



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería Agronómica

Propuesta de modelo de gestión de residuos
ganaderos basado en estrategias de
economía circular en la vega de Carrión y
Saldaña (Palencia)

Alumno: Ignacio Prieto Tejedor

Tutora: Almudena Gómez Ramos
Cotutor: Francisco Lafuente Álvarez

Septiembre de 2020

ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	2
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos	9
1.3. Análisis del entorno	10
1.3.1. Cálculo del potencial productivo	10
1.3.2. Cálculo de la demanda de estiércol	11
CAPÍTULO 2. LEGISLACIÓN APLICABLE AL PROYECTO	14
2.1. Marco legislativo	14
2.2. Subvenciones	16
CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	17
3.1. Identificación de alternativas	17
3.1.1. Estrategia de gestión de residuos	17
3.1.2. Tecnología de biometanización	24
3.1.3. Sistema de aprovechamiento del biogás	25
3.1.4. Sistema de aprovechamiento del digestato	28
3.2. Metodología de evaluación de las alternativas	29
3.3. Evaluación de las alternativas	30
3.3.1. Estrategia de gestión de residuos	30
3.3.2. Tecnología de biometanización	32
3.3.3. Sistema de aprovechamiento del biogás	33
3.3.4. Sistema de aprovechamiento del digestato	34
3.4. Conclusiones	34
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO	35
4.1. Cuantificación de los residuos	35
4.2. Diseño y dimensionamiento del digestor	35
4.2.1. Tanque de alimentación	35
4.2.2. Digestor	36
4.4. Diseño y dimensionamiento de la planta de aprovechamiento del biogás	39
4.5. Diseño y dimensionamiento de la planta de aprovechamiento del digestato	42
CAPÍTULO 5. ESTUDIO ECONÓMICO	44
5.1. Introducción	44
5.2. Criterios de rentabilidad	44
5.3. Estimación de la inversión	44
5.4. Financiación del proyecto	45
5.5. Estructura de los flujos de caja	45
5.5.1. Cobros	45
5.5.2. Pagos	46
5.5.3. Flujos de caja	47
5.6. Rentabilidad y análisis de sensibilidad	48
5.7. Conclusiones del estudio económico	51
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXO A. MAPAS DE SITUACIÓN	55
ANEXO B. ESQUEMA DEL PROCESO Y DIAGRAMA DE LA INSTALACIÓN	57
B.1. Esquema del proceso	57
B.2. Diagrama de la instalación	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número total de cabezas de ganado vacuno en España, Castilla y León y Palencia en el período 2010-2019 [1] _____	2
Tabla 2. Número de vacas de leche en España, Castilla y León y Palencia en el período 2010-2019 [1] _____	3
Tabla 3. Carga contaminante del estiércol producido por el ganado vacuno de leche (cálculos realizados para un animal tipo de 600 Kg de peso vivo) cantidad (g/día) ____	3
Tabla 4. Contenido aproximado en nutrientes del estiércol de vacuno de leche en kg/día _____	4
Tabla 5. Características y concentraciones perceptibles de distintas sustancias en el aire ambiente _____	4
Tabla 6. Censo de vacas de leche de más de 24 meses de edad por municipios de la zona de estudio ordenados de mayor a menor [9] [10] _____	10
Tabla 7. Datos de cálculo de la enmienda orgánica _____	12
Tabla 8. Estado térmico y tiempos de retención típicos [16] _____	23
Tabla 9. Composición habitual del biogás [16] _____	26
Tabla 10. Tratamiento según el uso final del biogás [18] _____	26
Tabla 11. Matriz de efectos para la elección de la estrategia de gestión de residuos	31
Tabla 12. Matriz de efectos para la elección de la tecnología de biometanización ____	32
Tabla 13. Matriz de efectos para la elección del sistema de aprovechamiento del biogás _____	33
Tabla 14. Matriz de efectos para la elección del sistema de aprovechamiento del digestato _____	34
Tabla 15. Media de las temperaturas medias, máximas y mínimas del observatorio de Villaluenga de la Vega en el período 2010-2019 [21] _____	36
Tabla 16. Resumen de los requisitos del sistema de cogeneración _____	42
Tabla 17. Cuadro de amortización del préstamo bancario, en Euros _____	45
Tabla 18. Resumen de los ingresos anuales _____	46
Tabla 19. Resumen de los pagos anuales _____	47
Tabla 20. Flujos de caja para los primeros 15 años, en Euros _____	47
Tabla 21. Serie histórica del IPC en España (2010-2019) _____	49
Tabla 22. Flujos de caja actualizados, en Euros _____	49
Tabla 23. Indicadores de rentabilidad _____	50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Esquema de la economía circular [8] _____	9
Gráfico 2. Diagrama de toma de decisiones para adoptar la solución tecnológica adecuada para la gestión de las deyecciones ganaderas (I) [13] _____	18
Gráfico 3. Diagrama de toma de decisiones para adoptar la solución tecnológica adecuada para la gestión de las deyecciones ganaderas (II) [13] _____	19
Gráfico 4. Comparación del poder metanogénico de diferentes sustratos [17] _____	22
Gráfico 5. Digestor vertical [16] _____	25
Gráfico 6. Digestor horizontal [16] _____	26
Gráfico 7. Evolución del precio medio mensual del mercado eléctrico (pool) de España por meses en €/MWh [27] _____	46
Gráfico 8. Resultados del análisis de sensibilidad _____	51

RESUMEN

La actividad ganadera tiene una elevada producción de residuos y subproductos que deben ser manejados de forma que no supongan un riesgo para el medio ambiente y que se aprovechen al máximo los recursos contenidos en ellos. Las estrategias ligadas a la economía circular, que buscan cerrar los flujos económicos y ecológicos de los recursos, son una posible respuesta a este problema.

La zona de la vega de Carrión y Saldaña concentra un importante número de explotaciones ganaderas, fundamentalmente de vacuno de leche. Debido a los recientes cambios en la normativa de gestión de residuos ganaderos en Castilla y León, se ve necesario buscar alternativas para gestionar y poner en valor estos residuos, resolviendo el problema de su impacto ambiental y permitiendo obtener energía y subproductos de valor.

En el presente trabajo se estudia a nivel técnico y económico la creación de un centro de tratamiento de residuos ganaderos a nivel comarcal, formado por una planta de biogás, un generador de corriente eléctrica y una planta de aprovechamiento del digestato.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. Introducción

El presente trabajo busca proponer una posible solución al problema de la gestión de los residuos ganaderos que se está dando en numerosas comarcas de España en los últimos años. En concreto, se tratará el caso de la comarca de la vega comprendida entre Carrión de los Condes y Saldaña, en la provincia de Palencia. En esta zona se localizan numerosas explotaciones de vacuno de leche y de carne, que producen una importante cantidad de residuos que deben ser gestionados adecuadamente. A continuación, se detallarán las razones para considerar la gestión de los residuos ganaderos de esta zona como un problema que se debe abordar.

Evolución del censo bovino

En los últimos diez años se ha producido un aumento en el censo bovino a nivel de España, pasando de haber 6.075.081 cabezas en el año 2010 a 6.727.932 cabezas en el año 2019, lo que supone un incremento neto del 10,75%. El aumento a nivel de Castilla y León ha sido aún mayor, pasando de 1.266.013 cabezas a 1.501.184 en el mismo período, lo que significa un 18,58%. A nivel de la provincia de Palencia se tiene que en el año 2010 había 57.984 cabezas y en el 2019 hay 62.893, lo que supone un incremento del 8,47%, menor que a nivel nacional pero muy significativo. Estos datos se pueden observar en la Tabla 1 [1].

Tabla 1. Número total de cabezas de ganado vacuno en España, Castilla y León y Palencia en el período 2010-2019 [1]

Año	España	Castilla y León	Palencia
2010	6075081	1266013	57984
2011	5923112	1250050	57681
2012	5812605	1255240	59133
2013	5802218	1238133	59396
2014	6078733	1297567	60695
2015	6182908	1337989	59674
2016	6317641	1372577	60814
2017	6465747	1414603	61026
2018	6510592	1422678	61820
2019	6727932	1501184	62893

Merece una atención particular el caso del ganado vacuno de leche. La comarca de la vega de Saldaña alberga un importante número de explotaciones de este tipo altamente tecnificadas. En la Tabla 2 se presentan los datos del censo ganadero de vacuno de leche en España, Castilla y León y Palencia [1]. Se puede observar que, mientras a nivel nacional y autonómico el número de cabezas está disminuyendo (especialmente desde el año 2012), en Palencia el número se ha mantenido e incluso aumentado en el último año. Esto se debe a que por el momento la balanza que se produce entre las ganaderías de pequeño tamaño (menos de 50 vacas en producción) que se cierran y las de mediano y gran tamaño que aumentan su capacidad se mantiene en equilibrio. Además, el potencial de ampliación de las de mediano y gran tamaño es todavía muy grande.

Tabla 2. Número de vacas de leche en España, Castilla y León y Palencia en el período 2010-2019 [1]

Año	España	Castilla y León	Palencia
2010	846691	94322	15906
2011	797894	99094	16649
2012	827207	99812	17254
2013	844059	98982	18285
2014	844791	95259	17377
2015	844114	95494	17711
2016	834453	91677	17247
2017	823390	94072	17621
2018	816693	93147	17445
2019	815308	93767	17670

Impacto ambiental de la ganadería

Un aspecto que está cobrando cada vez más importancia es lo relativo al impacto ambiental de la actividad ganadera. Las fuentes de impacto ambiental de la ganadería se pueden clasificar en tres grupos [2]:

- El primero se refiere a la localización de las explotaciones, respecto a ruidos, olores y efectos sobre el paisaje.
- El segundo concierne al almacenamiento y vertido de los residuos generados por la actividad.
- El tercero son las situaciones de exceso de carga ganadera.

La producción de estiércol en las explotaciones bovinas no es estable, y depende de una serie de factores, como el número de animales, su edad, su aptitud productiva (leche o carne), el método de explotación y la alimentación. Se puede considerar, de una forma muy aproximada, que un animal adulto produce unos 50 kg de estiércol al día, siendo un 70% la materia fecal y un 30% la orina [2]. En la Tabla 3 se pueden observar unos valores aproximados de la carga contaminante del estiércol producido por una vaca de leche de 600 kg de peso vivo por día [2].

Tabla 3. Carga contaminante del estiércol producido por el ganado vacuno de leche (cálculos realizados para un animal tipo de 600 Kg de peso vivo) cantidad (g/día)

Materia seca	5400
Materia orgánica	4400
DBO5	800-1000
DQO	9000-10000

Los estiércoles y purines se caracterizan por tener un elevado contenido en materia orgánica, una gran cantidad de sólidos en suspensión, una alta concentración de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y la presencia de patógenos. En la Tabla 4 se muestra el contenido en nitrógeno, fósforo y potasio elementales del estiércol producido por el vacuno de leche en kg/día [2].

Tabla 4. Contenido aproximado en nutrientes del estiércol de vacuno de leche en kg/día

Peso del animal (kg)	Contenido en nutrientes (kg/día)		
	N	P	K
70	0,027	0,005	0,018
225	0,090	0,016	0,064
450	0,186	0,033	0,122
625	0,258	0,046	0,172

Un problema derivado de la elevada concentración de nitrógeno de los estiércoles y purines es la contaminación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas. El nitrógeno contenido en los residuos ganaderos se transforma por fermentación y oxidación en amoníaco, que es convertido en nitritos y estos en nitratos, una forma muy soluble del nitrógeno que es utilizada por las plantas.

Los nitratos, en ausencia de actividad humana, son aprovechados por las plantas a medida que se van produciendo. Sin embargo, la actividad humana provoca desequilibrios en el ciclo, teniendo como resultado un exceso de nitratos que son arrastrados por la lluvia o el riego hacia los cauces fluviales o por percolación profunda a los acuíferos, con la consecuente contaminación de éstos.

La contaminación por nitratos de las aguas tiene implicaciones en la salud humana y en el medio ambiente. En los humanos puede provocar metahemoglobinemia, por lo cual se establece un límite de nitratos en las aguas potables de 50 mg/L [2]. En el medio ambiente provoca eutrofización de las aguas, modificando la fauna y la flora, con proliferación de algas y plantas acuáticas que consumen el oxígeno del agua y tienen como consecuencia la muerte masiva de animales acuáticos.

Los residuos generados por la actividad ganadera tienen como consecuencia, en la mayoría de los casos, la generación de olores desagradables. Estos olores pueden suponer un problema, sobre todo, en zonas donde la actividad coexiste con núcleos de población y actividades como el turismo. Los compuestos responsables del olor característico de la actividad ganadera son gases de bajo peso molecular, que se liberan durante la fermentación anaerobia del estiércol. En la Tabla 5 se presentan, de forma resumida, los compuestos más relevantes y el olor que producen [2].

Tabla 5. Características y concentraciones perceptibles de distintas sustancias en el aire ambiente

Sustancia	Olor característico	Concentración que produce un olor perceptible (10^{-9} g/L)
Acetaldehído	Acre	4
Amoniaco	Acre, penetrante	37
n-butyl mercaptano	Repugnante	1,4
Etil mercaptano	Col podrida	0,19
Metil mercaptano	Col o cebolla podrida	1,1
Propil mercaptano	Repugnante	0,075
Ácido sulfhídrico	Huevos podridos	1,1
Disulfuro de carbono	Ligeramente acre	2,6

Otros gases emitidos por la actividad ganadera y que además tienen una gran importancia en el efecto invernadero son el metano y el óxido nitroso (N_2O). El metano

se produce principalmente en las fermentaciones digestivas, y supone un 22% de las emisiones totales. También la digestión anaerobia del estiércol supone un 7% del total de las emisiones de este gas [2].

La cantidad de metano producida depende de factores como la especie, el peso vivo, la edad del animal y la alimentación. La producción de metano en la fermentación anaerobia del estiércol se ve favorecida en los sistemas de gestión de residuos en forma líquida, debido a que se fomenta la ausencia de oxígeno.

El óxido nitroso se produce también de forma derivada de la actividad ganadera. Este compuesto se genera en el proceso microbiano de nitrificación de los compuestos nitrogenados del suelo. Este proceso se intensifica con la aplicación de fertilizantes nitrogenados y residuos ganaderos a los suelos.

Algunas vías para la disminución de estas emisiones son la mejora de la nutrición animal, aumentando la digestibilidad de los alimentos o mediante la suplementación con compuestos reguladores de la fermentación ruminal. Otra vía importante es la actuación de los sistemas de gestión de los residuos. En la actualidad existen sistemas de recuperación del metano producido durante la fermentación anaerobia de los residuos, pudiendo utilizar este gas para la producción de energía. Este método será el que se estudie en el presente trabajo.

Situación normativa

En el contexto de una sociedad que demanda una mayor protección del medio ambiente, la legislación en materia de gestión de residuos ganaderos está sufriendo modificaciones en los últimos años. Estos cambios se están produciendo a nivel comunitario, nacional y autonómico.

Respecto a los cambios comunitarios, el marco de referencia es el Reglamento CE Nº 1069/2009, que entre otros temas trata sobre la gestión de los residuos ganaderos en las explotaciones. A nivel nacional, es de aplicación la Ley 22/2011 sobre residuos y suelos contaminados. Y a nivel de Castilla y León, el Decreto 4/2018 establece las condiciones ambientales mínimas para el establecimiento de actividades ganaderas. Este Decreto determina unos requisitos de gestión de los residuos ganaderos más estrictos que la normativa anterior. Entre otros, obliga a las explotaciones a realizar un programa de gestión de residuos, que debe estar firmado por un técnico cualificado. Además, endurece los requisitos para la incorporación de los residuos generados en las explotaciones al suelo, disminuyendo los límites máximos de nitrógeno que se pueden aportar.

Necesidad de cambio en el modelo de gestión de los residuos

Los precedentes expuestos en los apartados anteriores conducen a la pregunta: el modelo actual de gestión de residuos, ¿responde a las necesidades y exigencias ambientales, económicas y sociales actuales? Una breve reflexión sobre la situación de la ganadería en España y en la comarca de la vega de Carrión y Saldaña en particular, indica que es necesario un cambio para responder a los retos que se plantean en la actualidad y que, de no resolverse en un corto plazo de tiempo pueden llevar a la desaparición de la ganadería y, en consecuencia, de la actividad económica y del tejido social de la zona.

En la actualidad, los residuos generados en las explotaciones (estiércoles y purines) son almacenados en balsas o zanjas, tras lo cual son esparcidos en las parcelas agrícolas,

bien de la explotación, bien de agricultores de la zona. Sin embargo, en muchas ocasiones el período de permanencia de los residuos en las granjas hasta su esparcimiento es excesivamente alto, pues el momento en el que se realiza la labor de estercolado se concentra en unas pocas semanas al año, pero la producción de residuos es continua en la explotación.

Las labores relacionadas con el manejo de los residuos ganaderos durante su almacenamiento tienen en numerosas ocasiones un carácter secundario en las labores cotidianas. Así, el mantenimiento en buen estado de los estercoleros y balsas, el volteado de los estiércoles y el control del proceso de fermentación en muchos casos no se realiza. El estiércol aportado a las parcelas es habitualmente de escasa calidad por no haber sufrido una fermentación adecuada. El estiércol maduro, debido a su proceso de fermentación, es un producto inodoro, exento de patógenos y semillas de malas hierbas, mejora la fertilidad del suelo y es equilibrado en nutrientes. El estiércol inmaduro, que es el que se usa habitualmente en España, al no haber finalizado su proceso de fermentación, desprende olores desagradables, puede presentar patógenos y semillas de malas hierbas. Así, son habituales las infestaciones con semillas de malas hierbas procedentes de los forrajes que consumen los animales, y que en la mayoría de los casos deberán ser eliminadas del cultivo con el empleo de herbicidas. Además, el estiércol fresco no presenta una adecuada relación carbono/nitrógeno, derivada de su inacabado proceso de fermentación, lo que puede suponer una mayor necesidad de aporte de fertilizantes nitrogenados al cultivo.

Los purines presentan dificultades en cuanto a su manejo, pues producen olores desagradables que son difíciles de combatir dado que son un medio líquido, su manejo es más complicado y requieren de una maquinaria más compleja para su esparcido (cisternas específicas y equipos de inyección en el suelo). La fase líquida es menos problemática en rumiantes al estar mezclado habitualmente con el estiércol, pero muy problemática en porcino. Los purines tienen mayor concentración de nitrógeno que el estiércol, y es más fácil que sufra una percolación profunda en los suelos, pudiendo contaminar con relativa facilidad las aguas subterráneas y las superficiales por escorrentía.

Visto el modelo actual de gestión de los residuos ganaderos en la zona, y respondiendo a los requisitos actuales y futuros, parece que la vía de subsistencia pasa por un cambio en el modelo.

Economía circular

Este cambio en el modelo de gestión de los residuos ganaderos debe ser sostenible en lo ambiental, lo económico y lo social. En este sentido, los sistemas basados en economía circular pueden contribuir o conseguir tal objetivo.

