



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE
COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA
OBTENER FERTILIZANTES DE USO AGRÍCOLA**

Autor: Marcos Vázquez, Rut

Tutor:

Coca Sanz, Mónica

Cotutor:

Fernández Delgado, Marina

Dpto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente

Valladolid, Abril 2021

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a mis tutoras, Mónica Coca Sanz y Marina Fernández Delgado, la infinita paciencia que han tenido conmigo y el haberme enseñado mucho más de lo que ellas se imaginan.

A mi familia, especialmente a mis padres Jesús y Susana y a mi hermano Samuel, quienes han estado toda la vida apoyándome en todas mis decisiones, celebrando mis victorias y, sobre todo, a mi lado en las derrotas. Gracias a ellos estoy orgullosa de la persona en la que me he convertido.

A mi novio, Álvaro, por ayudarme y aconsejarme durante todo el proceso de mi TFG, pero sobre todo por aguantarme en mis peores momentos y saberme calmarme mejor que nadie.

A todos mis amigos y a todas aquellas personas que, de una forma u otra, han pasado por mi vida y me han aportado algo especial.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

En este TFG se ha diseñado una planta de compostaje de lodos de depuradora para obtener un compost de uso agrícola. La primera parte del trabajo presenta una recopilación bibliográfica sobre el proceso de compostaje, seleccionándose paja de trigo como agente estructurante y pilas aireadas por volteo como el sistema de compostaje más adecuado teniendo en cuenta la ubicación de la planta (Valencia de Don Juan, León). La segunda parte del trabajo presenta el dimensionado de dicha planta, cuya capacidad de tratamiento es de 40,7 m³/día. La parcela elegida tiene una superficie de 18.000 m², donde se sitúan 52 pilas (21 de fermentación y 31 de maduración). Se ha realizado un estudio económico y ambiental que demuestra que la planta es viable económica y ambientalmente, ya que la inversión inicial de 666.231,37 €, se recupera en 5,23 años mediante la venta de 5.609 kg/d de fertilizante a 0,21 €/kg.

Palabras clave: Lodos de depuradora, Compostaje, Paja de trigo, Pilas aireadas, Fertilizante orgánico.

ABSTRACT AND KEY WORDS

In this TFG a sewage sludge composting plant has been designed to obtain a compost for agricultural use. The first part of the work presents a bibliographic compilation on the composting process, selecting wheat straw as a structuring agent and aerated windrows by turning as the most suitable composting system taking into account the location of the plant (Valencia de Don Juan, León). The second part of the work presents the sizing of the plant, whose treatment capacity is 40,7 m³/day. The chosen plot has a surface area of 18.000 m², where 52 piles are located (21 for fermentation and 31 for maturation). An economic and environmental study has been carried out which shows that the plant is economically and environmentally viable, as the initial investment of 666.231,37 € is recovered in 5,23 years through the sale of 5.609 kg/d of fertiliser at 0,21 €/kg.

Key words: Sewage sludge, Composting, Wheat straw, Aerated piles, Organic fertiliser.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN Y PALABRAS CLAVES	5
ABSTRACT AND KEY WORDS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Tratamiento de aguas residuales en EDAR.....	13
1.1.1. Línea de aguas.....	14
1.1.2. Línea de fangos.....	15
1.2. Datos de producción de fangos de depuradora	20
1.3. Composición de fangos de depuradora.....	22
1.4. Gestión y alternativas de valorización de fangos de EDAR.....	23
1.4.1. Valorización agronómica	24
1.4.2. Valorización energética	28
1.5. Proceso de compostaje	30
1.5.1. Parámetros de seguimiento del proceso	31
1.5.2. Parámetros relativos al sustrato.....	35
1.5.3. Sistemas de compostaje	37
1.5.4. Compostaje de lodos de depuradora	40
2. OBJETIVOS	47
3. BASES DE DISEÑO	49
3.1. Ubicación de la planta	49
3.2. Selección de materias primas.....	53
3.3. Capacidad de tratamiento de la planta de compostaje	59
3.4. Selección del sistema de compostaje	60
4. DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE COMPOSTAJE.....	63
4.1. Funcionamiento de la planta	64
4.2. Zona de recepción y mezcla de los materiales.....	65
4.3. Zona de almacenamiento.....	66
4.4. Zona de fermentación	69
4.5. Zona de maduración.....	72
4.6. Recogida y almacenamiento de lixiviados	75
4.7. Vestuarios y aseos	78

4.8.	Oficina.....	78
4.9.	Maquinaria del proceso.....	79
4.10.	Postratamiento.....	81
4.11.	Equipos para el control del proceso	82
4.12.	Construcciones en las distintas zonas de la planta	82
4.13.	Producto final obtenido	83
5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL.....	87
5.1.	Evaluación económica.....	87
5.1.1.	<i>Costes de la planta</i>	<i>87</i>
5.1.2.	<i>Materias primas y productos finales</i>	<i>89</i>
5.1.3.	<i>Estudio de viabilidad.....</i>	<i>91</i>
5.2.	Evaluación ambiental	94
5.2.1.	<i>Ruido.....</i>	<i>94</i>
5.2.2.	<i>Contaminación atmosférica</i>	<i>95</i>
5.2.3.	<i>Suelos</i>	<i>97</i>
5.2.4.	<i>Aguas subterráneas y superficiales.....</i>	<i>98</i>
5.2.5.	<i>Flora (vegetación)</i>	<i>98</i>
5.2.6.	<i>Fauna</i>	<i>99</i>
5.2.7.	<i>Paisaje</i>	<i>100</i>
5.2.8.	<i>Contaminación lumínica.....</i>	<i>100</i>
5.2.9.	<i>Población</i>	<i>101</i>
6.	CONCLUSIONES	103
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	105
8.	ANEXOS.....	115
8.1.	Anexo I: Características del tractor	115
8.2.	Anexo II: Características de la criba trómel	116
8.3.	Anexo III: Cálculos para el flujo de caja	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tratamientos efectuados en cada EDAR según su tamaño en habitantes equivalente. Fuente: PEMAR. [5].....	16
Figura 2. Tratamientos finales o destinos de los lodos producidos en el año 2012 en España. Fuente: PEMAR. [5].....	24
Figura 3. Evolución del pH y de la temperatura en pilas de compostaje durante el proceso. [38].....	33
Figura 4. Evolución del oxígeno durante el proceso de compostaje. [38].....	35
Figura 5. Proporción de las tecnologías utilizadas en el proceso de compostaje en España. Fuente: Estudio de mercado de los compost urbanos en España. [42].....	38
Figura 6. Ubicación del municipio de Valencia de Don Juan en la lejanía. [54].....	49
Figura 7. Ubicación de la EDAR de Valencia de Don Juan de donde proceden los lodos a compostar. [54].....	49
Figura 8. Ubicación de la planta de compostaje en el municipio. [54].....	52
Figura 9. Parcela en la que se construye la estación de compostaje con el camino señalado para llegar a ella a partir de la carretera LE-510. [59].....	53
Figura 10. Distribución de las zonas en la parcela. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 11. Formas de apilar niveles. De izquierda a derecha: En bloque, adosado y en isla. [66].....	69
Figura 12. Distribución de las pilas en la hilera de fermentación según la propuesta 1. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 13. Distribución de las pilas en la hilera de fermentación según la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 14. Distribución de las pilas en la hilera de maduración según la propuesta 1. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 15. Distribución de las pilas en la hilera de maduración según la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 16. Pala mecánica. [72].....	79
Figura 17. Volteadora de compost. [72].....	80
Figura 18. Elevadora de compost. [72].....	80
Figura 19. Tractor New Holland T4 110 LP Cab. [74].....	81
Figura 20. Criba de trómel. [72].....	81
Figura 21. Flujo de caja acumulado donde se representa el beneficio en euros obtenido con el paso del tiempo en años. Fuente: Elaboración propia.....	91

Figura 22. Análisis de sensibilidad de la planta. Se representa la variación del precio de mercado del fertilizante, el lodo y la paja frente al VAN obtenido (expresado en €). Fuente: Elaboración propia.....93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos aplicados a los lodos de depuradora en España en 2010. Fuente: PEMAR. [5].....	16
Tabla 2. Componentes del biogás obtenido a partir de lodos de depuradora. [6].....	17
Tabla 3. Comparativa entre tratamientos de estabilización de lodos. [12].....	19
Tabla 4. Producción de lodos de depuradora en las diferentes Comunidades Autónomas durante el año 2012 expresada en toneladas de materia seca. Fuente: PEMAR. [5].....	21
Tabla 5. Composición típica de los fangos en base seca. [17].....	22
Tabla 6. Composición típica de metales pesados por cada kg de lodo en base seca en España. [17].....	23
Tabla 7. Valores límite de los lodos destinados a la utilización agraria en mg/kg materia seca. Fuente: BOE. [24].....	26
Tabla 8. Valores límite de metales pesados a aplicar al suelo por hectárea y año en mg/kg materia seca. Fuente: BOE. [24].....	27
Tabla 9. Concentraciones máximas de metales pesados en los suelos sobre los que se aplican lodos tratados expresados en mg/kg materia seca. Fuente: BOE. [24].....	27
Tabla 10. Principales sistemas de compostaje según sus características. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 11. Características en peso seco de los agentes estructurantes usados en el compostaje de lodos: Residuo de algodón (A), residuo de poda (P), residuos de troncos de palmera (TP), paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM), tallo de girasol (TG). [50,51].....	41
Tabla 12. Características de las diferentes mezclas lodo de depuradora (LD)-agente estructurante 3:2 en base húmeda de los diferentes agentes estructurantes: paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM) y tallo de girasol (TG). [50].....	42
Tabla 13. Pérdida de materia seca y materia orgánica en las mezclas de lodo de depuradora (LD) con paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM) y tallo de girasol (TG). [50].....	42
Tabla 14. Características del aserrín de madera. [52].....	43
Tabla 15. Características de la mezcla de lodo de depuradora y paja de cereal sin aserrín (mezcla 1: LD+PC) y con aserrín (mezcla 2: LD+PC+A). [53].....	43
Tabla 16. Características del compost obtenido a partir de la mezcla de lodo de depuradora y paja de cereal sin aserrín (mezcla 1: LD+PC) y con aserrín (mezcla 2: LD+PC+A). [53].....	45

Tabla 17. Variación de la concentración de metales pesados antes del compostaje y después de 90 días para ambas mezclas en mg/kg. [53].....	45
Tabla 18. Contaminación media a tratar en la EDAR de Valencia de Don Juan. [57].....	50
Tabla 19. Composición de los fangos en base seca de la EDAR de Valencia de Don Juan [58].....	50
Tabla 20. Concentración de metales pesados en los lodos de la EDAR de Valencia de Don Juan en mg/kg. [58].....	51
Tabla 21. Producción de cereales en la provincia de León en 2018. [63].....	54
Tabla 22. Características de ambas materias primas. [38,58,62].....	55
Tabla 23. Parámetros de la mezcla a compostar (lodo:paja 1:0,7 en base húmeda o 1:3,105 en base seca) y rangos óptimos en los que sería favorable que esté. [38,58,62].....	58
Tabla 24. Comparativa de los posibles sistemas de compostaje a utilizar en la planta. [64].....	62
Tabla 25. Superficies de cada una de las zonas existentes en la planta. Fuente: Elaboración propia.....	78
Tabla 26. Valores límite en la concentración de metales pesados en las distintas clases de fertilizantes expresados en mg/kg MS. Fuente: BOE. [21].....	84
Tabla 27. Costes iniciales de la planta. Fuente: Elaboración propia.....	89
Tabla 28. Balance económico de materias primas y productos. Fuente: Elaboración propia.....	90
Tabla 29. Valores del VAN, TIR y PR. Fuente: Elaboración propia.....	92
Tabla 30. Ruido máximo permitido en un área receptora exterior de tipo 4 en función de las franjas horarias y de la inmisión o emisión expresado en dB. Fuente: BOE. [87].....	95
Tabla 31. Contaminantes emitidos por los distintos puntos de emisiones difusas [68,88].....	96

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales en nuestro país hace que se genere una importante cantidad de fango en las estaciones depuradoras de aguas residuales o EDAR, el cual es necesario valorizar para no acumular esos grandes volúmenes de residuos. Los fangos tienen numerosos beneficios en la agricultura, pero para poder ser usados deben someterse previamente a un proceso de estabilización para reducir el contenido de patógenos y controlar las concentraciones de nutrientes y metales pesados que aportan a los suelos. En este TFG se describirá la situación en España en cuanto a la producción de fangos y se abordará el diseño de una instalación de compostaje de fangos de depuradora para obtener un producto apto para su uso agrícola.

1.1. Tratamiento de aguas residuales en EDAR

Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es el conjunto de instalaciones con las que se logra disminuir el grado de contaminación de las aguas residuales hasta un nivel aceptable, el cual viene dado por la legislación vigente o por las necesidades del lugar, para devolverlas posteriormente a un cauce receptor, el cual puede ser un río, un embalse o el mar. Dichas aguas residuales son fruto de la actividad humana (actividad doméstica o industrial) y se captan a través de una red de alcantarillado mediante la cual son transportadas hasta dicha estación depuradora donde son tratadas.

En ella se efectúan tratamientos primarios, secundarios y, en algunas ocasiones también terciarios, para lograr los siguientes objetivos:

- La eliminación de materia en suspensión responsable de la turbidez del agua, lo cual es nocivo para la respiración de los seres vivos y la fotosíntesis.
- La disminución de la concentración de materia orgánica, culpable de la muerte de los peces a causa de la reducción de la concentración de oxígeno disuelto en el agua.
- La eliminación del fósforo y del nitrógeno causantes de la eutrofización de las aguas.

Además, en la EDAR también se da un tratamiento a los lodos o fangos que se generan en grandes cantidades como subproducto en los tratamientos primario y secundario.

Tendremos, por tanto, dos líneas de tratamiento, la de aguas y la de fangos que se describen en los siguientes apartados. [1,2]

1.1.1. Línea de aguas

Las etapas del proceso generalmente son las siguientes, aunque según la contaminación de las aguas residuales a tratar, se diseñará la EDAR con diferentes tratamientos para la correcta adecuación de dichas aguas y para garantizar el cumplimiento de los límites de vertido:

1.1.1.1. Pretratamiento

Es la etapa inicial, la cual consta de varias operaciones físicas por las cuales se retiran los sólidos grandes, las arenas y las grasas ya que en las etapas posteriores del proceso causarán problemas por sus dimensiones o su naturaleza, ocasionando obstrucciones de tuberías, válvulas y bombas, desgastando los equipos o provocando un menor rendimiento. Las operaciones de las que consta son las siguientes:

- **Obra de llegada:** Se decantan los sólidos más grandes en un pozo de llegada con paredes inclinadas. Este también homogeneiza y regula los caudales y las cargas.
- **Desbaste:** Proceso cuyo objetivo es la eliminación de sólidos gruesos como ramas y plásticos mediante rejas y tamices de distintos tamaños, que pueden ser manuales o automáticas.
- **Desarenado:** Con esto se logra eliminar las partículas pequeñas y densas.
- **Desengrasado:** Se introduce aire para poder eliminar sustancias como aceite o espumas, los cuales tienen una densidad menor que la del agua.

1.1.1.2. Tratamiento primario

En esta etapa, se eliminan los sólidos en suspensión sedimentables, como por ejemplo materia orgánica particulada o sólidos inertes, y también las partículas flotantes y las grasas que no hubieran podido ser eliminadas con el pretratamiento. Esto se logra basándose en la sedimentación primaria, es decir, mediante procesos físicos y, en algunos, casos también químicos:

- **Procesos físicos:** En EDAR de pequeños municipios, se utilizan fosas sépticas o tanques Imhoff. En EDAR de grandes municipios, se utilizan decantadores primarios.
 - o En las fosas sépticas, los sólidos sedimentables se depositan en el fondo por gravedad, donde experimentan degradaciones anaeróbicas por las cuales disminuyen su volumen y desprenden biogás y, por otro lado, en la superficie quedan los flotantes.
 - o Los tanques Imhoff consisten en un depósito constituido por dos zonas diferenciadas: la de digestión en la parte inferior, donde se produce la degradación anaeróbica, y la de sedimentación en la superior, donde se produce la sedimentación o decantación

- de partículas. La materia orgánica decantada se estabiliza anaeróbicamente, lo que hace más barata la gestión de fangos.
- Los decantadores primarios: Pueden ser estáticos o dinámicos. Estos últimos tienen elementos para poder recoger los flotantes y otros para poder evacuar los lodos del fondo del decantador.
 - Procesos físico-químicos: Mediante coagulación-floculación lo que se hace es añadir productos químicos en una primera etapa (coagulación) como sulfato de alúmina o sulfato de hierro con el fin de neutralizar las cargas y, seguidamente, en la segunda etapa (floculación) se añaden floculantes para que se formen partículas más grandes que puedan sedimentar. En otros casos simplemente se añaden reactivos químicos antes de la etapa de sedimentación.

1.1.1.3. Tratamiento secundario

En este tratamiento se compone de una sucesión de procesos biológicos por los que se transforma la materia orgánica en materia celular, energía, dióxido de carbono y agua, debido a la acción de microorganismos como bacterias, los cuales pueden ser aerobios, anaerobios o facultativos (es decir que pueden crecer con o sin oxígeno).

Seguidamente a este tratamiento se hace una decantación, conocida como decantación secundaria, por la que se separa el fango generado en dicho proceso biológico, es decir, el fango secundario, del agua tratada.

1.1.1.4. Tratamiento terciario

Este tratamiento únicamente se realiza en las EDAR cuyo cauce receptor es una zona protegida o debe cumplir restricciones mayores por algún motivo y consta de la eliminación de nutrientes, especialmente de fósforo y nitrógeno, y de desinfección. Una vez finalizado, el agua se devolverá a su cauce correspondiente mediante una obra de salida y sin perturbar el régimen hidráulico. [3]

1.1.2. Línea de fangos

En el tratamiento de las aguas residuales en EDAR se obtiene un caudal de fango producto de las decantaciones de la línea de aguas del proceso. Aproximadamente se obtiene un caudal de 0,025 - 0,03 m³ lodo/m³ agua tratada. [4] Dicho caudal se tratará en la línea de fangos, cuyo objetivo principal es reducir el volumen de fangos y disminuir y estabilizar la materia orgánica, para lo cual se les aplicará distintos tratamientos, como se muestra en la *Tabla 1*. El tipo de tratamiento aplicado depende del tamaño de la EDAR, como se muestra en la *Figura 1*, que se ha elaborado a partir de los datos recogidos en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR 2016-2022).

TRATAMIENTOS APLICADOS A LOS LODOS	PORCENTAJE (%)
Digestión anaerobia	49
Aireación prolongada	32
Digestión aerobia	8
Estabilización química con cal	4
Incineración	3
Compostaje	2
No estabilizados	2

Tabla 1. Tratamientos aplicados a los lodos de depuradora en España en 2010. Fuente: PEMAR. [5]

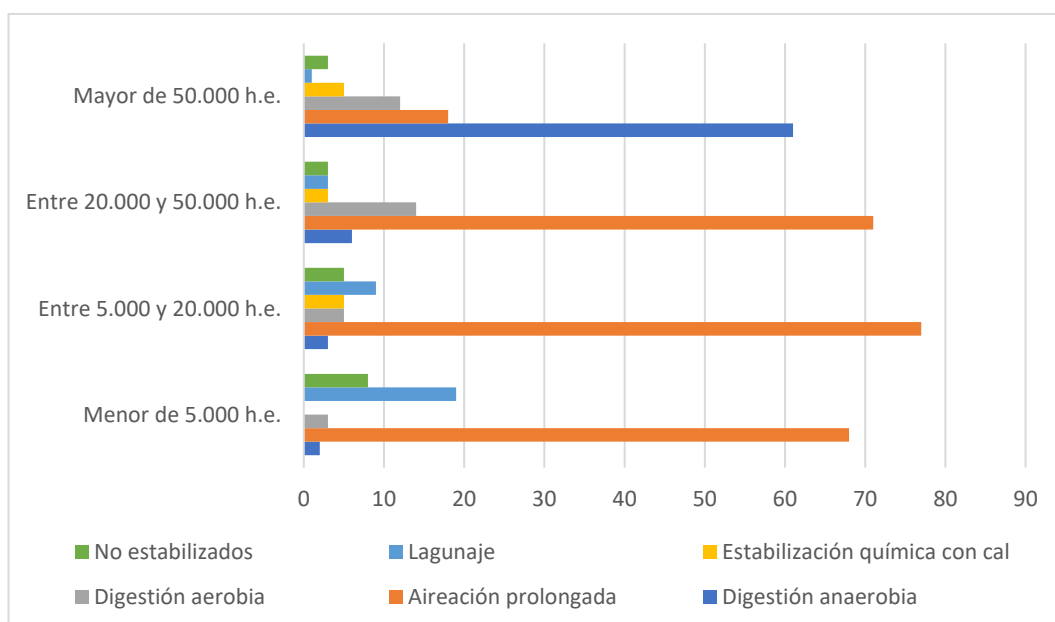


Figura 1. Tratamientos efectuados en cada EDAR según su tamaño en habitantes equivalente. Fuente: PEMAR. [5]

Estos tratamientos se explican de manera más extendida seguidamente:

1.1.2.1. Espesado

Proceso por el cual se homogenizan los fangos obtenidos, ya que proceden de distintos decantadores (primarios y secundarios) y se disminuye el volumen de fango eliminando parte del agua, desde el 95% que poseen inicialmente estos lodos hasta aproximadamente un 90%, lo que permite reducir el volumen de lodo en los tratamientos posteriores. Hay varias formas de llevarlo a cabo como la sedimentación, la flotación (donde se introduce aire por la parte inferior para que los fangos asciendan a la parte superior) o la centrifugación (mediante centrifugas de discos, de tipo cesta o de tambor rotatorio).

1.1.2.2. Digestión o estabilización

Con el fin de minimizar las consecuencias negativas de la gestión de lodos en el medio ambiente, el lodo espesado se somete a un proceso de estabilización por el cual se reduce la formación de olores, el contenido en materia orgánica y la presencia de organismos patógenos, obteniendo de esta forma lo que se conoce como lodos digeridos o estabilizados. Este proceso se puede llevar a cabo mediante procesos químicos o biológicos, tales como la digestión aerobia o anaerobia, siendo esta última la más utilizada por tratarse de una de las alternativas más ventajosas ya que la producción de metano hace que la EDAR pueda generar energía renovable.

1.1.2.2.1. La digestión anaerobia o biometanización

Consiste en degradar la materia orgánica de los lodos en ausencia de oxígeno obteniendo así biogás, el cual es un conjunto de gases cuyos componentes principales son metano y dióxido de carbono, aunque también contiene pequeñas cantidades de otros componentes, como se muestra en la *Tabla 2*. El residuo digerido es el digestato, el cual puede ser explotado para su uso como fertilizante agrícola.

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
CH ₄	50-80
CO ₂	20-50
H ₂ O	Saturado
H ₂	0,5
H ₂ S	0-1
NH ₃	Trazas
CO	0,1
N ₂	0-3
O ₂	0-1
Compuestos orgánicos	Trazas

Tabla 2. Componentes del biogás obtenido a partir de lodos de depuradora. [6]

La digestión anaerobia se produce a través de transformaciones bioquímicas que se clasifican en 4 etapas metabólicas en las que actúan un grupo diferente de bacterias anaerobias y facultativas que dan lugar a productos intermedios característicos de cada etapa:

- Etapa hidrolítica:

En esta etapa las macromoléculas insolubles (lípidos, proteínas e hidratos de carbono) son hidrolizadas por enzimas extracelulares en fragmentos simples solubles y fácilmente degradables (azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos y alcoholes).

- Etapa acidogénica o acidogénesis:

Los compuestos solubles que se obtienen de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos volátiles, es decir, de cadena corta, los cuales tienen menor peso molecular.

- Etapa acetogénica o acetogénesis:

Los compuestos obtenidos en la etapa anterior son transformados por bacterias acidogénicas y los principales productos obtenidos son ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

- Etapa metanogénica o metanogénesis:

Es la última etapa del proceso, en la que se transforman el ácido acético y el dióxido de carbono en metano por bacterias metanogénicas anaerobias estrictas.

La digestión anaerobia presenta grandes ventajas:

- La obtención de energía limpia y renovable para autoabastecer la EDAR.
- La eliminación de malos olores.
- Las instalaciones para llevarlo a cabo no requieren una gran superficie ya que se obtiene una producción de biomasa muy baja.
- Tiene buena capacidad para tratar residuos húmedos.
- Buena capacidad para eliminar patógenos.
- No se desprenden apenas olores ya que el 99% de los compuestos volátiles se descomponen por oxidación.
- El biogás se utiliza como energía alternativa y el digestato se puede usar como fertilizante agrícola siempre que se composte previamente. Ambas aplicaciones son muy destacadas.
- Dicho biogás tiene una alta capacidad calorífica 5.750 kcal/m^3 , lo que hace ideal para su aprovechamiento energético como combustible.

Pero también tiene algunas desventajas como, principalmente, la gran inversión inicial necesaria para llevarla a cabo, junto con el elevado tiempo requerido para su puesta en marcha. [6,7]

1.1.2.2.2. La digestión aerobia

Este proceso biológico consiste en introducir aire en el interior del digestor, haciendo que la materia volátil se reduzca entre el 35 y el 40% y, por tanto, la materia seca se reduce también.

