48	1774	72268
36	5761	49	2823	75091
37	4565	50	2283	77373
38	4261	51	2173	79546
39	4044	52	2103	81649
40	4044	50	2022	83671
41	4044	52	2103	85774
42	4044	49	1982	87756
43	5135	51	2619	90375
44	4508	52	2344	92719
45	2500	52	1300	94019
46	4408	52	2292	96311
47	4408	52	2292	98603
48	4408	50	2204	100807
49	4408	50	2204	103011
50	4408	50	2204	105215



51	5868	50	2934	108149
52	5926	50	2963	111112
53	4582	51	2337	113449
54	4582	51	2337	115786
55	4582	51	2337	118123
56	4582	48	2199	120322
57	4582	48	2199	122521
58	1017	51	519	123040
59	4620	51	2356	125396
60	5382	53	2449	127845
61	5382	53	2852	130697
62	5382	50	2691	133388
63	5382	50	2691	136079
64	5984	52	2799	138878

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,90	1655	14794	5,05	89000	5000	37,30	2,99

**Tabla 9.22.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, biomasa microalgal, purín, triticale y rastrojo de maíz (SBPTR4).

Experimento SBPTR4			VCO : 4 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,28	3540	12601	5,22	105000	3540	35,23	2,79

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	5058	49	2478	10658
2	5835	49	2859	13518
3	5602	49	2745	16262
4	6864	51	3501	19763
5	6864	51	3501	23264
6	6864	47	3226	26490
7	6864	47	3226	29716
8	4831	50	2416	32131
9	7501	49	3675	35807
10	6590	50	3295	39102
11	6964	51	3552	42654
12	6964	51	3552	46205
13	6964	51	3552	49757
14	6964	51	3552	53308
15	6636	51	3384	56693
16	3655	52	1901	58593
17	3086	51	1574	60167
18	4417	51	2253	62420
19	4417	51	2253	64673
20	4417	51	2253	66925
21	4417	51	2253	69178
22	4417	47	2076	71254
23	4417	47	2076	73330
24	100	47	47	73377
25	2738	50	1369	74746
26	2738	50	1369	76115
27	2738	50	1369	77484
28	2738	50	1369	78853
29	5978	50	2989	81842
30	3418	50	1709	83551
31	7796	50	3898	87449
32	5094	50	2547	89996
33	5094	51	2598	92594
34	5094	51	2598	95192
35	5094	51	2598	97790
36	6036	49	2958	100747
37	6445	50	3223	103970
38	8187	50	4094	108063
39	7789	50	3895	111958
40	7789	50	3895	115852
41	7789	50	3895	119747
42	7789	50	3895	123641
43	7319	51	3733	127374
44	7830	51	3993	131367
45	4100	51	2091	133458
46	6501	50	3251	136709
47	6501	50	3251	139959
48	6501	49	3185	143145
49	6501	49	3185	146330
50	6501	49	3185	149516

51	6451	52	3355	152870
52	6457	50	3229	156099
53	5542	51	2826	158925
54	5542	51	2826	161752
55	5542	51	2826	164578
56	5542	48	2660	167238
57	5542	49	2716	169954
58	6720	49	3293	173247
59	6684	50	3360	176607
60	8112	52	3476	180082
61	8112	52	4218	184301
62	8112	49	3975	188275
63	8112	49	3975	192250
64	6370	52	3312	195563

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Digestato	7,78	1383	14655	4,32	95500	6400	37,39	3,62

**Tabla 9.23.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín (STP1).

Experimento STP1			VCO : 1,17 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
Inóculo	8,65	673	11321	1,42	116000	2200	2,34	0,21

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1165	59	687	3962
2	1122	58	651	4613
3	1109	58	643	5256
4	1138	58	660	5916
5	1077	59	635	6551
6	1077	59	635	7187
7	1077	59	635	7822
8	1077	59	635	8458
9	1077	59	635	9093
10	1077	62	668	9761
11	1210	62	750	10511
12	1130	62	701	11212
13	1130	62	701	11912
14	1130	62	701	12613
15	1130	62	701	13313
16	1036	62	642	13956
17	912	62	565	14521
18	843	62	523	15044
19	1072	62	664	15708
20	1072	62	664	16372
21	1072	63	675	17047
22	1072	63	675	17723
23	1155	63	728	18450
24	1240	63	781	19231
25	1086	63	684	19916
26	838	63	528	20444
27	838	63	528	20971
28	838	63	528	21499
29	838	63	528	22027
30	843	63	531	22558
31	984	63	620	23178
32	875	63	551	23730
33	875	63	551	24281
34	875	63	551	24832
35	875	65	569	25401
36	875	65	569	25970
37	1135	62	704	20619
38	1188	62	543	21162
39	1237	62	767	21929
40	1085	62	673	22602
41	1085	62	673	23274
42	1085	62	673	23947
43	1085	62	673	24620
44	1181	62	732	25352
45	1194	62	740	26092
46	1371	62	850	26942
47	1353	61	825	27767
48	1353	61	825	28593
49	1353	61	825	29418
50	1353	61	825	30243