La economía circular es un planteamiento económico que busca que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos no aprovechables [3]. De ello se desprende el objetivo último de la economía circular: la máxima eficiencia en el uso de los recursos.

La economía circular se sustenta en tres principios [4]:

Principio 1: conservar y aumentar los recursos naturales, promoviendo el control de sus stocks y equilibrando los flujos de los recursos renovables.

Principio 2: optimizar el uso de todos los recursos, procurado extender al máximo la vida útil del producto y fomentando su recuperación.

Principio 3: promover la efectividad de los sistemas, reduciendo las consecuencias negativas de los mismos.

Teniendo en cuenta la definición y estos principios, se pueden concretar los efectos de una economía circular [4] [5]:

- Reducción de insumos y menor uso de recursos naturales:
 - Explotación minimizada y optimizada de materias primas, dando mayor valor a partir de menor volumen de material.
 - Reducción de la dependencia de importación de recursos naturales.
 - Eficiencia en el uso de todos los recursos naturales.
 - Minimización del consumo total de agua y energía.
- Incremento de la tasa de uso de recursos y energías renovables y reciclables:
 - Sustitución de fuentes de energía no renovables por fuentes renovables, garantizando niveles sostenibles de suministro.
 - Incremento de la proporción de materiales reciclados y reciclables que pueden sustituir el uso de materias primas vírgenes.
 - Cierre de los ciclos de los materiales.
 - Extracción de materias primas de forma sostenible.
- Reducción de emisiones:
 - Reducción de emisiones en todo el ciclo de los materiales, mediante la reducción del uso de materias primas y la obtención sostenible de las mismas.
 - Menor contaminación favoreciendo los ciclos materiales más limpios.
- Menor pérdida de materiales y generación de residuos:
 - Minimización de la acumulación de deshechos.
 - Reducción al mínimo de la incineración y acumulación de residuos.
 - Minimización de la pérdida por disipación de recursos.
- Mantenimiento del valor de los productos, componentes y materiales en la economía:
 - Aumento de la vida útil de los productos, manteniendo su valor durante el uso.
 - Reutilización de componentes.
 - Preservar el valor de los materiales, fomentando el reciclaje de alta calidad.

La Unión Europea, en sus políticas de desarrollo sostenible, incorpora elementos de economía circular. En su Documento de reflexión para una Europa sostenible de aquí a 2030 [6], la Unión Europea constata la importancia que tiene y va a tener en el futuro el uso sostenible de los recursos renovables, la transformación de las materias primas renovables y los subproductos y residuos en productos de base biológica, como combustibles, compuestos y fertilizantes. Así mismo, incide en la importancia de que la agricultura tiene para el entorno socioeconómico de Europa. Los agricultores son los “primeros administradores del medio natural”, cuidando el 48% de la superficie de la Unión Europea [6]. También en el ámbito de la energía, fomentando el uso de energías renovables, y la transición hacia una un sistema financiero sostenible.

En materia de reciclado y reutilización de residuos, se encuentra regulado por la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos, la Directiva 1999/31/CE sobre el vertido de residuos y la Directiva 94/62/EC sobre envases y residuos de envases. Respecto a la agricultura, son numerosas las normas que la regulan. Las más recientes son las relativas a la producción y comercialización de fertilizantes orgánicos y organominerales (Reglamento 2019/1009) y la nueva Política Agrícola Común (PAC), la cual está en desarrollo.

La PAC se fundamenta en dos pilares: el primero con la organización común de mercados de los productos agrarios y los pagos directos a las explotaciones, y el segundo con la política de desarrollo rural. Es este segundo pilar el que en las sucesivas reformas está tomando mayor importancia.

Los objetivos de la política de desarrollo rural de la Unión Europea son tres [7]:

- Fomentar la competitividad de la agricultura.
- Garantizar la gestión sostenible de los recursos naturales y la acción por el clima.
- Lograr un desarrollo territorial equilibrado de las economías y comunidades rurales que incluya la creación y la conservación del empleo.

Estos objetivos se concretan en las siguientes seis prioridades [7]:

- Impulsar la transferencia de conocimientos en la agricultura, la silvicultura y las zonas rurales.
- Mejorar la competitividad de todos los tipos de agricultura y aumentar la viabilidad de las explotaciones.
- Fomentar la organización de la cadena alimentaria y la gestión de riesgos en agricultura.
- Restaurar, preservar y mejorar los ecosistemas dependientes de la agricultura y la silvicultura.
- Promover la eficiencia de los recursos y alentar el paso a una economía hipocarbónica y capaz de adaptarse a los cambios climáticos en los sectores agrícola, alimentario y forestal.
- Fomentar la inclusión social, la reducción de la pobreza y el desarrollo económico en las zonas rurales.

Como se puede ver, todos ellos son compatibles con los conceptos de economía circular.

El manejo que se lleva a cabo en la actualidad con los residuos ganaderos en la zona de estudio podría parecer, a priori, que encaja en el concepto de economía circular: los residuos generados en la explotación sirven para fertilizar los cultivos que posteriormente alimentarán a los animales, cerrando el ciclo. Sin embargo, este sistema obvia el concepto de eficiencia. Los residuos ganaderos, como ya se ha descrito en los apartados anteriores, suponen un problema ambiental, en cuanto a olores, contaminación de suelos y aguas y emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Por tanto, para que el sistema de manejo responda a criterios de economía circular debe plantear una adecuada transformación de estos residuos para minimizar los problemas que generan en la actualidad y pueda aprovecharse al máximo su potencial.

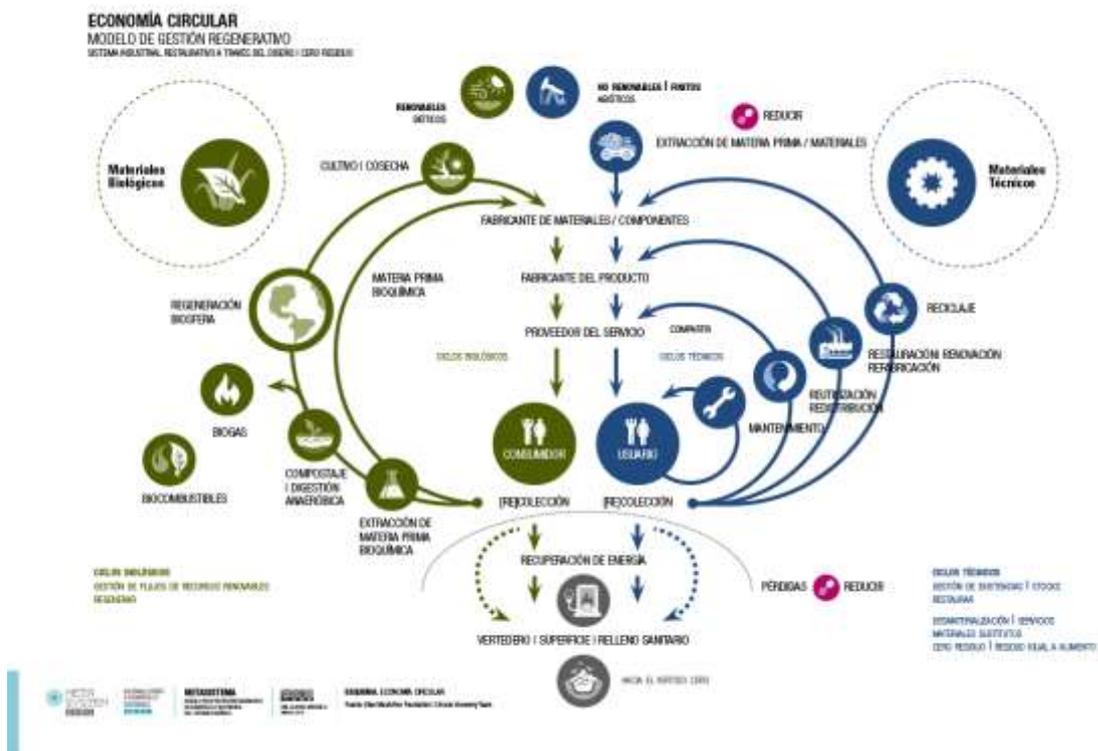


Gráfico 1. Esquema de la economía circular [8]

Dentro de este planteamiento, se plantea el uso de un digestor para fermentar la materia orgánica y obtener dos subproductos: un digestato orgánico de carácter estable, con alto contenido en nutrientes, que puede ser empleado en la fertilización orgánica de los cultivos con las mismas ventajas que presenta el estiércol maduro, y de un gas rico en metano que se puede emplear para producir una parte importante de la energía que emplean las explotaciones.

1.2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es plantear una solución al problema de la gestión de los residuos ganaderos de la comarca empleando elementos de economía circular.

El objetivo general se subdivide en los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis del entorno, determinando el potencial de producción de estiércoles y purines y la posible demanda de estiércol por la agricultura.
- Determinar la mejor propuesta de solución al problema, basada en los criterios de economía circular. Para ello se desarrollará un estudio de alternativas.
- Desarrollar la alternativa seleccionada, definiendo los parámetros y dimensiones de la instalación.
- Analizar la viabilidad económica de la alternativa seleccionada.

1.3. Análisis del entorno

1.3.1. Cálculo del potencial productivo

Para determinar el potencial productivo de la instalación, es necesario establecer previamente la disponibilidad de materia orgánica fermentable que se puede emplear en el proceso.

La delimitación de la zona de estudio se corresponde con aquellos municipios del entorno de Carrión de los Condes y Saldaña con una mayor concentración ganadera. En la zona se observa la influencia del río Carrión, que forma una vega relativamente estrecha de tierras de regadío. Se trata de tierras de características variables, siendo en su mayoría franco-arcillosos o franco-arenosos, con cascajos típicos de las zonas inundables de los ríos.

En primer lugar, se va a analizar el censo ganadero de la zona de trabajo. Los datos del censo se han extraído de la página web de la Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León [9] [10].

Como se puede observar en la Tabla 6, el resultado del censo para los años 2018 y 2019 es muy similar. A partir de este momento emplearemos los datos de la columna "Media" para efectuar los cálculos.

Tabla 6. Censo de vacas de leche de más de 24 meses de edad por municipios de la zona de estudio ordenados de mayor a menor [9] [10]

Municipio	Censo 2018	Censo 2019	Media
Villaluenga de la Vega	2241	2243	2242
Villamoronta	1586	1600	1593
Bustillo de la Vega	1241	1262	1252
Santervás de la Vega	1136	1132	1134
Pedrosa de la Vega	997	1022	1010
Poza de la Vega	705	704	705
Villarrabé	694	642	668
Renedo de la Vega	588	603	596
Saldaña	405	412	409
Villabasta de Valdavia	403	385	394
Calzada de los Molinos	374	379	377
Villota del Páramo	371	374	373
Lagartos	277	274	276
La Serna	268	240	254
Pino del Río	208	231	220
Valde-Ucieza	122	144	133
Carrión de los Condes	185	125	155
Quintanilla de Onsoña	121	124	123
Villaturde	102	106	104
TOTAL	12024	12002	12013

Los cinco primeros municipios (Villaluenga de la Vega, Villamoronta, Bustillo de la Vega, Santervás de la Vega y Pedrosa de la Vega) concentran de media 7230 cabezas de ganado, lo que supone un 60% del total de vacas de leche en producción de la zona. Es en estos municipios donde los problemas derivados de la gestión de los residuos ganaderos son más acusados.

La metodología para el cálculo del estiércol fresco excretado por animal y día (M_E) y de materia seca excretada por animal y día (DM_E) es el propuesto por Nennich y col. [11]. Ambos cálculos se basan en estimaciones a partir de la ingesta diaria de materia seca. De forma general, se puede estimar para las vacas en lactación una ingesta diaria de 44 kg de materia fresca, con un 55% de materia seca, con lo que se tiene una ingesta diaria de 24,2 kg de materia seca por día (DMI).

El estiércol fresco excretado por animal y día (M_E) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$M_E = DMI \cdot 2,63 + 9,4$$

Donde:

M_E : estiércol fresco excretado por animal y día [kg/vaca y día].

DMI : ingesta diaria de materia seca por animal y día [kg/vaca y día].

Aplicando la fórmula, y considerando un valor de DMI de 24,2 kg/vaca y día, tenemos un M_E de 73,05 kg/vaca y día, que para un total de 12013 vacas suponen 147049 kg/día (147,05 t/día). Este valor se puede extrapolar a un período de un año multiplicándolo por 365 días, teniendo una producción anual de estiércol fresco de 53673,25 t/año.

La materia seca excretada por animal y día (DM_E) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$DM_E = DMI \cdot 0,356 + 0,80$$

Donde:

DM_E : materia seca excretada por animal y día [kg/vaca y día].

DMI : ingesta diaria de materia seca por animal y día [kg/vaca y día].

Aplicando la fórmula, y considerando el mismo valor de DMI, tenemos una DM_E de 9,42 kg/vaca y día, que para un total de 12013 vacas suponen 113104,80 kg/día (113,10 t/día). Este valor se puede extrapolar a un período de un año multiplicándolo por 365 días, teniendo una producción anual de materia seca de 41281,5 t/año.

1.3.2. Cálculo de la demanda de estiércol

La demanda de estiércol fermentado (o de los posibles subproductos del proceso de fermentación anaerobia controlada) está directamente relacionada con el contenido en materia orgánica de los suelos de la zona de estudio. Según el Atlas Agroclimático de Castilla y León [12], en su mapa de materia orgánica en los suelos agrícolas, la zona de Carrión de los Condes tiene de media un 1,4% de materia orgánica, mientras que la zona de Saldaña tiene un 1,8%. Para los suelos agrícolas, se considera un valor objetivo de materia orgánica de, al menos, el 2%. Por lo tanto, queda patente la necesidad de realizar enmiendas orgánicas en la zona.

Las enmiendas orgánicas se realizan con el material disponible en la zona, debido fundamentalmente a los costes de transporte. Debido a la actividad ganadera de la comarca de la vega de Carrión y Saldaña, tradicionalmente se ha empleado el estiércol de vaca para realizar estas enmiendas. Se va a realizar el cálculo de la enmienda orgánica de una parcela tipo de la zona de Carrión de los Condes y otra del entorno de Saldaña. En la Tabla 7 se presentan los datos de cálculo de las dos parcelas tipo:

Tabla 7. Datos de cálculo de la enmienda orgánica

	Característica	Símbolo	Carrión	Saldaña
Suelo	Materia orgánica del suelo	MO	1,40%	1,80%
	Densidad aparente	Da	1,35 t/m ³	1,30 t/m ³
	Profundidad de la capa arable en preplantación	P	30 cm	30 cm
Estiércol	Materia seca	MS		75 %
	Coefficiente isohúmico	K ₁		40 %

El peso de la capa arable se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Peso capa arable}_{\text{Carrión}} = 10000 \text{ m}^2/\text{ha} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 1,35 \text{ t/m}^3 = 4050 \text{ t/ha}$$

$$\text{Peso capa arable}_{\text{Saldaña}} = 10000 \text{ m}^2/\text{ha} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 1,30 \text{ t/m}^3 = 3900 \text{ t/ha}$$

El contenido de materia orgánica de la capa arable se calcula a continuación:

$$\text{Contenido real MO}_{\text{Carrión}} = 4050 \text{ t/ha} \cdot \frac{1,40 \text{ kg MO}}{100 \text{ kg suelo}} = 56,70 \text{ t/ha}$$

$$\text{Contenido real MO}_{\text{Saldaña}} = 3900 \text{ t/ha} \cdot \frac{1,80 \text{ kg MO}}{100 \text{ kg suelo}} = 70,20 \text{ t/ha}$$

Una vez calculado el contenido real de materia orgánica del suelo se calcula el contenido para un 2% de MO:

$$\text{Contenido MO } 2\%_{\text{Carrión}} = 4050 \text{ t/ha} \cdot \frac{2,00 \text{ kg MO}}{100 \text{ kg suelo}} = 81,00 \text{ t/ha}$$

$$\text{Contenido MO } 2\%_{\text{Saldaña}} = 3900 \text{ t/ha} \cdot \frac{2,00 \text{ kg MO}}{100 \text{ kg suelo}} = 78,00 \text{ t/ha}$$

El aporte necesario es la diferencia entre el contenido de materia orgánica al 2% y el contenido real de materia orgánica, como se puede ver a continuación:

$$\text{Necesidades MO}_{\text{Carrión}} = 81,00 - 56,70 = 24,30 \text{ t/ha}$$

$$\text{Necesidades MO}_{\text{Saldaña}} = 78 - 70,20 = 7,80 \text{ t/ha}$$

Teniendo en cuenta el tipo de estiércol que se va a emplear, se determina la cantidad de este que se necesita por ha:

$$\text{Necesidades estiércol}_{\text{Carrión}} = 24,3 \text{ t/ha} \cdot \frac{100}{75} \cdot \frac{100}{40} = 81,00 \text{ t/ha}$$

$$Necesidades\ estiércol_{saldaña} = 7,80\ t/ha \cdot \frac{100}{75} \cdot \frac{100}{40} = 26,00\ t/ha$$

Se puede observar la elevada necesidad de materia orgánica en los suelos de la zona, especialmente en el entorno de Carrión de los Condes. No obstante, estas son unas necesidades teóricas de estiércol fermentado que es necesario contrastar con las posibilidades de estercolado en la zona. En muchos casos, la práctica de los agricultores denota una falta de disponibilidad y maquinaria para realizar estas aportaciones. Pocos agricultores disponen de remolques esparcidores, y el coste de transporte del estiércol lo hace prohibitivo en las tierras de secano, que son la mayoría en la zona.

La posibilidad de realizar una transformación al estiércol, con la finalidad de presentarlo en una forma que barata de transportar y fácil de aplicar, como pueden ser los pellets o el uso de abonos organominerales, puede facilitar y extender la aplicación de materia orgánica de alta calidad en los suelos de secano de la zona.

CAPÍTULO 2. LEGISLACIÓN APLICABLE AL PROYECTO

2.1. Marco legislativo

A continuación, se detallan las normativas aplicables al proyecto a nivel de la Unión Europea y a nivel nacional. Será de aplicación la normativa referente a la valorización de residuos, biogás, energías renovables y generación eléctrica en régimen especial.

Unión Europea

Reglamento (CE) núm. 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano.

Reglamento (CE) No 185/2007 de la Comisión de 20 de febrero de 2007 por el que se modifican los Reglamentos (CE) no 809/2003 y (CE) no 810/2003 en lo relativo a la validez de las medidas transitorias para las plantas de compostaje y biogás contempladas en el Reglamento (CE) no 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo.

Reglamento (CE) No 208/2006 de la Comisión de 7 de febrero de 2006 por el que se modifican los anexos VI y VIII del Reglamento (CE) no 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, en lo que se refiere a las normas de transformación para las plantas de biogás y compostaje y las condiciones aplicables al estiércol.

Reglamento (CE) No 92/2005 de la Comisión de 19 de enero de 2005 por el que se aplica el Reglamento (CE) no 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que se refiere a los métodos de eliminación o a la utilización de subproductos animales y se modifica su anexo VI en lo concerniente a la transformación en biogás y la transformación de las grasas extraídas.