Las bacterias consumen la materia orgánica hasta su supresión, donde éstas mueren y son utilizadas de alimento por otras. De esta forma se reducen los sólidos.

Los costos de capital son más bajos que los de la digestión anaerobia debido a que esta transcurre más rápida, pero los gastos de explotación son mucho más elevados debido a los gastos energéticos de la aireación.

1.1.2.2.3. La estabilización química

Se consigue mediante la adición de productos químicos como por ejemplo una solución de cal. Con esto se busca poder aumentar el pH del fango para eliminar los microorganismos patógenos y los malos olores. Este proceso se suele hacer en EDAR de dimensiones pequeñas o como sistema adicional cuando otros sistemas no estén en uso. [8-10] También se puede llevar a cabo la estabilización de fangos mediante la adición de cloruro férrico, sulfato de aluminio y quitosano. Las dosis empleadas oscilan en un rango entre 10 y 50 mg/L, a diferencia de la cal, cuya dosis es bastante mayor (entre 30 y 500 mg/L). [11]

La *Tabla 3* presenta una comparativa entre las distintas tecnologías de estabilización de fangos descritas.

PARÁMETRO	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA	DIGESTIÓN AEROBIA	DIGESTIÓN ANAEROBIA
Destrucción sólidos volátiles (SV)	Inexistente	Menor	Mayor
Reducción sólidos totales (ST)	<0 (genera más)	Menor	Mayor
Velocidad degradación	-	Menor	Mayor
Subproductos	-	CO ₂ , H ₂ O, NO ₃	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ O, NH ₄ , H ₂ S
Carga orgánica sobrenadante	-	Menor (<500 mg/L DBO ₅)	Mayor (>500 mg/L DBO ₅)
Deshidratación	Excelente	Regular	Buena
Flexibilidad cargas/tóxicos	Mayor	Mayor	Menor
Coste explotación	Mayor	Mayor	Menor
Facilidad explotación	Mayor	Mayor	Menor

Tabla 3. Comparativa entre tratamientos de estabilización de lodos. [12]

1.1.2.3. *Deshidratación*

En esta etapa, se elimina todo el contenido de agua posible mediante un secado mecánico y, posteriormente, térmico, aunque este último solo se aplica en EDAR de gran tamaño.

El secado mecánico se hace con filtración a vacío, utilizando filtros de banda o filtros prensa y se consigue reducir el volumen de agua hasta el 75% aproximadamente. Seguidamente, con secado térmico el volumen disminuye hasta tan solo un 5%, es decir, es en el proceso donde más humedad se retira. Esto se consigue mediante un secadero rotatorio o un lecho fluidizado, donde se produce la evaporación de parte del agua de los lodos. Puede darse poniendo el lodo en contacto con un vapor caliente de manera directa (por convección), indirecta (por conducción) o mixta (ambas se dan).

Como resultado obtenemos un lodo con un volumen más manejable y con un alto poder calorífico. [2,13]

Algunas veces el secado térmico no se aplica ya que manipular el lodo seco puede generar atmósferas explosivas (ATEX). Para evitarlo se debe controlar las propiedades físicas de las partículas de lodo seco en todo momento, con el fin de que no se forme polvo de lodo seco, ya que este contiene gran cantidad de materia orgánica y es el incentivo para la formación de ATEX. [14]

1.2. **Datos de producción de fangos de depuradora**

Como ya se ha comentado, los lodos de depuradora se generan como consecuencia de la depuración de aguas residuales. Actualmente, en la Unión Europea se llegan a producir al día alrededor de 30.000 toneladas en masa seca de lodo. Esta cifra tiene previsión de que aumente considerablemente en los próximos años. Además, se conoce que alrededor del 30% del coste del capital y el 50% del coste operativo de las EDAR va asignado al tratamiento, transporte y gestión de dichos lodos. [15]

Por otra parte, en 2016 en nuestro país se produjeron 1.174.400 toneladas en materia seca al año de lodos de depuradora, lo que equivale a 3.218 toneladas en materia seca diarias. [16] Por lo que una alta producción de lodos exige una gestión adecuada de los mismos.

La generación de fangos en España se puede estimar en aproximadamente 0,2 kilogramos de materia seca de lodo por habitante equivalente al día. [17] El término “habitante-equivalente” (h.e), es una forma muy común de expresar el caudal de agua tratado en una EDAR. Este se define según la Directiva Europea 91/271 de 21 de mayo de 1991 sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, como “la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica

de oxígeno de cinco días (DBO₅), de 60 gramos de oxígeno por persona y día”.
[1]

$$h.e. = \frac{Q \left(\frac{m^3}{día} \right) \cdot DBO_5 \left(\frac{l}{m^3} \right) \cdot \left(\frac{g}{l} \right)}{60 \left(\frac{g}{hab \cdot día} \right)}$$

Por tanto, mediante dicho factor $\left(0,2 \frac{kg \ ms \ lodo}{h.e. \cdot día} \right)$ y el caudal de tratamiento correspondiente de una EDAR se podrá determinar la producción de fango.

Los lodos producidos en EDAR de las diferentes Comunidades Autónomas, se ven reflejados en la *Tabla 4*.

COMUNIDAD AUTÓNOMA	PRODUCCIÓN EN 2012 (t m.s.)
Andalucía	128.727
Aragón	29.537
Principado de Asturias	3.504
Islas Baleares	44.221
Islas Canarias	31.422
Cantabria	27.800
Castilla-La Mancha	58.094
Castilla y León	64.912
Cataluña	135.058
Ceuta y Melilla	982
Extremadura	11.480
Galicia	60.201
La Rioja	9.533
Comunidad de Madrid	193.722
Región de Murcia	34.623
Comunidad de Navarra	10.473
País Vasco	39.690
Comunidad Valenciana	198.690
TOTALES	1.082.669

Tabla 4. Producción de lodos de depuradora en las diferentes Comunidades Autónomas durante el año 2012 expresada en toneladas de materia seca. Fuente: PEMAR. [5]

1.3. Composición de fangos de depuradora

En términos generales, la composición general en base seca de los fangos provenientes de una EDAR viene recogida en la *Tabla 5*, existiendo grandes variaciones en función del tipo de agua residual a tratar y el tipo de tratamiento aplicado.

PARÁMETRO AGRONÓMICO	VALOR	UNIDADES
pH	6,7 - 6,9	Adimensional
Conductividad	5.013 - 6.687	μS/cm
Carbono total	29,8 - 38,0	%
Carbono oxidable	15,6 - 19,6	%
Materia orgánica oxidable	26,9 - 33,7	%
Nitrógeno	3,5 - 4,5	%
Relación C/N	8,0 - 9,7	Adimensional
Fósforo total	15.417 - 22.908	mg/kg MS
Fósforo asimilable	2.097 - 3.422	mg/kg MS
Fósforo	0,48 - 0,78	%
Calcio total	37.812 - 61.607	mg/kg MS
Calcio asimilable	5.641 - 10.241	mg/kg MS
Magnesio total	5.462 - 7.652	mg/kg MS
Magnesio asimilable	1.382 - 2.290	mg/kg MS
Potasio total	2.944 - 12.980	mg/kg MS
Potasio asimilable	939 - 1.357	mg/kg MS
Potasio	0,11 - 0,23	%
Hierro total	12.182 - 23.223	mg/kg MS
Hierro asimilable	13,4 - 17,4	mg/kg MS
Sodio asimilable	852 - 1.703	mg/kg MS

Tabla 5. Composición típica de los fangos en base seca. [17]

Por otra parte, se tiene una concentración despreciable frente a las representadas en la *Tabla 5* de metales pesados, (entre 0,5 y 2%, pudiendo llegar hasta al 6% [11]), pero que aun en tan pequeña cantidad siguen siendo el principal problema para el uso agrícola de los fangos. Los valores promedio típicos de estos metales según un estudio que representa al 75% de los lodos generados en España hecho a partir de los datos de 66 EDAR repartidas por todo el país vienen representados en la *Tabla 6*.

METAL PESADO	CONCENTRACIÓN (mg/kg MS)
Cadmio	0 - 0,36
Cromo	82,7 - 218,5
Cobre	200,5 - 336,1
Mercurio	0,79 - 1,43
Níquel	31,2 - 71,9
Plomo	60,4 - 100,4
Zinc	533,0 - 871,8

Tabla 6. Composición típica de metales pesados por cada kg de lodo en base seca en España. [17]

Por otra parte, todos ellos se pueden clasificar en:

- Micronutrientes los cuales son necesarios para los seres vivos, aunque a partir de ciertas concentraciones tienen una toxicidad alta, como por ejemplo Zn, Cu, Ni, Cr.
- Elementos muy tóxicos sin ningún beneficio para los seres vivos como por ejemplo Cd, Hg, Pb. [17]

1.4. Gestión y alternativas de valorización de fangos de EDAR.

La orientación relativa a la gestión de los lodos procedentes de las EDAR viene recogida en el Plan Estatal Marco de Residuos (PEMAR), el cual tiene vigencia desde el 2016 hasta como máximo el 2022. [18]

Según dicho plan, la gestión de los lodos de depuradora se realiza conforme lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Según esta ley, las EDAR deben garantizar la correcta gestión de los lodos por ellas mismas o por gestores autorizados, cumpliendo la normativa específica para cada tipo de tratamiento que se les haga.

Dichos lodos tienen diversas aplicaciones y, en la actualidad, se les está dando cada vez más uso a aquellas aplicaciones que persiguen una economía circular. Aunque la aplicación con más uso continúa siendo, al igual que en la antigüedad la aplicación agronómica, con la diferencia de que en la actualidad estos lodos deben someterse a procesos previos de estabilización como el compostaje.

Por otro lado, los lodos primarios y secundarios, al no tener las mismas composiciones, no son igual de idóneos para las distintas valorizaciones: Los lodos primarios tienen un contenido mayor de sólidos totales y volátiles, por lo que será más beneficioso valorizarlo mediante digestión anaerobia. Por otra parte, el lodo secundario será más valioso para su aplicación en agricultura como fertilizante debido al alto contenido en nutrientes. En la práctica se unen y homogenizan en la línea de tratamiento de lodos como lodo mixto. [11]

Los objetivos que se propusieron alcanzar en España en 2020 según el PEMAR en cuanto al destino final de los lodos de depuradora fueron los siguientes:

- Valorizar el lodo ya sea en suelos o en cualquier otro tipo al menos un 85% de los lodos producidos.
- Incinerar o eliminar en vertederos como máximo un 15% de estos en total, llevando al vertedero un 7% como máximo. [5]

En la *Figura 2* se muestra el tipo de valorización o el destino que se da a los lodos de depuradora. Como puede comprobarse, un 7% de estos acaban siendo depositados en el vertedero, lo cual, actualmente representa la última opción de gestión que se contempla debido a la problemática que acarrea por las grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la producción de lixiviados, el riesgo de contaminación de suelos y aguas y los costes asociados al proceso. A esto se le añade el carácter cada vez más restrictivo de la legislación europea. [19]

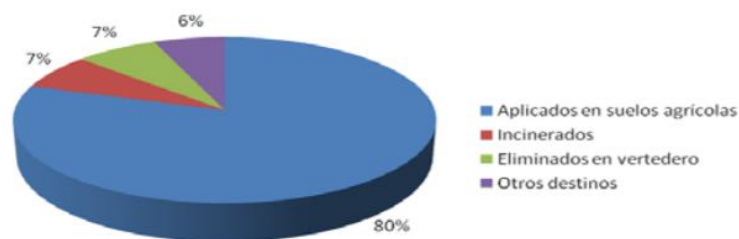


Figura 2. Tratamientos finales o destinos de los lodos producidos en el año 2012 en España. Fuente: PEMAR. [5]

1.4.1. Valorización agronómica

La valorización agronómica es el tipo de valorización más utilizada en nuestro país. En 2012, en España el 80% de los lodos producidos tenía como destino final su uso en suelos agrícolas. [5] Antiguamente, los lodos se aplicaban directamente al terreno, pero en la actualidad, debido a la problemática de los metales pesados y la presencia de patógenos, la valorización agronómica directa se considera como un uso poco seguro debido al riesgo de contaminación del suelo, del agua y, consecuentemente, la bioacumulación en las plantas, introduciéndose en la cadena trófica, haciendo que animales y seres humanos sufran también su toxicidad. Por lo tanto, se llevan a cabo previamente operaciones de estabilización de la materia orgánica como la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización química o el compostaje, siendo esta última la más utilizada.

El Real Decreto 506/2013, de 28 de junio establece un listado de residuos susceptibles de compostaje para la fabricación de productos fertilizantes. [20]

En dicho listado aparecen los lodos procedentes de EDAR con contenidos en metales pesados inferiores a los establecidos en el Real Decreto 1310/1990, cuyos valores aparecen en la *Tabla 7*. [21]

Por otro lado, el Real Decreto 1310/1990 obliga a estabilizar los lodos antes de su uso en el sector agrario, pero no especifican de qué forma. Según la Unión Europea, se está obligado a hacerlo por alguno de los siguientes métodos: [22]

- Compostaje en hileras:

El lodo debe mantenerse durante 3 periodos de 4 horas a 55 °C con un volteo entre cada una de ellas. Este proceso debe seguirse de una etapa de maduración.

- Compostaje en pila aireada:

El lodo deberá estar como mínimo 5 días a 40 °C o más y 4 horas dentro de este periodo deberá alcanzar como mínimo los 55 °C. A este proceso deberá seguirle una etapa de maduración.

- Secado térmico:

Los lodos se calentarán 10 minutos a un mínimo de 80 °C con el fin de reducir la humedad a un valor inferior al 10%.

- Digestión termofílica:

El lodo debe estar al menos 4 horas a un mínimo de 55 °C.

- Tratamiento térmico y digestión:

El lodo debe alcanzar los 70 °C durante un tiempo mínimo de 30 minutos. A este proceso le debe seguir una digestión anaeróbica mesófila a 35 °C de 12 días de media.

- Tratamiento con cal:

El lodo se mezcla con la cal con el fin de obtener un pH de 12 o superior y una temperatura de al menos 55 °C dos horas después de mezclarlos.

1.4.1.1. Marco legal de la valorización agronómica de fangos

Si los lodos van a destinarse a suelos agrícolas, serán de aplicación las siguientes normativas: [5]

- Artículo 27 de la Ley 22/2011, de 28 de julio:

Obliga a disponer de una autorización para poder tratar residuos R10 “Tratamiento de los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos”.

- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero:

Relativo a la prevención de la contaminación de las aguas por los nitratos de procedencia agraria.

- Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario:

Informa sobre los datos que deben proporcionar las EDAR las instalaciones de tratamiento de lodos y los gestores que realizan la aplicación de los lodos en los suelos agrícolas. Entre los documentos que tienen que suministrar se encuentran la información de la EDAR con sus datos y los tratamientos que se efectúan, documentos de identificación de lodos con los valores de todos sus parámetros o las aplicaciones en las que se destinan dichos lodos. [23]

- Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre:

Mediante este decreto se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario, decretándose un cierto seguimiento por parte de las respectivas Comunidades Autónomas y se funda el Registro Nacional de Lodos (RNL). Incorpora la Directiva 86/278 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. Más ampliamente, será de aplicación la Ley de Residuos 22/2011, de 28 de julio, y las disposiciones de desarrollo de la misma.

El Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre impone los valores que no podrán sobrepasar los lodos tratados destinados a la utilización agraria en cuanto a metales pesados, los cuales vienen recogidos en la *Tabla 7*.

PARÁMETROS	VALORES LÍMITE PARA SUELOS CON PH MENOR DE 7	VALORES LÍMITE PARA SUELOS CON PH MAYOR DE 7
Cadmio	20	40
Cobre	1.000	1.750
Níquel	300	400
Plomo	750	1.200
Zinc	2.500	4.000
Mercurio	16	25
Cromo	1.000	1.500

Tabla 7. Valores límite de los lodos destinados a la utilización agraria en mg/kg materia seca. FUENTE: BOE. [24]

Además, las cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por hectárea y año serán las que, de acuerdo con el contenido en metales pesados

de los suelos y lodos a aplicar, no rebasen los valores límite de incorporación de los metales pesados que se presentan en la *Tabla 8*.

PARÁMETROS	VALORES LÍMITE
Cadmio	0,15
Cobre	12,00
Níquel	3,00
Plomo	15,00
Zinc	30,00
Mercurio	0,10
Cromo	3,00

Tabla 8. Valores límite de metales pesados a aplicar al suelo por hectárea y año en mg/kg materia seca. Fuente: BOE. [24]

Por otra parte, los suelos sobre los que podrán aplicarse los lodos tratados deberán de presentar una concentración de metales pesados inferior a los representados en la *Tabla 9*. [24]

PARÁMETROS	SUELOS CON PH MENOR DE 7	SUELOS CON PH MAYOR DE 7
Cadmio	1	3
Cobre	50	210
Níquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450
Mercurio	1	1,5
Cromo	100	150

Tabla 9. Concentraciones máximas de metales pesados en los suelos sobre los que se aplican lodos tratados expresados en mg/kg materia seca. Fuente: BOE. [24]

- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes:

Los “lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas, con contenidos en metales pesados inferiores a los establecidos en el real decreto 1310/1990” están bajo esta norma con el código LER (Listado Europeo de Residuos) 19 08 05 según el anexo IV de este documento. Esto implica, que están obligados a cumplir los límites de porcentaje de nitrógeno orgánico, humedad, granulometría, microorganismos, metales pesados, usos, furfural y polifenoles que en esta normativa aparecen. Para poder llegar a cumplir dichos límites deben ser compostados previamente en la gran mayoría de los casos.

1.4.2. Valorización energética

La valorización energética o termoquímica aprovecha los residuos como fuente de energía para algún proceso productivo y su objetivo es romper las cadenas moleculares para poder recuperar el calor contenido en ellas.

Para que un lodo sea apto para valorizarlo energéticamente tiene que tener un poder calorífico inferior (PCI) aceptable, el cual es el valor que indica la energía que desprende este material al quemarlo en presencia de oxígeno. Este suele estar en torno a 12 MJ/kg para lodos secos y entre 1 y 3 MJ/kg para lodos húmedos [8], considerándose suficiente para su valorización energética a partir de 14 MJ/kg para los lodos secos aproximadamente, correspondiendo este valor a uno muy inferior para lodo húmedo. Además, en su valorización se pueden emplear materiales que aumenten dicho valor como, por ejemplo, rechazos de plantas de compostaje o bolsas de plástico.

La valorización energética abarca varias alternativas, las cuales son procesos autosuficientes, como la gasificación, la pirólisis y la combustión, entre otras. [19,25,26]

1.4.2.1. Combustión

El tratamiento previo de dichos fangos consta de una deshidratación mecánica a partir de filtros prensa donde se reduce el volumen de agua hasta obtener una humedad en torno al 70 o 75%, seguido de un secado térmico mediante el uso de energía térmica donde se reduce algo más el volumen (obteniéndose una humedad final entre el 10 y el 15%) y se aumenta su PCI (hasta 18,8 MJ/kg).

Después, estos fangos se introducen en una caldera de lecho fluidizado donde se queman mediante la reacción con oxígeno, alcanzando temperaturas muy altas. Debido a la colocación de un ciclo Rankine contiguo a la caldera de combustión, el cual es un ciclo termodinámico que convierte mediante cuatro pasos energía térmica en eléctrica, se consigue calentar el agua del ciclo a partir de dichas temperaturas, consiguiendo de esta forma finalmente energía eléctrica. [7]

Como subproductos o residuos de dicha combustión se obtiene:

- Cenizas: Estas se pueden utilizar como aditivo en materiales de construcción como cemento y hormigón, evitando además su traslado a vertederos.
- Vapor de agua.
- Gases residuales como CO₂, cuya emisión a la atmósfera está cada vez más restringida, por lo que habría que tratarlo previamente, lo que encarecería el proceso.

Las grandes ventajas de esta alternativa son la elevada eficiencia térmica y la gran disminución del volumen de los lodos. [27,28]

1.4.2.2. Pirólisis

Es el proceso de degradación térmica de las moléculas químicas de los combustibles en una atmósfera inerte a unas temperaturas comprendidas entre 300 y 900 °C. Los productos de pirolisis se dividen en gases no condensables, líquidos y sólidos, los cuales tienen propiedades combustibles todos ellos. Los gases no condensables están formados principalmente por H₂, CO₂, CO, CH₄ o hidrocarburos de bajo peso molecular; es decir, no se dan emisiones nocivas a la atmósfera, ya que los metales pesados permanecerán en el residuo sólido. Esto le hace ser a la pirolisis mucho más ventajosa frente a la combustión y a la incineración. Además, estos productos gaseosos poseen un PCI entre 12 y 20 MJ/m³, por lo que una optimización del proceso podría hacer que se maximizara la producción de gases y que se mejorara el equilibrio energético del proceso. Por otra parte, los líquidos obtenidos suelen ser alquitrán y aceite y su poder calorífico oscila entre 22,4 y 28 MJ/kg, valores comparables a muchos de los combustibles usados en la actualidad o incluso superiores, lo que les hace idóneos para la producción de energía. Finalmente, los sólidos están formados principalmente por carbono y cenizas, que por su limitado poder calorífico y por su composición en metales pesados no es eficaz para su uso energético, pero sí lo es para su utilización como absorbente de compuestos ácidos o contaminantes.

Los principales parámetros que afectan al rendimiento y a la optimización del proceso son la temperatura, la presión, el tiempo de residencia, la turbulencia y las características del lodo de depuradora. [19,27]

1.4.2.3. Gasificación

La gasificación es el proceso por el cual se descompone el lodo seco con oxígeno en defecto a unas temperaturas que rondan los 1.000 °C, obteniéndose cenizas, gases combustibles (principalmente gas de síntesis) y calor, el cual se utiliza para generar energía. [28]

Primeramente, se da una etapa de secado de los lodos de depuradora, a una temperatura entre 70 y 200 °C, obteniendo el calor necesario para poder alcanzar posteriormente la temperatura de las reacciones de oxidación parcial. Seguidamente se da una etapa de pirólisis o degradación térmica de los lodos secados a una temperatura entre 350 y 500 °C y de dicho proceso se obtiene carbonilla, cenizas, vapor de agua, condensables de alto peso molecular y gases como CO, CO₂ o H₂. El calor proviene también de la oxidación parcial. Finalmente se da una etapa de gasificación de los productos de la pirólisis, lo cual es una reacción muy exotérmica y la temperatura asciende hasta 1.100 °C, como ya se ha comentado. [19,27]

1.5. Proceso de compostaje

Los lodos provenientes de las EDAR contienen organismos patógenos y materia orgánica sin estabilizar. En caso de uso agrario directo, podrían llegar a contaminar las aguas subterráneas. [29] Por lo tanto, para poder utilizar estos lodos en aplicaciones agrícolas, se necesita someterlos previamente a un proceso de compostaje para estabilizarlos, es decir, para reducir patógenos, y para mejorar la calidad de la materia orgánica, produciendo así ácidos húmicos que tienen mejores propiedades para la agricultura. Con ello, se conseguirá paliar los efectos negativos sobre el medio ambiente y los seres vivos, además de conseguir la homogeneización de los residuos orgánicos, consiguiendo también la reducción de su masa y su volumen.

El compostaje es un proceso biológico aerobio, es decir, que tiene lugar en presencia de oxígeno. Bajo condiciones controladas de aireación, humedad y temperatura, los residuos orgánicos degradables se descomponen gracias a la actividad de microorganismos como los hongos y bacterias, transformándose en compost, un material estable e higienizado, libre de fitotoxinas y patógenos con propiedades húmicas, que se puede utilizar como enmienda orgánica, ya que es beneficioso para el suelo y el crecimiento de las plantas. [30,31] Dicha higienización se consigue gracias al incremento de la temperatura, lo que hace que los agentes patógenos finales sean mínimos, conociéndose como lodo higienizado aquel que se ha tratado de forma que los patógenos finales no sean detectables. Por otra parte, el grado de estabilidad es la medida en la que se ha descompuesto la materia orgánica fácilmente biodegradable. [32]

Las ventajas del compostaje son muchas, lo que le convierte en una de las mejores opciones en la gestión de los residuos orgánicos, tanto ambientalmente como económicamente. Algunas de ellas son la calidad del compost como fertilizante, los innumerables beneficios que produce en el suelo, su estabilización microbiana, la eliminación de patógenos, de olores y de la humedad y la posibilidad de almacenarse durante periodos más largos que el lodo sin compostar. Además, su transporte es más barato y es más fácil de manejar. Por otra parte, también tiene desventajas como son la necesidad de grandes superficies para la operación y el mantenimiento y el alto coste que esto conlleva, la necesidad de un agente estructurante para compensar sus carencias, la adición de metales pesados al suelo y el aumento de la salinidad de éste. [33]

Su uso como fertilizante mejora las propiedades químicas del suelo, como un aumento de la concentración de materia orgánica, nutrientes y biomasa microbiana y las propiedades físicas como la mejor retención del agua. Dichas propiedades son muy beneficiosas para poder recuperar los suelos degradados, favoreciendo también el retorno de la materia orgánica al suelo y su inserción en los ciclos naturales. [34]

Dependiendo de los distintos factores como el sistema o la tecnología de la que se dispone, puede durar entre 10 y 16 semanas, tiempo en el cual se dan dos etapas: la descomposición y la maduración. Ambas etapas se describen seguidamente:

- Etapa de descomposición:

En la primera fase, desaparecen las moléculas más fácilmente degradables liberando energía (se alcanzan temperaturas de 60-70°C), agua, anhídrido carbónico y amoníaco y los biopolímeros como la celulosa y la lignina quedan parcialmente alterados.