51	1696	61	1035	31278
52	1568	61	956	32235
53	1260	67	844	33079
54	1070	67	717	33796
55	1070	67	717	34513
56	1070	70	749	35262
57	1070	70	749	36011
58	1089	70	762	36773
59	1105	70	774	37546

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
<b>Digestato</b>	8,30	619	10631	0,75	37000	2280	2,60	0,25

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda

**Tabla 9.24.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín (STP2).

Experimento STP2			VCO : 1,05 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,32	830	14277	2,18	41000	4560	31,30	2,64

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	3462	56	1939	5360
2	3462	56	1939	7299
3	4876	57	2779	10078
4	4675	58	2712	12790
5	4218	59	2489	15278
6	3547	58	2057	17335
7	3547	58	2057	19393
8	3547	58	2057	21450
9	4198	58	2435	23884
10	4514	58	2618	26503
11	4168	58	2417	28920
12	4353	55	2394	31314
13	4443	55	2443	33758
14	4443	55	2443	36201
15	4443	55	2443	38644
16	4443	55	2443	41088
17	5972	56	3344	44432
18	5656	56	3167	47599
19	4682	57	2669	50268
20	5714	57	3257	53525
21	5714	54	3085	56610
22	5714	54	3085	59696
23	5714	54	3086	62781
24	6718	56	3762	66543
25	6077	57	3464	70007
26	5438	57	3100	73107
27	6003	57	3422	76529
28	6003	56	3362	79890
29	6003	56	3362	83252
30	6003	56	3362	86613
31	5932	56	3322	89935
32	5070	58	2941	92876
33	5057	58	2933	95809
34	3833	58	2223	98032
35	3833	58	2223	100255
36	3833	58	2223	102478
37	3833	58	2223	104701
38	5379	59	3174	107875
39	5024	59	2261	110136
40	4991	60	2995	113131
41	5299	59	3127	116258
42	5299	56	2968	119225
43	5299	56	2968	122193
44	5299	56	2968	125160
45	5981	59	3529	128689
46	5783	58	3354	132043
47	5396	57	3076	135119
48	5401	57	3078	138197
49	5401	56	3024	141222
50	5401	56	3024	144246

51	5401	56	3024	147271
52	6198	58	3595	150865
53	5350	57	3050	153915
54	4695	58	2723	156638

---

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
Digestato	8,37	588	11306	2,79	37000	2360	1,58	0,25

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda

**Tabla 9.25.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale y purín en planta piloto (STP3-4).

Experimento STP3-4			VCO : 0,88-1,15 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,19	676	10641	2,80	56000	4520	34,10	2,62

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, L	Metano acumulado, L
1	81	41	33	33
2	81	42	34	67
3	81	43	35	102
4	81	44	36	138
5	81	45	37	175
6	81	46	33	208
7	81	47	38	246
8	81	49	40	286
9	81	51	41	328
10	81	54	41	369
11	81	55	44	413
12	81	58	45	458
13	81	60	47	505
14	81	63	49	553
15	81	66	51	605
16	143	68	94	699
17	270	69	186	885
18	270	69	186	1072
19	270	69	186	1258
20	127	71	90	1348
21	144	71	99	1447
22	154	71	109	1557
23	119	71	84	1641
24	306	69	211	1852
25	306	69	211	2064
26	306	69	211	2275
27	182	72	131	2406
28	179	72	129	2535
29	167	73	122	2657
30	170	72	122	2779
31	271	70	190	2969
32	271	70	190	3158
33	271	70	190	3348
34	146	71	104	3452
35	279	72	201	3653
36	258	72	186	3838
37	421	73	307	4146
38	265	73	193	4339
39	265	69	183	4522
40	265	69	183	4705
41	348	69	240	4945
42	348	69	240	5185
43	536	69	370	5555
44	454	69	313	5868
45	369	69	255	6123
46	369	69	255	6377
47	369	68	251	6628
48	525	68	357	6985
49	464	69	320	7305
50	382	69	264	7569



51	783	69	540	8109
52	416	69	287	8396
53	416	69	287	8683
54	416	69	287	8970
55	416	67	279	9248
56	571	68	388	9637
57	565	68	384	10021
58	334	67	224	10245
59	334	67	224	10468
60	334	64	214	10682
61	334	65	217	10899
62	334	65	217	11116
63	334	65	217	11333
64	989	64	633	11966
65	756	68	514	12480
66	654	65	425	12905
67	654	64	418	13323
68	654	64	418	13741
69	654	66	431	14172
70	618	66	408	14580
71	634	64	406	14986
72	605	64	387	15373

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
Digestato	7,64	479	10984	0,78	24000	3360	3,98	0,25

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda

**Tabla 9.26.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale, purín y aceite de colza (STPA1).

Experimento STPA1			VCO : 0,68 g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C, %	N, %
Inóculo	8,56	686	11906	0,96	22000	5320	25,12	2,50