Directiva 2009/73/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de julio de 2009 sobre normas comunes para el mercado interior del gas natural y por la que se deroga la Directiva 2003/55/CE.

Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.

Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan diversas Directivas.

España

Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible.

Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica.

Real Decreto-ley 9/2013, de 12 de julio, por el que se adoptan medidas urgentes para garantizar la estabilidad financiera del sistema eléctrico.

Real Decreto-ley 2/2013, de 1 de febrero, de medidas urgentes en el sistema eléctrico y en el sector financiero.

Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.

Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social.

Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

Real Decreto 1823/2009, de 27 de noviembre, por el que se regula la concesión directa de una subvención a las comunidades autónomas para la ejecución urgente de actuaciones para el cumplimiento de la legislación de vertederos, incluyendo la clausura de vertederos ilegales y la captación de biogás en vertederos, y otras actuaciones complementarias.

Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Real Decreto 616/2007, de 11 de mayo, sobre fomento de la cogeneración.

Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Orden IET/221/2013, de 14 de febrero, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2013 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial.

Corrección de errores del Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Orden ITC/3353/2010, de 28 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2011 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial.

Orden ITC/3801/2008, de 26 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir de 1 de enero de 2009.

Resolución de 8 de octubre de 2018, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifican las normas de gestión técnica del sistema NGTS-06, NGTS-07 y los protocolos de detalle PD-01 y PD-02.

Resolución de 21 de diciembre de 2012, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 «Medición, Calidad y Odorización de Gas» de las normas de gestión técnica del sistema gasista.

Resolución de 22 de septiembre de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 «medición» de las normas de gestión técnica del sistema gasista.

Resolución de 7 de abril de 2010, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se publican los valores del coste de la materia prima y del coste base de la materia prima del gas natural para el primer trimestre 2010, a los efectos del cálculo del complemento de eficiencia y los valores retributivos de las instalaciones de cogeneración y otras en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Circular 1/2017, de 8 de febrero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, que regula la solicitud de información y el procedimiento de liquidación, facturación y pago del régimen retributivo específico de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

Circular 4/2009, de 9 de julio, de la Comisión Nacional de Energía, que regula la solicitud de información y los procedimientos para implantar el sistema de liquidación de las primas equivalentes, las primas, los incentivos y los complementos a las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial.

2.2. Subvenciones

En la actualidad, la línea de subvenciones existente para el desarrollo de plantas de biogás está regulada por el Real Decreto 263/2019, de 12 de abril, por el que se regula el Programa de ayudas para actuaciones de eficiencia energética en PYME y gran empresa del sector industrial.

La convocatoria de la subvención establece una cuantía máxima subvencionable para Castilla y León de entre el 30 y el 50%, en función del tamaño de la empresa, con una cuantía máxima de la subvención de 1.000.000 €.

El Programa de Desarrollo Rural de Castilla y León 2014-2020 (PDR) tiene líneas de subvenciones compatibles con la actuación objeto de estudio. En concreto, el PDR establece en su operación "M04.0001 Ayuda a las inversiones en explotaciones agrícolas" que son subvencionables las actuaciones destinadas a la mejora de las condiciones de higiene de las explotaciones ganaderas y del bienestar de los animales y la protección y mejora del suelo, de la cubierta vegetal y del medio ambiente. La cuantía de la subvención es de hasta el 40% de la inversión auxiliable, con un incremento del 10% en el caso de inversiones colectivas y un 5% en actuaciones del ámbito del agroambiente y clima, con un importe máximo de 200.000 € por socio, hasta considerar un máximo de 4, es decir, 800.000 €.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

La realización de un estudio de alternativas es una parte fundamental del proceso de desarrollo de todo proyecto. Mediante el estudio de alternativas se pretende determinar, en primer lugar, cuáles son los aspectos susceptibles de generar diferentes escenarios de desarrollo (alternativas). En segundo lugar, se define cada una de las alternativas, en términos cualitativos y cuantitativos. Posteriormente, es necesario establecer el método de evaluación de las alternativas, de tal forma que sea homogéneo y fiable. En último lugar se procede con la evaluación de las alternativas en los medios anteriormente definidos. A partir de las conclusiones, que definen el escenario seleccionado, se puede desarrollar el proyecto.

3.1. Identificación de alternativas

Los elementos susceptibles de general alternativas son los siguientes:

- **Estrategia de gestión de residuos:** existen múltiples estrategias para el tratamiento de los residuos. Las principales se basan en la separación de la fracción sólida de la líquida, el compostaje y la digestión anaerobia.
- **Tecnología de biometanización:** se determinará el método de producción de biogás óptimo de entre los disponibles en la actualidad.
- **Sistema de aprovechamiento del biogás:** el biogás producido en la instalación puede tener diferentes usos, por lo que es necesario elegir el que se adecúe mejor a los objetivos del estudio y sea más eficiente.
- **Sistema de aprovechamiento del digestato:** como subproducto de la digestión anaerobia se produce digestato, compuesto principalmente por materia orgánica fermentada. Se determinará el destino de este subproducto.

3.1.1. Estrategia de gestión de residuos

Para el establecimiento de la estrategia de gestión de residuos se va a seguir la Guía de los Tratamientos de las deyecciones ganaderas de la Fundación Centro UdL-IRTA [13]. Los Gráficos 1 y 2 muestran el diagrama de toma de decisiones para adoptar la solución tecnológica adecuada para la gestión de las deyecciones ganaderas, extraído del citado trabajo.

La primera disyuntiva que plantea el diagrama es si hay o no excedente de nutrientes en la zona. Como se ha indicado en el Capítulo 1 del presente estudio, en la zona no existe un excedente de nutrientes, por lo que serán de aplicación las estrategias que se muestran en el Gráfico 1, que se detallan a continuación.

Aplicación directa

Consiste en el uso del residuo como fertilizante, sin realizarle ningún tipo de transformación. Es la técnica más simple y común de aprovechamiento de los residuos ganaderos, tanto en forma sólida como en forma líquida [14]. A pesar de ser un sistema sencillo y barato, presenta ciertos inconvenientes y limitaciones, como la necesidad de disponer de balsas de tamaño suficiente para almacenar durante largos períodos los residuos y la producción de lixiviados y malos olores.

Es preciso seguir unas condiciones de aplicación: respetar la distancia mínima a los cursos de agua, no aplicarlos en terrenos de elevada pendiente ni cercanos a núcleos de población, tener en cuenta las condiciones meteorológicas y respetar las dosis máximas de nutrientes que se pueden aplicar. En Castilla y León, las condiciones de

aplicación de los estiércoles y purines se encuentran reguladas por el Decreto 4/2018, de 22 de febrero, por el que se determinan las condiciones ambientales mínimas para las actividades o instalaciones ganaderas de Castilla y León, se modifica el Anexo III del Texto Refundido de la Ley de Prevención Ambiental de Castilla y León aprobado por el Decreto Legislativo 1/2015, de 12 de noviembre, y se regula el régimen de comunicación ambiental para el inicio del funcionamiento de estas actividades. Este decreto limita la libre aplicación de estos residuos, estableciendo las dosis máximas de nutrientes por hectárea y los requisitos de esparcido y enterrado.

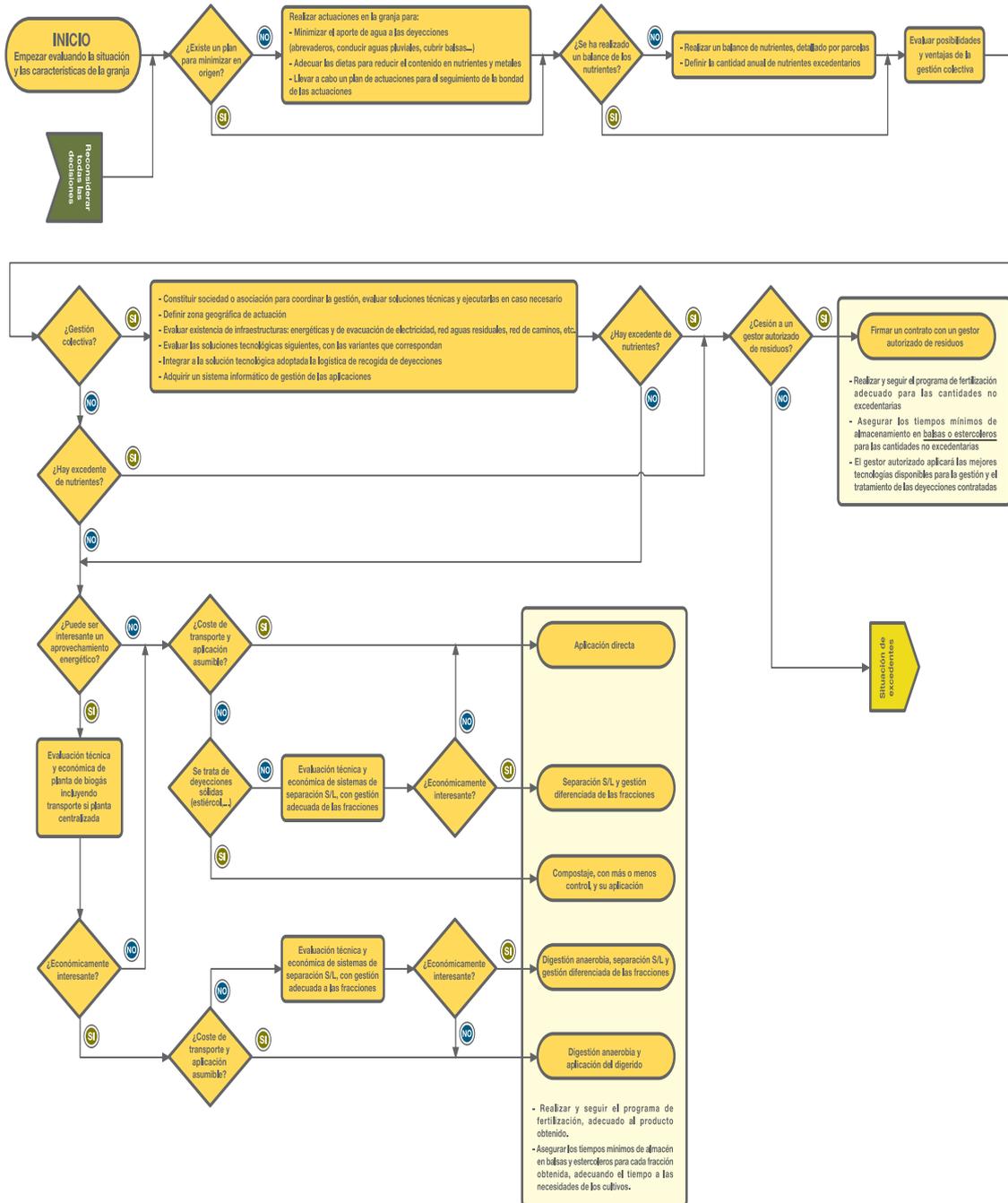


Gráfico 2. Diagrama de toma de decisiones para adoptar la solución tecnológica adecuada para la gestión de las deyecciones ganaderas (I) [13]

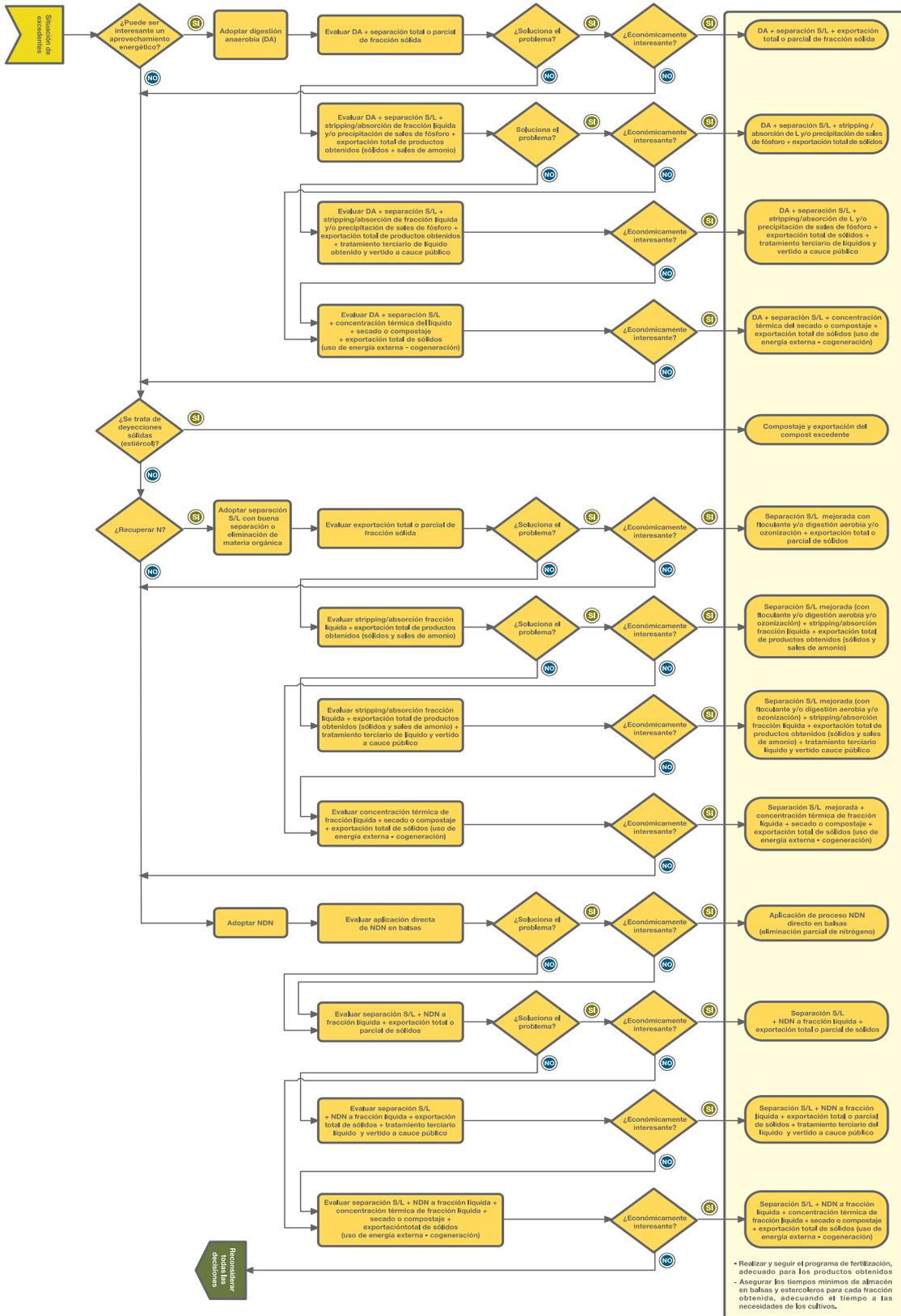


Gráfico 3. Diagrama de toma de decisiones para adoptar la solución tecnológica adecuada para la gestión de las deyecciones ganaderas (II) [13]

Separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones

La separación de la fase líquida de la sólida tiene como fin mejorar la aptitud de los residuos para su tratamiento posterior y aumentar la capacidad de gestión de los residuos. Se puede realizar mediante procesos físicos o fisicoquímicos [13].

La separación física es un proceso que permite extraer los sólidos contenidos en unas deyecciones de consistencia líquida, generando dos fracciones, una sólida y una líquida. La separación fisicoquímica consiste en la adición de uno o varios agentes floculantes a las deyecciones líquidas, con el fin de que los coloides que contiene precipiten y se puedan separar mediante algún procedimiento mecánico [13]. En ambos casos, la separación final de las fases se realiza mediante las técnicas siguientes:

- **Sistemas mecánicos:**
 - Por gravedad: tamices estáticos, vibratorios, rotativos o deslizantes.
 - Por centrifugación: con centrífuga centrífuga o decantador, o mediante hidrociclón.
 - Por presión: prensas de rodillos (con tamiz cepillado o con rodillos perforados), prensa de bandas, prensa de tornillo y filtro prensa (de vacío o de presión).
- Decantación natural.

En caso de que la mezcla de residuos sea muy heterogénea, puede emplearse una combinación de varios de los sistemas.

Compostaje

El compostaje es un proceso biooxidativo que comprende la mineralización y la humificación parcial de la materia orgánica, dando como resultado un producto estable, libre de fitotoxicidad y patógenos con ciertas propiedades húmicas [15].

El proceso del compostaje se ve afectado por diversos factores, que se pueden dividir en dos grupos: aquellos que dependen del compuesto (equilibrio de nutrientes, pH, tamaño de partícula, porosidad y humedad), y aquellos que dependen del manejo (aireación y temperatura) [15]:

- **Equilibrio de nutrientes:** habitualmente se define como la relación carbono/nitrógeno (C/N). Las deyecciones ganaderas suelen tener demasiado nitrógeno, por lo que normalmente las deyecciones se deben mezclar con materiales que tengan mucho carbono y poco nitrógeno.
- **pH:** en un proceso normal, el pH se sitúa en el rango 5,5-8,0, mientras que el rango 6,7-9,0 es en el que se tiene una actividad microbiana óptima. La mayoría de los materiales que se emplean en compostaje se encuentran en estos rangos, por lo que no es un parámetro que habitualmente sea limitante. No obstante, resulta importante para controlar las pérdidas de nitrógeno amoniacal por volatilización, que serían altas a pH mayor de 7,5.
- **Tamaño de partícula:** el área expuesta de una partícula está directamente relacionada con su tamaño. Así, a mayor tamaño de la partícula, menor superficie expuesta relativa tendrá, por lo que menos masa estará disponible para que los microorganismos actúen. Por el contrario, si el tamaño de las partículas es demasiado pequeño, se producirá compactación, con lo que no habrá suficiente oxígeno disponible para que se produzca la descomposición microbiana.

- **Porosidad:** la porosidad afecta a la distribución y disponibilidad de oxígeno durante el proceso. Un exceso de porosidad puede provocar que no se alcance la temperatura suficiente durante la fermentación, mientras que la escasez puede conllevar la aparición de procesos anaerobios y la generación de malos olores.
- **Humedad:** los microorganismos necesitan de una cierta cantidad de agua para realizar los procesos fermentativos. Se considera que una humedad del 50-60% es óptima para el proceso. Una humedad superior puede provocar falta de oxígeno y la aparición de procesos anaerobios.
- **Aireación:** una adecuada aireación elimina el exceso de humedad y dióxido de carbono, a la vez que controla la temperatura y aporta el oxígeno necesario para que los microorganismos trabajen.
- **Temperatura:** el patrón de temperatura muestra la actividad microbiana a lo largo del proceso. Durante la fase de descomposición, que se da en las primeras semanas del proceso, la temperatura asciende rápidamente debido a la acción de las bacterias y los hongos, hasta alcanzar los 65°C, aproximadamente. Esta temperatura se mantiene durante unas semanas, para posteriormente descender progresivamente en lo que se denomina la fase de maduración, que dura varios meses. Al final de la maduración se obtiene un compost estable y maduro, con ausencia de olores.