La duración de esta primera fase suele ser de 4-6 semanas, aunque si se lleva a cabo de forma intensiva (recintos cerrados y aireación forzada) puede reducirse a 2-4 semanas.

- Etapa de maduración:

Después se pasa a la etapa de maduración, en la cual los biopolímeros pasan a ser las estructuras básicas de las macromoléculas que incluirán parte del nitrógeno contenido en los materiales iniciales dando lugar a materia orgánica parecida a las sustancias húmicas del suelo. Se produce la condensación y repolimerización de los productos intermedios formados en la etapa anterior para dar lugar a ácidos húmicos. En esta etapa el requerimiento de oxígeno es menor que en la fase de descomposición.

El residuo se estabiliza y madura, para ello se requiere de 6-10 semanas, y finalmente se obtiene un producto, el compost, con distinta estabilidad, según la duración de esta fase.

1.5.1. Parámetros de seguimiento del proceso

La calidad del compost depende, entre otros, de las diferentes características del sustrato de partida, del método de compostaje y de los parámetros de compostaje. Además, dichos factores también son parámetros de seguimiento del proceso para comprobar que el compostaje se está llevando a cabo correctamente y poder mejorar la calidad del producto final.

Los parámetros más importantes se detallan a continuación:

1.5.1.1. Temperatura

La temperatura siempre se considera uno de los parámetros más importantes de seguimiento, ya que es el indicio más evidente de que el compostaje se está desarrollando de forma adecuada por darse fases claramente diferenciadas en cuanto a la variación de este parámetro, como se puede ver en la *Figura 3*. Además, también es importante para analizar los microorganismos implicados en cada fase:

- Fase mesófila inicial:

La temperatura aumenta desde el ambiente hasta aproximadamente 40 °C.

- Fase termófila:

En esta fase la temperatura aumenta desde 40-45 °C hasta que la generación de calor se iguala a la pérdida de este, alcanzándose así la temperatura máxima del proceso, lo que ocurre aproximadamente a unos 80 °C, donde finaliza esta fase.

A causa de la mayor actividad de las bacterias aeróbicas se genera calor y mayor cantidad de CO₂ por la descomposición de la materia orgánica, lo que se traduciría en una disminución del oxígeno, por lo que el compost se voltea para evitar la disminución de este, manteniéndolo en todo momento controlado por ser un proceso aeróbico. Cuando la concentración de oxígeno es suficiente, la temperatura aumenta, ya que se acelera la estabilidad y la madurez del compost. [31]

- Fase mesófila final o de enfriamiento:

Comienza al alcanzarse la temperatura máxima en la fase termófila. A partir de ella, como se muestra en la *Figura 3*, la temperatura comienza a descender desde una temperatura que oscila en torno a 80 °C hasta algo menos de los 30 °C.

- Fase de maduración:

Al finalizar el proceso, los valores de la temperatura se igualan a los del ambiente, a no ser que el compost no esté maduro completamente, lo cual se debería a una humedad demasiado baja.

Hay que mantener la temperatura controlada porque las bajas temperaturas se traducen en una transformación lenta de los residuos y las que son demasiado altas higienizan, pero secan la pila, reduciendo la actividad biológica. Por otra parte, cada tipo de microorganismo tiene su propio intervalo de temperaturas óptimas para el cual hay una mejora actividad.

1.5.1.2. Humedad

Este parámetro es muy importante ya que los microorganismos necesitan agua para poder degradar la materia orgánica, es decir, es imprescindible para el proceso biológico. Este valor es importante controlarlo durante todo el proceso ya que un exceso de humedad produciría la obstrucción de los poros del compostado, no dejando transferirse al oxígeno ni a los gases resultantes de la reacción. Consecuentemente, se generarían condiciones de anaerobiosis, por lo que el proceso se vería ralentizado, empeorando la calidad del compost y emitiéndose malos olores. Este exceso puede corregirse proporcionando una mayor aireación, pero el proceso no estaría siendo económicamente óptimo.

Por el contrario, las humedades bajas favorecen el transporte, pero, también hacen que el desarrollo sea incompleto al disminuir la velocidad de la actividad microbiana. Este déficit de humedad se solventa regando las pilas. Los valores óptimos para la humedad inicial deben estar comprendidos entre el 40 y el 60% para unos autores [35] y entre 50 y 65% para otros. [36]

1.5.1.3. pH

A lo largo del proceso el pH varía según la fase en la que se encuentre el compostado, como se observa en la *Figura 3*, ya que los valores altos están relacionados con la emisión de nitrógeno amoniacal y la producción de carbonatos solubles y los bajos con la formación de ácidos orgánicos.

- Fase mesófila inicial: En esta fase se producen ácidos orgánicos por la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica, por lo que el pH disminuye hasta acidificar el medio considerablemente.
- Fase termófila: Hay más actividad metabólica, por lo que se genera amoníaco a partir de amonio. Esto hace que el pH sea más alcalino.
- Fase mesófila final o de enfriamiento: Se forman compuestos húmicos con propiedades tampón, por lo que el pH se vuelve neutro.

El rango óptimo está comprendido entre 6 y 8, siendo los valores comprendidos entre 6 y 7 los considerados óptimos para una mayor actividad bacteriana y entre 5,5 y 8 para una mayor actividad fúngica. [37] Si al finalizar el proceso de compostaje el pH se encuentre entre 7 y 8 es sinónimo de una aireación apropiada y, si por el contrario este es menor, el producto no estará maduro aún.

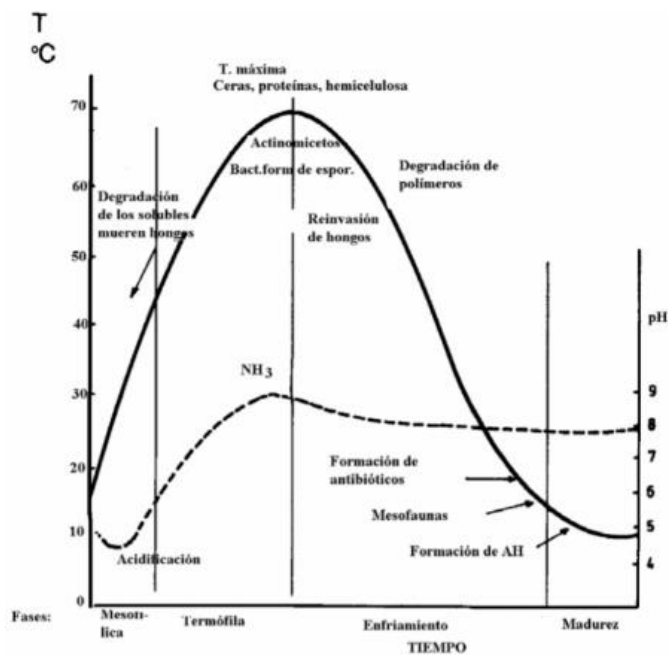


Figura 3. Evolución del pH y de la temperatura en pilas de compostaje durante el proceso. [38]

1.5.1.4. Aireación (oxígeno)

Como ya se sabe, los microorganismos que intervienen en el proceso del compostaje son aerobios, por lo que se necesita aportar oxígeno. Su consumo está estrechamente relacionado con el grado de oxidación biológica y la descomposición de la materia orgánica. La aireación tiene dos objetivos principales:

- Aportar oxígeno a los microorganismos.
- Retirar el dióxido de carbono producido.

Aunque también tiene otros objetivos o funciones como la reducción de la temperatura cuando sea necesario, aumentando la aireación, o evitar la pérdida de calor, reduciendo la aireación siempre que el suministro de oxígeno sea suficiente. Otro objetivo es eliminar la humedad de la pila en caso de que esta exceda los límites.

La demanda de oxígeno va variando en cada etapa. En la primera fase es cuando más oxígeno se necesita. Por otra parte, como se muestra en la *Figura 4*, a medida que el compost está más estabilizado, disminuye el consumo de oxígeno: Para mantener las actividades microbianas, el suministro de oxígeno debe modificarse en la fase termofílica para mejorar la biodegradación de la materia orgánica, por lo que, a partir de ésta, la demanda va disminuyendo hasta el final del compostaje.

Por otra parte, al aumentar la actividad de las bacterias aeróbicas que generan CO₂ en la descomposición de la materia orgánica, disminuye la concentración del aire de salida.

Para ello, se necesita airear las pilas dentro de cierto intervalo ya que tanto el exceso como el defecto de aire será perjudicial para la calidad del compost:

- Un exceso de aireación se traduce en el enfriamiento y desecación de la masa, y, por consiguiente, la actividad metabólica de los microorganismos se verá reducida. Además, también se darían variaciones en la temperatura y la humedad, pudiendo llegar a la interrupción de la actividad microbiológica, y con ello el proceso de compostaje en sí. Por otra parte, esto se traduciría también en un notable incremento de los costes.
- Una aireación deficiente hace que los microorganismos aerobios se reemplacen por anaerobios o aerobios fermentativos. Esto hará, principalmente, que la calidad del compost empeore, y, por otra parte, también causará que la descomposición se ralentice y que aparezca sulfuro de hidrógeno, y, por tanto, malos olores.

Esta variable de operación es de gran importancia ya que los equipos que miden la concentración requerida de oxígeno constituyen gran parte de los

costes, aunque también puede realizarse indirectamente mediante la medida de humedad y temperatura.

El rango de valores óptimos de oxígeno es 15-20%. [30,38]

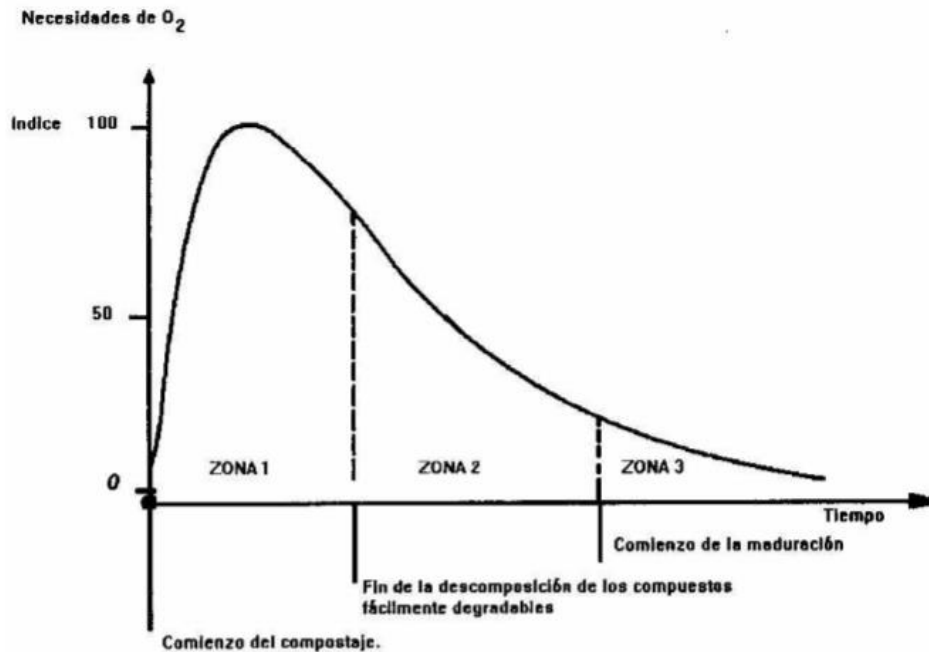


Figura 4. Evolución del oxígeno durante el proceso de compostaje. [38]

1.5.2. Parámetros relativos al sustrato

Existen algunos parámetros cuyos valores deben estar comprendidos en unos rangos antes de comenzar el proceso con el fin de obtener un compost de calidad y que, una vez que comienza el compostaje, no será necesario volverlos a determinar, ya que estos valores no influyen en el seguimiento del proceso. Si el sustrato que se va a compostar no tiene los valores necesarios, se mezclará con algún material, llamado agente estructurante, cuyas características puedan adaptarse a las necesidades de este de la mejor manera. La proporción entre el sustrato y el agente estructurante vendrá dada por las necesidades de dicho sustrato.

Los parámetros más relevantes se detallan a continuación:

1.5.2.1. Relación C/N y C/P

La relación C/N representa el cociente entre el contenido en carbono y nitrógeno del sustrato orgánico a compostar. Esta relación influye en la velocidad del proceso, ya que si es excesivamente alta la actividad biológica disminuye debido a un déficit de nutrientes, esto ocurre con relaciones superiores a 40.

La relación C/N al iniciarse el proceso debe estar comprendida entre 25 y 30, siendo el valor óptimo de 25. Una vez transcurrido el compostaje, el compost ya madurado tiene una relación C/N en torno a 10.

Por otro lado, las relaciones C/P y N/P tienen rango óptimo entre 75-150 y 5-20, respectivamente. [39]

1.5.2.2. *Tamaño de partícula*

Es favorable que este valor inicial sea lo menor posible, ya que su área específica (área partícula/volumen partícula) será mayor, lo que se traduce en una elevada velocidad de oxidación biológica, por lo que se facilitará la degradación microbiana. Por otra parte, si este valor es demasiado pequeño, habrá un menor espacio libre entre partículas, lo que consecuentemente hará que existan problemas para darse la convección natural ya que el oxígeno no podrá difundirse hacia el interior de la partícula ni el dióxido de carbono hacia el exterior. Los diámetros óptimos para estas partículas se encuentran entre 1 y 5 cm. [39,40] Al acabar el proceso, el 90% de las partículas deberán pasar por un tamiz de 2,5 cm de luz de malla para obtener un producto que pueda ser comercializado. [38]

1.5.2.3. *Conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica viene dada por la naturaleza y composición del material a compostar, es decir, por la composición en sales y los iones amonio y nitrato que se forman en el proceso.

Este valor aumenta durante el proceso ya que los nutrientes aumentan en la mineralización de materia orgánica, aunque si se diera una humectación excesiva del material, disminuiría. [39]

La conductividad eléctrica se mide sobre el compost final y el valor alcanzado suele oscilar entre 440 y 6.590 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el rango óptimo de entre 1.500 y 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Un exceso de salinidad afectaría a las propiedades agronómicas, dificultando la absorción de agua por las raíces de las plantas. [38]

Por otra parte, los parámetros agronómicos determinan la calidad, dividiéndose estos en físicos, biológicos y químicos:

- Calidad física: Densidad aparente, color, olor, humedad, granulometría, capacidad de retención de agua, contaminantes, autocalentamiento, pH y conductividad eléctrica.
- Calidad biológica: Patógenos, índice de germinación, respirometrías, mineralización y semillas de malas hierbas.
- Calidad química: Contenido en materia orgánica y nutrientes, los cuales vienen dados por las relaciones C/N y C/P y contenidos de otros elementos como potasio, calcio, sodio, carbonatos o metales pesados.

1.5.3. Sistemas de compostaje

Existen diferentes sistemas para llevar a cabo el compostaje, desde muy sencillos hasta muy complejos y automatizados. La elección del método de compostaje depende principalmente del volumen de residuos a tratar, del espacio disponible y del gasto de energía, entre otros.

El parámetro de seguimiento con más facilidad de manipulación en el compostaje es la aireación, el cual también es uno de los factores que más afecta al proceso, por lo que la diferencia entre los diferentes sistemas de compostaje suele deberse al método de control de este parámetro. En base a esto, los sistemas de compostaje se pueden dividir en abiertos y cerrados, siendo este último el más adecuado para tener una aireación controlada, a pesar de los mayores costes de operación. También se dividen en estáticos y dinámicos. [41] Según estas clasificaciones, los principales sistemas de compostaje se dividen en los que aparecen en la *Tabla 10*. [19]

	ESTÁTICOS	DINÁMICOS
Abiertos	-Pilas estáticas aireadas.	-Pilas dinámica aireada por volteo.
Cerrados	-Túneles de compostaje (reactores horizontales). -Reactores verticales discontinuos.	-Compostaje en nave cerrada con volteo automático. -Sistemas rotativos. -Reactores horizontales o verticales continuos (con movimiento del material).

Tabla 10. Principales sistemas de compostaje según sus características. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 5* se muestra la proporción del uso de los diferentes sistemas de compostaje en España, pudiéndose comprobar que casi la mitad de los procesos de compostaje se llevan a cabo mediante pilas dinámicas volteadas.

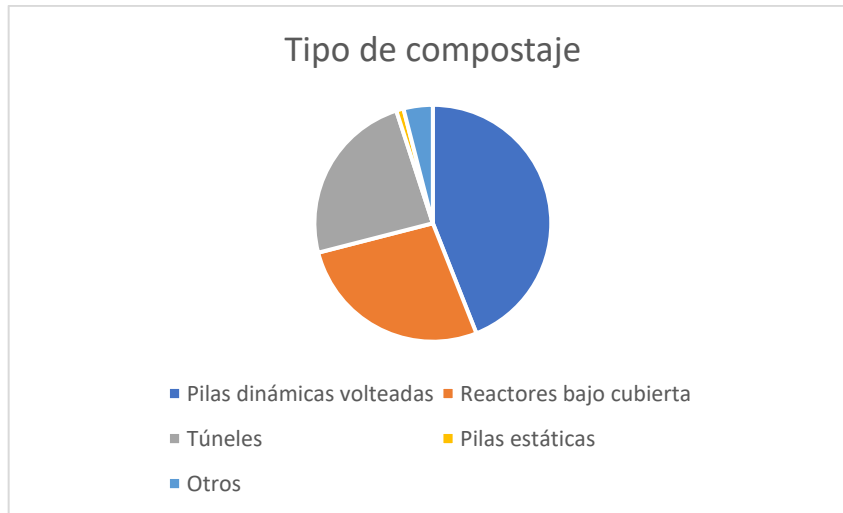


Figura 5. Proporción de las tecnologías utilizadas en el proceso de compostaje en España. FUENTE: Estudio de mercado de los compost urbanos en España. [42]

1.5.3.1. Pila estática aireada

Existen dos tipos de pilas aireadas, las estáticas y las dinámicas. En una pila estática aireada, el lodo a compostar se coloca en largas hileras con forma de pequeñas montañas, donde permanece inmóvil durante todo el proceso. Las hileras tienen las siguientes dimensiones aproximadamente:

- Entre 2,5 y 4 m de anchura.
- Entre 1,5 y 3 m de altura.
- Entre 5 y 15 m de longitud.

A dichas pilas se les suministra oxígeno por medio de unas tuberías perforadas colocadas en la parte inferior de la pila y completamente tapadas por ésta.

Generalmente, se suele colocar en la base un material poroso con un gran espacio libre entre partículas con el fin de evitar posibles obstrucciones y así mejorar la transferencia del aire hacia el material a compostar. Este material también puede absorber parte de la humedad del material a compostar. Debido a esto último, este sistema es muy utilizado para compostar materiales con una humedad alta, como es el caso de los lodos de depuradora. [43]

Un tipo específico de pila estática aireada muy común es la estabilización en trincheras, en la cual el material a compostar se coloca en una zona delimitada por muros, llamados trincheras, los cuales se encuentran en una nave en vez de al aire libre, con una parte diseñada para la entrada de dicho material y otro para la salida. Las trincheras se cargan con el material a compostar, generalmente de forma automatizada, y, cuando sea necesario, se llevan a cabo las aireaciones pertinentes mediante un sistema de volteo que puede estar automatizado o no, el cual, en el caso de estar automatizado, se mueve

a lo largo de la trinchera por la parte superior de los muros, volteando el compost para hacer que se oxigene. Esta ventilación se suele complementar con una aireación forzada por la parte inferior mediante sistemas de compresores.

Con este sistema de compostaje, se aumenta considerablemente la capacidad de tratamiento. [44]

1.5.3.2. Pila dinámica aireada por volteo

En las pilas dinámicas con aireación por volteo, al igual que en las pilas estáticas aireadas, las materias primas a compostar se colocan en hileras, pero en este caso la aireación se lleva a cabo mediante volteos mecánicos periódicos de este material. Al voltearlo, se mezcla el material en la altura y anchura de la hilera, pero no a lo largo de la longitud. El lodo deberá mantenerse 4 horas a 55 °C durante cada uno de los 3 volteos que deben darse. Tras esto, debe tener lugar una etapa de maduración [22], por lo que el proceso de compostaje puede llegar a finalizarse en tiempos de un mes o incluso semanas si se dispone de una buena aireación.

En el sistema de hilera de aireación forzada, la transferencia de oxígeno se acompaña por una aireación inducida por soplantes. [45]

Las hileras deben tener una altura entre 1,5 y 3 metros. Su anchura es función de la altura y suele estar comprendida entre 2,5 y 4 metros. Por otro lado, la longitud de ésta no tiene valores máximos ni mínimos, aunque suelen estar comprendidos entre 5 y 15 metros. [46] La separación entre las hileras depende principalmente del tipo de equipo utilizado para el volteo, ya que estos necesitan un mayor espacio.

1.5.3.3. Reactores horizontales continuos

Los reactores horizontales continuos son reactores en los que el material a compostar entra por un extremo y el sale por el extremo opuesto ya compostado. Por la parte inferior del reactor se suministra aire y se recogen los lixiviados y por la parte superior se evacúan los gases.

Los tiempos de residencia para este tipo de compostaje tienen una duración entre 15 y 28 días seguida de una posterior maduración en pilas aireadas que fluctúa en torno a 30 y 60 días.

Pese a su amplia utilización, hay una serie de problemas de los que depende su utilización a largo plazo, los cuales son la deficiente optimización del proceso y los altos costes de inversión y mantenimiento. Este último depende en gran parte del sistema de aireación utilizado.

La humedad es todavía más decisiva en este sistema de compostaje que en los otros ya que, al no existir volteo, si la masa se ve compactada por un exceso de agua, al oxígeno no le sería posible traspasar dicha barrera física. Tanto la

humedad como otros parámetros como la porosidad y la pérdida de presión, afectan al tipo de aireación, al caudal, a la concentración de oxígeno y a la recirculación, entre otros parámetros. Además, se ha demostrado que la aireación forzada en este tipo de compostaje es favorable. [36]

1.5.3.4. Túneles de compostaje

Los túneles de compostaje son reactores horizontales discontinuos de tipo estático, por lo que la pila no se mueve, que suelen estar contruidos de hormigón. Por encima del túnel existe un espacio en el que no se coloca material donde se implantan sistemas de rociado de agua y de captación de los gases producidos y, por otro lado, en la parte inferior hay un sistema de aireación.

Los túneles de compostaje se caracterizan principalmente por la existencia de una etapa de fermentación más rápida que en los sistemas explicados anteriormente, de aproximadamente 2 semanas, debida a una degradación de materia orgánica más rápida y completa. Además, se tiene un mejor control sobre las variables del proceso y un impacto ambiental menor debido a que con el túnel se consigue minimizar la producción de malos olores. En esta etapa, las principales variables a controlar son la humedad (mediante análisis discretos) y la temperatura y el oxígeno, mediante el control en continuo de la temperatura, la cual tendrá que estar en esta etapa entre 75 y 80 °C. El oxígeno se controla indirectamente a través de la temperatura, el cual deberá estar en torno al 10% en todos los puntos del túnel.

Una vez finalizada la etapa de fermentación, el material se traspassa a unas pilas estáticas, las cuales suelen estar resguardadas de la lluvia, donde tiene lugar la fase de maduración. Esta etapa tiene una duración comprendida entre 6 y 8 semanas. Dichas pilas no se suelen voltear y, en caso de que se voltearan, se haría las mínimas veces posibles.

Este sistema es muy versátil para casos como el de los lodos de depuradora. [47]

1.5.4. Compostaje de lodos de depuradora

El lodo de depuradora deshidratado tiene una humedad muy elevada, alrededor del 80%, lo que provoca una mala permeabilidad del aire durante el proceso de compostaje. Además, tiene una densidad demasiado alta y una relación C/N muy baja como para que se pueda llevar a cabo un compostaje de manera eficiente.

Todas estas características lo hacen inadecuado para su compostaje, por lo que este debe mezclarse con algún material que contrarreste dichas características, llamado agente estructurante, el cual además de modificar las

propiedades físicas de la materia prima, también modificará la cinética de biodegradación y el rendimiento del compostaje. [48] En este caso, dicho agente estructurante debe ser seco, rico en carbono y de baja densidad para poder ajustar la relación C/N, la densidad y la humedad en un rango apropiado para un compostaje óptimo. [49]

Se ha buscado en bibliografía información sobre los agentes estructurantes utilizados en el compostaje de fangos. Algunos de los agentes estructurantes que se mezclan más comúnmente con los lodos de depuradora son residuos de algodón, residuos de poda, residuos de troncos de palmera, paja de trigo, hoja plana, mazorca de maíz o tallo de girasol.

Las características de los agentes estructurantes usados en el compostaje de lodos se resumen en peso seco en la *Tabla 11*.