Tiempo, días	Biogás generado, mL	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	1786	40	715	2489
2	1786	52	929	3418
3	1801	52	937	4354
4	1665	59	982	5336
5	2115	59	1248	6584
6	2115	59	1248	7832
7	1976	59	1166	8998
8	1976	59	1166	10164
9	1976	59	1166	11330
10	1563	59	922	12252
11	3323	59	1961	14213
12	3021	59	1782	15995
13	3522	59	1782	17778
14	3522	59	2078	19856
15	3522	59	2078	21934
16	3522	59	2078	24012
17	3996	59	2358	26369
18	5042	57	2874	29243
19	4430	58	2569	31813
20	4430	60	2658	34471
21	4430	58	2569	37040
22	4430	58	2569	39609
23	4430	56	2481	42090
24	4430	56	2481	44571
25	2790	56	1562	46133
26	2790	59	1646	47780
27	3170	59	1870	49650
28	3170	58	1838	51488
29	3170	58	1838	53326
30	3170	58	1838	55165
31	4146	58	2405	57569
32	3829	58	2221	59790
33	3300	60	1980	61770
34	2359	59	1392	63162
35	2359	59	1392	64554
36	2359	59	1392	65946
37	2359	59	1392	67338
38	3888	59	2294	69632
39	3368	60	2021	71653
40	3502	61	2136	73789
41	3094	61	1887	75676
42	3094	61	1887	77563
43	3094	61	1887	79450
44	3094	59	1825	81275
45	4437	59	2618	83893
46	3421	62	2121	86014
47	3217	61	1962	87976
48	3935	61	2400	90376
49	3935	59	2322	92698
50	3935	58	2282	94980

51	3935	58	2282	97262
52	5153	58	2989	100251
53	4536	61	2767	103018
54	2609	61	1591	104609

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
Digestato	8,54	402	15122	2,73	35000	2280	1,60	0,23

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda

**Tabla 9.27.** Experimentos de digestión anaerobia tipo semi-continuo alimentados con una mezcla de sorgo, triticale, purín y aceite de colza en planta piloto (STPA2-3-4).

Experimento STPA2-3-4			VCO : 1,08-1,31-1,42 g SV L <sub>D</sub> <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>					
Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
Inóculo	8,74	760	1806	0,77	13000	2160	0,91	0,14

Tiempo, días	Biogás generado, L	Concentración metano, %	Metano generado, mL	Metano acumulado, mL
1	311	77	240	240
2	205	76	156	396
3	212	74	157	552
4	238	74	176	729
5	256	74	189	918
6	297	69	229	1147
7	297	69	205	1352
8	297	69	205	1557
9	422	68	287	1844
10	442	66	301	2145
11	457	64	302	2446
12	536	64	343	2789
13	900	61	549	3441
14	959	60	575	4401
15	1001	61	611	5012
16	1001	61	611	5623
17	1001	61	611	6234
18	1001	61	611	6844
19	1097	60	658	7503
20	997	60	598	7503
21	997	60	598	7503
22	997	60	598	8101
23	1012	60	607	8699
24	1041	60	625	9297
25	1017	59	600	9904
26	1208	59	713	12513
27	1208	59	713	13226
28	1208	59	713	13939
29	1567	58	909	15710
30	1484	58	861	16571
31	1586	58	920	17490
32	1419	59	837	18328
33	1419	59	837	19165
34	1419	59	837	20003
35	1665	59	982	20985
36	1376	59	812	22732
37	1443	58	837	23569
38	1408	58	817	24386
39	1408	57	803	25189
40	1408	57	803	25992
41	1408	58	817	26808
42	1338	59	789	28859
43	1061	59	626	29485
44	1061	59	626	30111
45	1061	58	615	30726
46	1061	58	615	31341
47	1061	59	626	31967
48	1180	59	696	32664
49	333	58	193	32857
50	229	57	130	32987

51	229	57	130	33118
52	229	57	130	33248
53	1192	56	668	35472
54	1137	56	637	36109
55	1129	57	644	36753
56	1030	57	587	37339
57	1030	56	577	37916
58	1030	57	587	38503
59	1030	57	587	39090
60	1539	57	877	39967
61	1647	56	922	41830
62	1550	56	868	43566
63	1550	56	868	44434
64	1550	59	915	45349
65	1613	59	952	46300
66	1490	59	879	47179
67	1536	59	906	48086
68	1305	59	770	48855
69	1305	59	770	49625
70	1305	59	770	50395
71	1305	60	783	51177
72	1242	60	745	51922

Parámetro	pH	AGV, mg L <sup>-1</sup>	Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	SV <sub>T</sub> , %	DQO, mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> , mg L <sup>-1</sup>	C*, %	N*, %
Digestato	8,33	1404	9976	0,79	29000	2320	3,26	0,21

\*Resultados obtenidos de la muestra húmeda