El proceso del compostaje permite obtener un producto estable, libre de patógenos, semillas, larvas e insectos. Además, se reduce el peso y el volumen, por la pérdida de agua y la descomposición de la materia orgánica. Esto permite una optimización del transporte y la aplicación. Sin embargo, se trata de un proceso lento, que requiere de varios meses para su consecución, así como de disponer de espacio suficiente.

Digestión anaerobia, separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones

Este método emplea residuos con una alta carga de materia orgánica que se presentan mayormente en fase líquida. Tiene como objetivo la reducción de la concentración de materia orgánica mediante la digestión anaerobia, para posteriormente realizar una separación de las fases sólida y líquida y tratarlas de forma diferente. Habitualmente a la fracción líquida se le aplica un proceso de evaporación al vacío, mientras que a la fase sólida se la somete a secado [13].

El proceso de digestión anaerobia se explicará en el siguiente apartado, por ser común con este. Las técnicas de separación sólido/líquido son las mismas que las detalladas en el apartado “Separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones”.

Se trata de un proceso de alta complejidad técnica, pues consta de cuatro procesos independientes (digestión, separación de fases, tratamiento de la fase líquida y tratamiento de la fase sólida). De la aplicación de estos procesos se obtienen tres productos: biogás, que puede emplearse para obtener electricidad o calor, un residuo procedente de la extracción de los sólidos procedentes de la fase líquida y un residuo seco procedente de la fase sólida. Ambos residuos pueden emplearse como enmienda orgánica en agricultura.

Digestión anaerobia y aplicación del digerido

La digestión anaerobia es un proceso en el que la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno por la acción de diversos tipos de microorganismos anaerobios.

En una instalación de biogás, el resultado de la digestión anaerobia es el biogás y el digestato [16].

Se puede emplear una gran variedad de sustratos para producir biogás, como purines y estiércoles de origen ganadero, residuos y subproductos agrícolas y agroindustriales, residuos orgánicos procedentes de industrias agroalimentarias y mataderos, lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos (RSU), cultivos energéticos (maíz, sorgo, etc.). Frecuentemente se emplean mezclas de varios de estos sustratos, para obtener una materia prima homogénea y equilibrada en nutrientes, necesarios para que la actividad de los microorganismos se desarrolle con normalidad.

El uso de purines y estiércoles ganaderos tiene varias ventajas respecto de los otros sustratos [16]:

- Contienen bacterias anaerobias de forma natural.
- Presentan una elevada humedad, especialmente los purines, sirviendo de disolvente para otros sustratos.
- Bajo coste de obtención.
- Elevada disponibilidad, al tratarse de residuos de las explotaciones ganaderas.

Resulta fundamental que el sustrato empleado tenga una capacidad metanogénica suficiente. El Gráfico 3 muestra la capacidad metanogénica de diferentes sustratos. Como se puede observar, los estiércoles y purines poseen una capacidad metanogénica inferior a la que presentan los cultivos energéticos, los residuos de matadero, los residuos de las industrias agroalimentarias o los RSU. No obstante, debido a su bajo coste de obtención y a su elevada disponibilidad, son un elemento viable para obtener metano, especialmente si se mezcla con otros materiales para conseguir un sustrato equilibrado.

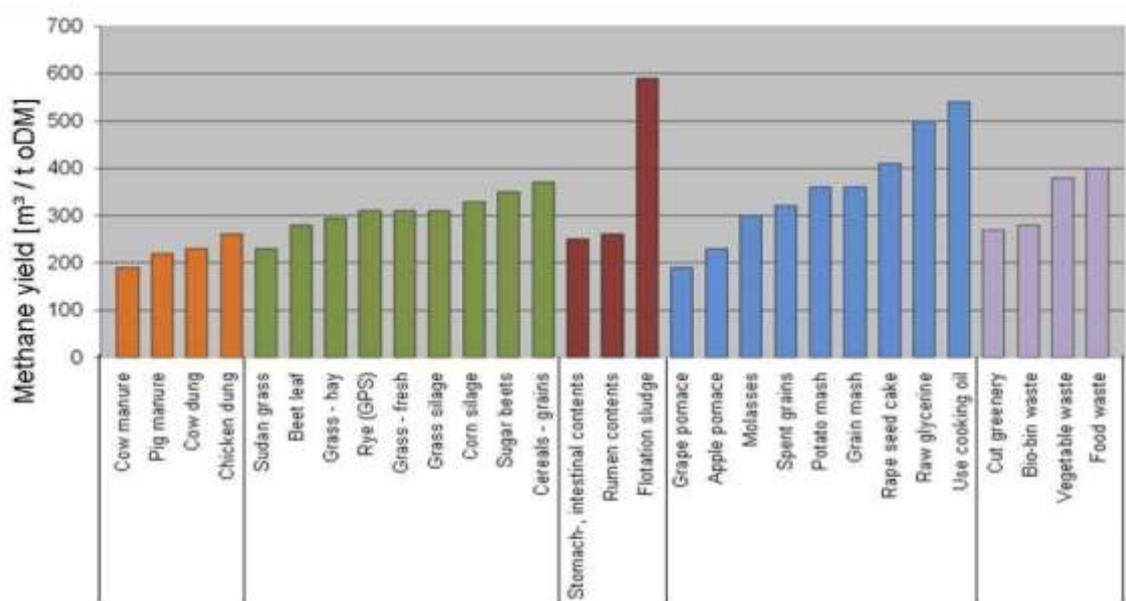


Gráfico 4. Comparación del poder metanogénico de diferentes sustratos [17]

El proceso de formación de biogás se compone de cuatro etapas bien diferenciadas, en cada una de las cuales intervienen unos microorganismos diferentes, que digieren los productos producidos por los anteriores de forma sucesiva. Dichas etapas son las siguientes [16]:

- **Hidrólisis:** es la primera etapa de la metanogénesis. En esta fase los lípidos son transformados en ácidos grasos y glicerol, los polisacáridos en monosacáridos y las proteínas en aminoácidos.
- **Acidogénesis:** las bacterias fermentativas transforman los productos anteriores en sustancias metanogénicas. Los ácidos grasos, glicerol, monosacáridos y aminoácidos son degradados a acetato, dióxido de carbono e hidrógeno, así como ácidos grasos volátiles y alcoholes. Estos últimos no son digestibles por las bacterias metanogénicas, para lo que se requiere de una fase intermedia.
- **Acetogénesis:** los ácidos grasos volátiles y los alcoholes, que tienen cadenas de carbonos demasiado largas para que las bacterias metanogénicas puedan degradarlos, son oxidados por las bacterias acetogénicas en acetato e hidrógeno. La concentración de hidrógeno va aumentando con el transcurso del proceso, hasta alcanzar un nivel al cual se inhibe la actividad de las bacterias acetogénicas. La acetogénesis y la metanogénesis habitualmente se desarrollan de forma simultánea.
- **Metanogénesis:** las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono, y el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano y agua. Esta fase es la que se ve más influenciada por las condiciones de manejo, tales como la composición del sustrato, el tiempo de retención, el pH o la temperatura.

La eficiencia del proceso depende de diversas variables, que deben ser medidas y controladas. La actividad de los microorganismos anaerobios se ve limitada o favorecida en función del nivel de oxígeno, de la temperatura, del pH, de la concentración de nutrientes y la presencia de inhibidores, como el amoníaco [16].

- **Temperatura:** mantener una temperatura estable durante el proceso es vital para garantizar una buena eficiencia de trabajo de las bacterias. En función de la temperatura, se pueden dar tres velocidades del proceso, lo que condiciona y define el tiempo de retención del residuo en el digestor.

Tabla 8. Estado térmico y tiempos de retención típicos [16]

Estado térmico	Rango de temperaturas	Tiempo de retención mínimo
Psicofílico	< 20°C	70 – 80 días
Mesofílico	30 – 42°C	30 – 40 días
Termofílico	43 – 55°C	15 – 20 días

- **pH:** el valor de pH del sustrato influye en el crecimiento de bacterias metanogénicas y afecta a la disociación de algunos compuestos importantes en la digestión anaeróbica. El rango de trabajo de las bacterias metanogénicas es de 5,5-8,5, aunque su óptimo se sitúa entre 7,8 y 8,0. En los reactores anaeróbicos el valor de pH se controla mediante la adición de una solución tampón de bicarbonato. Debido a la gran variabilidad de pH que se pueden dar en los sustratos, y a la gran variabilidad que tiene durante el proceso, no es un parámetro que pueda informar con precisión de la fase de la reacción. No obstante, es un buen indicativo del equilibrio de la reacción, además de ser un parámetro muy fácil de medir a un coste mínimo, lo que lo hace imprescindible.
- **Amoníaco:** una concentración de amoníaco, y más específicamente ion amonio, demasiado alta en el reactor puede provocar que la digestión anaerobia se ralentice o se detenga. Esto sucede porque las bacterias metanogénicas son muy sensibles al amonio, cuya concentración se debe mantener por debajo de los 80 mg/L para no originar problemas.

El producto de la digestión anaerobia es el biogás. El biogás es un gas formado principalmente por metano y dióxido de carbono, combustible, que se puede emplear para obtener energía eléctrica o calor mediante los equipos adecuados. Además, el residuo resultante de la digestión, el digestato, es rico en materia orgánica degradada, que se puede emplear como enmienda orgánica de alta calidad. para los cultivos [16].

Las instalaciones necesarias son complejas. Una planta tipo se puede componer de todos o algunos de los siguientes componentes: equipos de pretratamiento (cribas, trómel, aspiración de films y plásticos, separación magnética, trituración...), reactor, prensas, tamices, centrífugas, tanques de almacenamiento del biogás y del digestato... [16] En consecuencia, la instalación de una planta de biogás puede ser un proyecto de gran envergadura y elevados costes.

3.1.2. Tecnología de biometanización

Como resultado del apartado 3.3 Evaluación de las alternativas se tiene que la estrategia de gestión de residuos óptima es la digestión anaerobia y aplicación del digerido. En consecuencia, el siguiente grupo de alternativas que se debe evaluar es la tecnología de biometanización óptima para este caso.

La biometanización se produce en el interior del reactor o digestor. A tal efecto, la elección de este resulta una cuestión de vital importancia para garantizar la máxima eficiencia del proceso. Existen en el mercado numerosos tipos de digestores, que a grandes rasgos se pueden distinguir en función del flujo en su interior. Hay, no obstante, otras clasificaciones de digestores, como pueden ser con retención o no de biomasa. Los digestores con retención de biomasa se emplean fundamentalmente en el tratamiento de aguas residuales u otros sustratos principalmente líquidos. Debido al carácter sólido de los residuos que se pretenden gestionar, no se tendrá en cuenta esta clasificación.

Entendemos por flujo del digestor el recorrido que realiza el sustrato en su interior. Puede ser continuo o discontinuo.

Digestores discontinuos

Hablamos en primer lugar de los digestores discontinuos por ser el sistema más simple de biometanización. La operación característica de estos digestores es que se les realiza una carga de sustrato, que es digerido y posteriormente se descarga, tras lo cual vuelve a comenzar el proceso.

El tipo más común de digestores discontinuos consiste una zanja de hormigón con cubierta plástica. La temperatura en su interior se puede controlar mediante la incorporación de una red de calor en el suelo. Se puede producir la inoculación continua del sustrato recirculando los líquidos de percolación, que se pulverizan sobre el sustrato.

Tienen un rango de capacidad de tratamiento de 2000 a 50000 t de residuos al año. Son sencillos en su construcción y funcionamiento. Son adecuados para prácticamente todo tipo de sustratos, sean líquidos o sólidos. Sin embargo, son poco eficientes y requieren de grandes tiempos de funcionamiento en comparación con otras tecnologías [16].

Digestores continuos

En un digestor continuo, el sustrato se introduce de forma constante. El material se mueve en su interior bien de forma mecánica, bien por el empuje que provoca la introducción del nuevo sustrato. Existen dos tipos de digestores continuos:

- **Digestores verticales:** son el tipo más común de digestores. Están formados por un tanque circular construido de metal u hormigón armado, con el suelo de forma cónica y completamente estanco. Están recubiertos por una membrana plástica, que puede inflarse por el gas producido o estar sostenida por un pilar central. El sustrato se introduce por una abertura practicada en un lateral, mientras que el digestato se extrae por la parte inferior del reactor. De esta forma se produce un flujo continuo en el interior, con un elevado tiempo de retención y buena producción de biogás. Es el sistema más empleado en el tratamiento de residuos ganaderos [16].



Gráfico 5. Digestor vertical [16]

- **Digestores horizontales:** tienen forma cilíndrica y un eje horizontal. Normalmente son de acero, construidos en taller y transportados de una pieza al lugar de instalación, por lo que tienen un tamaño limitado. También se pueden construir de hormigón armado, en cuyo caso se denominan “de zanja”. Se pueden operar varios digestores en paralelo, aumentando la capacidad de la instalación.

El sustrato se introduce por un extremo, circulando lentamente por su interior. El movimiento en su interior se produce mediante un tornillo sinfín, que a su vez mezcla el sustrato, garantizando su homogeneidad. Para minimizar el riesgo de descargar un sustrato insuficientemente descompuesto es necesario garantizar un tiempo de retención mínimo, que puede oscilar entre 15 y 30 días.

Habitualmente se emplea como sustrato gallinaza, hierba, silo de maíz o estiércol con un elevado contenido de paja, como el estiércol vacuno [16].

3.1.3. Sistema de aprovechamiento del biogás

El biogás se puede emplear como fuente de energía de muchas formas. A grandes rasgos, los distintos aprovechamientos del biogás pueden tener como fin la producción de calor, la generación de electricidad o la obtención de gas natural estandarizado para su inyección a la red de distribución.



Gráfico 6. Digestor horizontal [16]

El poder energético del biogás se fundamenta en su contenido en metano. La composición y las propiedades del biogás están en función del tipo de sustrato empleado y de las diversas variables de control del reactor. En la Tabla 9 se pueden observar los rangos de valores normales de composición del biogás.

Tabla 9. Composición habitual del biogás [16]

Compuesto	Símbolo químico	Contenido (% volumen)
Metano	CH ₄	50-75
Dióxido de carbono	CO ₂	25-45
Vapor de agua	H ₂ O	2 (20°C) – 7 (40°C)
Oxígeno	O ₂	<2
Nitrógeno	N ₂	<2
Amoníaco	NH ₃	<1
Hidrógeno	H ₂	<1
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	<1

En función del destino final del biogás, puede ser necesario realizar algún tipo de tratamiento, como la eliminación del agua, del dióxido de carbono o del ácido sulfhídrico. El tratamiento necesario para cada destino se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Tratamiento según el uso final del biogás [18]

Uso final	Eliminación del agua	Eliminación del CO ₂	Eliminación del H ₂ S
Producción térmica en caldera	Parcial	No	No/Parcial/Elevado
Producción de electricidad en motores estacionarios	Parcial o Elevado	No/Parcial/Elevado	No/Parcial/Elevado
Combustible de vehículos o turbinas	Elevado	Elevado	Elevado

Tabla 10 (cont.). Tratamiento según el uso final del biogás [18]

Uso final	Eliminación del agua	Eliminación del CO ₂	Eliminación del H ₂ S
Gas natural para calefacción	Elevado	Elevado	Elevado
Pilas de combustible	Elevado	Elevado	Elevado

Se considerarán como alternativas de aprovechamiento del biogás la producción de calor, la cogeneración y la obtención de biometano.

Producción de calor

La forma más sencilla de aprovechamiento del biogás es mediante su combustión en calderas o quemadores para la obtención de calor, bien sea en el lugar de producción, bien sea en algún lugar próximo mediante su transporte en tuberías. Su uso directo en el lugar de obtención no requiere de ningún tratamiento previo del biogás, mientras que si que requiere transportar es necesario realizar una serie de tratamientos, como la eliminación de partículas, la eliminación del vapor de agua, su compresión y enfriado.

Cogeneración

Otra forma de aprovechamiento del biogás es la obtención de electricidad. En la mayoría de los sistemas de generación eléctrica la eficiencia se ve limitada por la producción de calor, que puede ser aprovechado para otros usos, como la producción de agua caliente sanitaria, calefacción o para usos industriales. Una planta de cogeneración basada en un motor térmico tiene una eficiencia del 90%, y produce un 35% de electricidad y un 65% de calor [16].

Las tecnologías más habituales de cogeneración son las siguientes:

- **Motores de gas:** se trata de motores tipo Otto adaptados para su uso exclusivamente con gas. En el caso de instalaciones de más de 100 kW, se suelen sustituir por motores Diésel adaptados igualmente para su uso exclusivamente con gas.
- **Motores de combustible dual:** consisten en motores tipo Diésel adaptados para consumir una mezcla de gas y gasóleo o sólo gasóleo. El gasóleo se puede sustituir por biodiesel o aceites vegetales. Presentan como ventaja frente a los motores de gas que, en caso de corte del suministro de gas, pueden seguir funcionando.
- **Turbinas de gas:** en este tipo de instalaciones el aire es introducido en una cámara de combustión a elevada presión que donde es mezclado con el biogás. La mezcla combustiona en el interior de la cámara debido al aumento de la temperatura, produciendo la expansión del gas. Los gases calientes circulan a través de una turbina conectada a un generador eléctrico. Se trata de instalaciones que requieren una elevada inversión. Para su uso con biogás, éste debe recibir un tratamiento complejo de depuración.

Obtención de biometano

El biogás obtenido de los procesos de digestión anaerobia contiene, además de metano, vapor de agua, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. En el caso de emplear este gas como combustible para vehículos o para la inyección a la red de distribución de gas natural, es necesario eliminar estos compuestos, que representan entre un 25 y un 50% de la mezcla, hasta obtener un gas con un 95% de metano [19].

- **Deshumidificación:** el agua presente en el biogás es eliminada mediante condensación, haciéndolo pasar a través de unos tubos refrigerantes que condensan el agua.
- **Eliminación del dióxido de carbono:** algunos métodos de eliminación del CO₂ son el lavado con agua, el lavado con disolventes orgánicos, el filtrado en carbón activo, la separación por membranas y la separación criogénica. En general son procedimientos de elevada complejidad técnica y coste.
- **Desulfuración:** es el proceso más habitual en las plantas de producción de biogás. Existen tres métodos:
 - **Desulfuración microaerofílica:** se inyectan pequeñas cantidades de aire en la cabeza del digestor donde se forman bacterias sulfooxidantes, que degradan el H₂S para producir azufre elemental.
 - **Desulfuración biológica externa:** se hace pasar el biogás por un filtro plástico al que se encuentran adheridas bacterias desulfurantes.
 - **Adición de sales férricas:** consiste en añadir sales de hierro al sustrato para que se produzcan sulfatos insolubles que impidan que el azufre se transforme en H₂S. A pesar de su simpleza, se trata de un método arriesgado, pues se puede producir una bajada indeseada del pH en el reactor y corrosión de los materiales estructurales.

Los tratamientos anteriormente descritos requieren de instalaciones adicionales a la producción del biogás, y requieren de una elevada inversión. La obtención de biometano puede resultar interesante en el caso de elevadas producciones de biogás, siempre que la instalación se encuentre próxima a la red de distribución.