	A	P	TP	PT	HP	MM	TG
pH (1:10 sólido-agua)	7,33	6,88	6,84	6,67	6,45	5,16	6,69
Conductividad eléctrica (mS/cm)	4,45	5,84	7,04	1,98	1,54	3,08	0,20
Materia orgánica (%)	71,4	68,3	61,1	87,2	80	82,9	91,6
C total (%)	39,3	30,6	30,8	38,4	41,6	36,7	47,0
N total (%)	2,30	2,35	2,46	0,37	0,87	0,50	0,485
C/N	17,1	12,1	12,6	104	47,8	73,4	96,9

Tabla 11. Características en peso seco de los agentes estructurantes usados en el compostaje de lodos: Residuo de algodón (A), residuo de poda (P), residuos de troncos de palmera (TP), paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM), tallo de girasol (TG). [50,51]

Se ha estudiado el compostaje en biorreactores aeróbicos de la mezcla de lodos de depuradora con algunos de los agentes estructurantes (paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM) y tallo de girasol (TG)) cuyas propiedades aparecían en peso seco en la *Tabla 11*. Dichas mezclas contenían una relación lodo:agente estructurante en base húmeda de 3:2. Las propiedades de estas mezclas aparecen en la *Tabla 12*.

PARÁMETROS	LD + PT	LD + HP	LD + MM	LD + TG
pH	6,94	6,91	6,83	7,53
Humedad (%)	45,9	56,7	50,8	50,4
Materia orgánica (%)	80,5	72,8	77,0	81,0
N total (%)	1,05	1,38	1,20	0,99
C/N	42,4	29,2	35,7	45,6

Tabla 12. Características de las diferentes mezclas lodo de depuradora (LD)-agente estructurante 3:2 en base húmeda de los diferentes agentes estructurantes: paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM) y tallo de girasol (TG). [50]

El proceso de compostaje se llevó a cabo durante 21 días en biorreactores aeróbicos, los cuales son un tipo de sistema de compostaje cerrado y estático, en los cuales se produjo la aireación del material mediante soplantes. Una vez finalizó el proceso, se concluyó que, para esta relación de mezcla, los mejores agentes estructurantes fueron mazorca de maíz (MM) y tallo de girasol (TG), ya que las mezclas que los contenían alcanzaron las temperaturas necesarias para reducir los patógenos y ocasionaron una mayor pérdida de materia orgánica a causa de la mayor disminución de la relación C/N, como se puede ver en la *Tabla 13*.

	LD + PT	LD + HP	LD + MM	LD + TG
Pérdida de materia seca (%)	14,5	10,3	29,6	26,0
Pérdida de materia orgánica (%)	14,7	14,5	37,6	33,0

Tabla 13. Pérdida de materia seca y materia orgánica en las mezclas de lodo de depuradora (LD) con paja de trigo (PT), hoja plana (HP), mazorca de maíz (MM) y tallo de girasol (TG). [50]

La hoja plana y la paja de trigo no fueron muy eficientes, principalmente por la relación C/N inicial, la cual era demasiado elevada para llevar a cabo un compostaje óptimo, y también por no haber conseguido alcanzar los 55 °C necesarios para la reducción de los patógenos. [50]

En la bibliografía también se ha encontrado que, en el caso de la paja de trigo, añadiendo a mayores otro material para llevar a cabo un co-compostaje como puede ser el aserrín de madera, y estableciendo una relación entre la cantidad de lodo y de paja de trigo más adecuada, los resultados del proceso pueden

ser mucho más satisfactorios. Las características del aserrín de madera se muestran en la *Tabla 14*.

PARÁMETROS	VALOR	UNIDADES
Humedad	8,03	%
pH (1:5)	5,08	Adimensional
Materia orgánica	994,6	g/kg
Carbono total	1,20	g/kg
Nitrógeno total	1,80	g/kg
C/N	0,67	Adimensional

Tabla 14. Características del aserrín de madera. [52]

El uso de aserrín en el proceso de co-compostaje tiene las siguientes ventajas frente al compostaje de únicamente lodos de depuradora con paja:

- El nitrógeno del compost aumenta, por lo que se reduce la relación C/N.
- Se reduce considerablemente el tiempo de maduración.
- La fitotoxicidad aminora y el índice de germinación (IG) supera el 80%.
- El compost con aserrín es un poco más alcalino.

Las propiedades iniciales de una mezcla de lodo de depuradora con un 4,6% de paja (mezcla 1) y de una mezcla de lodos de depuradora con un 6,9% de paja y un 1,7% de aserrín de madera (mezcla 2), se comparan en la *Tabla 15*.

PARÁMETROS	MEZCLA 1 (LD + PC)	MEZCLA 2 (LD + PC + A)
Humedad (%)	65,03	62,13
pH	7,42	7,01
Conductividad eléctrica (mS/cm)	2,04	1,56
Materia orgánica (%)	78,06	81,35
C total (%)	43,36	45,19
N total (%)	1,72	1,83
C/N	25,26	24,73
P total (%)	1,39	1,54
K total (%)	0,92	0,82

Tabla 15. Características de la mezcla de lodo de depuradora y paja de cereal sin aserrín (mezcla 1: LD+PC) y con aserrín (mezcla 2: LD+PC+A). [53]

Se llevó a cabo el compostaje de ambas mezclas en pilas aireadas con forma trapezoidal de dimensiones 0,8 m de largo, 0,7 m de ancho y 1,3 m de alto, donde la mezcla estuvo cubierta con una película plástica con el fin de conservar la humedad. Las pilas se voltearon cada 4 días durante 3 meses para mantener el nivel adecuado de oxígeno y se humedecieron con agua.

Al finalizar el proceso de compostaje se obtuvo un compost con una relación C/N que había disminuido hasta 10,87 y 11,68 para las mezclas 1 y 2, respectivamente, lo que indica un alto grado de madurez. De igual forma, se superaron las temperaturas necesarias para la destrucción de patógenos, alcanzando unas temperaturas en la fase termófila en la mezcla 1 de 62, 64 y 60 °C para las partes superior media e inferior, respectivamente, las cuales se mantuvieron por encima de 50 °C durante 19 días. Por otro lado, la mezcla 2 alcanzó también altas temperaturas en esta fase (61, 62 y 60 °C para las partes superior media e inferior, respectivamente), las cuales se mantuvieron por encima de 50 °C dos días menos, debido a que la degradación de sustratos herbáceos (mezcla 1) es más rápida que la de leñosos (mezcla 2). En la fase de maduración estas temperaturas fueron reduciéndose hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Otro parámetro de interés es la humedad, la cual disminuyó progresivamente debido a la descomposición de materia orgánica, hasta 32,46% para la mezcla 1 y 31,06 para la 2, como se puede ver en la *Tabla 16*, lo que es indicio de estabilidad del compost ya que se encuentra alrededor de 30% en ambos compost.

Por otro lado, la conductividad eléctrica, aumentó en ambas mezclas desde 2,04 mS/cm en la mezcla 1 y 1,56 mS/cm en la mezcla 2 hasta unos valores máximos de 3,76 y 2,96 mS/cm, respectivamente, debido a la liberación de sales minerales por la degradación de materia orgánica. Posteriormente, a partir del día 10 disminuyeron de forma gradual debido a la volatilización del amoníaco y la precipitación de sales minerales, alcanzando valores constantes de 1,81 mS/cm a los 31 días y 1,32 mS/cm a los 46 días para los compost de las mezclas 1 y 2, respectivamente, como muestra la *Tabla 16*.

PARÁMETROS	MEZCLA 1 (LD + PC)	MEZCLA 2 (LD + PC + A)
Humedad (%)	32,46	31,06
pH	6,73	7,19
Conductividad eléctrica (mS/cm)	1,81	1,32
C total (%)	19,06	22,23
N total (%)	1,75	1,90
C/N	10,87	11,68
P total (%)	1,66	1,73
K total (%)	1,12	0,98

Tabla 16. Características del compost obtenido a partir de la mezcla de lodo de depuradora y paja de cereal sin aserrín (mezcla 1: LD+PC) y con aserrín (mezcla 2: LD+PC+A). [53]

Las cantidades de metales pesados durante el proceso de compostaje disminuyeron debido a la lixiviación como se muestra en la *Tabla 17*. La mezcla 2 tuvo una concentración inicial de metales pesados muy inferior a la mezcla 1, por el hecho de contener aserrín, pero la pérdida de estos fue significativamente mayor en la mezcla que no lo contenía (mezcla 1). Esto se debe a que el aserrín, al igual que el resto de agentes de carga leñosos, aumenta la capacidad de complejación de los ácidos húmicos, es decir que aumenta la capacidad de unión de los ácidos húmicos con metales pesados, lo que hace que se reduzca la movilidad y la biodisponibilidad de los metales tóxicos.

METAL PESADO	MEZCLA 1 INICIAL	COMPOST 1 FINAL	MEZCLA 2 INICIAL	COMPOST 2 FINAL
Mn	39,83	21,64	31,25	22,15
Fe	2.722,33	2.467,00	2.562,67	2.165,33
Zn	241,50	190,83	182,28	150,94
Cr	26,20	15,08	17,05	13,55
Cu	59,56	31,02	41,87	28,12
Pb	21,08	17,24	18,16	14,18
Ni	19,94	11,14	12,90	7,05
Cd	0,80	0,10	0,50	0,09

Tabla 17. Variación de la concentración de metales pesados antes del compostaje y después de 90 días para ambas mezclas en mg/kg. [53]

Del estudio se puede concluir que los resultados obtenidos del compost final no mostraron diferencias relevantes en la mayoría de parámetros menos en el pH y en nitrógeno total, las cuales hacen que el compost obtenido a partir de la mezcla 2 sea más favorable:

- En cuanto al nitrógeno total, la diferencia se debe principalmente a que las mezclas con residuos lignocelulósicos como el aserrín (mezcla 2) minimizan las pérdidas de nitrógeno durante el proceso de compostaje por lo que el contenido de nitrógeno total es más alto en el compost formado a partir de la mezcla 2. Esto se ve reflejado consecuentemente en la relación C/N.
- En cuanto al pH, el compost obtenido a partir de la segunda mezcla tiene un pH más alcalino como se puede ver en la *Tabla 16*, lo cual está relacionado con el mayor contenido en nitrógeno. [53]

2. OBJETIVOS

El objetivo global que persigue este trabajo es el diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos, en este caso de los lodos de una EDAR de una población rural de pequeño tamaño, con el fin de obtener fertilizantes de uso agrícola que podrían ser utilizados en el propio municipio. Con esta instalación se persigue un doble objetivo:

1. Evitar el uso agrario directo de los fangos de depuradora, tanto por la problemática que esto implica como por la normativa relacionada con su aplicación, la cual es cada vez más restrictiva.
2. Valorizar los residuos generados en una EDAR proponiendo una alternativa viable de valorización que aporte un valor añadido al municipio.

Para alcanzar este objetivo global, deben de alcanzarse ordenadamente los siguientes objetivos parciales:

1. Revisar las alternativas de valorización de los fangos de depuradora y seleccionar aquella que permita valorizar los fangos mediante su uso agrícola.
2. Analizar las diferentes alternativas de compostaje y seleccionar la más adecuada para el compostaje de fangos de una EDAR de un municipio pequeño situado en una zona rural.
3. Diseñar una instalación de compostaje en el municipio de Valencia de Don Juan cuya capacidad será seleccionada a partir de la producción diaria de los lodos obtenidos en la EDAR de dicho municipio.
4. Analizar la viabilidad de la planta diseñada tanto económicamente como ambientalmente.

3. BASES DE DISEÑO

3.1. Ubicación de la planta

La instalación de compostaje de lodos de depuradora se ha situado en el municipio de Valencia de Don Juan, el cual se muestra en la *Figura 6*, en la provincia de León (España) a partir del abastecimiento de lodos de la EDAR de este mismo municipio.



Figura 6. Ubicación del municipio de Valencia de Don Juan en la lejanía. [54]

La EDAR de Valencia de Don Juan, construida en el año 2.004 y ubicada en la provincia de León, ocupa el puesto 14 en Castilla y León en cuanto a capacidad de tratamiento y el 1.008 en España, con un caudal de entrada de 8.454 h.e. [55] A través de un alcantarillado de 3 kilómetros de longitud se transportan las aguas residuales captadas a la EDAR con el fin de tratarlas para que alcancen los límites establecidos por la normativa, devolviéndolas al río Esla posteriormente. [56] La ubicación de la EDAR dentro del municipio se muestra en la *Figura 7* y la composición del agua tratada en esta se muestra en la *Tabla 18*.



Figura 7. Ubicación de la EDAR de Valencia de Don Juan de donde proceden los lodos a compostar. [54]

PARÁMETROS	CONTAMINACIÓN MEDIA	UNIDADES
Sólidos en Suspensión	200	mg/L
DQO	800	mg O ₂ /L
DBO ₅	400	mg/L
NH ₄	89	mg/L
NKT	99	mg/L
P total	5	mg/L

Tabla 18. Contaminación media a tratar en la EDAR de Valencia de Don Juan. [57]

La línea de aguas de la EDAR de Valencia de Don Juan recibe un tratamiento fundamentado en un proceso biológico de aireación prolongada, en el cual se lleva a cabo la degradación de materia orgánica mediante aireación. Este tratamiento suele usarse en EDAR de poblaciones inferiores a 10.000 habitantes, como es el caso. Antes de finalizar el proceso se aplica un tratamiento terciario para la eliminación del nitrógeno. Por otra parte, en la línea de fangos se efectúa un tratamiento de deshidratación hasta alcanzar una sequedad en el fango en torno al 18-22%, el cual se almacenará en un contenedor con una capacidad de almacenamiento de 12 m³. [55,58]

Como ya se ha explicado, existe un factor que relaciona los habitantes equivalentes con la producción de fangos generados en la EDAR: se generan aproximadamente 0,2 kg en materia seca por habitante equivalente al día. Es decir, en el municipio de Valencia de Don Juan se producen alrededor de 617 toneladas de lodo en materia seca anualmente, lo que equivale a 1.691 kg diarios en materia seca. La composición de estos viene reflejada en la *Tabla 19*.

PARÁMETROS	VALOR	UNIDADES
Materia seca	16,40	%
Fósforo	21.800	mg P ₂ O ₅ /kg
Hierro	9.630	mg/kg
Magnesio	5.190	mg MgO/kg
Potasio	4.270	mg K ₂ O/kg
Calcio total	13.500	mg CaO/kg
Relación C/N	5,60	Adimensional
pH	6,99	Adimensional
Materia orgánica total	73,70	%
Nitrógeno dumas	6,53	%
Nitrógeno amoniacal	0,70	% N-NH ₄ ⁺
Humedad	78-82	%

Tabla 19. Composición de los fangos en base seca de la EDAR de Valencia de Don Juan. [58]

Por otro lado, la *Tabla 20* muestra la concentración de metales pesados en los lodos generados en dicha EDAR. Comparando estos valores con los de la *Tabla 6*, se podrá observar que los valores de metales pesados de los fangos de la EDAR de Valencia de Don Juan son inferiores al rango típico.

METAL PESADO	CONCENTRACIÓN (mg/kg)
Cadmio	0,50
Cobre	118,00
Cromo	60,10
Mercurio	0,26
Níquel	13,70
Plomo	36,80
Zinc	417,00

Tabla 20. Concentración de metales pesados en los lodos de la EDAR de Valencia de Don Juan en mg/kg. [58]

Respecto a la selección del terreno para poder llevar a cabo la construcción de la planta de compostaje se deberán tener en cuenta diversos factores, los cuales se muestran a continuación:

- El cumplimiento de una distancia de seguridad de 500 m a cualquier núcleo habitado, en este caso a Valencia de Don Juan y a San Millán de los Caballeros, evitando también la cercanía a lugares industrializados, con el fin de evitar malos olores.
- La existencia de vías de acceso a la planta para facilitar el acceso a los camiones de gran tonelaje.
- La lejanía del río Esla para evitar que sus aguas sean contaminadas.
- La selección de un terreno de baja permeabilidad.

En función de estos factores, se ha decidido ubicar la planta en la parcela 16 del polígono 414 (Membril) de Valencia de Don Juan (León), cuya referencia catastral es 24191414000160000HY. [59]

La parcela tiene una extensión de 18.540 m², con una forma rectangular, como se muestra en la *Figura 9*, de dimensiones 268,7 m de largo y 69 m de ancho, aunque la instalación por ahora solo ocupa una superficie de 11.833 m², estando los 6.707 m² restantes inhabilitados, previstos para su uso ante una posible futura expansión.

Como se puede ver en la *Figura 8*, esta parcela se encuentra ubicada de tal forma que cumple con las distancias legalmente permitidas para evitar la propagación de malos olores a lugares habitados y evitar contaminar las aguas del río:

- Está a más de 2 km del pueblo de Valencia de Don Juan.
- Se encuentra suficientemente alejada de todas las zonas industriales que rodean el municipio.
- La distancia al río Esla es ligeramente superior a 1 km.

Además, la planta se encuentra en las proximidades de la EDAR de donde proviene la materia prima (a aproximadamente 2 km), lo cual según el artículo 9 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, es conveniente, asegurando también la protección del medio ambiente. [60] Por otro lado esto abarataría los costes de transporte.

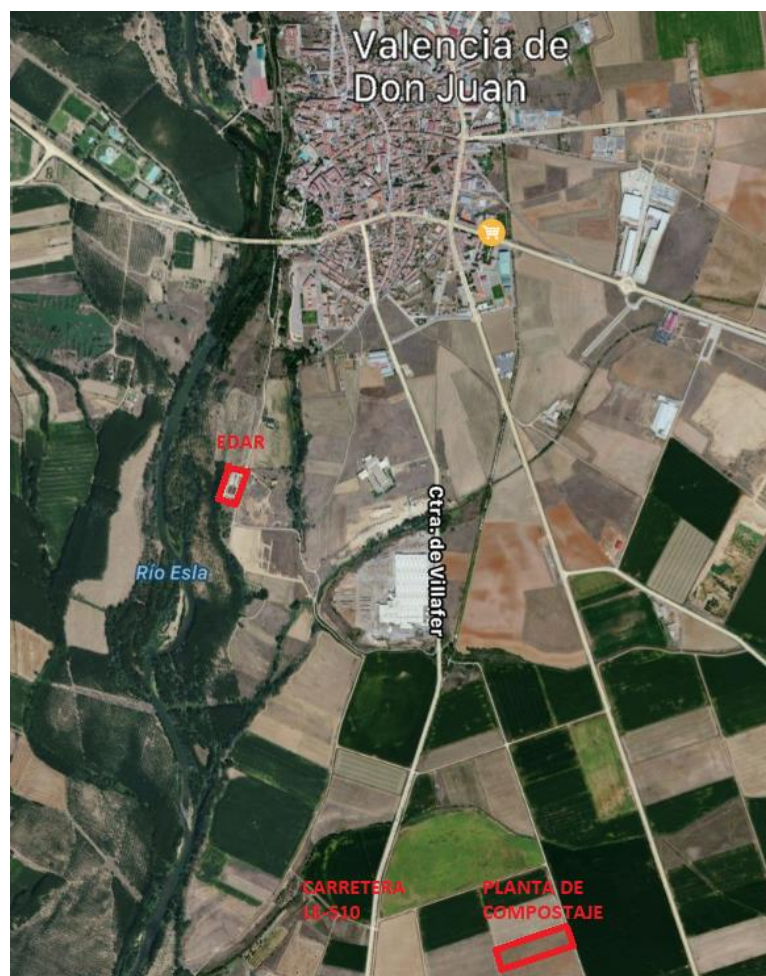


Figura 8. Ubicación de la planta de compostaje en el municipio. [54]

A la parcela se puede acceder fácilmente recorriendo pocos metros de un camino que se toma al desviarse de la carretera secundaria LE-510, como se muestra en la *Figura 9*, por el cual pueden circular fácilmente los camiones que transportan las materias primas a la planta.

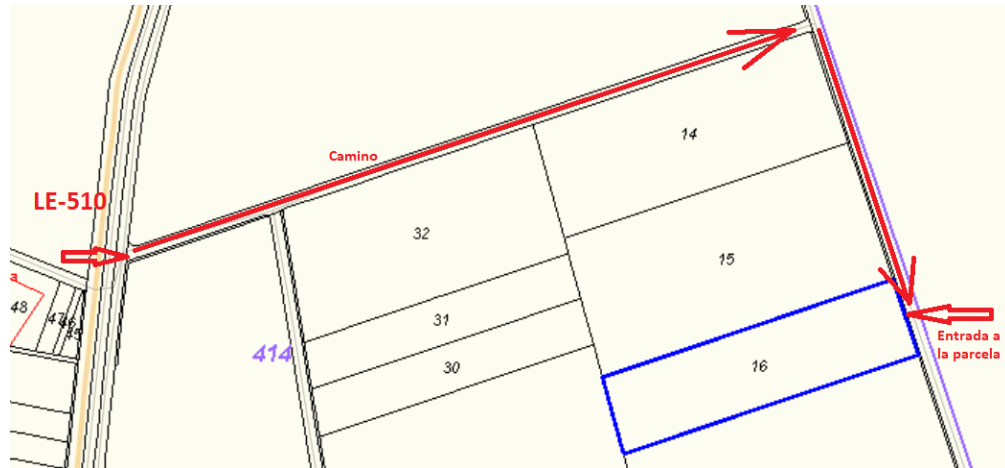


Figura 9. Parcela en la que se construye la estación de compostaje con el camino señalado para llegar a ella a partir de la carretera LE-510. [59]

Esta parcela se encontrará vallada perimetralmente con una verja de 2 metros de altura como mínimo y únicamente se podrá acceder a ella por las dos entradas que tiene:

- Una entrada pequeña para el personal que trabaje allí por donde se accede a los vestuarios.
- Una entrada grande por donde entran los camiones para abastecer la planta con las materias primas.

3.2. Selección de materias primas

El uso de paja de cereal como agente estructurante no solo mejora la madurez del compost, sino que también reduce las emisiones gaseosas durante el compostaje y aumenta las cantidades de nutrientes reutilizables que están presentes en el compost. Además, existe una gran producción de esta en la zona, lo cual es muy importante. [61]

Antiguamente, se mezclaba una pequeña cantidad de paja con el lodo por razones económicas pero esta práctica condujo a:

- Un alto nivel de humedad en el fondo de la pila y una característica demasiado pegajosa de la matriz. Esto derivó en una circulación de aire débil y en dificultades a la hora de manipular la mezcla inicial o el compost durante los primeros volteos.
- Una relación C/N baja al comienzo del compostaje, lo cual se traduce en la liberación de compuestos nitrogenados gaseosos.

Años más tarde, se descubrió que mezclando el lodo de depuradora y la paja en una relación correcta se conseguían relaciones C/N adecuadas,

desapareciendo los obstáculos anteriores, dando resultado a un proceso de compostaje óptimo. [32]

La paja de cereal es un residuo generado en la cosecha de los cereales. [62] En nuestro país se cosechan aproximadamente 18 millones de toneladas de cereales al año y, en torno al 40% de estos se producen en Castilla y León, aunque de unos años a otros la producción puede variar debido a las condiciones meteorológicas, la zona o el tipo de cereal. En la provincia de León se cosecha el 6,16% del trigo de Castilla y León, aproximadamente 0,3 millones de toneladas al año, dato aceptable para cubrir las necesidades de la planta de compostaje, ya que no se necesitarán cantidades excesivamente grandes debido a la capacidad de esta. Por otra parte, en caso de que fuera necesario, Valencia de don Juan se encuentra muy próxima a las provincias de Valladolid y Palencia, las cuales producen alrededor de 1,2 millones de toneladas anuales, ocupando el segundo puesto de producción de la Comunidad Autónoma.

Más concretamente, el 65% de los cereales cosechados en la provincia de León es trigo, ya que se dedica una gran superficie a su cosecha a este cereal. Por tanto, se dispondrá de una gran cantidad de paja de cereal para poder realizar el proceso de compostaje en Valencia de Don Juan.

La *Tabla 21* recoge los datos de la producción de cereales en la provincia de León en el año 2018. [63]

	SUPERFICIE (ha)	PRODUCCIÓN (t)	RENDIMIENTO (kg/ha)
Trigo	65.854	291.607	4.428
Cebada	19.778	72.012	3.641
Avena	19.140	58.029	3.032
Centeno	9.571	19.190	2.005
Triticale	2.115	4.641	2.194
TOTAL CEREALES	116.458	445.479	3.825

Tabla 21. Producción de cereales en la provincia de León en 2018. [63]

Las propiedades físicas y químicas de paja de cereal son muy similares entre todos los tipos de cereal existentes, pero, debido a la abundancia del trigo en la provincia, se ha elegido este como agente estructurante. Este material tiene una relación C/N cuyo valor oscila entre 100 y 150, con una media de 127, el porcentaje de nitrógeno se encuentra entre los valores 0,3 y 0,5 con una media de 0,4. [38] Por otra parte, la paja de trigo tiene una densidad media aproximada de 200 kg/m³, un pH alrededor de 6,5 y una humedad media de 8,3%, no sobrepasando nunca el 10%. [62]

A partir de los parámetros C/N y N de la *Tabla 22*, los cuales han sido obtenidos a partir de los parámetros ya comentados de la paja de trigo de la *Tabla 21* y de los valores de los lodos de la EDAR de Valencia de Don Juan de la *Tabla 19*, se calcula la relación que deberá existir entre las masas de ambas materias primas en base seca para que tenga lugar un compostaje óptimo.