3.1.4. Sistema de aprovechamiento del digestato

El digestato obtenido del proceso de digestión anaerobia es rico en materia orgánica y elementos nutritivos que deben ser aprovechados. El destino más frecuente de los digestatos es la fertilización de los cultivos. Para mejorar las características físicas del producto, es habitual realizar una serie de operaciones sobre el mismo, buscando un mayor aprovechamiento de los nutrientes y reduciendo el volumen del digestato para poder transportarlo con mayor facilidad.

Tratamiento parcial

El tratamiento parcial consiste en la separación de la materia sólida de la líquida del digestato, para su posterior uso por separado. Esta operación se puede realizar de varias formas: tamices, prensa de tornillo, filtro de tambor, decantación... [20]

La fracción sólida resultante de este tratamiento se puede emplear directamente como enmienda orgánica para los cultivos o se puede someter a compostaje. La fracción líquida se puede aplicar a los cultivos, empleando para ello equipos de inyección específicos, o puede someterse a secado. En cualquier caso, a mayor número de operaciones de tratamiento sobre el digestato, mayor el coste asociado al mismo.

Tratamiento completo

Un tratamiento completo tipo consta de tres fases [18]:

- **Centrifugado:** en esta primera etapa se separan, mediante una centrifugadora industrial, la fase sólida de la fase líquida, dando como resultado una materia sólida

con, aproximadamente, el 25% de humedad. Este producto puede emplearse directamente para la fertilización orgánica de los cultivos o someterse a compostaje.

- **Ultrafiltrado:** la fase líquida proveniente de la etapa anterior se somete a ultrafiltrado, obteniendo un concentrado con la poca materia sólida que contenía esta fase y una solución de agua y nutrientes. El concentrado obtenido se puede incorporar al digestor, permitiendo recuperar una parte importante de compuestos y bacterias promotores de la digestión anaerobia.
- **Ósmosis inversa:** la solución obtenida mediante ultrafiltrado se procesa mediante un sistema de ósmosis inversa, produciendo por una parte un sólido rico en nitrógeno, fósforo y potasio, y por otra agua pura que puede emplearse en el resto del proceso.

Este tipo de tratamiento tiene unos elevados requerimientos de energía, siendo rentable únicamente para plantas con una capacidad de generación de más de 700 kW [16]. No obstante, la energía empleada en este proceso puede provenir del calor producido en el sistema de cogeneración, así como la electricidad necesaria.

3.2. Metodología de evaluación de las alternativas

La evaluación de las alternativas anteriormente descritas se va a realizar en base a cuatro enfoques: técnico, ambiental, económico y social. Cada una de las alternativas se valorará para cada enfoque, en función de los criterios que se establecerán a continuación. Posteriormente, se realizará una evaluación multicriterio por cada grupo de alternativas, teniendo como conclusión la alternativa óptima.

Enfoque técnico

En primer lugar, se evaluará cada alternativa en función de su adecuación a las necesidades técnicas del proceso. La evaluación se realizará mediante una matriz en la que se enfrenten las distintas alternativas de cada grupo con las necesidades técnicas del proyecto. En las casillas de cruce se asignará el valor de 1 en caso de cumplimiento, y el valor 0 en caso de no cumplimiento, multiplicado por el número de alternativas posibles.

Enfoque ambiental

En segundo lugar, se realizará la evaluación de la alternativa en términos ambientales. Para ello, se valorará cada alternativa en función del aprovechamiento de los recursos y la calidad de los efluentes, y se ordenarán de mayor a menor. Las alternativas recibirán su puntuación atendiendo al orden dentro de la lista, teniendo la mayor puntuación la alternativa que presente un mayor aprovechamiento de los recursos y mayor calidad de los efluentes.

Enfoque económico

En tercer lugar, se valorará el coste económico de cada alternativa. Las alternativas de cada grupo se ordenarán de mayor a menor coste, asignándole a cada una la puntuación en función de su posición relativa en la lista. Aquellas alternativas con menor coste recibirán las puntuaciones mayores.

Enfoque social

El último lugar, se estimará la capacidad de creación de puestos de trabajo directos e indirectos para cada alternativa. Las alternativas recibirán su puntuación atendiendo al

orden dentro de la lista, teniendo la mayor puntuación la alternativa que presente un potencial de creación de empleo mayor.

El valor dado a cada alternativa para cada uno de los enfoques anteriores se multiplicará por un factor de ponderación, de la siguiente forma:

- **Enfoque técnico:** 1,2
- **Enfoque ambiental:** 0,8
- **Enfoque económico:** 1
- **Enfoque social:** 0,8

Se efectuará la suma para cada alternativa del valor de cada enfoque por su ponderación. La alternativa idónea de cada grupo será aquella que presente una mayor puntuación final.

3.3. Evaluación de las alternativas

3.3.1. Estrategia de gestión de residuos

En la Tabla 11 se presenta la matriz de efectos para la elección de la estrategia de gestión de residuos, en función de los criterios expuestos en el apartado anterior. A continuación, se justifican los valores contenidos en la tabla:

- **Aplicación directa:** no reúne las características técnicas necesarias, pues en la actualidad no se disponen en la zona de suficientes recursos de aplicación. En lo ambiental, resulta la alternativa menos eficiente, pues no realiza prácticamente ninguna transformación sobre el material de partida. Sin el debido tratamiento, puede provocar problemas de contaminación de los suelos, así como la transmisión de patógenos y semillas de malas hierbas. No obstante, es la alternativa con un menor coste económico. No genera nuevos puestos de trabajo, al ser el método actual.
- **Separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones:** a nivel técnico, esta opción es viable en el caso de que el problema de gestión de los residuos derive de la presencia en el sustrato de una fracción líquida muy abundante, que no es el caso. Se trata de una alternativa que permite el aprovechamiento medianamente eficiente de los recursos, pero no de forma óptima, al ser estos fundamentalmente sólidos. Respecto de su valoración económica, es la segunda alternativa con mayor coste, debido a la necesidad de equipos de separación de las fases y la creación de dos líneas de tratamiento separadas. Tiene un impacto positivo en el empleo, en un término medio con respecto a las demás alternativas.
- **Compostaje:** se trata de una alternativa viable a nivel técnico, muy adecuada a las características del material disponible. A nivel ambiental, se le ha otorgado una valoración de 2, debido a que, aunque el producto resultante es de calidad, con ausencia de patógenos y semillas de malas hierbas, no permite un aprovechamiento óptimo de los recursos, al no separar las distintas fracciones. Se trata de una opción muy económica, pues únicamente requiere de la construcción de zanjas o trojes de hormigón. Apenas tendría impacto positivo en la generación de empleo, pues el proceso de transformación es muy sencillo y la aplicación en el campo se realizaría con los medios de que se disponen actualmente.
- **Digestión anaerobia, separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones:** cumple con los requisitos técnicos necesarios, en tanto que es un proceso adecuado para el tratamiento del material de partida, si bien puede o ser

necesaria una separación de fases. Además, es la alternativa que mejor aprovecha los recursos y proporciona unos productos de mayor calidad, proporcionando nutrientes para la aplicación agrícola y un gas que puede transformarse en electricidad y/o calor. No obstante, es la opción con mayor coste, debido a los equipos necesarios. Respecto a su impacto social, es la opción que genera un mayor número de puestos de trabajo, en relación con el número de procesos que contempla.

- **Digestión anaerobia y aplicación del digerido:** a nivel técnico, reúne los requisitos necesarios para el tratamiento del material de partida. Tiene un buen aprovechamiento de los recursos, si bien no tan elevado como la alternativa anterior. El coste económico de la alternativa es elevado, si bien más bajo que la alternativa 4. Tiene un buen impacto en la generación de empleo, debido a la diversidad de procesos de transformación que contempla.

Tabla 11. Matriz de efectos para la elección de la estrategia de gestión de residuos

Enfoque	Técnico	Ambiental	Económico	Social	Total
Ponderación	1,2	0,8	1	0,8	
<i>Aplicación directa</i>	0	1	5	1	6,6
<i>Separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones</i>	0	3	2	3	6,8
<i>Compostaje</i>	5	2	4	2	13,2
<i>Digestión anaerobia, separación sólido/líquido y gestión diferenciada de las fracciones</i>	5	5	1	5	15,0
<i>Digestión anaerobia y aplicación del digerido</i>	5	4	3	4	15,4

La estrategia con mayor puntuación es la Digestión anaerobia y aplicación del digerido. Los residuos objeto de gestión presentan una relación entre fase líquida y sólida baja, por lo que no es necesaria una separación de fases. Así mismo, el objetivo primordial de la transformación es el aprovechamiento óptimo de los residuos, obteniendo el mayor valor de sus subproductos. Esto se obtiene mediante un proceso de biometanización.

Esta estrategia permite una gestión adecuada de los residuos, minimizando su impacto en el medio ambiente. Tiene una baja huella de carbono, en tanto que evita las emisiones de metano en los procesos de fermentación, considerado gas de efecto invernadero.

El coste de la inversión es elevado, debido al equipamiento necesario. No obstante, es menor que otras alternativas al no requerir de equipos de separación de fases.

Se estima un impacto positivo en el empleo de la zona, al requerirse transportistas y varios operarios en la instalación para su manejo y mantenimiento. Así mismo, los efluentes obtenidos (biogás y digestato) implican en conjunto la necesidad de mano de obra que sólo con la aplicación de los residuos (de forma directa o transformados) no existiría.

3.3.2. Tecnología de biometanización

En la Tabla 12 se presenta la matriz de efectos para la elección de la tecnología de biometanización, en función de los criterios expuestos en el apartado 3.2. Metodología de evaluación de las alternativas. A continuación, se justifican los valores contenidos en la tabla:

- **Digestor discontinuo:** debido al elevado volumen de residuos que se pretende gestionar y a la necesidad de unos tiempos de retención altos, ésta no resulta una alternativa viable técnicamente. A nivel ambiental, es la opción que presenta una menor eficiencia del proceso. Esto se debe a que no se produce una retención de materia orgánica en el interior del reactor que favorezca la proliferación de la flora bacteriana. A pesar de su sencillez en la construcción, se necesita construir uno o varios reactores más grandes que en el caso del uso de digestores continuos, para poder procesar el volumen de residuos que se generan en la zona, por lo que se otorga el valor 1. En el ámbito social, es la alternativa que generaría un mayor número de puestos de trabajo, como consecuencia de las elevadas necesidades de mano de obra para la carga y descarga del reactor.
- **Digestor continuo vertical:** este tipo de digestor cumple con las características técnicas requeridas, pues resulta óptimo para el tipo de residuo objeto de tratamiento y el volumen que se pretende gestionar. Con respecto al aspecto ambiental, presenta una elevada eficiencia del proceso, debido a que retiene parte del sustrato en su interior, favoreciendo la colonización del sustrato nuevo. A nivel económico, tiene un coste medio entre el digestor discontinuo y el continuo horizontal. Respecto a lo social, tiene un menor requerimiento de mano de obra que el digestor discontinuo.
- **Digestor continuo horizontal:** se trata de un sistema adecuado a nivel técnico, pues es capaz de tratar los residuos objeto de tratamiento. A nivel ambiental, presenta una eficiencia parecida al digestor continuo vertical, si bien al tener una menor permanencia de sustrato fermentado capaz de inocular las nuevas incorporaciones, y al hecho de que es más susceptible a que se den digestiones incompletas debidas a un tiempo de retención insuficiente, se le ha otorgado un valor de 2. Es la alternativa con un coste relativo menor, debido al tipo de construcción. No obstante, en lo social es la alternativa con menor valor, pues no requiere prácticamente de mano de obra, por lo que apenas generaría empleo en la zona.

Tabla 12. Matriz de efectos para la elección de la tecnología de biometanización

Enfoque	Técnico	Ambiental	Económico	Social	Total
Ponderación	1,2	0,8	1	0,8	
<i>Digestor discontinuo</i>	0	1	1	3	4,2
<i>Digestor continuo vertical</i>	3	3	2	2	9,6
<i>Digestor continuo horizontal</i>	3	2	3	1	9,0

La alternativa con mayor puntuación es el Digestor continuo vertical. Se trata de un sistema adecuado para el tratamiento del estiércol de vacuno. Además, el control de los parámetros de la reacción se puede controlar con suficiente precisión. Aprovecha adecuadamente los residuos, obteniendo buenos volúmenes de biogás y un digestato de calidad.

Las necesidades de superficie para la construcción del centro de tratamiento de residuos son pequeñas. Así mismo, al ser el tipo de instalación mayoritaria en Europa, se trata

de una tecnología muy probada y depurada. En consecuencia, los costes de construcción son menores que en el caso de otras tecnologías.

Tiene un impacto medio en la creación de puestos de trabajo. Si bien se trata de plantas con un elevado nivel de automatización, requieren de un cierto número de trabajadores dedicados a la carga del digestor, manipulación del digestato y labores de mantenimiento, así como las labores de transporte de los residuos y productos.

3.3.3. Sistema de aprovechamiento del biogás

En la Tabla 13 se presenta la matriz de efectos para la elección del sistema de aprovechamiento del biogás, en función de los criterios expuestos en el apartado 3.2. Metodología de evaluación de las alternativas. A continuación, se justifican los valores contenidos en la tabla:

- **Producción de calor:** a nivel técnico, no cumple con las características necesarias. La producción de calor es factible en el caso de necesidad de redes de calor en instalaciones próximas a la planta de tratamiento de residuos. A pesar de ello, resulta más interesante la cogeneración, pues permite obtener calor y electricidad de forma simultánea. Debido a ello, recibe la mínima puntuación en el enfoque ambiental. En el ámbito económico es la alternativa, a priori, más económica de ejecutar. Apenas tendría impacto en el empleo de la zona.
- **Cogeneración:** resulta una alternativa viable a nivel técnico, aprovechando adecuadamente la capacidad energética del biogás. Por este mismo motivo, se le ha otorgado la máxima puntuación en el enfoque ambiental. Se trata de una alternativa intermedia en cuanto al coste de instalación. A pesar del elevado nivel de automatización del sistema, puede tener un impacto positivo en el empleo, pues el calor producido puede emplearse en industrias existentes en la zona, que abaratarían los costes energéticos, o en industrias de nueva creación.
- **Obtención de biometano:** es factible a nivel técnico, pues el gas obtenido del proceso es, a priori, de suficiente calidad. A nivel ambiental presenta una eficiencia menor que la cogeneración, debido principalmente a los procesos de tratamiento necesarios para su depuración y a la frecuente baja eficiencia de los equipos de consumo (motores endotérmicos o quemadores, mayoritariamente), en comparación con la cogeneración. Requiere de una elevada inversión. No obstante, tendría un impacto positivo en el empleo de la zona.

Tabla 13. Matriz de efectos para la elección del sistema de aprovechamiento del biogás

Enfoque	Técnico	Ambiental	Económico	Social	Total
Ponderación	1,2	0,8	1	0,8	
<i>Producción de calor</i>	0	1	3	1	4,6
<i>Cogeneración</i>	3	3	2	2	9,6
<i>Obtención de biometano</i>	3	2	1	3	8,6

La alternativa elegida es la Cogeneración. Presenta una elevada eficiencia energética, al aprovechar el calor desprendido en la generación de electricidad. Además, al ser una tecnología muy frecuente y de relativa sencillez. La disponibilidad de equipos en el mercado es alta, pudiendo contener el coste de instalación.

3.3.4. Sistema de aprovechamiento del digestato

En la Tabla 14 se presenta la matriz de efectos para la elección del sistema de aprovechamiento del digestato, en función de los criterios expuestos en el apartado 3.2. Metodología de evaluación de las alternativas. A continuación, se justifican los valores contenidos en la tabla:

- **Tratamiento parcial:** debido a las características de digestato obtenido en el proceso, un tratamiento parcial es adecuado y suficiente para su manejo y almacenamiento. Como consecuencia de intervenir mínimamente en el digestato, la eficiencia del proceso es elevada, no desperdiciándose material. El coste económico de la implantación del proceso es relativamente bajo, pues no se requiere de un número elevado de equipos, y de poca complejidad. El impacto en la creación de empleo es bajo, por la sencillez del proceso.
- **Tratamiento completo:** esta alternativa reúne los requisitos técnicos necesarios. A nivel ambiental, el proceso tiene un mayor requerimiento de energía, lo que hace disminuir su eficiencia, a pesar de obtener unos productos de elevada calidad. Requiere de una elevada inversión, debido a la gran complejidad de los equipos necesarios. En lo social, puede tener un impacto en la creación de empleo mayor que el tratamiento parcial, como consecuencia de la diversidad de productos obtenidos y su necesidad de comercialización.

Tabla 14. Matriz de efectos para la elección del sistema de aprovechamiento del digestato

Enfoque	Técnico	Ambiental	Económico	Social	Total
Ponderación	1,2	0,8	1	0,8	
<i>Tratamiento parcial</i>	2	2	2	1	6,8
<i>Tratamiento completo</i>	2	1	1	2	5,8

La alternativa con mayor puntuación es el Tratamiento parcial. A igualdad de cumplimiento de las condiciones técnicas necesarias, presenta una mejor eficiencia en tanto que requiere de un menor consumo de energía. Además, requiere de una inversión relativamente pequeña.

3.4. Conclusiones

La alternativa elegida consiste en la digestión anaerobia de los residuos, para la obtención de biogás y digestato que puede ser aplicado en las tierras de labor de la zona.

La instalación consistirá en uno o varios digestores continuos verticales. El biogás obtenido se empleará en un sistema de cogeneración para la obtención de electricidad, que podrá ser empleada en los procesos de la instalación y el sobrante inyectado en la red eléctrica, y calor que se empleará en la propia instalación y en fábricas cercanas. Sobre el digestato resultante se aplicará un tratamiento parcial, suficiente para obtener un material fácilmente transportable y aplicable en el campo.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1. Cuantificación de los residuos

Como se puede ver en el apartado 1.3.1. Cálculo del potencial productivo, el censo de vacuno de leche en la comarca de la Vega de Carrión y Saldaña es de 12013 vacas de media. Se pretende que la instalación tenga capacidad para un tercio de las cabezas de ganado totales de la zona, es decir, 4000 vacas.

Se estima que la producción de estiércol es de 73,05 kg/vaca y día, como se ha calculado en el apartado 1.3.1. Cálculo del potencial productivo en base a los parámetros de las explotaciones de la zona de estudio. Por tanto, el volumen de residuos que deberá gestionar la instalación, también denominado Materia Prima para Carga (MPC), será:

$$MPC = 73,05 \text{ kg/vaca y día} \cdot 4000 \text{ vacas} = 292200 \text{ kg/día} = 292,200 \text{ t/día}$$

Por tanto, la instalación tendrá capacidad para gestionar 292,2 t de estiércol fresco por día.

4.2. Diseño y dimensionamiento del digestor

4.2.1. Tanque de alimentación

El tanque de alimentación tiene como finalidad recibir los residuos procedentes de las explotaciones de la zona, transportados hasta la planta de biogás mediante camiones, y homogeneizarlos como paso previo a introducirlos en el digestor. La homogeneización se realizará mediante un agitador de hélice.

La alimentación del tanque de alimentación se realizará mediante una piqueta en la que descargarán los camiones procedentes de las explotaciones. Los residuos se transportarán mediante un sistema de sinfines, tanto a la entrada como a la salida del tanque de alimentación.

Dimensionamiento del tanque de alimentación

El tanque de alimentación deberá tener una capacidad igual al volumen de residuos que se reciban a lo largo de una jornada, más un margen de seguridad del 20%. Teniendo en cuenta que la densidad del estiércol es de 0,6 t/m³, entonces:

$$V_{diseño} = \frac{292,2 \text{ t}}{0,6 \text{ t/m}^3} = 487 \text{ m}^3 \rightarrow 487 \text{ m}^3 \cdot 1,20 = 584,4 \text{ m}^3$$

Se considerará un radio de diseño ($R_{diseño}$) de 6 m. La altura de diseño ($H_{diseño}$) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$H_{diseño} = \frac{V_{diseño}}{\pi \cdot R_{diseño}^2} = \frac{584,4 \text{ m}^3}{\pi \cdot 6^2} = 5,17 \text{ m}$$

Por tanto, el tanque de alimentación tendrá un radio de 6 m y una altura de 5,17 m.

4.2.2. Digestor

Los residuos procedentes del tanque de alimentación se transportarán mediante sinfines al digestor. Éste será de forma circular, construido en hormigón armado y parcialmente enterrado. La superficie interior tendrá forma cóncava, con el fin de permitir en la parte más baja extraer el digestato. Estará cubierto por una membrana plástica sujeta por un mástil central. Esta membrana se hinchará con el gas producido en el digestor, y servirá para su regulación.

Un elemento importante del digestor es el circuito de calefacción. En los períodos más fríos del año, especialmente en invierno, puede ser necesario calentar el sustrato desde el interior del digestor para promover la fermentación anaerobia que, de otra forma y debido a las bajas temperaturas, se vería ralentizada o incluso detenida. El calor necesario para mantener la temperatura interna del digestor provendrá del sistema de cogeneración.

Se dispondrá de un sistema de mezcla en el interior del reactor, formado por unas palas, de acero inoxidable que distribuirán el sustrato nuevo por toda la superficie del digestor.

La salida del gas se realizará mediante un sistema de tuberías de acero convenientemente aisladas, con el fin de evitar condensaciones indeseadas. Se dispondrá de la valvulería necesaria para evacuar los condensados y regular el caudal y presión del gas.

La extracción del digestato se realizará por la parte inferior del reactor, mediante un sistema de sinfines. El digestato se transportará a una zona de almacenamiento. La extracción del digestato se realizará de forma programada a lo largo del año, garantizando un tiempo de retención en el interior del digestor tal que permita obtener el máximo de biogás posible.

Dimensionamiento del digestor

Antes de proceder a dimensionar el digestor, es necesario conocer la temperatura ambiente y la temperatura del proceso. La temperatura ambiente es aquella a la que llegan los residuos al tanque de alimentación, y posteriormente al digestor.

En la Tabla 15 se muestran la temperatura media anual y la media de las temperaturas mínimas anuales para el período 2010-2019 del observatorio de Villaluenga de la Vega [21].

Tabla 15. Media de las temperaturas medias, máximas y mínimas del observatorio de Villaluenga de la Vega en el período 2010-2019 [21]

Mes	Media de las temperaturas medias	Media de las temperaturas máximas	Media de las temperaturas mínimas
Enero	2,65	7,77	-1,41
Febrero	3,07	8,95	-1,91
Marzo	6,12	12,72	0,19
Abril	9,16	15,66	2,98
Mayo	12,36	19,38	5,59
Junio	16,66	24,20	9,27
Julio	19,02	27,53	10,89
Agosto	18,39	27,15	10,17

Tabla 15 (cont.). Media de las temperaturas medias, máximas y mínimas del observatorio de Villaluenga de la Vega en el período 2010-2019 [21]

Mes	Media de las temperaturas medias	Media de las temperaturas máximas	Media de las temperaturas mínimas
Septiembre	15,29	23,79	8,04
Octubre	11,10	18,50	5,01
Noviembre	5,94	11,26	1,44
Diciembre	3,37	8,75	-0,82

La temperatura media anual es de 10,31°C, mientras que la temperatura media de las mínimas para los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) es de -1,38°C. Con 10°C el proceso se desarrolla en el rango Psicrófilico, lo que significa que se produce de forma muy lenta. Debido a ello, es necesaria la instalación de un sistema de calefacción que mantenga la temperatura en el interior del digestor estable en 31°C. Para el cálculo de las necesidades de calefacción se empleará la temperatura media de las mínimas para los meses de invierno calculada anteriormente.

Otro parámetro importante es el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), que relaciona la temperatura del proceso con el tiempo de permanencia de la biomasa en el interior del digestor. Para su cálculo, se empleará la fórmula mostrada en la “Guía de implementación de sistemas de biogás” [22]:

$$TRH = (-51,227 \cdot \ln(T) + 206,72)$$

Donde:

T : temperatura del proceso [°C].

Aplicando la fórmula, y considerando un valor de T de 31°C, se obtiene un TRH de 30,8 días.

La Carga Orgánica Volumétrica (COV) es la cantidad de materia orgánica productora de biogás por metro cúbico del digestor. Se mide en kgMV/m³·día y depende del TRH, de la temperatura y del tipo de materia orgánica.

Su cálculo se efectúa mediante la siguiente fórmula [22]:

$$COV = \frac{CD \cdot MS \cdot MV \cdot \rho_{estiércol}}{V_{digestor}} = \frac{MS \cdot MV \cdot \rho_{estiércol}}{TRH}$$

Donde:

CD : carga diaria [m³/día].

MS : materia seca [%].

MV : materia volátil [%].

$\rho_{estiércol}$: densidad del estiércol [kg/m³].

$V_{digestor}$: volumen del digestor [m³].

TRH : tiempo de retención hidráulico [días].

Su valor debe estar comprendido entre 1 y 3 kg/m³·día. Si excede los 3 kg/m³·día, el proceso es más inestable y se debe controlar con mayor intensidad para que no disminuya la producción de gas. Si alcanza los 4-5 kg/m³·día hay demasiada biomasa en el digestor y disminuye la producción de biogás, ya que el exceso de sólidos dificulta la movilidad de los microorganismos, reduciendo la efectividad del proceso [22].

Aplicando la fórmula, y considerando un valor de MS del 8%, MV del 83%, una densidad del estiércol de 600 kg/m³ y un TRH de 30,8 días, se tiene un COV de 1,29 kgMV/m³·día. Si bien es un valor bajo, se encuentra dentro del rango admisible para su correcto funcionamiento.

Una vez calculados los parámetros anteriores se puede determinar el volumen del digestor. Éste se calcula a partir del TRH (30,8 días), la Materia Prima para Carga (292,2 t/día) y la densidad del estiércol (0,6 t/m³), y considerando un margen de seguridad del 20%.

$$V_{digestor} = \frac{TRH \cdot MPC}{\rho_{estiércol}} = 15000 \text{ m}^3 \rightarrow 15000 \text{ m}^3 \cdot 1,20 = 18000 \text{ m}^3$$

Por tanto, el digestor deberá tener un volumen de 18000 m³.

Al volumen anterior hay que sumar el volumen de la cubierta para el almacenamiento del gas producido. Un kilogramo de masa volátil produce entre 0,25 y 0,40 m³ de biogás en el digestor. Por tanto, tomando como valores de MPC 292200 kg/día, de MS 8% y de MV 83%, el biogás producido será:

$$\text{Biogás producido} = MPC \cdot MS \cdot MV \cdot 0,325 = 6305,7 \text{ m}^3$$

El volumen de almacenamiento mínimo será el correspondiente para albergar el biogás producido en 5 horas.

$$V_{almacenamiento} = \frac{\text{Biogás producido}}{24 \text{ horas}} \cdot 5 \text{ horas} = 1313,7 \text{ m}^3 \rightarrow 1313,7 \text{ m}^3 \cdot 1,20 \\ = 1576,4 \text{ m}^3$$

Una vez calculados los volúmenes del digestor y del almacenamiento del biogás, se procede a determinar las dimensiones del digestor. Considerando un radio de 25 m, se tiene que, para un volumen de 18000 m³ la altura debe ser de 9,17 m.

Debido a que la temperatura media anual es de 10,31°C y la media de las mínimas de los meses de diciembre, enero y febrero es de -1,38°C, es necesaria la instalación de un sistema de calefacción para mantener la temperatura del proceso en 31°C. El calor necesario para este sistema provendrá de la refrigeración del motor de la unidad de cogeneración.

El sistema de calefacción estará formado por una red de tuberías de polietileno reticulado por las que circulará agua caliente, situando la primera a una altura de 50 cm del fondo del digestor y las demás a 50 cm de ésta, con una separación de la pared exterior de 5-10 cm. La red de calefacción debe cubrir al menos un tercio de la altura del digestor.

4.4. Diseño y dimensionamiento de la planta de aprovechamiento del biogás

El biogás producido en el digestor se almacenará en el mismo gracias a la cúpula formada por una membrana plástica y reforzada en su exterior por una red que impida su rotura. El gas se conducirá mediante una red de tuberías de acero debidamente aisladas hasta la válvula de seguridad. La válvula de seguridad es un dispositivo que permite que, en caso de que no se consuma el gas contenido en el reactor, este tenga una vía de salida segura. La salida se realizará mediante un quemador.

La línea principal de gas continuará hasta el filtro. Se trata de un sistema que eliminará, por etapas, la humedad y el sulfuro de hidrógeno.

El gas generado se encuentra completamente saturado de agua, debido a las condiciones de humedad en el interior del digestor. Para optimizar el transporte de gas y la producción de energía a partir del mismo, es necesario eliminar esta agua. Esto se realiza mediante un sistema de condensación.

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico, formado a partir de la fermentación de los residuos animales. Reacciona con el vapor de agua que contiene el biogás para formar ácido sulfúrico, un ácido fuerte que corroe el metal de las tuberías y los motores. Para prevenir estos daños, es necesario eliminarlo. En la actualidad se realiza mediante filtros estandarizados que precipitan el sulfuro de hidrógeno y lo separan del gas.

Se instalará un tanque de almacenamiento de biogás, a mayores del propio reactor. Será de tipo "baja presión", y consistirá en un globo de material plástico flexible, que se hinchará con el propio gas.

El gas producido en la instalación se consumirá en una unidad de cogeneración, produciendo electricidad que se inyectará en la red general. El sistema de refrigeración del motor proporcionará, mediante un intercambiador, el calor necesario para mantener la temperatura interna del reactor.

Dimensionamiento de la unidad de cogeneración

Para dimensionar la unidad de cogeneración que se va a instalar, es necesario caracterizar energéticamente el biogás producido en la instalación.

El volumen de biogás producido es de 6305,7 m³/día. Se supone que el digestor funciona los 365 días del año.

La demanda térmica será la necesaria para alimentar el sistema de calefacción del digestor. Para dimensionar la unidad de cogeneración, se va a realizar el balance energético del digestor, con el fin de obtener las necesidades térmicas de la calefacción.

En primer lugar, se calculan las pérdidas por transferencia de calor, mediante la siguiente fórmula:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_{interior} - T_{ambiente})$$

Donde:

Q: pérdidas por calor [W/día].

U : coeficiente global de transferencia de calor [$W/m^2 \cdot K$].

A : área de contacto [m^2].

$T_{interior}$: temperatura interior [K].

$T_{ambiente}$: temperatura exterior [K].

El coeficiente global de transferencia de calor para el caso del contacto hormigón-aire se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$U_{hormigón-aire} = \frac{1}{\frac{1}{h_{interior}} + \frac{E}{K_{hormigón armado}} + \frac{1}{h_{exterior}}}$$

Donde:

$U_{hormigón-aire}$: coeficiente global de transferencia de calor [$W/m^2 \cdot K$].

$h_{interior}$: coeficiente de convección interior [$W/m^2 \cdot K$].

$h_{exterior}$: coeficiente de convección exterior [$W/m^2 \cdot K$].

$K_{hormigón armado}$: conductividad del hormigón armado [$W/m \cdot K$].

E : espesor de la pared [m].

Los valores de cálculo son los siguientes [23] [24] [25]:

$T_{interior}$: 31°C

$T_{ambiente}$: 10,31°C

$h_{interior}$: 45 $W/m^2 \cdot K$

$h_{exterior}$: 1,37 $W/m^2 \cdot K$

$K_{hormigón armado}$: 2,4 $W/m \cdot K$

$U_{hormigón-suelo}$: 1,3956 $W/m^2 \cdot K$

$A_{hormigón-aire}$: se toma una altura libre del digestor de 6 m sobre el suelo.

$$A_{hormigón-aire} = 2 \cdot \pi \cdot 25 m \cdot 6 m = 942,48 m^2$$

$A_{hormigón-suelo}$: se toma una altura enterrada del digestor de 3,17 m.

$$A_{hormigón-suelo} = \pi \cdot (25 m)^2 + 2 \cdot \pi \cdot 25 m \cdot 3,17 m = 2461,44 m^2$$

E : el grosor de la pared será de 0,3 m

A continuación, se calcula el coeficiente de transferencia global hormigón-aire:

$$U_{\text{hormigón-aire}} = \frac{1}{\frac{1}{45} + \frac{0,3}{2,4} + \frac{1}{1,37}} = 1,14 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Por último, se calculan las pérdidas por transferencia de calor al ambiente y al suelo:

$$Q_{\text{ambiente}} = U_{\text{hormigón-aire}} \cdot A_{\text{hormigón-aire}} \cdot (T_{\text{interior}} - T_{\text{ambiente}}) \\ = 1,14 \cdot 942,48 \cdot (31 - 10,31) = 22229,90 \text{ W/día}$$

$$Q_{\text{suelo}} = U_{\text{hormigón-suelo}} \cdot A_{\text{hormigón-suelo}} \cdot (T_{\text{interior}} - T_{\text{ambiente}}) \\ = 1,3956 \cdot 2461,44 \cdot (31 - 10,31) = 71074,00 \text{ W/día}$$

Las pérdidas de calor totales serán la suma de pérdidas por transferencia de calor al ambiente y al suelo, es decir, 93303,90 W/día.

En segundo lugar, se determina el calor requerido para el sistema de calefacción, mediante la siguiente fórmula:

$$Q = MPC \cdot C_p \text{ estiércol} \cdot (T_{\text{proceso}} - T_{\text{estiércol inicial}})$$

Donde:

Q: necesidad de calor [J/día].

MPC: 292200 kg/día

$C_p \text{ estiércol}$: 4186,8 J/kg·K

T_{proceso} : 31°C

$T_{\text{estiércol inicial}}$: 10,31°C

Sustituyendo los valores, se tienen unas necesidades de calor de $2,53 \cdot 10^{10}$ J/día, es decir, 25300 MJ/día o 2185920 W/día.

La demanda térmica del sistema de calefacción es la suma de las pérdidas de calor totales (93303,30 W/día) y del calor necesario para mantener la temperatura (2185920,00 W/día), es decir, un total de 2279223,30 W/día o 2279,22 kW/día.

Los cálculos anteriores se realizan también considerando como T_{ambiente} y $T_{\text{estiércol inicial}}$ la temperatura media de las mínimas de los meses de invierno, es decir, -1,38°C.

$$Q_{\text{ambiente}} = U_{\text{hormigón-aire}} \cdot A_{\text{hormigón-aire}} \cdot (T_{\text{interior}} - T_{\text{ambiente}}) \\ = 1,14 \cdot 942,48 \cdot (31 - (-1,38)) = 34789,96 \text{ W/día}$$

$$Q_{\text{suelo}} = U_{\text{hormigón-suelo}} \cdot A_{\text{hormigón-suelo}} \cdot (T_{\text{interior}} - T_{\text{ambiente}}) \\ = 1,3956 \cdot 2461,44 \cdot (31 - (-1,38)) = 111231,31 \text{ W/día}$$

$$Q = MPC \cdot C_p \text{ estiércol} \cdot (T_{\text{proceso}} - T_{\text{estiércol inicial}}) = 292200 \cdot 4186,8 \cdot (31 - (-1,38)) \\ = 3,96 \cdot 10^{10} \text{ J/día}$$

Las pérdidas de calor totales serán la suma de pérdidas por transferencia de calor al ambiente y al suelo, es decir, 146021,27 W/día. Las necesidades de calor son de $3,96 \cdot 10^{10}$ J/día, es decir, 39600 MJ/día o 3421440 W/día.

La demanda térmica para los meses de invierno es la suma de las pérdidas de calor totales y de las necesidades de calor, 3567461,27 W/día, 3567,46 kW/día o 148,64 kWh. Este será el valor de cálculo para la elección del sistema de cogeneración.

El poder calorífico inferior (PCI) del biogás, considerando un contenido en metano (CH₄) del 65%, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$PCI_{biogás} = 9,94 \text{ kWh/m}^3 \cdot \%CH_4 = 9,94 \cdot 65\% = 6,46 \text{ kWh/m}^3$$

La potencia generada disponible es la siguiente:

$$Potencia\ generada = 6305,70 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 6,46 \text{ kWh/m}^3 \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 1697,54 \text{ kWh}$$

Los requisitos que debe cumplir el equipo de cogeneración se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Resumen de los requisitos del sistema de cogeneración

Caudal de biogás	6305,70 m ³ /día
Potencia térmica generada	1697,54 kWh
Calor producido	679,02 kWh
Calor necesario digestor	148,64 kWh

La electricidad generada es la diferencia de la potencia térmica generada menos el calor producido, asumiendo una eficiencia del generador del 60%, que es igual a 929,34 kWh.

Se comprueba que el calor producido supera las necesidades de la planta.

4.5. Diseño y dimensionamiento de la planta de aprovechamiento del digestato

El digestato producido en el reactor se extraerá del mismo mediante un sistema de sinfines desde su parte inferior. En primer lugar, se realizará una separación de las fases sólida y líquida mediante un sistema de prensa tornillo. La fase sólida se conducirá a una serie de trojes de hormigón para su expedición como fertilizante, mientras que la fase líquida se recirculará al interior del digestor para mejorar su eficiencia.

Dimensionamiento del almacenamiento del digestato

Para determinar las necesidades de almacenamiento del digestato, es necesario conocer la producción diaria del mismo. Para ello, se va a realizar el balance de masa global del proceso.

La Materia Prima para Carga es de 292,2 t/día. La producción de biogás es de 6305,7 m³/día. Considerando una densidad del biogás de 1,2 kg/m³, se tiene una masa diaria de biogás de 7566,8 kg/día o 7,57 t/día. La producción de digestato será la diferencia entre la Materia Prima para Carga y la producción de biogás, es decir, 284,63 t/día. Por tanto, la instalación para el almacenamiento del digestato debe tener capacidad para, al menos, albergar 284,63 t.

La zona de almacenamiento debe tener capacidad para albergar la producción de digestato de tres días más un margen de seguridad del 20%. Por tanto, se requiere espacio para 1024,67 t. Considerando una densidad del digestato de 0,7 t/m³, el volumen necesario es de 1463,8 m³.