PARÁMETROS (UNIDADES)	BASE EN LA QUE SE MIDE	LODO DE DEPURADORA	PAJA DE TRIGO
Relación C/N (adimensional)	Base seca	5,60	127
Nitrógeno (%)	Base seca	6,53	0,4
Materia orgánica (%)	Base seca	73,70	88
Humedad (%)	Base húmeda	79,50	8,3
pH (adimensional)	Base húmeda	6,99	6,5
Densidad (kg/m ³)	Base húmeda	1000	200

Tabla 22. Características de ambas materias primas. [38,58,62]

Para ello, primeramente, se debe calcular el valor del carbono mediante balances de materia al nitrógeno y al carbono a partir de los datos de la *Tabla 22*, para posteriormente imponer una relación C/N adecuada para este proceso.

- Balances de materia al lodo en base seca (MS):
 - o Balance de materia al carbono:

$$\begin{aligned}
 C \text{ en } 1 \text{ kg de lodo MS} &= 1 \text{ kg lodo MS} \cdot \frac{6,53 \text{ kg N}}{100 \text{ kg MS}} \cdot \frac{5,6 \text{ kg C}}{1 \text{ kg N}} \\
 &= 0,366 \frac{\text{kg C}}{\text{kg lodo MS}}
 \end{aligned}$$

- o Balance de materia al nitrógeno:

$$N \text{ en } 1 \text{ kg de lodo MS} = 1 \text{ kg lodo MS} \cdot \frac{6,53 \text{ kg N}}{100 \text{ kg MS}} = 0,0653 \frac{\text{kg N}}{\text{kg lodo MS}}$$

- Balance de materia a la paja en base seca (MS):
 - o Balance de materia al carbono:

$$\begin{aligned}
 C \text{ en } X \text{ kg de paja MS} &= X \text{ kg paja MS} \cdot \frac{0,4 \text{ kg N}}{100 \text{ kg MS}} \cdot \frac{127 \text{ kg C}}{1 \text{ kg N}} \\
 &= 0,508 \cdot X \frac{\text{kg C}}{\text{kg paja MS}}
 \end{aligned}$$

- Balance de materia al nitrógeno:

$$N \text{ en } X \text{ kg de paja MS} = X \text{ kg paja MS} \cdot \frac{0,4 \text{ kg N}}{100 \text{ kg MS}} = 0,004 \cdot X \frac{\text{kg N}}{\text{kg paja MS}}$$

Una vez que conocidos los datos de carbono de cada material, se calcula el carbono y nitrógeno total en la mezcla a partir de estos resultados obtenidos:

$$C \text{ total} = 0,36568 + 0,508 \cdot X$$

$$N \text{ total} = 0,0653 + 0,004 \cdot X$$

Se fija una relación C/N de 25, ya que es el valor óptimo obtenido a partir de los estudios bibliográficos ya explicados para este tipo de compostaje, como se mostró en la *Tabla 15*. A partir de este valor, se obtiene la relación entre la masa de lodo y de paja, calculando la cantidad de paja de trigo seca necesaria para 1 kg de lodo seco mediante balances de materia efectuados al nitrógeno y al carbono:

$$\frac{C}{N} = \frac{0,36568 + 0,508 \cdot X}{0,0653 + 0,004 \cdot X} = 25$$

Despejando en la ecuación anterior se obtiene que por cada kg de lodo en base seca que se mezcle se deberán emplear 3,105 kg de paja de trigo en base seca para que la relación C/N sea la fijada previamente y, por lo tanto, se pueda llevar a cabo, un compostaje en condiciones óptimas.

A partir de la relación obtenida lodo:paja en base seca (1:3,105), se calculará la relación en base húmeda, la cual será la que realmente haya que pesar ya que las materias primas tienen humedad. Esta relación se calculará a partir del balance de materia a las humedades de ambas materias, las cuales aparecen recogidas en la *Tabla 22*.

- Cálculo de la relación másica de la mezcla a partir del balance de materia a la humedad:

Primero se calculan las masas de cada una de las materias primas en base húmeda que contienen 1 kg de lodo en base seca y 3,105 kg de paja en base seca, respectivamente, a partir de sus humedades. Para ello hay que calcular la materia seca del lodo y de la paja con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Materia seca lodo}(\%) = 100 - \text{Humedad lodo}(\%)$$

$$\text{Materia seca paja}(\%) = 100 - \text{Humedad paja}(\%)$$

Sustituyendo las humedades de la *Tabla 22*, se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{Materia seca lodo}(\%) = 100 - 79,5\% = 20,5\%$$

$$\text{Materia seca paja}(\%) = 100 - 8,3\% = 91,7\%$$

A partir de ambos valores de materia seca, se conocen las masas de ambos materiales en base húmeda (MH):

$$\text{Masa de lodo MH} = 1 \text{ kg lodo MS} \cdot \frac{100 \text{ kg lodo MH}}{20,5 \text{ kg lodo MS}} = 4,878 \text{ kg lodo MH}$$

$$\begin{aligned} \text{Masa de paja MH} &= 3,105 \text{ kg paja MS} \cdot \frac{100 \text{ kg paja MH}}{91,7 \text{ kg paja MS}} \\ &= 3,386 \text{ kg paja MH} \end{aligned}$$

Por cada 4,878 kg de lodo en base húmeda en la mezcla tendrá que haber 3,386 kg de paja en base húmeda, eso equivale según las siguientes ecuaciones a una relación másica en base húmeda lodo:paja de 1:0,7 y paja:lodo de 1:1,44, lo que se aproxima a 1,5 kg de lodo por cada kg de paja.

$$\frac{m \text{ paja MH}}{\text{kg lodo MH}} = \text{lodo } 1 \text{ kg lodo MH} \cdot \frac{3,386 \text{ kg paja MH}}{4,878 \text{ kg lodo MH}} = 0,7 \text{ kg paja MH}$$

$$\frac{m \text{ lodo MH}}{\text{kg paja MH}} = \text{lodo } 1 \text{ kg paja MH} \cdot \frac{4,878 \text{ kg lodo MH}}{3,386 \text{ kg paja MH}} = 1,44 \text{ kg paja MH}$$

A partir de esta relación se calcularán el resto de valores de los parámetros relevantes para el proceso de compostaje, cuyos resultados aparecen recogidos en la *Tabla 23*.

- Materia orgánica de la mezcla calculada en base seca:

$$\text{Materia orgánica} = \frac{73,70 \cdot 1 + 88 \cdot 3,105}{1 + 3,105} = 84,52\%$$

- Humedad de la mezcla calculada en base húmeda:

$$\text{Humedad de la mezcla} = \frac{79,50 \cdot 1 + 8,3 \cdot 0,7}{1 + 0,7} = 50,18\%$$

- Densidad de la mezcla calculada en base húmeda:
Primero se calculan por separado los volúmenes ocupados por cada una de las masas de lodo y de paja en base húmeda en la relación pertinente en la mezcla asumiendo como base de cálculo 1 kg de lodo en base

seca a partir de sus correspondientes densidades, de la siguiente manera:

$$V_{\text{lodo MH}} = \frac{m_{\text{lodo MH}}}{d_{\text{lodo MH}}} = \frac{4,878 \text{ kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,004878 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{paja MH}} = \frac{m_{\text{paja MH}}}{d_{\text{paja MH}}} = \frac{3,386 \text{ kg}}{200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,01693 \text{ m}^3$$

A partir de los resultados obtenidos se calcula la densidad total de la mezcla, la cual corresponde al cociente entre la masa total en base húmeda y el volumen ocupada por esta, es decir, la suma de los volúmenes que se acaban de calcular.

$$\begin{aligned} \text{Densidad de la mezcla} &= \frac{4,878 \text{ kg} + 3,386 \text{ kg}}{0,004878 \text{ m}^3 + 0,01693 \text{ m}^3} \\ &= 378,945 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Finalmente, se obtiene que la densidad de la mezcla corresponde a aproximadamente 379 kg/m³.

PARÁMETROS (UNIDADES)	BASE EN LA QUE SE MIDE	LODO DE DEPURADO RA	PAJA DE TRIGO	MEZCLA A COMPOSTA R	RANG O TÍPICO	RANG O ÓPTIMO
Relación C/N (adim)	Seca	5,60	127	25	20-40	25-30
Materia orgánica (%)	Seca	73,70	88	84,5	>40	
Humedad (%)	Húmeda	79,50	8,3	50,18	40-65	50-60
Densidad (kg/m ³)	Húmeda	1000	200	378,9	550- 850	400- 700

Tabla 23. Parámetros de la mezcla a compostar (lodo:paja 1:0,7 en base húmeda o 1:3,105 en base seca) y rangos óptimos en los que sería favorable que este. [38,58,62]

Como se aprecia comparando los resultados obtenidos y los rangos típicos de los parámetros de una mezcla a compostar recogidos en la Tabla 23, todos los parámetros calculados tienen un valor aceptable para poder proceder a su compostaje.

3.3. Capacidad de tratamiento de la planta de compostaje

En el municipio de Valencia de don Juan se genera una cantidad de lodo diaria de 1.691 kg en base seca (MS). Para diseñar la capacidad que tendrá la planta de compostaje, se sobredimensionará un 10% la mezcla de esta cantidad de lodos junto con la de agente estructurante necesario, ambos en base húmeda (MH), debido a las posibles alteraciones en la producción y finalmente se redondeará el resultado.

$$\begin{aligned} \text{Masa de lodo MH} &= 1.691 \frac{\text{kg lodo MS}}{\text{día}} \cdot \frac{100 \text{ kg lodo MH}}{20,5 \text{ kg lodo MS}} \\ &= 8.248,8 \frac{\text{kg lodo MH}}{\text{día}} \end{aligned}$$

La relación másica de ambos materiales en base húmeda es de 1,5 kg lodo/kg paja. Por tanto, por cada 8.248,8 kg/día de lodo, se necesitan 5.774 kg/día de paja de cereal.

$$\begin{aligned} \text{Masa de paja MH} &= 8.248,8 \frac{\text{kg lodo MH}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ kg paja MH}}{1,5 \text{ kg lodo MH}} \\ &= 5.774 \frac{\text{kg paja MH}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Lo que implica que diariamente se composte en masa una mezcla de 14.022,8 kg en base húmeda.

$$\dot{m}_{\text{mezcla}} = \dot{m}_{\text{lodo}} + \dot{m}_{\text{trigo}} = 8.248,8 + 5.774 = 14.022,8 \frac{\text{kg mezcla MH}}{\text{día}}$$

Sobredimensionando dicha capacidad de tratamiento diaria con un 10% y redondeando se obtiene que la planta de compostaje a diseñar tendrá una capacidad de tratamiento de diseño de 15.425 kg en base húmeda al día.

Capacidad másica diseño = Factor seguridad · Producción diaria mezcla

$$\begin{aligned} \text{Capacidad másica diseño} &= 1,1 \cdot 14.022,8 \frac{\text{kg mezcla MH}}{\text{día}} \\ &= 15.425 \frac{\text{kg mezcla MH}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Dicha capacidad másica corresponde a una capacidad volumétrica de 40,7 m³ diarios.

$$\begin{aligned} \text{Capacidad volumétrica planta} &= \dot{V}_{\text{mezcla}} = \frac{\dot{m}_{\text{mezcla}}}{\rho_{\text{mezcla}}} \\ &= \frac{15.425 \frac{\text{kg mezcla MH}}{\text{día}}}{379 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 40,7 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \end{aligned}$$

Por otra parte, como se necesitan diariamente 6.351,4 kg de paja de cereal, se requerirá al día de aproximadamente 17 pacas.

$$\dot{m}_{cereal} = \text{Factor seguridad} \cdot \text{Producción diaria paja (MH)}$$

$$\dot{m}_{cereal} = 1,1 \cdot 5.774 \frac{\text{kg paja MH}}{\text{día}} = 6.351,4 \frac{\text{kg paja MH}}{\text{día}}$$

$$\frac{\text{Pacas}}{\text{día}} \text{ necesarias} = \frac{\dot{m}_{cereal}}{\text{Masa de una paca}} = \frac{6.351,4 \frac{\text{kg paja MH}}{\text{día}}}{378 \frac{\text{kg paja MH}}{\text{paca}}} = 16,8 \frac{\text{paca}}{\text{día}}$$

3.4. Selección del sistema de compostaje

Se han valorado los distintos tipos de sistemas de compostaje en función de diferentes criterios, tanto técnicos como económicos, para poder hacer una selección adecuada del sistema que se utilizará en la planta, los cuales se explican a continuación.

El compostaje en reactores, tanto horizontales como verticales, los cuales son sistemas de compostaje cerrados, tienen importantes ventajas, como por ejemplo las siguientes:

- Permite registrar, controlar y optimizar las variables, lo que mejora el control del proceso.
- Degradación más rápida y completa de la materia orgánica
- Menor impacto ambiental, ya que se tiene un mayor control sobre las emisiones de los malos olores.
- Permite reducir el tiempo de compostaje.
- Menor ocupación de terreno.

Pese a estas ventajas, debido a que el municipio de Valencia de Don Juan es de pequeño tamaño, se ha descartado el uso de estos sistemas debido a que es el sistema de compostaje con mayores costes de inversión y mantenimiento, por lo que no se rentabilizarían para una planta de compostaje de pequeño tamaño como esta.

Por lo tanto, debido a la capacidad de tratamiento de la planta y a la elevada disponibilidad del terreno por tratarse de una zona muy ruralizada, se considera más adecuado usar un sistema de compostaje abierto, los cuales presentan costes menores principalmente por estar poco tecnificados. Dentro de los sistemas abiertos existen algunas ventajas e inconvenientes en función de si dicho sistema es estático o dinámico:

- Sistemas dinámicos con aireación mediante volteadoras o palas mecánicas:

Pese al coste de las volteadoras, esta resulta la opción más económica y simple, en la cual existe una mayor homogeneización e higienización del producto final. Por ello es la opción más utilizada en plantas de pequeño tamaño, pese a que el proceso es más lento, las instalaciones requieren un mayor espacio, es más difícil el control de la temperatura y existe una mayor dispersión de olores. Una variante de este sistema, es el compostaje en trincheras, ya comentada anteriormente. Este se diferencia principalmente de las pilas aireadas dinámicas usuales en que suele darse en el interior de una nave, lo que protege al compost de las condiciones climatológicas adversas, ya que de no existir una cubierta que las proteja de la lluvia, los valores en la humedad variarán de forma no deseada en periodos lluviosos, lo cual es un inconveniente principalmente porque la calidad final del compost sería menor. El hecho de tener que montar una nave para una superficie tan grande encarecería considerablemente los costes por lo que simplemente se considerará una cubierta en las zonas de fermentación y maduración para que las condiciones meteorológicas no influyan en el desarrollo del proceso.

- Sistemas estáticos con aireación forzada:

La aplicación de esta tecnología es menos frecuente que la anterior, ya que, pese al ahorro económico relativo a la menor necesidad de mano de obra, existen unos gastos relativamente altos de aireación, además de que el resultado final no es suficientemente homogéneo, existiendo diferencias importantes entre el compost que se encuentra más próximo a las soplantes y el que se encuentra alejado de estas.

Como conclusión a estas consideraciones técnicas y económicas, las cuales aparecen resumidas en la *Tabla 24*, el sistema escogido ha sido el compostaje por pilas dinámicas aireadas por volteo bajo una cubierta, las cuales **se voltean una vez a la semana en la fase de fermentación y una vez al mes en la fase de maduración.** [64]

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Reactores horizontales o verticales (sistemas cerrados)	<ul style="list-style-type: none"> - Control de las variables del proceso. -Degradación rápida y completa de la materia orgánica. -Bajo impacto ambiental. -Menor tiempo de compostaje. -Menor ocupación de terreno. 	<ul style="list-style-type: none"> -Costes altos de inversión y mantenimiento.
Pilas dinámicas aireadas mediante palas (sistema abierto)	<ul style="list-style-type: none"> -Económico. -Simple. -Adecuado plantas de compostaje de pequeño tamaño. -Buena homogeneización Buena higienización. Adecuado para la elevada disponibilidad del terreno. Con cubierta: <ul style="list-style-type: none"> - Protección ante la lluvia. 	<ul style="list-style-type: none"> -Proceso lento. -Requiere gran superficie. -Difícil control de la temperatura. Mayor dispersión de olores.
Pilas estáticas con aireación forzada (sistema abierto)	<ul style="list-style-type: none"> Adecuado plantas de compostaje de pequeño tamaño. Adecuado para la elevada disponibilidad del terreno. 	<ul style="list-style-type: none"> Gastos de aireación. Mala homogeneización.

Tabla 24. Comparativa de los posibles sistemas de compostaje a utilizar en la planta. [58]

4. DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE COMPOSTAJE

En este apartado se llevará a cabo el dimensionado de la planta de compostaje, a partir de las bases de diseño previamente seleccionadas y bajo el conocimiento de las zonas de las que debe disponer y de la extensión de cada una de ellas. Además, también se elegirán los equipos necesarios para llevar a cabo la actividad en la planta de compostaje.

Según la Consejería de Fomento y Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, [46] los requisitos mínimos para poder llevar a cabo el compostaje en pilas dinámicas volteadas son los siguientes:

- Zona de recepción y/o de almacenamiento de los materiales: Puede constar de dos zonas distintas o de una sola que sea bifuncional. Dicha zona debe ser amplia, ya que en ella deberá circular un tractor con su respectiva pala o volteadora.
- Era de fermentación o compostaje: Deberá tener una solera hormigonada con una inclinación de en torno al 2% para la recogida de lixiviados en sus correspondientes balsas. En ella se colocan las pilas de compost, las cuales oscilan entre 1,5 y 3 metros de alto y 2,5 y 4 de ancho.
- Era de maduración: Lugar de la planta donde se realiza la maduración del compost, la cual no necesita estar prevista de muros laterales ni de solera hormigonada. Las zahorras deben soportar el tráfico de la maquinaria pesada que circule en esta zona.
- Balsas de decantación para la recogida y almacenamiento de lixiviados generados.
- Sistema de riego para las pilas.
- Oficina.
- Vestuarios y aseos.
- Estación meteorológica.
- Zona de postratamiento.

Todas estas zonas se encontrarán distribuidas en la parcela de la planta de compostaje como se muestra en la *Figura 10*, existiendo también un espacio sin utilizar reservado para las probables ampliaciones futuras.

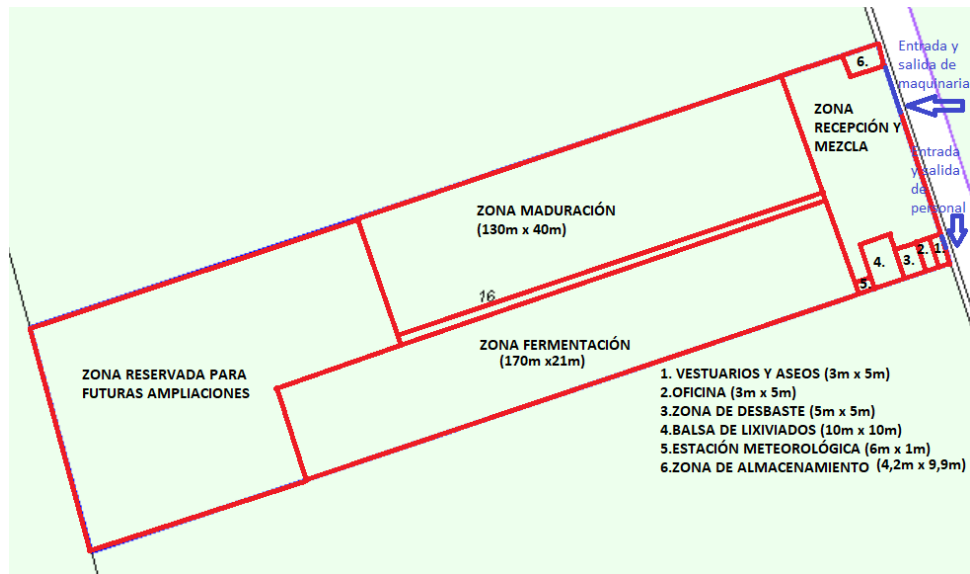


Figura 10. Distribución de las zonas en la parcela. Fuente: Elaboración propia.

4.1. Funcionamiento de la planta

La planta de compostaje estará en funcionamiento 24 horas al día los 7 días de la semana, no existiendo paradas técnicas de mantenimiento ya que no se han considerado estrictamente necesarias.

El personal contratado consta de dos personas a jornada completa que cumplen las funciones de operarios y de encargados simultáneamente, ya que se ocupan tanto de las funciones directamente relacionadas con el compost (preparación de las pilas o volteo, entre otras) como de la administración y el control. Entre sus obligaciones están las siguientes:

- Recibir el camión diario de los lodos procedentes de la EDAR y el camión de paja cada tres días, llevando el control de las cantidades que entran en la planta.
- Mezclar las materias primas y fabricar las pilas cada 5 días.
- Voltear las pilas una vez a la semana o una vez al mes en función de si están en la era de fermentación o la de maduración, respectivamente, mediante el tractor con pala.
- Mantener limpia la zona de recepción y mezcla mediante una manguera de agua presurizada.
- Proceder a la medición de los principales parámetros de control, tomando muestras de las pilas que se encuentren en distinta fase en los procesos tanto de fermentación como de maduración.
- Dedicarse en la oficina a la administración de los datos recogidos.
- Transportar el compost ya madurado a la fase de postratamiento para afinar el producto final.

4.2. Zona de recepción y mezcla de los materiales

Zona destinada a la descarga de los lodos procedentes de la EDAR y de la paja de cereal. Esta puede constar de dos partes diferenciadas o de una sola que cumpla las dos funciones, tanto recibir como mezclar los materiales. En este caso, por tratarse de una planta de pequeñas dimensiones, se tendrá una única zona en la que se llevarán a cabo ambas funciones.

Las tres operaciones que se dan en la fase de recepción de las materias primas son las siguientes:

- El pesaje de los materiales que llegan en una báscula para camiones.
- La identificación y el control de los mismos.
- El lavado de los camiones que transportan el lodo para no dejar restos de los lixiviados. Es recomendable hacerlo mediante equipos de agua presurizada con el fin de consumir menor volumen de esta y tener que almacenar una menor cantidad.

Una vez pesadas e identificadas las materias primas, se llevará a cabo la mezcla de ambas o, en caso de que no corresponda la preparación de una pila nueva ese día, se dará el almacenamiento de dichas materias primas que acaban de llegar a la planta, como se explicará en el apartado 4.3. *Zona de almacenamiento.*

En caso de que corresponda llevar a cabo el mezclado de ambas materias en la proporción adecuada para formar una nueva pila de compostaje, se deberá cortar la paja en fragmentos de menor tamaño.

Esta zona de recepción y mezcla, debido al drenaje de los lixiviados, deberá tener las siguientes características:

- Debe estar pavimentada con una solera impermeabilizada de hormigón, con el fin de evitar que los lixiviados se filtren en el suelo, ya que podrían llegar a contaminarlo y también las aguas subterráneas.
- La solera debe tener una ligera pendiente, de alrededor del 2%, para facilitar la recogida y almacenamiento de los lixiviados en las balsas correspondientes.

Estos lixiviados pueden provenir de:

- El drenaje natural del lodo que se está descargando o mezclando.
- El agua de lluvia que haya podido estar en contacto con los lodos, ya que esta superficie no está sotechada.
- El agua utilizada en el lavado del camión que los transporta previo a su regreso.

Esta zona de recepción y mezcla dispondrá de una superficie de aproximadamente el 20% de la superficie de las zonas de fermentación y

maduración, las cuales ocupan una superficie de 3.570 y 5.200 m², respectivamente, según los cálculos de los apartados 4.4. Zona de fermentación y 4.5. Zona de maduración, respectivamente. Este 20% equivale a una superficie total de esta zona de 1.750 m², como se mostró en la Figura 10.

$$\begin{aligned} \text{Superficie}_{\text{recepcción/mezcla}} &= 0,2 \cdot (\text{Superficie}_{\text{fermentación}} + \text{Superficie}_{\text{maduración}}) \\ &= 0,2 \cdot (3.570 + 5.200) = 1.754 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.3. Zona de almacenamiento

En cuanto al almacenamiento, se debe establecer un tiempo máximo para cada tipo de material:

- Los lodos, al estar formados por más de un 80% de residuos de alta degradabilidad preestabilizados, no deben tener largos periodos de almacenamiento, siendo preferible que sean tratados lo antes posible para que no se descompongan.