Se construirán tres trojes de 6 m de ancho, 22 m de largo y 4 m de altura en bloques de hormigón prefabricado tipo “LEGO” autoensamblables, debido a su facilidad de instalación, economía y flexibilidad de ampliación. El digestato se depositará en ellos mediante pala cargadora desde la salida de la prensa tornillo.

CAPÍTULO 5. ESTUDIO ECONÓMICO

5.1. Introducción

El objetivo del presente capítulo es determinar la viabilidad económica de la inversión. Los parámetros que definen una inversión son los siguientes:

- Pago de la inversión (K). Es el número de unidades monetarias que el inversor debe desembolsar para conseguir que el proyecto empiece a funcionar como tal.
- Vida útil de proyecto (n). Es el número de años estimados durante los cuales la inversión genera rendimientos.
- Flujo de caja (R_i). Resultados de efectuar la diferencia entre cobros y pagos, ya sean estos ordinarios o extraordinarios, en cada uno de los años de la vida del proyecto.

5.2. Criterios de rentabilidad

Los parámetros anteriores se aplican a los siguientes métodos de evaluación:

- **Valor actual neto (VAN).** Indica la ganancia o la rentabilidad neta generada por el proyecto. Se puede describir como la diferencia entre lo que el inversor da a la inversión (K) y lo que la inversión devuelve al inversor (R_i). Cuando un proyecto tiene un VAN mayor que cero, se dice que para la tasa de actualización elegida resulta viable desde el punto de vista financiero. Se calcula mediante la expresión:

$$VAN = -K + R_i \cdot x \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$$

- **Relación beneficio/inversión (Q).** Mide el cociente entre el VAN y la cifra de inversión (K). Indica la ganancia neta generada por el proyecto por cada unidad monetaria invertida. A mayor Q más interesa la inversión.

$$Q = VAN/K$$

- **Tasa interna de rentabilidad (TIR).** Tasa de actualización que haría que el VAN fuera nulo. Para que la inversión sea rentable, este valor debe de ser mayor al tipo de interés vigente en el mercado, entendiéndose este como la tasa de capitalización del dinero con menor riesgo.

5.3. Estimación de la inversión

La estimación de la inversión necesaria para ejecutar las instalaciones del proyecto de la planta de biogás (biodigestor, tanque de alimentación, unidad de cogeneración, sistema de recuperación de calor, instalación eléctrica, antorcha de emergencia, bombas, tuberías, valvulería, etc.) se realiza en base a la siguiente fórmula, que relaciona la inversión, en €/kWh, con la potencia eléctrica instalada [26]:

$$Inversión \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] = 16272 \cdot Potencia \left[\text{kWh} \right]^{-0,2114}$$

La instalación tendrá una capacidad de generación eléctrica de 929,34 kWh, por lo que la inversión necesaria para ejecutar las instalaciones será de 3836,80 €/kWh, es decir, 3.565.688,90 € en total.

Al importe anterior es necesario sumar el coste de la obra civil, que se cifra en un 15% del coste de las instalaciones, es decir, 534.853,34 €.

Se asume que la parcela donde se ubique la instalación es propiedad del promotor.

La inversión total es la suma del coste de la obra civil y de los equipos, es decir, 4.100.542,24 €

5.4. Financiación del proyecto

La financiación del proyecto se realizará mediante dos vías. Por una parte, se solicitará la subvención del Programa de ayudas para actuaciones de eficiencia energética en PYME y gran empresa del sector industrial, tal y como se detalla en el apartado 2.2. Subvenciones, con una cuantía máxima de 1.000.000 €. Por otra parte, se solicitará un préstamo bancario por un importe total de 1.200.000,00 €, con un TAE del 1,5%, un año de carencia y una duración de 15 años. A continuación, se muestra el cuadro de amortización del préstamo.

Tabla 17. Cuadro de amortización del préstamo bancario, en Euros

Año	Cuota anual	Intereses	Cuota amortización	Capital vivo	Capital amortizado
0				1.200.000,00	
1	18.000,00	18.000,00	0,00	1.200.000,00	0,00
2	95.667,98	18.000,00	77.667,98	1.122.332,02	77.667,98
3	95.667,98	16.834,98	78.833,00	1.043.499,02	156.500,98
4	95.667,98	15.652,49	80.015,50	963.483,52	236.516,48
5	95.667,98	14.452,25	81.215,73	882.267,79	317.732,21
6	95.667,98	13.234,02	82.433,97	799.833,82	400.166,18
7	95.667,98	11.997,51	83.670,47	716.163,35	483.836,65
8	95.667,98	10.742,45	84.925,53	631.237,82	568.762,18
9	95.667,98	9.468,57	86.199,42	545.038,40	654.961,60
10	95.667,98	8.175,58	87.492,41	457.545,99	742.454,01
11	95.667,98	6.863,19	88.804,79	368.741,20	831.258,80
12	95.667,98	5.531,12	90.136,86	278.604,34	921.395,66
13	95.667,98	4.179,07	91.488,92	187.115,42	1.012.884,58
14	95.667,98	2.806,73	92.861,25	94.254,17	1.105.745,83
15	95.667,98	1.413,81	94.254,17	0,00	1.200.000,00

5.5. Estructura de los flujos de caja

5.5.1. Cobros

El principal ingreso que tendrá la actividad normal de la instalación será la venta de electricidad. En el Gráfico 4 se muestra la evolución del precio medio mensual del mercado eléctrico entre marzo del 2019 y marzo del 2020 [27].

El precio percibido por la venta de energía eléctrica se considera como el precio medio entre marzo de 2019 y marzo de 2020, es decir, 42,7 €/MWh o 0,0427 €/kWh. Se supone que la planta está operativa los 365 días del año.

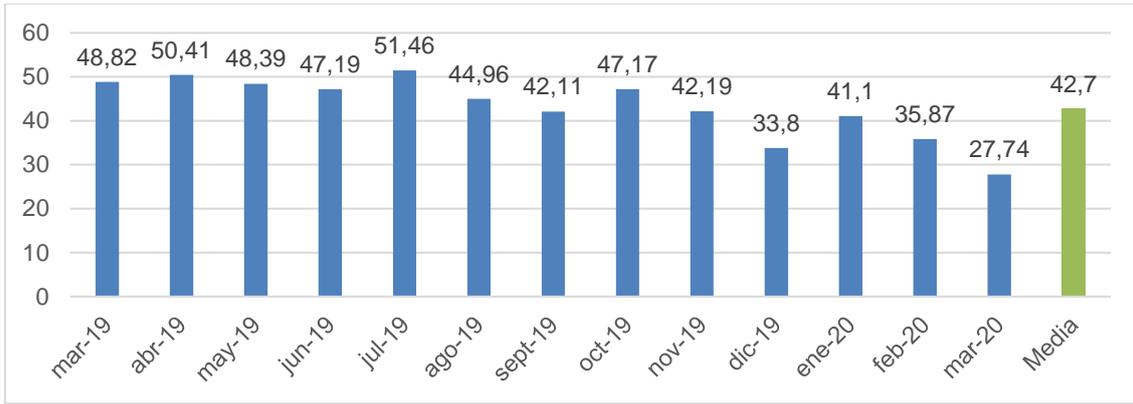


Gráfico 7. Evolución del precio medio mensual del mercado eléctrico (pool) de España por meses en €/MWh [27]

El digestato producido en la instalación tendrá dos destinos: una parte será consumida por los ganaderos que entregan sus residuos, y otra parte será comercializada a industrias productoras de fertilizantes organominerales. Los ganaderos tendrán un cupo anual asignado de consumo de digestato del 30% de las entregas de estiércol. En consecuencia, y considerando una producción del digestato de 284,63 t/día, que corresponde con 103.889,95 t/año, el cupo asignado a los ganaderos será de 31.166,99 t/año y el destinado para la venta de 72.722,96 t/año. El precio de venta del digestato será de 6,00 €/t.

En la Tabla 18 se presenta el resumen de los ingresos anuales.

Tabla 18. Resumen de los ingresos anuales

Concepto	Base	Precio unitario	Ingreso anual
Venta electricidad	929,34 kWh	0,0427 €/kWh	345.751,23 €
Venta digestato	72.722,96 t	6,00 €/t	436.337,76 €
Total anual			782.088,99 €

5.5.2. Pagos

La estimación de los costes de funcionamiento se va a realizar siguiendo las premisas planteadas por Flotats y Sarquella [26]. Se considera un coste de 0,01 €/kWh en concepto de funcionamiento del motor de cogeneración. Para las reparaciones, mantenimiento general de la instalación y seguros, se considera un 1,5% anual de la inversión. En cuanto a gastos de personal, se considera una dedicación base del 25% del tiempo de una persona, más un incremento lineal del equivalente de una persona a tiempo completo por cada 200 kWh de potencia de la instalación, con un coste de 45.000 €/persona·año. Se considera que el transporte de la materia prima corre a cargo del ganadero.

Así mismo, se considerarán unos gastos extraordinarios los años 5, 10, 15 y 20 del 3% de la inversión inicial, en concepto de renovación de equipos. El coste será, por tanto, de 123.016,27 € en cada uno de dichos años.

A continuación, en la Tabla 19, se muestra el resumen de los pagos anuales.

Tabla 19. Resumen de los pagos anuales

Concepto	Base	Coste unitario	Coste anual
Operación del motor de cogeneración	929,34 kWh	0,01 €/kWh	81.410,18 €
Reparaciones, mantenimiento general y seguros	3.565.688,90 €	1,5%	53.485,33 €
Gastos de personal	25% + 4	45.000 €/persona	191.250,00 €
Total anual			326.145,51 €

5.5.3. Flujos de caja

En la Tabla 20, que se muestra a continuación, se presenta la estructura de los flujos de caja para los primeros 15 años de vida de la instalación. Se ha elaborado atendiendo a las siguientes premisas:

- El capítulo “Importe neto de la cifra de negocios” se corresponde con los ingresos de explotación anuales.
- En el capítulo “Otros gastos de explotación” se consideran los pagos anuales que no son gastos de personal, que se imputan en su respectivo capítulo.
- La amortización del inmovilizado se considera constante para el período de 15 años.
- La subvención percibida se imputa en el primer año.
- Las anualidades del préstamo se imputan en el capítulo “Devolución de préstamos”, de forma coincidente con el cuadro de amortización presentado en la Tabla 17.
- Se considera que la inversión se amortiza de forma constante en 25 años.

Tabla 20. Flujos de caja para los primeros 15 años, en Euros

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
INGRESOS					
<i>Venta de electricidad</i>	345751,23	345751,23	345751,23	345751,23	345751,23
<i>Venta del digestato</i>	436337,76	436337,76	436337,76	436337,76	436337,76
TOTAL INGRESOS	782088,99	782088,99	782088,99	782088,99	782088,99
GASTOS					
<i>Operación del motor de cogeneración</i>	81410,18	81410,18	81410,18	81410,18	81410,18
<i>Reparaciones, mantenimiento general y seguros</i>	53485,33	53485,33	53485,33	53485,33	53485,33
<i>Gastos de personal</i>	191250,00	191250,00	191250,00	191250,00	191250,00
TOTAL GASTOS	326145,51	326145,51	326145,51	326145,51	326145,51
<i>Gastos extraordinarios</i>					123016,27
<i>Devolución de préstamos</i>	18000,00	95667,98	95667,98	95667,98	95667,98
<i>Amortizaciones</i>	164021,69	164021,69	164021,69	164021,69	164021,69
FLUJO DE CAJA	273921,79	196253,81	196253,81	196253,81	73237,54

Tabla 20 (cont.). Flujos de caja para los primeros 15 años, en Euros

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS					
<i>Venta de electricidad</i>	345751,23	345751,23	345751,23	345751,23	345751,23
<i>Venta del digestato</i>	436337,76	436337,76	436337,76	436337,76	436337,76
TOTAL INGRESOS	782088,99	782088,99	782088,99	782088,99	782088,99
GASTOS					
<i>Operación del motor de cogeneración</i>	81410,18	81410,18	81410,18	81410,18	81410,18
<i>Reparaciones, mantenimiento general y seguros</i>	53485,33	53485,33	53485,33	53485,33	53485,33
<i>Gastos de personal</i>	191250,00	191250,00	191250,00	191250,00	191250,00
TOTAL GASTOS	326145,51	326145,51	326145,51	326145,51	326145,51
<i>Gastos extraordinarios</i>					123016,27
<i>Devolución de préstamos</i>	95667,98	95667,98	95667,98	95667,98	95667,98
<i>Amortizaciones</i>	164021,69	164021,69	164021,69	164021,69	164021,69
FLUJO DE CAJA	196253,81	196253,81	196253,81	196253,81	73237,54
	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
INGRESOS					
<i>Venta de electricidad</i>	345751,23	345751,23	345751,23	345751,23	345751,23
<i>Venta del digestato</i>	436337,76	436337,76	436337,76	436337,76	436337,76
TOTAL INGRESOS	782088,99	782088,99	782088,99	782088,99	782088,99
GASTOS					
<i>Operación del motor de cogeneración</i>	81410,18	81410,18	81410,18	81410,18	81410,18
<i>Reparaciones, mantenimiento general y seguros</i>	53485,33	53485,33	53485,33	53485,33	53485,33
<i>Gastos de personal</i>	191250,00	191250,00	191250,00	191250,00	191250,00
TOTAL GASTOS	326145,51	326145,51	326145,51	326145,51	326145,51
<i>Gastos extraordinarios</i>					123016,27
<i>Devolución de préstamos</i>	95667,98	95667,98	95667,98	95667,98	95667,98
<i>Amortizaciones</i>	164021,69	164021,69	164021,69	164021,69	164021,69
FLUJO DE CAJA	196253,81	196253,81	196253,81	196253,81	73237,54

5.6. Rentabilidad y análisis de sensibilidad

Para determinar la rentabilidad de la inversión se van a calcular el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Rendimiento (TIR) y la Relación Beneficio/Inversión (Q). Previo a su cálculo, es necesario fijar ciertos parámetros: la tasa de inflación y la serie de tasas de actualización.

La tasa de inflación se calcula a partir de la serie histórica del IPC. EN la Tabla 21 se muestra la variación del IPC en España entre los años 2010 y 2019 [28].

Tabla 21. Serie histórica del IPC en España (2010-2019)

Año	IPC Anual	Año	IPC Anual
2010	3,0	2015	0,0
2011	2,4	2016	1,6
2012	2,9	2017	1,1
2013	0,3	2018	1,2
2014	-1,0	2019	0,8
Media		1,2	

Se considerará una serie de 30 tasas de actualización, con una tasa mínima de 1 y saltos incrementales de 0,5.

En la Tabla 22 se presentan los flujos de caja actualizados, que se tomarán como dato de partida para los cálculos. La actualización se ha realizado en base al IPC medio de la Tabla 21.

Tabla 22. Flujos de caja actualizados, en Euros

Año	Inversión	Cobros	Pagos	Pagos extraordinarios	Préstamo	Flujo de caja	Flujo actualizado
0	4100542,24	2200000,00	0,00	0,00	0,00	-1900542,24	-1900542,24
1	0,00	782088,99	326145,51	0,00	18000,00	437943,48	432622,23
2	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
3	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
4	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
5	0,00	782088,99	326145,51	123016,27	95667,98	237259,23	234376,40
6	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
7	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
8	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
9	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
10	0,00	782088,99	326145,51	123016,27	95667,98	237259,23	234376,40
11	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
12	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
13	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
14	0,00	782088,99	326145,51	0,00	95667,98	360275,50	355897,96
15	0,00	782088,99	326145,51	123016,27	95667,98	237259,23	234376,40
16	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
17	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
18	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
19	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
20	0,00	782088,99	326145,51	123016,27	0,00	332927,21	328881,96
21	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
22	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
23	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
24	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52
25	0,00	782088,99	326145,51	0,00	0,00	455943,48	450403,52

A continuación, en la Tabla 23, se muestra el resultado del VAN y la Relación Beneficio/Inversión (Q).

Tabla 23. Indicadores de rentabilidad

Tasa de actualización	VAN	Q	Tasa de actualización	VAN	Q
1,00	6291588,39	1,53	8,50	1659732,57	0,40
1,50	5754959,66	1,40	9,00	1510856,27	0,37
2,00	5266623,12	1,28	9,50	1372851,85	0,33
2,50	4821656,85	1,18	10,00	1244781,08	0,30
3,00	4415685,86	1,08	10,50	1125796,90	0,27
3,50	4044817,17	0,99	11,00	1015133,79	0,25
4,00	3705583,14	0,90	11,50	912099,20	0,22
4,50	3394891,74	0,83	12,00	816065,96	0,20
5,00	3109982,98	0,76	12,50	726465,53	0,18
5,50	2848390,69	0,69	13,00	642782,00	0,16
6,00	2607908,96	0,64	13,50	564546,74	0,14
6,50	2386562,62	0,58	14,00	491333,66	0,12
7,00	2182581,25	0,53	14,50	422754,91	0,10
7,50	1994376,32	0,49	15,00	358457,14	0,09
8,00	1820521,05	0,44	15,50	298118,11	0,07

La Tasa Interna de Rendimiento (TIR) es del 18,55%.

En el análisis de sensibilidad se considera la variación de la productividad y la variación de los costes representativos, de la siguiente forma:

- La variación sobre las cantidades estimadas inicialmente del pago de la inversión será de $\pm 3\%$.
- La variación sobre las cantidades estimadas inicialmente de los flujos de caja será de $\pm 5\%$.
- La duración mínima del proyecto será de 20 años.

En el Gráfico 5 se muestran las 8 combinaciones posibles considerando financiación propia, indicando su VAN y su TIR. Se ha considerado una tasa de actualización igual al IPC medio (1,2%).