En la planta de compostaje se podrá formar una hilera a partir de los lodos generados en la EDAR en aproximadamente 5 días.

$$\begin{aligned} \text{Volumen}_{\text{pila}} &= \text{altura} \cdot \text{anchura} \cdot \text{longitud} = 3 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} \\ &= 180 \frac{\text{m}^3 \text{ mezcla}}{\text{pila}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Masa}_{\text{pila}} &= \text{Volumen}_{\text{pila}} \cdot \text{Densidad}_{\text{mezcla}} = 180 \frac{\text{m}^3}{\text{pila}} \cdot \frac{378,9 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \\ &= 68.202 \frac{\text{kg mezcla}}{\text{pila}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Días que se tarda en formar una pila} &= \frac{\text{Masa}_{\text{pila}}}{\text{Producción diaria}} \\ &= \frac{68.202 \frac{\text{kg mezcla}}{\text{pila}}}{14.022,8 \frac{\text{kg mezcla}}{\text{día}}} = 4,86 \frac{\text{días}}{\text{pila}} \sim 5 \frac{\text{días}}{\text{pila}} \end{aligned}$$

En la EDAR de Valencia de Don Juan de donde provienen dichos lodos, estos son almacenados en contenedores con un volumen de 12 m³ y el volumen diario generado de estos es de 8,2 m³ (ya que se producen 8.248,8 kg de lodo en materia húmeda al día). Al cabo de 5 días, se consiguen llenar 3,5 contenedores, es decir, cada 5 días se transportan 4 contenedores en camión desde la EDAR hasta la planta de compostaje.

$$\begin{aligned}
\text{Masa lodo en 5 días} &= 8.248,8 \frac{\text{kg lodo MH}}{\text{día}} \cdot 5 \text{ días} \\
&= 41.244 \text{ kg lodo} \\
\text{Volumen lodo en 5 días} &= \frac{41.244 \text{ kg lodo}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 41,244 \text{ m}^3 \\
\text{Contenedores} &= \frac{41,244 \text{ m}^3}{12 \frac{\text{m}^3}{\text{contenedor}}} \\
&= 3,5 \text{ contenedores} \sim 4 \text{ contenedores}
\end{aligned}$$

Los contenedores tienen unas dimensiones de 6 m de largo, 1 m de ancho y 2 m de altura, por lo que cada uno ocupa una superficie en el camión de 6m², ocupando una superficie total en el camión de 24 m².

$$\text{Superficie}_{1 \text{ contenedor}} = \text{Longitud} \cdot \text{Anchura} = 6 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}
\text{Superficie}_{\text{ocupada en el camión}} &= n^{\circ} \text{ contenedores} \cdot \text{Superficie}_{1 \text{ contenedor}} \\
&= 4 \text{ contenedores} \cdot 6 \text{ m}^2 = 24 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Pese a que la cantidad de lodo que llega a la planta en los contenedores es algo mayor que la necesitada para la formación de una pila, se usa la totalidad de lodo, formando así una pila de una longitud algo superior a la supuesta, lo cual no es ningún impedimento ya que la planta está sobredimensionada.

- Por el contrario, la paja no tendrá ningún impedimento para ser almacenada durante largos periodos, por lo que no será necesario el abastecimiento diario de esta.

Por otro lado, pese a que la paja podrá almacenarse durante largos periodos, se necesita equilibrar los costes del transporte con los del terreno, ya que cuanto más frecuentemente el camión lleve paja a la planta, más se encarecerán los costes de transporte, pero, por otro lado, cuanto menos frecuentemente lo haga, será necesario aumentar considerablemente tanto la superficie de almacenamiento como la superficie sotechada necesaria para poder resguardar el agente estructurante de las condiciones meteorológicas, lo cual encarecerá costes también.

Por tanto, se ha decidido fijar la capacidad de almacenamiento máxima de la paja en la equivalente a un 50% más de la prevista para la formación de una pila cada 5 días:

La paja utilizada en la formación de una pila será de 27.496 kg.

$$\begin{aligned} \text{Masa paja en 5 días} &= 41.244 \text{ kg lodo MH} \cdot \frac{1 \text{ kg paja MH}}{1,5 \text{ kg lodo MH}} \\ &= 27.496 \text{ kg paja MH} \end{aligned}$$

La paja almacenada será un 50% mayor que la necesaria, es decir de 41.244 kg.

$$\text{Masa paja almacenada} = 1,5 \cdot 27.496 \text{ kg paja MH} = 41.244 \text{ kg}$$

Esta se recibirá en las instalaciones en forma de pacas. Existen tres tipos habituales:

- Paca rectangular clásica: Tiene unas dimensiones de 80x40x40 centímetros, lo que hará más fácil su manipulación manual.
- Paca rectangular gigante: Sus dimensiones aproximadas son 90x100x210 centímetros y, debido a su elevado peso, necesitan ser manipuladas mediante maquinaria. Suponen un ahorro de tiempo de trabajo en la manipulación.
- Paca cilíndrica gigante o rotopaca: Están diseñadas para su colocación al aire libre para alimentar al ganado, principalmente. [65]

Debido a que se dispone de maquinaria para poderla manipular, se hará uso de la paca rectangular gigante. Cada una de ellas tendrá una masa de 378 kg.

$$\begin{aligned} \text{Volumen}_{1 \text{ paca}} &= \text{anchura} \cdot \text{altura} \cdot \text{largura} = 0,90 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m} \cdot 2,10 \text{ m} \\ &= 1,89 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Masa}_{1 \text{ paca}} = \text{Volumen}_{1 \text{ paca}} \cdot \text{Densidad} = 1,89 \text{ m}^3 \cdot 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 378 \text{ kg}$$

Como se ha comentado, en la zona de almacenado habrá simultáneamente 41.244 kg. Esto equivaldrá a 109 pacas.

$$\text{pacas almacenadas} = \frac{41.244 \text{ kg}}{378 \text{ kg/paca}} = 109,1 \sim 110 \text{ pacas}$$

Existen tres formas de apilar niveles, como se muestra en la *Figura 11*:

- Apilado en bloque.
- Apilado adosado.
- Apilado en isla.

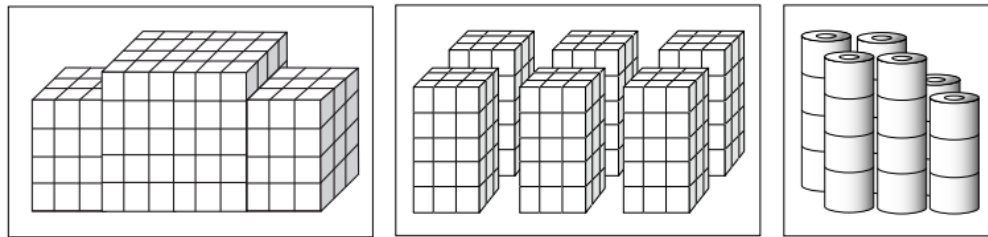


Figura 11. Formas de apilar niveles. De izquierda a derecha: En bloque, adosado y en isla. [66]

Entre estos tipos de apilado se ha elegido el apilado en bloque ya que tiene un nivel de riesgo frente a la inestabilidad similar al resto, pero la forma en la que aprovecha el espacio es más óptima. Por precaución, no se podrán almacenar más de 5 alturas de paquetes de paja apilados ya que comenzarían a ser inestables y se agravaría el riesgo de derrumbe. [66]

Por lo tanto, en la zona de almacenamiento, las 110 pacas coexistentes, se apilarán en 2 filas de 11 columnas cada una con una altura de 5 pacas.

$$\begin{aligned} \text{Longitud}_{\text{almacenamiento}} &= n^{\circ}\text{pacas longitud} \cdot \text{longitud paca} = 2 \cdot 2,1 \text{ m} \\ &= 4,2 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Anchura}_{\text{almacenamiento}} &= n^{\circ}\text{pacas anchura} \cdot \text{anchura paca} = 11 \cdot 0,9 \text{ m} \\ &= 9,9 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Superficie}_{\text{pacas}} = \text{Anchura} \cdot \text{Longitud} = 4,2 \text{ m} \cdot 9,9 \text{ m} = 41,6 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Superficie}_{\text{almacenamiento}} &= \text{Superficie}_{\text{pacas}} \cdot \text{Factor seguridad} \\ &= 41,58 \text{ m}^2 \cdot 1,15 = 47,8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sabiendo que las dimensiones de la paca son 0,9 m de ancho, 1 m de alto y 2,1 m de largo, estas ocuparán una superficie de 41,6 m², aunque la zona total de almacenamiento sotechada se sobredimensionará un 15%, por lo que la superficie total será de 48 m².

4.4. Zona de fermentación

Según la información recogida de la bibliografía acerca del compostaje de lodos de depuradora con paja de trigo en pilas aireadas por volteo, la etapa de fermentación tarda alrededor de 2 meses en finalizar, para posteriormente poder pasar a la fase de maduración. [67,68] A partir de este tiempo de fermentación y de la capacidad de tratamiento de la planta, se puede conocer el volumen de material a compostar que se encontrará simultáneamente en esta zona.

$$V_{mezcla \text{ en zona de compostaje}} = 40,7 \frac{m^3}{día} \cdot 60 \text{ días} = 2.442 m^3$$

Los 2.442 m³ de mezcla en la etapa de fermentación, se distribuirán en la era correspondiente formando pilas o hileras, las cuales podrán estar protegidas de los efectos climatológicos mediante una cubierta o no estarlo. En este proyecto se ha decidido instalar dicha cubierta de protección contra la lluvia por dos motivos relacionados entre sí:

- El proceso de fermentación podría verse interrumpido debido al aumento de humedad en las pilas debido a las lluvias, lo que hará que se acumulen los materiales a compostar a causa del retraso en la fermentación.
- Sería necesario aumentar un 15% dicha superficie para evitar los posibles retrasos ya comentados. Además de incrementarse los costes, habría una gran parte del terreno inutilizada en las épocas del año no lluviosas.

Además de la cubierta, otro elemento para proteger las pilas de la lluvia es la implantación de muros laterales con el fin de que las aguas de escorrentía no penetren hasta la zona donde se encuentran éstas.

Con el fin de optimizar espacio, las pilas serán rectangulares, lo cual no es aconsejable en caso de que se den lluvias abundantes, pero debido a la instalación del sotechado se podría utilizar esta configuración. Estas tendrán las máximas dimensiones posibles dentro de los rangos típicos ya indicados:

- Una longitud (L) de 15 m.
- Una altura (H) de 3 m.
- Una anchura (W) de 4 m.

Según estas dimensiones, cada hilera ocupará una superficie de 60 m² y un volumen de 180 m³.

$$Superficie_{1 \text{ hilera}} = L \cdot W = 15 \cdot 4 = 60 m^2$$

$$Volumen_{1 \text{ hilera}} = L \cdot H \cdot W = 15 \cdot 3 \cdot 4 = 180 m^3$$

A partir del volumen diario y del sobredimensionado del volumen obtenido de una hilera a partir de su multiplicación por un factor de carga de 2/3, se calcula el número de hileras que debe haber en la zona de compostaje simultáneamente.

$$V_{sobredimensionado}_{1 \text{ hilera}} = Factor \cdot V_{real}_{1 \text{ hilera}} = \frac{2}{3} \cdot 180 = 120 m^3$$

$$n^{\circ} \text{ hileras} = \frac{\dot{V}_{mezcla}}{V_{1 \text{ hilera}}} = \frac{2.442 m^3}{120 m^3} = 20,35$$

Redondeando, se obtiene un valor de 21 pilas simultáneamente en la era de compostaje. La superficie total ocupada por estas 21 pilas, sin tener en cuenta la superficie de separación entre ellas será de 1.860 m².

$$\begin{aligned} Superficie_{hileras\ totales} &= n^{\circ} hileras \cdot Superficie_{1\ hileras} = 21 \cdot 60m^2 \\ &= 1.260\ m^2 \end{aligned}$$

Para conocer la superficie total de la zona de compostaje será necesario considerar las distancias que deben existir entre pilas para que el tractor pueda proceder a voltearlas sin problemas de espacio. Dichas distancias son las siguientes:

- Entre las diferentes hileras es necesario que exista una distancia mínima de 4 m, la cual se abreviará en los cálculos como DM1.
 - Entre las hileras y los límites perimetrales de dicha zona debe haber una distancia mínima de 3 m, la cual se abreviará en los cálculos como DM2.
- [69]

Con estos datos se puede calcular el área total de la era de compostaje a partir del cálculo de la longitud y la anchura de esta. Se hará para dos propuestas de distribución y se valorará cuál es más adecuada: colocar todas las pilas de forma vertical en una misma fila una a continuación de otra o colocarlas del mismo modo, pero en dos filas distintas. Estas distribuciones se han representado en la *Figura 12* y en la *Figura 13*, respectivamente.

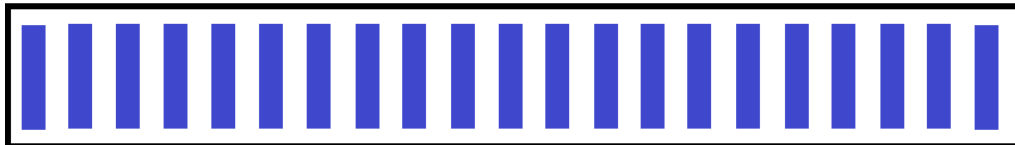


Figura 12. Distribución de las pilas en la hilera de fermentación según la propuesta 1. Fuente: Elaboración propia.

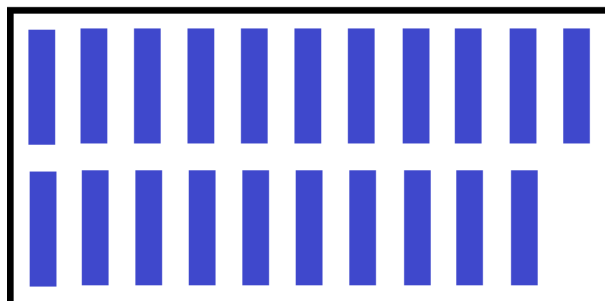


Figura 13. Distribución de las pilas en la hilera de fermentación según la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia.

- Primera propuesta de distribución: Colocación de las pilas en una misma fila, como se muestra en la *Figura 12*:

- o Longitud del área de fermentación:

$$\text{Longitud} = L + (2 \cdot DM2) = 15 + (2 \cdot 3) = 21 \text{ m}$$

- o Anchura del área de fermentación:

$$\begin{aligned} \text{Anchura} &= (n^{\circ}_{\text{hileras}} \cdot W) + (2 \cdot DM2) + ((n^{\circ}_{\text{hileras}} - 1) \cdot DM1) \\ &= (21 \cdot 4) + (2 \cdot 3) + ((21 - 1) \cdot 4) = 170 \text{ m} \end{aligned}$$

- o Área total de la era de fermentación:

$$\text{Superficie}_{\text{compostaje}} = \text{Longitud} \cdot \text{Anchura} = 21 \cdot 170 = 3.570 \text{ m}^2$$

- Segunda propuesta de distribución: Colocación de las pilas en dos filas, una de 11 hileras y otra de 10, calculándolo como si fueran dos de 11 y dejando una para una situación de emergencia, como se muestra en la *Figura 13*:

- o Longitud del área de fermentación:

$$\text{Longitud} = (2 \cdot L) + (2 \cdot DM2) + DM1 = (2 \cdot 15) + (2 \cdot 3) + 4 = 40 \text{ m}$$

- o Anchura del área de fermentación:

$$\begin{aligned} \text{Anchura} &= (n^{\circ}_{\text{hileras}} \cdot W) + (2 \cdot DM2) + ((n^{\circ}_{\text{hileras}} - 1) \cdot DM1) \\ &= (11 \cdot 4) + (2 \cdot 3) + ((11 - 1) \cdot 4) = 90 \text{ m} \end{aligned}$$

- o Área total de la era de compostaje:

$$\text{Superficie}_{\text{compostaje}} = \text{Longitud} \cdot \text{Anchura} = 40 \cdot 90 = 3.600 \text{ m}^2$$

Para la primera propuesta de distribución, el área total de compostaje sería de 3.570 m² y para la segunda de 3.600 m², existiendo una diferencia favorable hacia la primera de 30 m², por lo que se implementará esta.

Por tanto, la zona de fermentación tendrá un área total de 3.570 m² y se realizarán volteos periódicos de las pilas una vez a la semana.

4.5. Zona de maduración

Según los datos obtenidos a partir de la bibliografía, la duración óptima para la fase de maduración es de 3 meses. [67,68] En esta fase se llevan a cabo volteos periódicos menos frecuentes que en la etapa de fermentación, concretamente una vez al mes.

De forma análoga al cálculo de la superficie de fermentación, se calcula la superficie de maduración. En algunas ocasiones, en plantas de compostaje de pequeño tamaño, ambas zonas podrían coexistir, pero los costes se

encarecerían ya que la zona de maduración no está obligada a cumplir ciertos requisitos como los citados a continuación:

- No es necesario la solera hormigonada, bastará con zahorras compactadas, las cuales se forman a partir de áridos sin triturar o por suelos granulares. Las zahorras necesitarán resistir el paso de maquinaria pesada y será necesario que estas no produzcan zonas de encharcamientos.
- No es necesario que se construyan muros laterales.
- No se precisa un seguimiento tan exhaustivo de los parámetros de proceso.

Por lo que en esta planta se ha decidido su emplazamiento por separado para no encarecer costes.

El volumen de mezcla coexistente en la zona de maduración se calcula a partir del tiempo de maduración propuesto de 3 meses y de la capacidad volumétrica de la planta, la cual es de 40,7 m³ diarios de mezcla como se calculó en el apartado 3.3. *Capacidad de tratamiento de la planta de compostaje*, ya que se ha decidido contemplar la misma capacidad de tratamiento pese a que en la etapa de fermentación el volumen inicial se reducirá, con el fin de poder sobredimensionar. A partir de estos datos se obtiene un volumen de mezcla coexistente en la zona de maduración de 3.663 m³.

$$V_{mezcla \text{ en zona de maduración}} = 40,7 \frac{m^3}{día} \cdot 90 \text{ días} = 3.663 m^3$$

Este volumen de maduración se distribuye en la era destinada a esta etapa formando hileras rectangulares con las mismas dimensiones que las formadas en la zona de fermentación, las cuales también estarán cubiertas para que el proceso no se vea retrasado por las condiciones climatológicas y para no tener que recoger y almacenar una mayor cantidad de lixiviados.

Al tener las mismas dimensiones que las hileras de fermentación, su superficie y su volumen serán análogas a estas, 60 m² y 180 m³, respectivamente. Aunque se tomará el volumen sobredimensionado de 120 m³.

- Una longitud (L) de 15 m.
- Una altura (H) de 3 m.
- Una anchura (W) de 4 m.

$$Superficie_{1 \text{ hilera}} = L \cdot W = 15 \cdot 4 = 60 m^2$$

$$Volumen_{1\text{ hilera}} = Factor \cdot L \cdot H \cdot W = \frac{2}{3} \cdot 15 \cdot 3 \cdot 4 = 180 \text{ m}^3$$

$$V \text{ sobredimensionado}_{1\text{ hilera}} = Factor \cdot V \text{ real}_{1\text{ hilera}} = \frac{2}{3} \cdot 180 = 120 \text{ m}^3$$

Por tanto, al necesitarse un tiempo mayor para concluir esta etapa, el volumen de mezcla simultánea en la etapa de maduración será mayor que el que está fermentando, pudiéndose formar así un mayor número de pilas.

$$n^{\circ} \text{ hileras} = \frac{\dot{V}_{mezcla}}{V_{1\text{ hilera}}} = \frac{3.663 \text{ m}^3}{120 \text{ m}^3} = 30,5$$

Redondeando, se obtiene un valor de 31 pilas simultáneamente en la era de compostaje. Recordando las distancias que deben existir entre las pilas y entre una pila y los límites de la zona, tal y como se explicó en el apartado 4.4. *Zona de fermentación*, se calcula la superficie total de la zona de maduración, valorando dos opciones distintas de disposición de estas en el espacio: Colocar todas las pilas de forma vertical en una misma fila una a continuación de otra o colocarlas del mismo modo, pero en dos filas distintas tal y como se hizo con la zona de fermentación.



Figura 14. Distribución de las pilas en la hilera de maduración según la propuesta 1. Fuente: Elaboración propia.

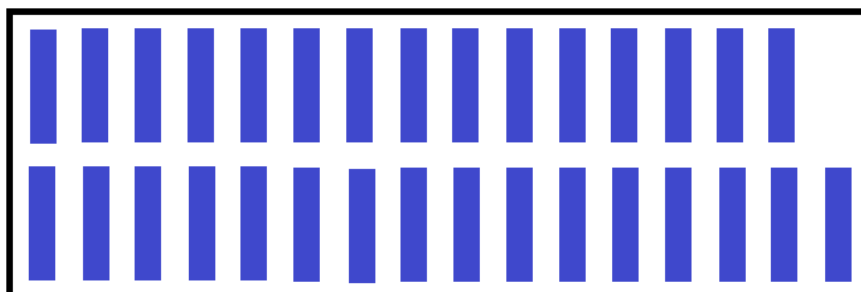


Figura 15. Distribución de las pilas en la hilera de maduración según la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia.

- Primera propuesta de distribución: Colocación de las pilas en una misma fila tal y como se muestra en la *Figura 14*:

- o Longitud del área de compostaje:

$$\text{Longitud} = L + (2 \cdot DM2) = 15 + (2 \cdot 3) = 21 \text{ m}$$

- o Anchura del área de compostaje:

$$\begin{aligned} \text{Anchura} &= (n^{\circ}_{\text{hileras}} \cdot W) + (2 \cdot DM2) + ((n^{\circ}_{\text{hileras}} - 1) \cdot DM1) \\ &= (31 \cdot 4) + (2 \cdot 3) + ((31 - 1) \cdot 4) = 250 \text{ m} \end{aligned}$$

- o Área total de la era de compostaje:

$$\text{Superficie}_{\text{compostaje}} = \text{Longitud} \cdot \text{Anchura} = 21 \cdot 250 = 5.250 \text{ m}^2$$

- Segunda propuesta de distribución: Colocación de las pilas en dos filas, una de 16 hileras y otra de 15, calculándolo como si fueran dos de 16 y dejando una para por si acaso, como se muestra en la *Figura 15*:

- o Longitud del área de compostaje:

$$\text{Longitud} = (2 \cdot L) + (2 \cdot DM2) + DM1 = (2 \cdot 15) + (2 \cdot 3) + 4 = 40 \text{ m}$$

- o Anchura del área de compostaje:

$$\begin{aligned} \text{Anchura} &= (n^{\circ}_{\text{hileras}} \cdot W) + (2 \cdot DM2) + ((n^{\circ}_{\text{hileras}} - 1) \cdot DM1) \\ &= (16 \cdot 4) + (2 \cdot 3) + ((16 - 1) \cdot 4) = 130 \text{ m} \end{aligned}$$

- o Área total de la era de compostaje:

$$\text{Superficie}_{\text{compostaje}} = \text{Longitud} \cdot \text{Anchura} = 40 \cdot 130 = 5.200 \text{ m}^2$$

Para la primera propuesta de distribución el área total de compostaje sería de 5.250 m² y para la segunda de 5.200 m², existiendo una diferencia favorable hacia la segunda propuesta de 50 m², por lo que se implementará esta última.

4.6. Recogida y almacenamiento de lixiviados

Los lixiviados formados son peligrosos por su absorción en el suelo, por eso se han impermeabilizado las zonas de fermentación y recepción y mezcla. Además, como ya se ha explicado, es obligatorio su recogida y almacenamiento. Para ello, los suelos de dichas zonas poseen una inclinación de entre el 2 y el 3% hacia la balsa de recogida de estos, donde se almacenan para posteriormente recircularlos en la humectación del material en la etapa de fermentación y, los sobrantes que no lleguen a utilizarse, enviarlos a una empresa externa para que puedan ser tratados. Mediante la recirculación de estos se consigue minimizar el impacto ambiental y la cantidad de lixiviados generados a tratar por la empresa externa. [70]

Según su procedencia, estos se dividen en dos grupos, aunque todos se llevan a la misma balsa:

- Por una parte, se encuentran los generados por drenaje natural del lodo, los cuales se producen en la etapa de fermentación y se pueden aproximar a un 5% del volumen a fermentar. [69]
- Por otra parte, se encuentran las aguas pluviales que han estado en contacto con el lodo durante el proceso de fermentación. Que existan o no depende principalmente de si las pilas están protegidas frente a las precipitaciones o no mediante una cubierta, una nave u otro elemento. En el caso de que no lo estuvieran, el volumen de estos lixiviados estaría directamente relacionado con el volumen de precipitación que se diera ese día, aunque la balsa de lixiviados se diseñaría para el máximo histórico diario de esa zona en concreto.

En esta planta de tratamiento, al disponer de una cubierta, simplemente se recogerán como lixiviado en torno a un 5% del volumen de los residuos en proceso, exceptuando las áreas que pueden tener restos de lodo y están sin cubierta, como las de recepción y mezcla.

En la zona de recepción y mezcla es obligatorio disponer de balsas para recoger y almacenar lixiviados formados. Además, al no poseer cubierta que proteja frente a las lluvias, habrá que considerar ambos factores, aunque el primero será despreciable frente al de las lluvias. Para ello, se ha investigado acerca de la precipitación máxima diaria registrada en la zona de Valencia de Don Juan, la cual es de 61 l/m². [71] Como la superficie de recepción y mezcla es de 1750 m², el caudal recogido en esa zona sería de 106.750 litros, lo que equivale a 160,75 m³.

Caudal recogido procedente de lluvias

$$\begin{aligned} &= \text{Precipitación máxima diaria} \cdot \text{Superficie} \frac{\text{recepción}}{\text{mezcla}} \\ &= 61 \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \cdot 1.750 \text{ m}^2 = 106.750 \text{ l} = 160,75 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

El volumen libre de seguridad debe ser 3 veces el caudal generado por la precipitación máxima absoluta, por lo que el volumen de la balsa, teniendo solo en cuenta las precipitaciones diarias, debería ser, por seguridad de 320,25 m³. [46]

$$\text{Volumen}_{\text{pluvial}} = 3 \cdot \text{Caudal recogido} = 3 \cdot 160,75 \text{ m}^3 = 320,25 \text{ m}^3$$

Por otra parte, pese a que el resto de zonas están protegidas de la lluvia mediante cubiertas, en la zona de fermentación habrá que considerar el 5% del

fango que hay en la mezcla a compostar como lixiviados formados, por lo que se generarán 0,412 m³ al día.

$$Volumen_{drenaje} = 8.248,8 \frac{kg \text{ lodo MH}}{día} \cdot \frac{m^3}{1.000 \text{ kg}} \cdot 0,05 = 0,412 \frac{m^3}{día}$$

Esta cantidad se sobredimensionará un 50%, por lo que se obtendrá un volumen de 0,62 m³.

$$Volumen_{drenaje \text{ sobredimensionado}} = 0,412 \frac{m^3}{día} \cdot 1,5 = 0,62 \frac{m^3}{día}$$

Pese a que este último volumen de lixiviados es despreciable frente al que proviene de la lluvia, se suman ambos valores, obteniendo una capacidad volumétrica de balsa de lixiviados de 320,87 m³.

$$\begin{aligned} Volumen_{balsa \text{ lixiviados}} &= Volumen_{pluvial} + Volumen_{drenaje} \\ &= 320,25 \frac{m^3}{día} + 0,62 \frac{m^3}{día} = 320,87 \frac{m^3}{día} \end{aligned}$$

Aunque, dependiendo de la temporada estival, el volumen cambiará considerablemente llegando a poder recogerse tan solo los 0,62 m³ diarios antes calculados los días que no llueva.

La balsa de lixiviados diseñada tendrá las siguientes dimensiones:

- Altura de 3,2 m.
- Anchura y largura de 10 m.

$$Volumen_{Balsa \text{ Lixiviados}} = 3,2 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 320 \text{ m}^3$$

La balsa de lixiviados ocupará una superficie cuadrada en la planta de 100 m².

$$Superficie_{Balsa \text{ Lixiviados}} = 10 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$$

Como ya se ha comentado, una parte de los lixiviados generados almacenados se recirculan para su uso en el riego posterior de las pilas, pese a que muchos autores insistan en que es perjudicial por la recirculación consecuente de metales pesados, pero en este caso, ya que el porcentaje de estos no variaría tanto como para que el fertilizante obtenido disminuyera de clase, como se explicará más adelante. Por otro lado, el resto de los lixiviados se llevan a un gestor especializado para que proceda al tratamiento de estos.

4.7. Vestuarios y aseos

Para entrar en la planta será obligatorio el paso por los vestuarios y aseos, con el fin de que los trabajadores estén vestidos con la ropa de trabajo en todo momento en el que estén en la planta. Por ello la única entrada destinada a personas existente a la planta está en los vestuarios.

Esta instalación está diseñada para el uso de las personas que trabajen en la planta, tanto de hombres como de mujeres, y tiene una superficie de 15 m².

$$Superficie_{Aseos\ y\ vestuarios} = 5\ m \cdot 3\ m = 15\ m^2$$

Las aguas grises generadas en los aseos desembocan en una fosa séptica.

4.8. Oficina

La oficina es un espacio construido para recoger la información relacionada con:

- El control de las materias primas que llegan a la planta y su cantidad exacta.
- El registro de los parámetros medidos a lo largo del proceso en las diferentes hileras.
- La cantidad de compost que abandona la planta.

En ella se disponen una mesa de trabajo con sillas alrededor para poder reunirse y de armarios en los que se guarda la información pertinente y un ordenador. Tiene una superficie de 15 m².

$$Superficie_{oficina} = 5\ m \cdot 3\ m = 15\ m^2$$

ZONA	MEDIDAS (m x m)	SUPERFICIE (m ²)
Recepción y mezcla	Irregular	1.754
Almacenamiento	4,5 x 10,7	48
Fermentación	21 x 170	3.570
Maduración	40 x 130	5.200
Balsa de lixiviados	10 x 10	100
Vestuarios y aseos	3 x 5	15
Oficina	3 x 5	15
Espacios inútiles o caminos entre zonas	Irregular	1.1131
Futuras ampliaciones	Irregular	6.707
PARCELA ACTUALMENTE EN FUNCIONAMIENTO	Irregular	11.833
PARCELA COMPLETA	268,7 x 69	18.540

Tabla 25. Superficies de cada una de las zonas existentes en la planta. Fuente: Elaboración propia.

4.9. Maquinaria del proceso

Se contemplan tres opciones para la aireación del material de las pilas, es decir, tres opciones de volteo, que se describen a continuación. [72]

- Una pala mecánica:

Esta pala consta de una placa constituida por placas de acero y dos brazos articulados, uno conectado a la pala y otro al tractor que la sostiene, como se muestra en la *Figura 16*. En este caso, la forma de voltear el compost es perpendicular a la pila, elevando su compost y dejándolo caer para conseguir una mejor oxigenación. Además del volteo del compost, también forma la pila inicialmente, por lo que solo sería necesario un equipo para ambos procesos y se abarataría considerablemente el costo. Por otro lado, también existen más ventajas como su escasa necesidad de mantenimiento y la posibilidad de formación y volteo de diversos tamaños de pilas.



Figura 16. Pala mecánica. [72]

- La volteadora de compost:

La volteadora de compost consiste en una estructura metálica soportada por un eje con ruedas en la parte trasera de la estructura que se conecta a un tractor mediante un enganche, como se muestra en la *Figura 17*. Cuando el tractor avanza, lo hace consecuentemente la volteadora, la cual va moviendo el material impulsándolo hacia arriba y hacia atrás gracias al rotor que posee, por lo que este se va apilando en la parte trasera, consiguiendo su volteo total con un solo paso del tractor. Pese a sus ventajas, como su eficiencia, su rapidez y la facilidad con que volteo las pilas, las dimensiones de las volteadoras suelen ser bastante menores que las de las pilas de esta planta, siendo lo común 3 m de ancho y 1,5 de alto. En el caso de elegir esta opción, se necesitaría también otro elemento para la formación inicial de la pila, por lo que los costes ascenderían.

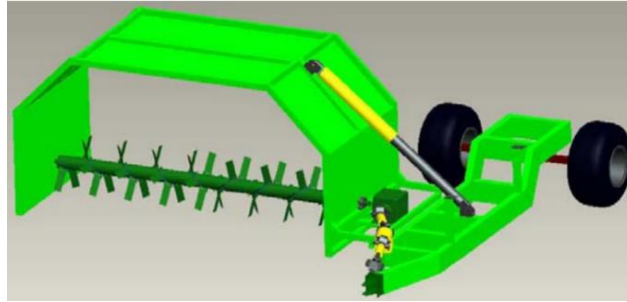


Figura 17. Volteadora de compost. [72]

- Elevadora de compost:

Consiste en una cinta transportadora de metal con paletas que pueden elevar el material en todo su ancho, como se muestra en la *Figura 18*. Esta cinta va montada sobre ruedas, las cuales la transmiten la potencia y la velocidad necesaria.

Para proceder al volteo, una vez ajustada la altura de la máquina, el tractor se coloca paralelo a la pila y se mueva lentamente. Mientras el compost se elevará de manera que, tras ascender por la cinta, cae nuevamente al suelo en la parte posterior oxigenándose y perdiendo calor. El proceso finaliza una vez que todo el compost atraviesa la pila.

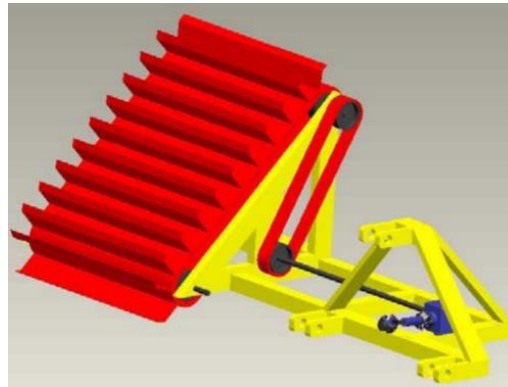


Figura 18. Elevadora de compost. [72]

Entre las tres opciones dadas, la elegida es la pala mecánica, ya que es la única que no precisaría de la adquisición a mayores de otro equipo para mezclar el material y porque puede trabajar con el tamaño de pila de la planta.

Esta opción necesita de un tractor, al igual que las demás. En este caso, como se muestra en la *Figura 19*, se ha elegido un tractor New Holland modelo T4 110 LP, cuyas características se adjuntan en el *Anexo I*. [73]



Figura 19. Tractor New Holland T4 110 LP Cab. [74]

4.10. Postratamiento

En los fertilizantes obtenidos a partir de sustratos orgánicos, como es el caso, el 90% debe pasar por una malla de 10 mm, según se indica en el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. [21] Para conseguirlo, se lleva a cabo un postratamiento del compost madurado consistente en introducirlo en una criba trómel similar a la que se muestra en la *Figura 20*. Un trómel es un tambor rotatorio inclinado perforado que hace que el rechazo (los materiales más gruesos que la luz de malla) permanezcan en el interior mientras que el producto deseado (las partículas más finas con un tamaño de 10 mm o menor) atraviesan la superficie de cribado y se recogen. [72] Con otras luces de malla de diferentes tamaños se puede separar el rechazo en aprovechable y no aprovechable. En caso de serlo, se triturará y se podrá introducir de nuevo en la criba trómel. [75]

La alternativa elegida para este proyecto es la criba Joker de la marca Komptech, cuyas características principales se pueden ver en el *Anexo II*.



Figura 20. Criba de trómel. [72]

Esta zona de postratamiento dispondrá de un área cuadrangular de 25 m².

4.11. Equipos para el control del proceso

Como se ha indicado en el apartado 1.5.1. *Parámetros de seguimiento del proceso*, durante el proceso de compostaje se deben controlar ciertos parámetros como la humedad o la temperatura, por ese motivo será necesario adquirir ciertos equipos para poder medirlos.

- Sonda de humedad:

Diariamente se medirá la humedad en las pilas mediante estas sondas.

- Sonda de temperatura:

Diariamente se medirá la temperatura y, consecuentemente, el oxígeno, por estar este directamente relacionado, mediante estas sondas.

- Laboratorio externo a la planta:

Al laboratorio se llevarán diversas muestras de compost para medir su relación C/N y comprobar que es la adecuada:

- Muestras de mezcla al inicio del proceso de compostaje para comprobar que su relación C/N inicial es la correcta.
- Muestras de las pilas de fermentación y maduración para hacer un seguimiento periódico de dicha relación.
- Muestras del compost que finaliza el proceso para hacer un seguimiento de su calidad.

En el laboratorio también se llevarán muestras de las pilas para conocer su contenido en materia orgánica.

4.12. Construcciones en las distintas zonas de la planta

Habrá que construir ciertas estructuras en la planta de compostaje. Para ello hay que tener en cuenta las dimensiones de cada una de las zonas donde se debe hacer las obras pertinentes. Dichas superficies se recogieron en la *Tabla 25*.

Se debe construir:

- Una cubierta para las zonas de fermentación, maduración y almacenamiento, con un total de 9.471,7 m².

$$\begin{aligned} \text{Superficie}_{\text{Cubierta}} &= \text{Superficie}_{\text{Fermentación}} + \text{Superficie}_{\text{Maduración}} \\ &+ \text{Superficie}_{\text{Almacenamiento}} \\ &= 3.570 \text{ m}^2 + 5.200 \text{ m}^2 + 41,6 \text{ m}^2 = 8.811,6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Una solera impermeable de hormigón en las zonas de fermentación y de recepción y mezcla de 6.004 m².

$$\begin{aligned} \text{Superficie}_{\text{solera impermeable hormigón}} &= \text{Superficie}_{\text{Fermentación}} + \text{Superficie}_{\text{Recepción/Mezcla}} \\ &= 3.570 \text{ m}^2 + 1.754 \text{ m}^2 = 5.324 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Un pavimento de zahorra en la zona de maduración de 5.200 m².
- Unos muros laterales que rodeen la zona de fermentación de 387,5 m de longitud ya que dicha zona tiene unas dimensiones de 25 m x 170 m pero se deja una zona de 2,5 m sin muro para la entrada del tractor con pala volteadora.

$$\begin{aligned} \text{Longitud}_{\text{muros laterales}} &= (2 \cdot \text{Longitud}_{\text{Fermentación}}) \\ &+ (2 \cdot \text{Anchura}_{\text{Fermentación}}) - \text{Entrada tractor} \\ &= (2 \cdot 170 \text{ m}) + (2 \cdot 25 \text{ m}) - 2,5 \text{ m} = 387,5 \text{ m} \end{aligned}$$

4.13. Producto final obtenido

Al finalizar la última etapa del proceso de compostaje, se habrá obtenido un fertilizante orgánico que deberá cumplir los criterios impuestos a estos productos según la normativa: [21]

- Un porcentaje de nitrógeno orgánico inferior al 85%.
- Una humedad máxima del 14% en masa.
- Una granulometría alcanzada con el postratamiento en la que el 90% del producto pase por una malla de 10 mm.
- Un producto higienizado que no supera los contenidos máximos de microorganismos patógenos permitidos.
- Unas concentraciones de metales pesados inferiores a los máximos permitidos, los cuales se explicarán a continuación.

Los fertilizantes se clasifican en función de la cantidad de metales pesados que contienen dentro de los límites permitidos. Respecto a estos valores, el fertilizante tendrá un valor económico diferente, ya que la cantidad del fertilizante que se permite adicionar al suelo es variable en función de su clasificación, la cual cataloga a los fertilizantes en tipo A, tipo B y tipo C, entre los cuales hay una diferencia económica considerable.

METAL PESADO	VALORES CLASE A	VALORES CLASE B	VALORES CLASE C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo	70	250	300

Tabla 26. Valores límite en la concentración de metales pesados en las distintas clases de fertilizantes expresados en mg/kg MS. Fuente: BOE. [21]

- Fertilizante tipo A: Los valores de todos los metales pesados son iguales o inferiores a los mostrados en la primera columna de la *Tabla 26* (Valores Clase A). Es el fertilizante de mayor calidad ya que es el que menos metales pesados añade al suelo, por lo que su precio supera al de los otros dos, rondando los 0,42 €/kg.
- Fertilizante tipo B: Los valores de todos los metales pesados son iguales o inferiores a los mostrados en la *Tabla 26*. Es considerado un fertilizante de calidad media, su precio oscila en torno a 0,21 €/kg. [76]
- Fertilizante tipo C: Los valores de todos los metales pesados están comprendidos entre los de la clase anterior y los máximos permitidos para la producción de fertilizantes. Es considerado un fertilizante de calidad baja, por lo que posee el precio más bajo de los tres, de aproximadamente 0,14 €/kg. [21,77]

Se prevé que el fertilizante obtenido en esta planta de compostaje sea de tipo B ya que el proceso de compostaje se realiza a partir de los lodos generados en la EDAR de Valencia de Don Juan cuya composición en metales pesados ha sido recogida en la *Tabla 20*. Como se puede comprobar comparando ésta con la *Tabla 26* (valores límites para cada tipo de fertilizante), ninguna de las concentraciones de metales excede los valores límite exigidos para un fertilizante de la clase B. Además, durante el proceso de compostaje, debido al drenaje de lixiviados, las concentraciones de metales pesados en el compost disminuyen considerablemente, como se puede ver en los datos recogidos en la *Tabla 17* que recopila datos de bibliografía. En dicha tabla se puede observar la composición de los metales pesados en los lodos de depuradora antes de comenzar el proceso de compostaje y en el compost obtenido finalmente y se puede apreciar que la diferencia es muy significativa.

Debido a esto, se concluye que el fertilizante no será de tipo C y que, pese a la disminución del contenido en metales pesados durante el compostaje debido al drenaje de lixiviados, los valores de estos se encuentran relativamente lejos

de poder alcanzar los valores del fertilizante tipo A. Por tanto, como ya se ha dicho, este fertilizante será de clase B.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL

5.1. Evaluación económica

En este apartado se ha realizado una evaluación económica de la planta de compostaje en la que se recogen todos los costes de la planta, tanto la inversión inicial, es decir, el dinero invertido para su construcción, como los ingresos obtenidos a partir de la venta del producto y los costes de las materias primas utilizadas. A partir de estos costes se lleva a cabo una evaluación de la rentabilidad de la planta de compostaje y un análisis de sensibilidad mediante el cual se evalúa la rentabilidad frente a posibles variaciones de los precios en el mercado tanto de las materias primas como del producto obtenido.

5.1.1. Costes de la planta

Los costes iniciales de la planta deberán considerar la adquisición del terreno, la obra civil que hay que realizar sobre el mismo y la adquisición de la maquinaria necesaria para llevar a cabo los trabajos de compostaje. Los costes estimados son los siguientes:

- El terreno de la parcela:

Este tiene 18.540 m², valorado en 103.594 € por la zona. [78]

- Las cubiertas:

En las zonas de fermentación, maduración y almacenamiento se instalan cubiertas para la protección ante la lluvia, las cuales están fabricadas todas de acero y ocupan una superficie de 8.811,6 m². Por lo que su valoración económica asciende a una cantidad de 227.320 €.

- La solera de hormigón:

La zona de fermentación y de recepción y mezcla tiene una superficie de 5.324 m². Poner una solera de hormigón armado tiene un coste aproximado de 19 €/m², por lo que tendrá un coste total de 101.156 €.

- La impermeabilización de dicha solera de hormigón:

Impermeabilizar tiene un coste aproximado de 10 €/m². [79] Considerando este precio impermeabilizar estas zonas tendrá un coste de 53.240 €.

- La zavorra:

El precio de la zavorra tiene un coste comprendido entre 8,89 y 14,52 €/m². Se considerará un coste de 9 €. Por lo que los 5.200 m² de la era de maduración implicarán un coste de 46.800 €. [80]

- Los muros laterales:

En la era de fermentación se dispondrá de 387,5 m de longitud de muros laterales. El metro de muro de contención en masa de 1,5 m de altura tiene un coste de 40 €, por lo que todo el conjunto ascenderá a 15.500 €.

- La balsa de lixiviados tiene un precio de 200 €.
- La trituradora está valorada en 1.500 €
- La pala volteadora tiene un valor de 2.000 €.
- El tractor:

El tractor que guía dicha pala volteadora New Holland T4 110 LP Cab está valorado en 47.107 €. [73]

- El trómel está valorado en 9.000 €.
- Las sondas de medida de la temperatura:

Se dispondrá de 3 sondas y cada una tendrá un coste de 200 €, por lo que estas tendrán un coste total de 600 €.

- La estación meteorológica tiene un precio de 200 €.
- La báscula puente metálica para el pesaje de camiones tiene un coste de 6.000 €.
- La manguera de agua presurizada tiene un precio de 300 €.
- La verja que cubre la planta:

Es una malla simple de torsión de 2 m de altura, cuyo precio oscila en torno a 3,50 € por cada metro de largura, por lo que al tener un perímetro de verja de 675,4 m el precio total asciende a 2.333,90 €. [81]

$$\begin{aligned} \text{Perímetro}_{\text{parcela}} &= (2 \cdot \text{longitud}) + (2 \cdot \text{anchura}) \\ &= (2 \cdot 268,7 \text{ m}) + (2 \cdot 69 \text{ m}) = 675,4 \text{ m} \end{aligned}$$

- Los aseos, los vestuarios y las oficinas:

Se ha considerado que la construcción de los aseos, vestuarios y oficinas supondrán el 5% de los costes totales, lo que equivale a 30.844 €.

- El diseño de la planta:

Se ha considerado que el diseño de la planta y los costes asociados a la ingeniería suponen un 3% del coste total de la planta, siendo este aproximadamente de 18.506 €.

Sumando todos estos costes, los cuales se encuentran recogidos en la *Tabla 27*, se determina que la inversión inicial asciende a un total de 666.231,37 €. Habrá que intentar recuperar la inversión en un plazo razonable mediante la venta de fertilizante, el cual se ha estimado que puede tener un precio de venta de 0,21 €/kg. [76]

	COSTE (€)
Terreno	103.594
Cubiertas	227.320
Solera hormigonada	101.156
Impermeabilización	53.240
Zahorra	46.800
Muros laterales	15.500
Balsa de lixiviados	200
Trituradora	1.500
Pala volteadora	2.000
Tractor	47.107
Trómel	9.000
Sondas	600
Estación meteorológica	200
Báscula	6.000
Manguera	300
Verja	2.363,90
Oficinas, aseos y vestuarios	30.844
Ingeniería y diseño	18.506
COSTES INICIALES TOTALES	666.231,37

Tabla 27. Costes iniciales de la planta. Fuente: Elaboración propia.

También habrá que contar con el sueldo mensual de los dos trabajadores de la planta, los cuales trabajan a tiempo completo y se les asocian unos costes de 30.000 €/año a cada uno, es decir, 60.000 €/año entre los dos.

5.1.2. Materias primas y productos finales

Según las fuentes bibliográficas consultadas, el precio actual de mercado de la paja se encuentra en torno a 50 €/t, lo que equivale a 0,05 €/kg. [82] Los lodos de depuradora actualmente rondan un precio de 0,035 €/kg en el mercado. [83]

Por otro lado, como ya se ha comentado, el precio de mercado de los fertilizantes está exclusivamente relacionado con la cantidad de metales pesados que contiene, clasificándose según los parámetros mostrados en la *Tabla 26*. Como ya se ha explicado, en este proyecto se supone que tras el proceso de compostaje se obtiene un compost que podría ser considerado de clase B por su contenido en metales pesados, por lo que se ha estimado un precio de venta de 0,21 €/kg. [76]

A partir de estos datos, se calcula el coste de las materias primas y los ingresos que se pueden obtener con la venta del producto final, sabiendo que la planta

trabaja en continuo y sin paradas, ya que no se necesita apenas mantenimiento y en caso de necesitarse podría usarse otra parte del terreno. Es decir, trabajando 24 horas al día los 365 días del año se obtendría un trabajo anual de 8.760 horas al año. Además, se debe considerar que la mezcla inicial disminuye en aproximadamente un 60% en masa durante el proceso de compostaje debido a la degradación de materia orgánica y a la reducción de la humedad, por lo que el compost final equivale a un 40% de la masa de la mezcla inicial a compostar. [84] Los costes y los ingresos vienen recogidos en la *Tabla 28*.

MATERIAL	MATERIA PRIMA/PRODUCTO	CANTIDAD (kg/día)	PRECIO (€/kg)	COSTE/INGRESO (€/año)
Paja de cereal	Materia prima	5.774	0,05	105.375,50
Lodo de EDAR compostado	Materia prima	8.248,8	0,035	105.378,42
Fertilizante	Producto	5.609,12	0,21	429.939,05

Tabla 28. Balance económico de materias primas y productos. Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Costes material} = \text{Cantidad} \cdot \text{Precio} \cdot \text{Tiempo}$$

$$\text{Costes paja} = 5.774 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot 0,05 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 105.375,50 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Costes lodo} = 8.248,8 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot 0,035 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 105.378,42 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Precio material} = \text{Cantidad} \cdot \text{Precio} \cdot \text{Tiempo}$$

Ingresos fertilizante

$$\begin{aligned} &= ((5.774 + 8.248,8) \cdot (1 - 0,6)) \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot 0,21 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \\ &= 429.939,05 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Según la *Tabla 28*, haciendo el balance económico anual entre los costes de las materias primas y del personal y lo obtenido a partir de la venta del fertilizante, se tienen unas ganancias anuales de 159.185,13 €.

Ganancias anuales

$$\begin{aligned} &= \text{Precio fertilizante} \\ &- (\text{Coste lodo} + \text{Coste paja} + \text{Coste personal}) \\ &= 429.939,05 \frac{\text{€}}{\text{año}} \\ &- \left(105.378,42 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 105.375,50 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 60.000 \frac{\text{€}}{\text{año}} \right) \\ &= 159.185,13 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

5.1.3. Estudio de viabilidad

Para comprobar si la instalación de compostaje es rentable, debe hacerse un estudio de viabilidad completo, para el cual se deben calcular los siguientes parámetros y analizar la rentabilidad de la inversión:

- El valor actual neto, de aquí en adelante nombrado VAN.
- La tasa interna de rentabilidad, retorno o rendimiento, de aquí en adelante nombrada TIR.
- El periodo de retorno, de aquí en adelante nombrado PR, el cual es el tiempo en el que la empresa tarda en recuperar su inversión inicial.

Llevar a cabo la instalación será más aconsejable cuanto más altos sean los valores del VAN y el TIR y menor el del PR.

A partir de los costes descritos se han calculado los flujos de caja, como se ve representado en el *Anexo III Cálculos para el flujo de caja*, donde se expresan los costes y las ganancias en euros obtenidos con la planta de compostaje para cada uno de los primeros años del uso de esta. A partir de dichos cálculos se ha elaborado el flujo de caja acumulado en el tiempo, el cual aparece representado en la *Figura 21*.

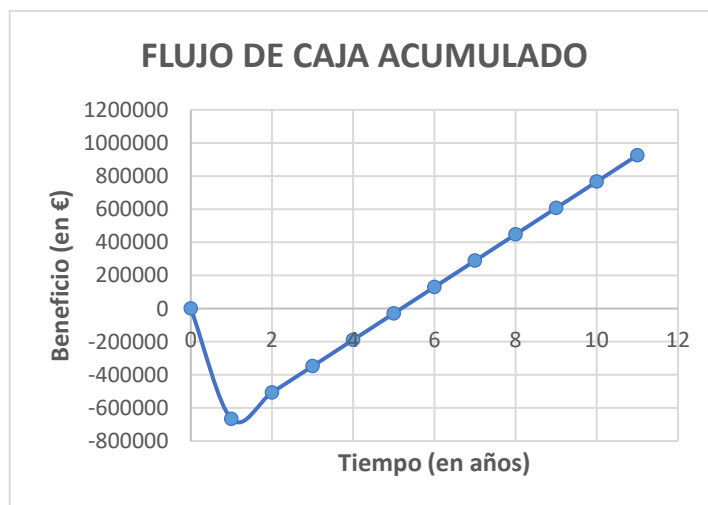


Figura 21. Flujo de caja acumulado donde se representa el beneficio en euros obtenido con el paso del tiempo en años. Fuente: Elaboración propia.