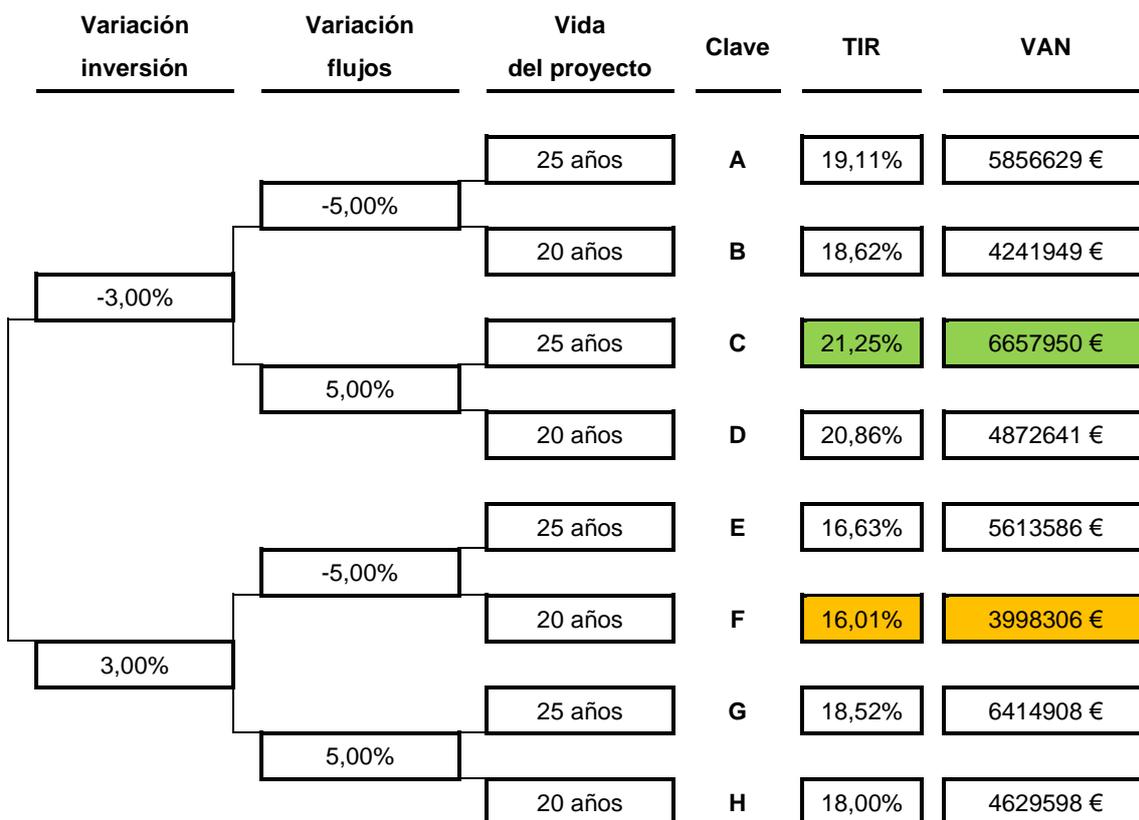


Gráfico 8. Resultados del análisis de sensibilidad

La situación más favorable es la C, con una TIR del 21,25% y un VAN de 6657950 €. Por su parte, la situación más desfavorable es la F, con una TIR del 16,01% y un VAN de 3998306 €.

5.7. Conclusiones del estudio económico

El VAN y la TIR son bastante elevados en todos los escenarios planteados. La TIR, en ambos casos, es considerablemente superior a la tasa de actualización considerada. Por tanto, se cumplen las condiciones necesarias de viabilidad económica del proyecto.

Observando los resultados del análisis de sensibilidad se puede comprobar que el proyecto es viable incluso en la situación más desfavorable (aumento de los gastos un 3%, disminución de los ingresos un 5% y vida útil de 20 años).

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

La comarca de la vega de Carrión de los Condes y Saldaña, en la provincia de Palencia, es una zona con una marcada tradición ganadera. En la actualidad, se trata de una de las principales zonas de Castilla y León en cuanto a producción de leche de vaca. La vega que forma el río Carrión entre estos dos municipios palentinos proporciona numerosas tierras de cultivo de regadío, de un elevado valor agronómico. Sin embargo, debido a las características geomorfológicas de la zona, se trata de una vega estrecha en comparación con otras cercanas como la de los ríos Pisuerga o Esla. Por tanto, la relación entre las cabezas de ganado y la superficie disponible para el esparcimiento de los residuos generados por la ganadería es limitada. La gestión de estos residuos ganaderos supone, cada día con mayor intensidad, un problema para la zona.

Con el fin de dar solución a este problema se plantea la creación de un centro comarcal de gestión de residuos ganaderos. En línea con los principios de la Economía Circular, es decir, buscando que el valor de los productos, materiales y recursos se mantenga durante el mayor tiempo posible y minimizando la generación de residuos no aprovechables, se estudia la posibilidad de realizar un tratamiento de digestión anaerobia a los estiércoles vacunos, obteniendo biogás que puede ser empleado para generar electricidad y calor, y un digestato de alto valor biológico que puede tener como destino la industria de fabricación de fertilizantes organominerales y las propias tierras de cultivo de la zona.

La elección de la tecnología de biometanización, del aprovechamiento del biogás y del digestato se ha llevado a cabo mediante un Estudio de Alternativas. La conclusión de este estudio es la instalación de un digestor continuo vertical, el aprovechamiento del biogás mediante un sistema de cogeneración y el tratamiento parcial del digestato.

Se construirá un digestor de 25 m de radio y una altura de 9,17 m. El equipo de cogeneración tendrá capacidad para procesar 6305,70 m³/día de biogás, produciendo 1697,54 kWh de potencia térmica, correspondiendo a 148,64 kWh de calor destinado al sistema de calefacción del digestor y 929,34 kWh de electricidad producida. Así mismo, se construirán tres trojes de 6 m de ancho, 22 m de largo y 4 m de altura en bloques de hormigón prefabricado para albergar el digestato.

Por último, se ha elaborado un Estudio Económico para valorar la viabilidad de la inversión. Se ha planteado un escenario en el que se obtiene una subvención de 1.000.000 € a fondo perdido, y se solicita un préstamo bancario de 1.200.000,00 €, con un TAE del 1,5%, un año de carencia y una duración de 15 años. Tras analizar la rentabilidad y realizar un análisis de sensibilidad de la inversión, se concluye que se trata de un proyecto viable en el plano económico.

La creación de un centro de gestión de residuos ganaderos a nivel comarcal en la vega de Carrión y Saldaña es una opción viable para solventar los problemas técnicos y medioambientales que se dan en la zona.

BIBLIOGRAFÍA

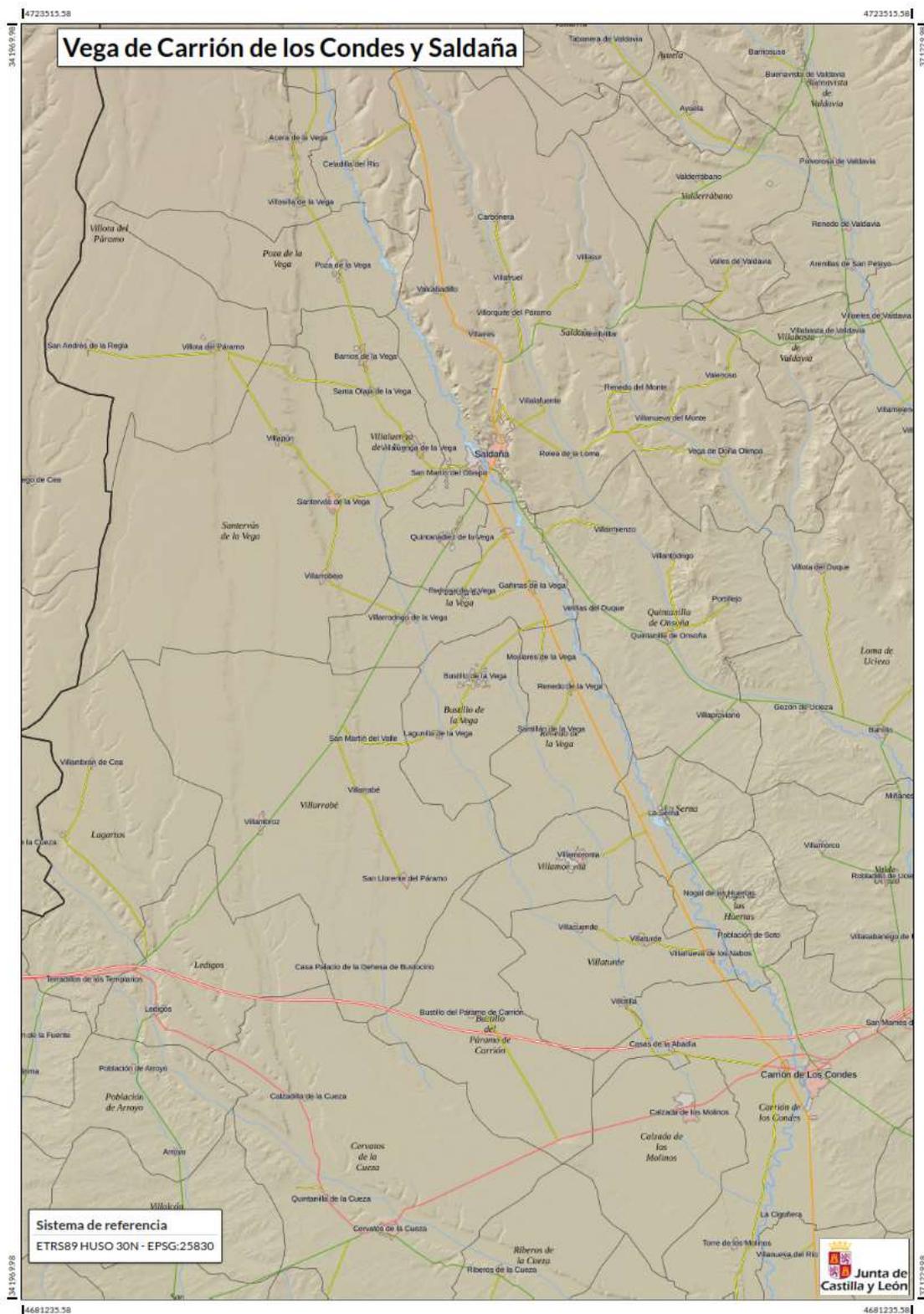
- [1] Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, «Encuestas Ganaderas, análisis del número de animales por tipos.» 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/ganaderia/encuestas-ganaderas/>. [Último acceso: 7 Abril 2020].
- [2] F. Mazzucchelli y A. Sánchez, «Impacto ambiental de las explotaciones de vacuno lechero» *Bovis*, nº 89, pp. 15-25, 1999.
- [3] Parlamento Europeo, «Economía circular: definición, importancia y beneficios» 10 4 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>. [Último acceso: 9 4 2020].
- [4] E. Cerdá y A. Khalilova, «Economía circular» *Empresa, medio ambiente y competición*, nº 401, pp. 11-20, 2016.
- [5] European Environment Agency, «Circular economy in Europe. Developing the knowledge base» Publications Office of the European Union, Luxemburgo, 2016.
- [6] Comisión Europea, «Documento de reflexión para una Europa sostenible de aquí a 2030» 30 Enero 2019. [En línea]. Disponible: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/rp_sustainable_europe_es_v2_web.pdf. [Último acceso: 11 Abril 2020].
- [7] Parlamento Europeo, «El segundo pilar de la PAC: la política de desarrollo rural» Febrero 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/110/el-segundo-pilar-de-la-pac-la-politica-de-desarrollo-rural>. [Último acceso: 11 Abril 2020].
- [8] Oncediez Central de Diseño, S.L., «Economía Circular - metasystemdesign» Metasystem Design, 15 Diciembre 2017. [En línea]. Disponible: <https://metasystemdesign.com/economia-circular/>. [Último acceso: 12 Septiembre 2020].
- [9] Junta de Castilla y León, «Explotaciones ganaderas de bovino 2018» 4 Octubre 2018. [En línea]. Disponible: https://datosabiertos.jcyl.es/web/jcyl/set/es/medio-rural-pesca/ganaderia_bovino_2018/1284827635377. [Último acceso: 7 Abril 2020].
- [10] Junta de Castilla y León, «Explotaciones ganaderas de bovino 2019» 19 Noviembre 2019. [En línea]. Disponible: https://datosabiertos.jcyl.es/web/jcyl/set/es/medio-rural-pesca/ganaderia_bovino_2018/1284827635377. [Último acceso: 7 Abril 2020].
- [11] T. D. Nennich, J. H. Harrison, L. M. VanWieringen, D. Meyer, A. J. Heinrichs, W. P. Weiss, N. R. St-Pierre, R. L. Kincaid, D. L. Davidson y E. Block, «Prediction of Manure and Nutrient Excretion from Dairy Cattle» *Journal of Dairy Science*, nº 88, pp. 3721-3733, 2005.
- [12] ITACYL-AEMET, «Atlas agroclimático de Castilla y León» 2013. [En línea]. Disponible: <http://atlas.itacyl.es/>. [Último acceso: 7 Abril 2020].
- [13] X. Flotats Ripoll, E. Campos Pozuelo, J. Palatsi Civit, J. Illa Alibes, F. Sole Mauri y A. Magri Aloy, «Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas» Lleida, 2004.
- [14] Ecorega - UPA, «Sistemas de gestión de los residuos orgánicos en las explotaciones ganaderas» 2008. [En línea]. Disponible: <https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=hom>

- e.showFile&rep=file&fil=ECOREGA_Organic_Waste_Management_Guide.pdf. [Último acceso: 24 Abril 2020].
- [15] M. P. Bernal, J. A. Albuerquerque y R. Moral, «Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review» *Bioresource Technology*, nº 100, p. 5444–5453, 2009.
- [16] T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk y R. Janssen, *Biogas Handbook*, Esbjerg (Denmark): University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- [17] D. Preissler, A. Lemmer y H. Oechsner, «Anaerobic digestion of energy crops without manure addition» de *35th International Symposium on Agricultural Engineering*, Opatija (Croacia), 2007.
- [18] Agencia Andaluza de la Energía, «Estudio Básico del Biogás» Junta de Andalucía, Sevilla, 2011.
- [19] Dirección General de Recursos Agrícola y Ganaderos. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, «El sector del biogás agroindustrial en España» Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, 2010.
- [20] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Evaluación de técnicas de gestión de deyecciones en ganadería. Sectores de bovino, porcino, avicultura de carne y puesta., Madrid: Centro de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015.
- [21] Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, «InfoRiego» [En línea]. Disponible: http://www.inforiego.org/opencms/opencms/info_meteo/construir/index.html. [Último acceso: 1 Agosto 2020].
- [22] Unidad de planeación minero energética, «Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás» Marzo 2003. [En línea]. Disponible: http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/GUIA_PARA_LA_IMPLEMENTACION_DE_SISTEMAS_DE_PRODUCION_DE_BIO.pdf. [Último acceso: 1 Agosto 2020].
- [23] G. Tchobanoglous y F. Burton, *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse*, Metcalf & Eddy, 1991.
- [24] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, «Prontuario de soluciones constructivas - CTE Web» Softeca, S.L., 2007. [En línea]. Disponible: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=7>. [Último acceso: 2020 Agosto 8].
- [25] Goodfellow Cambridge Limited, «Polietileno - Alta Densidad (HDPE) - Información sobre el material» [En línea]. Disponible: <http://www.goodfellow.com/S/Polietileno-Alta-Densidad.html>. [Último acceso: 2020 Agosto 8].
- [26] X. Flotats y L. Sarquella, *Producció de biogàs per codigestió anaeròbia*, Barcelona: Institut Català d'Energia, 2008.
- [27] CREO Energía, «Evolución precios electricidad y gas natural marzo 2020» Abril 2020. [En línea]. Disponible: <https://creoenergia.es/2020/04/evolucion-precios-electricidad-y-gas-marzo-2020/>. [Último acceso: 16 Agosto 2020].
- [28] Instituto Vasco de Estadística, «Índice General de Precios de Consumo (IPC) del Estado» 13 Agosto 2020. [En línea]. Disponible: https://www.eustat.eus/elementos/ele0000400/indice-general-de-precios-de-consumo-ipc-del-estado/tbl0000482_c.html. [Último acceso: 17 Agosto 2020].

ANEXO A. MAPAS DE SITUACIÓN



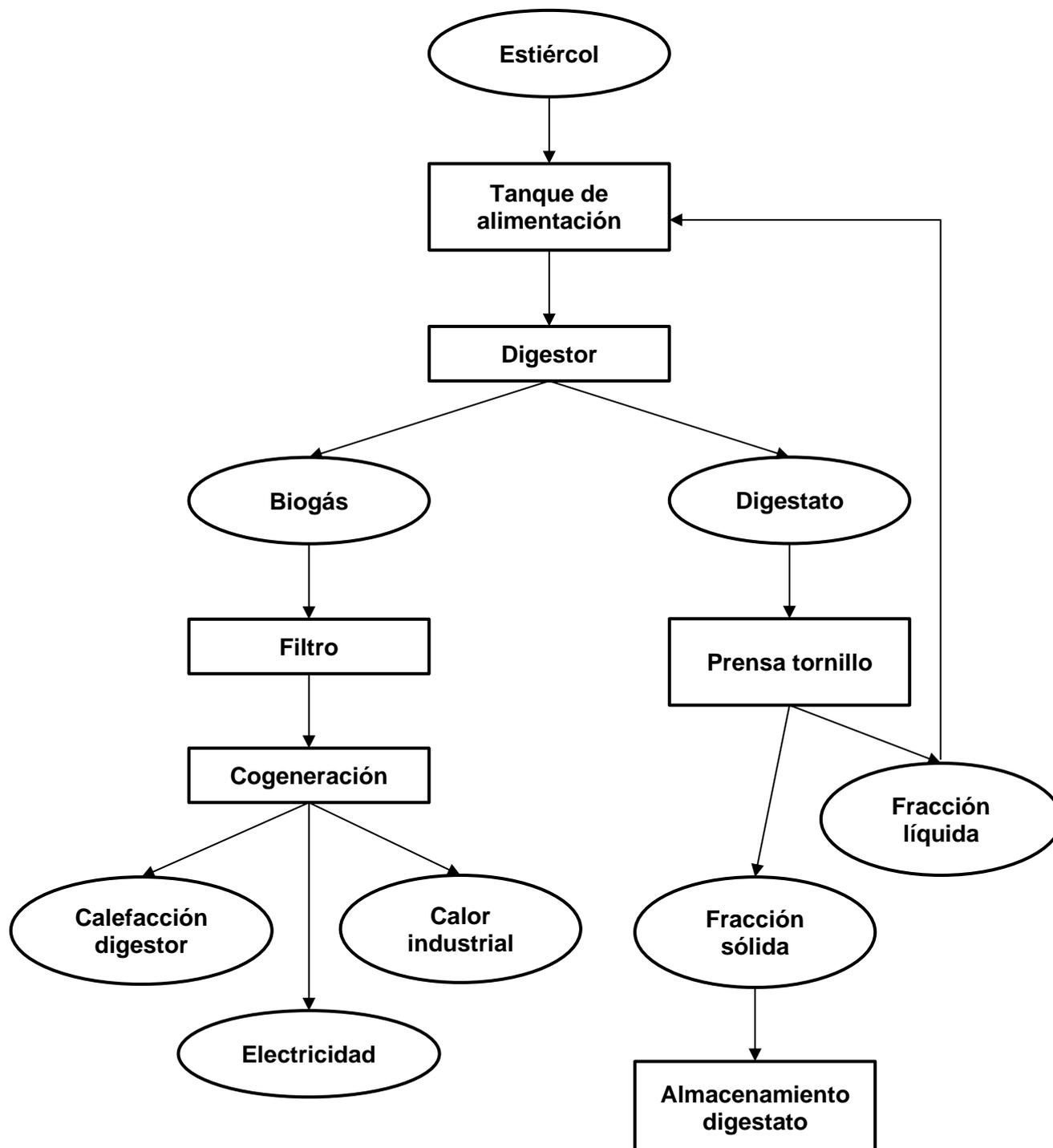
Fuente: Wikipedia e IDECyL



Fuente: IDECyL

ANEXO B. ESQUEMA DEL PROCESO Y DIAGRAMA DE LA INSTALACIÓN

B.1. Esquema del proceso



B.2. Diagrama de la instalación