A dichos datos representados en el *Anexo III Cálculos para el flujo de caja* se les aplica la fórmula siguiente para obtener el valor del VAN:

$$VAN = \frac{\sum_{i=1}^n FC_i}{(1+i)^n} - I_o$$

Donde:

- FC_i es el beneficio obtenido en el año i , ya sea positivo o negativo.
- i el interés real, el cual se ha considerado como un 0,10%.
- n el número de años estudiados. En este caso han sido 11 años.
- I_o la inversión inicial, la cual equivale a 666.231 €.

Aplicando la fórmula del VAN a los datos obtenidos se obtiene un valor para el VAN de 283.538,48 €.

Igualando el VAN a cero y despejando i en la siguiente fórmula, se puede obtener el TIR:

$$\frac{\sum_{i=1}^n FC_i}{(1+i)^n} - I_o = 0$$

Se obtiene un valor del TIR de 20% despejando la i .

Por otro lado, se calcula el PR, el cual es el cociente entre los ingresos iniciales y el promedio anual de los beneficios, según se expresa en la fórmula siguiente:

$$PR = \frac{I_o}{\overline{FC}}$$

Sustituyendo se obtiene un PR de 5,23 años.

En base a los valores obtenidos del VAN, el TIR y el PR, los cuales se recogen en la *Tabla 29*, se puede afirmar que sería económicamente rentable llevar a cabo la puesta en marcha de esta planta de compostaje, ya que tanto el VAN como el TIR son muy altos y el PR, es decir, el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial, es bastante bajo.

PARÁMETRO	VALOR
VAN	283.538,48 €
TIR	20%
PR	5,23 años

Tabla 29. Valores del VAN, TIR y PR. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, pese a que como se ha comprobado, la planta sea económicamente viable, hay que tener en cuenta las posibles futuras fluctuaciones de los precios tanto del fertilizante como de ambas materias primas en el mercado, por lo que se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad. El objetivo de dicho estudio es comprobar si frente a variaciones razonables de dichos precios seguiría siendo rentable económicamente la planta y cómo afectaría a los beneficios netos de esta.

Para ello se calcula el VAN obtenido a partir de la variación porcentual de cada uno de los tres productos y se representa gráficamente, como se muestra en la *Figura 22*.

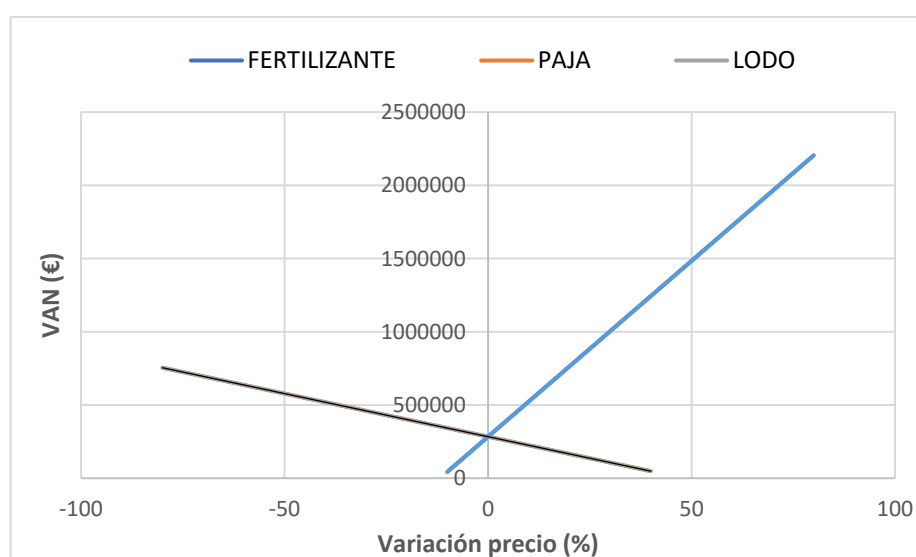


Figura 22. Análisis de sensibilidad de la inversión. Se representa la variación del precio de mercado del fertilizante, el lodo y la paja frente al VAN obtenido (expresado en €). Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar en la *Figura 22*, al ser los precios tanto de la paja como del lodo mucho menores que los del fertilizante, la pendiente de dichas rectas es mucho menor, de forma que puede haber variaciones de hasta algo más de un 40% en su precio sin que el VAN alcance un valor nulo. Por el contrario, si el precio del fertilizante en el mercado disminuyera un 10% respecto a su precio actual, ya no sería rentable llevar a cabo la construcción de la planta, ya que el VAN se igualaría a cero. Además, la variación del precio del producto tiene una pendiente muy pronunciada, lo que implica que si el precio de venta aumentase, los beneficios lo harían consecuentemente de forma muy significativa.

5.2. Evaluación ambiental

Se ha llevado a cabo un análisis del impacto ambiental generado por la planta de compostaje con el objetivo de prevenir, reducir y hacer un seguimiento de la contaminación atmosférica y acústica, de la generación y gestión de residuos y de la protección de suelos y aguas tanto superficiales como subterráneas. Es decir, se ha hecho una breve descripción de los principales impactos ambientales en cada uno de los ámbitos citados para proponer medidas preventivas, correctoras o compensatorias para la protección del medio ambiente, tal y como se describe en los siguientes subapartados. [85,86]

5.2.1. Ruido

Debido a los efectos nocivos del ruido ambiental en la salud humana, este se ha convertido en uno de los principales problemas ambientales en la actualidad, de hecho, se considera una forma importante de contaminación, que afecta negativamente a la calidad de vida. Las consecuencias del ruido ambiental en los aspectos físicos y psicofisiológicos afectan cada vez a más personas, especialmente a los habitantes de las grandes ciudades, por lo que la legislación lo regula con el fin de mejorar la calidad de vida y de bienestar de los ciudadanos y del medio ambiente.

Por otro lado, según Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León, las áreas acústicas en exteriores se clasifican en cinco tipos en función del uso que se le asigne al suelo:

- Tipo 1: Área de silencio.
- Tipo 2: Área levemente ruidosa.
- Tipo 3: Área tolerablemente ruidosa.
- Tipo 4: Área ruidosa.
- Tipo 5: Área especialmente ruidosa.

La planta de compostaje es de tipo 4, ya que no se necesita una protección especial contra el ruido por tratarse de una zona con función industrial relativa al suelo de baja sensibilidad acústica.

En la planta se deberán medir los valores de emisión y de inmisión, es decir, los ruidos generados y los coexistentes durante un tiempo determinado, respectivamente. Tanto los valores de emisión como los de inmisión no podrán sobrepasar los límites máximos establecidos por ley para un área exterior de tipo 4.

En cuanto al límite en los niveles de emisión de ruidos en exteriores, en la instalación no podrá existir maquinaria o actividades que emitan un ruido superior a 95 dB a una distancia inferior o igual a 1,5 metros.

Por otro lado, los límites en cuanto a los niveles de inmisión en exteriores varían entre el día o la noche. Entendiéndose por día la franja horaria comprendida

entre las 8:00 y las 22:00 horas y por noche el resto de horas, es decir, de 22:00 a 8:00. Se prohíbe sobrepasar durante el día los 65 dB y por la noche los 55. Estos datos vienen recogidos en la *Tabla 30*.

Los focos principales de generación de ruidos provienen de la entrada y salida de camiones cargados con materias primas y compost, de la carga y descarga de dichas materias y del movimiento de la maquinaria para el volteo, los cuales se deberán revisar periódicamente para asegurarse de que no emitan más ruido del permitido como consecuencia de posibles averías, estimándose el ruido de estos en torno a 90 dB, aproximadamente.

	DÍA	NOCHE
Inmisión	65	55
Emisión	95	95

Tabla 30. Ruido máximo permitido en un área receptora exterior de tipo 4 en función de las franjas horarias y de la inmisión o emisión expresado en dB. Fuente: BOE. [87]

En la planta se realizarán cada cierto tiempo inspecciones por organismos externos en las que se medirán en ambas franjas el ruido que se está produciendo. En caso de llegar a sobrepasar los niveles máximos, la actividad está obligada a suspenderse por completo hasta corregirlo y en caso no poder corregirse, se obliga al cierre definitivo de dicha instalación. Además de las multas con la sanción, también se castigará el quebrantamiento de estas normas con multas económicas de entre 600 y 300.000 € en función de la gravedad, pudiéndose distinguir entre infracciones leves, graves o muy graves. [87]

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

Ante las posibles futuras quejas y como método de prevención ante la contaminación acústica, la planta se ha ubicado en una zona lo suficientemente alejada del núcleo rural y de las zonas industriales. Además, se prohíbe el uso de maquinaria pesada durante el horario nocturno.

5.2.2. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema de gran relevancia en la actualidad, ya que con el crecimiento de la industria en los últimos años se ha convertido en un problema realmente importante. Debido a esto, las leyes se han vuelto cada vez más restrictivas.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción:

Durante la fase de construcción, el uso de maquinaria y la ejecución de obras tienen como consecuencia el aumento del nivel de polvo, lo que dificulta la

visibilidad y hace que disminuya la calidad del aire de la zona, aumentando así su contaminación.

- Impactos ambientales durante la fase de explotación:

En la planta no existen focos fijos de emisión sistemática de gases a la atmósfera, aunque sí que existen emisiones difusas de forma continuada (las 24 horas del día, los 365 días del año) como las mostradas en la *Tabla 31*, las cuales se clasifican según su código CAPCA (Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera), tal y como se dispone en el Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. [88] Estas emisiones proceden principalmente de las hileras, tanto de compostaje como de maduración, y de las balsas de lixiviados.

PROCEDENCIA DE LA CONTAMINACIÓN	CÓDIGO CAPCA	CONTAMINANTES EMITIDOS
Pilas de fermentación	B 09 10 03 00 Tratamiento de lodos	Partículas sólidas. Olores desagradables.
	B 09 10 05 01 Plantas de producción de compost	
Pilas de maduración	B 09 10 03 00 Tratamiento de lodos	Partículas sólidas. Olores desagradables.
	B 09 10 05 01 Plantas de producción de compost	
Balsas de almacenamiento de lixiviados	C 09 04 03 00 Emisiones de tratamientos de lixiviados en vertederos	Olores desagradables.

Tabla 31. Contaminantes emitidos por los distintos puntos de emisiones difusas. [68,88]

Como se puede observar todas poseen el prefijo en 09 en dicho código, el cual corresponde al tratamiento y eliminación de residuos. Además, según el CAPCA se establece que las plantas de producción de compost pertenecen al grupo B con el código 09 10 05 01. [88]

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

Pese a la existencia de estas emisiones difusas se intentará mediante medidas de prevención y corrección reducir su impacto ambiental, tal y como se describe a continuación:

- o Inclusión de instrumentos para medir la velocidad y la dirección del viento dentro del sistema meteorológico y de una manga de viento a una altura elevada que se vea desde cualquier punto de la planta. De esta forma se evitará el volteo de pilas en días ventosos y, especialmente, cuando los vientos estén orientados hacia el municipio de Valencia de Don Juan, como medida preventiva pese a que la planta se encuentre a una distancia suficiente como para que no lleguen las emisiones.
- o Se mantendrá limpia la zona de mezcla y las palas de las volteadoras.
- o Se prohibirá sobrepasar la altura estipulada de las pilas de compostaje con el fin de que no se formen zonas anaerobias, las cuales son la principal causa de la generación de olores desagradables.

5.2.3. Suelos

En cuanto al suelo, también existe una grave huella ambiental que se debe paliar.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción:

Las obras realizadas en el terreno y el paso de la maquinaria pesada por este hacen que la capa superficial del suelo sufra alteraciones, por lo que consecuentemente se darán variaciones en el ecosistema original que existía. Por otra parte, el vertido accidental de sustancias no biodegradables también afecta al suelo y hace que este pueda ser contaminado.

- Impactos ambientales durante la fase de explotación:

El paso continuado del tractor para la formación y volteo de pilas puede seguir modificando el suelo en la fase de explotación. Por otra parte, los lixiviados que pueden drenarse debido a los derrames o fugas accidentales que puedan darse de manera puntual, tendrían también un impacto ambiental negativo sobre el terreno.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden implementarse:

Como medida preventiva para evitar la contaminación del suelo de la planta se ha tomado la decisión de impermeabilizarlo con el fin de evitar que los lixiviados lo contaminen. Y, por otra parte, deberá lavarse el camión con agua para evitar que los posibles restos de lodos puedan contaminar con sus lixiviados.

5.2.4. Aguas subterráneas y superficiales

La magnitud del impacto está relacionada con el vertido accidental de lixiviados, ya que es el único punto problemático relacionado con la contaminación de las aguas subterráneas en una planta de compostaje.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción:

Mientras la planta de compostaje está en periodo de construcción y los suelos no están impermeabilizados todavía, existe el riesgo de vertido de alguna sustancia tóxica que pueda drenarse a través de este y llegar hasta las aguas subterráneas, por ejemplo, los aceites de los cambios de motor, que deberán llevarse a cabo en una zona especialmente impermeabilizada.

- Impactos ambientales durante la fase de operación:

El principal problema en cuanto a la contaminación de aguas subterráneas es el desbordamiento de la balsa de lixiviados o las posibles fugas de esta. Por otro lado, también existe la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas como consecuencia del vertido directo de las aguas negras generadas en los aseos.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

Las medidas de prevención ante el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas son las siguientes:

- La impermeabilización del terreno que se ha llevado a cabo en la fase de construcción para que, en caso de que se diera un derrame o una fuga accidental puntual, los metales pesados que contienen estos no pudieran drenarse a través del suelo y llegar hasta dichas aguas.
- El sobredimensionamiento de las balsas de lixiviados, ya que al ser la capacidad de esta 3 veces mayor que la precipitación máxima histórica registrada en el municipio, es prácticamente imposible que esta llegue a rebosar.
- La gestión de las aguas negras de los aseos.
- La recogida de aceites mediante gestor autorizado.

5.2.5. Flora (vegetación)

En el municipio de Valencia de Don Juan existe una gran diversidad de vegetación, aunque ninguna de las especies está protegida, siendo las más frecuentes y destacables las choperas, los bosques ribereños y los prados agrícolas. [89] La flora se verá afectada de forma mínima por la construcción de la planta.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción:

La vegetación se ve afectada principalmente por las operaciones de desbroce de la cubierta vegetal originadas causa de la ejecución de las obras. Esto se traduce en la destrucción permanente del hábitat de distintas especies. Considerando la limitada extensión de la superficie ocupada por la planta en relación a toda la extensión de campo que hay alrededor y a que la calidad del hábitat no es muy elevada, este impacto se considera bajo.

En caso de posibles futuras extensiones de la planta en el resto de terreno inutilizado, se agravará el impacto por ocupar más espacio, lo que implica la deforestación de una mayor superficie.

- Impactos ambientales durante la fase de operación:

Durante la fase de operación no se dan efectos negativos, ya que no existe desbroce añadido de la cubierta.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

Como medida correctora se podrían plantar nuevos ejemplares de árboles y arbustos para reforestar y minimizar el impacto de las construcciones.

5.2.6. Fauna

En el municipio de Valencia de Don Juan y en sus alrededores habita una abundante variedad de especies típicas de la zona. Entre ellas, las más características son las siguientes:

- Abubilla.
- Ánade real.
- Aguilucho pálido o gavilán rastrero.
- Aguilucho cenizo.
- Pito real.
- Avutarda común.
- Águila real o águila caudal.
- Tejón común.
- Murciélago de Cabrera.
- Lobo. [89]

El hábitat de todas ellas y muchas otras algo menos típicas, se puede ver modificado tanto por los impactos ambientales en la fase de construcción como en la de operación.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción:

Durante la fase de construcción se puede dar el desplazamiento de especies autóctonas debido al desbroce de su hábitat, como ya se ha comentado, lo que implica un impacto ambiental severo ya que algunas de las especies están

protegidas y, al no haberse edificado anteriormente en la zona, los animales ocuparán estas tierras por tratarse de una zona de baja actividad.

Por otro lado, tanto en la fase de obras como en la fase de explotación, habrá generación de ruidos por el uso de maquinaria, lo que también afectará a la fauna de las zonas limítrofes de forma negativa.

- Impactos ambientales durante la fase de operación:

Se altera la cadena trófica que existía en la parcela originalmente antes de las obras y los ruidos originados por la maquinaria afectan a la fauna de las zonas limítrofes de forma negativa.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

Se deberá comenzar las obras de la planta en una de las épocas para las que sea más fácil el desplazamiento y la búsqueda de nuevos refugios, fuera de épocas de celo y reproducción.

5.2.7. Paisaje

- Impactos ambientales durante la fase de construcción:

Durante la ejecución de las obras existen agentes de espacio visual que afectan negativamente al paisaje como la mala organización de los materiales, la presencia de vehículos de obra y la existencia de elementos de obra ajenos al paisaje que lo alteran.

- Impactos ambientales durante la fase de operación:

En la fase de funcionamiento, no existirán grandes edificaciones, tan solo las oficinas y vestuarios, las cuales tiene tan solo una planta y ocupan poca altura. Pero esto sumado a la circulación de maquinaria, hacen que se de una gran reducción del atractivo rural.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

Como medida correctora para la fase de operación se utilizarán materiales y colores que se mimeticen con el entorno como por ejemplo plásticos que cubran las balsas de lixiviados negras o geotextil de color oscuro, pero bajo ningún concepto se utilizarán materiales de colores llamativos o brillantes. Y como medida correctora para la fase de construcción, se transportarán todos los escombros formados al vertedero y se regenerarán las zonas de paso de maquinaria.

5.2.8. Contaminación lumínica

La contaminación lumínica es otro punto importante a nivel de contaminación atmosférica, aunque en este proyecto no será de gravedad.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción y operación:

Los impactos ambientales durante ambas fases son muy escasos debido a que las operaciones llevadas a cabo, tanto de construcción como de operación, se dan en horario diurno y, además apenas se cuenta con iluminación artificial.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

No existen medidas preventivas o correctoras ya que no son necesarias.

5.2.9. Población

El estilo de vida de la población que habita en dicha zona es algo en lo que hay que hacer hincapié, aunque en este caso, el balance es muy positivo para ellos.

- Impactos ambientales durante la fase de construcción y operación:

En ambas fases se da un impacto positivo en el municipio debido al aumento de la actividad económica y a la creación de dos puestos de empleo estables en el tiempo en el caso de la operación y de varios más en la fase de construcción, pero temporales.

- Medidas preventivas o correctoras que pueden darse:

No existen medidas preventivas o correctoras ya que, en este caso, el impacto es positivo.

6. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo el diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos para obtener fertilizantes de uso agrícola en el municipio de Valencia de Don Juan a partir de los lodos de depuradora que se generan en el municipio. Para ello, primeramente, se ha realizado un estudio bibliográfico para establecer cuál es el método más adecuado para la estabilización de los lodos de depuradora con fin agrícola, seleccionando el compostaje. Teniendo en cuenta las características de los diferentes métodos, se ha elegido el compostaje en pilas estáticas con volteo periódicos como el sistema más adecuado para ser implantado en este municipio.

Seguidamente se ha establecido la capacidad de tratamiento de la planta de compostaje. Para ello, se ha elegido paja de trigo como agente estructurante que se mezclará con los lodos en una relación de 1,5 kg de lodo por cada kg de paja en base húmeda, de forma que la relación C/N inicial sea de 25, que corresponde con una humedad del residuo inicial a compostar del 50,2%. Como la cantidad de lodos diarios generados en este municipio es de 8.248,8 kg/día, teniendo en cuenta la relación indicada entre ambas materias primas, se diseñará una planta con una capacidad de 40,7 m³/día, contando con un sobredimensionado del 10%.

Para llevar a cabo el dimensionado de dicha planta, se ha fijado un tiempo de fermentación de 2 meses y un tiempo de maduración 3 meses, por lo que a partir de la capacidad de tratamiento diaria se ha escogido una finca de 18.000 m² para poder disponer de las diversas zonas, coexistiendo en ésta un total de 52 pilas, 21 de las cuales se encuentran en la fase de fermentación y 31 en la fase de maduración. Dichas pilas son de tipo cuadrangular para poder disponer de un mayor aprovechamiento del espacio y cada una de ellas tiene unas medidas de 15 m de longitud, 3 m de altura y 4 m de anchura, estando cubiertas mediante un sotechado para protegerlas frente a las condiciones meteorológicas y aireándose mediante un tractor con pala volteadora una vez a la semana en caso de las que se encuentran en fase de fermentación y una vez al mes las que se encuentran en fase de maduración.

El estudio de viabilidad económica de la instalación de compostaje se ha realizado suponiendo que se venden 5.609,12 kg/día de fertilizante con una calidad B, estimándose un precio de venta de 0,21 €/kg. La inversión inicial es de 666.231 €, por lo que a partir del estudio económico se obtiene un tiempo de recuperación de la inversión inicial de 5,23 años y unos valores de VAN y de TIR de 283.538,48 € y 20%, respectivamente, lo que indica que la planta es totalmente viable desde un punto de vista económico. También se ha realizado

un estudio de sensibilidad, el cual muestra que el precio de venta del producto es la variable que más afecta al tiempo de recuperación de la inversión inicial.

Por otro lado, el estudio ambiental manifiesta que la planta es totalmente eficiente en este ámbito, siendo el mayor impacto la contaminación atmosférica, la cual se puede disminuir adoptando medidas preventivas y correctoras como no sobrepasar la altura recomendada de las pilas, mantener limpias las zonas o medir el viento antes de proceder a los volteos.

A partir de todos los resultados obtenidos, se concluye que mediante el compostaje de los lodos de depuradora no solo se obtiene un fertilizante orgánico apto para su uso agrícola de una calidad adecuada, sino que se da una solución económica y respetuosa con el medio ambiente a este residuo, a partir de la cual puede reciclarse, disminuyendo así su traslado a vertederos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Vilanova R, Santín I, Pedret C. Control en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Estado actual y perspectivas. Rev Iberoam Automática E Informática Ind. 2017;14:329-345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2017.09.001>
2. González Granados IC. Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR [Tesis doctoral]. [Córdoba]: Universidad de Córdoba; 2016 [consultado 3 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13199>
3. Ortega de Miguel E, Ferrer Medina Y, Salas Rodríguez JJ, Aragón Cruz C, Real Jiménez A. Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Madrid (España): Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Gobierno de España); 2010. p. 91-141. Cap 5 – Tratamientos primarios. ISBN: 978-84-491-1071-9
4. Anexo I_Estudio nacional e internacional de modelos de gestión de residuos. Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife [consultado 24 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://www.tenerife.es/planes/PTEOResiduos/adjuntos/Anexo01_Inf_o05.pdf
5. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente (Gobierno de España). 2015 [consultado 3 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf
6. Arhoun B. Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora [tesis doctoral]. [Málaga]: Universidad de Málaga; 2017 [consultado 4 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/15500>
7. López Martínez N. Valorización energética de los lodos de EDAR [Trabajo Fin de Grado]. [Bilbao]: Universidad del País Vasco, 2019 [consultado 4 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://addi.ehu.eus/bitstream/handle/10810/37161/TFG-%20Natalia%20L%C3%B3pez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. Montes-Morán MA, Menéndez JA. El problema de la gestión de lodos en EDARs. Instituto Nacional del Carbón, CSIC [consultado 15 de diciembre de 2020]. p.102-136. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/95474/1/El%20problema%20de%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20lodos%20en%20EDARs.pdf>

9. Ramalho RS. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona (España): Editorial Reverté; 1990. p 1-716. ISBN: 978-84-291-7975-0
10. Chamorro J. Depuración para principiantes VIII-I: Estabilización de fangos [Blog] iAgua. 3 octubre de 2016 [consultado 15 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-viii-i-estabilizacion-fangos>
11. Chergel A, Teodosiu C, De Gisi S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. J Clean Prod. 2019;228:244-263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>
12. Canut J, Donato R. Reducción de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales industriales. Soluciones industriales y tratamientos ambientales [consultado 14 de diciembre de 2020]. p.31-34. Disponible en: https://www.sitra.es/sites/default/files/Reducci%C3%B3n_de_lodos_generados_en_EDARI%27s_CTC_JUN_2015.pdf
13. Conesa JA. Lodos de depuración: Secado térmico y valorización energética. Universidad de Alicante [consultado 2 de diciembre de 2020]. p.1-49. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/36058/1/Secado_valorizacion_lodos_RUA.pdf
14. García Torrent J, Fernández Áñez N, Medic Pejic L, Querol Aragón E. Guía sobre la operación segura de las plantas con secado térmico de lodos en las depuradoras de aguas residuales. Universidad Politécnica de Madrid, 2014 [15 de diciembre de 2020] p.2-89. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Nieves_Fernandez_Anez/publication/260930559_Guia_sobre_la_operacion_segura_de_las_plantas_con_secado_termico_de_lodos_en_las_depuradoras_de_aguas_residuales/links/0a85e532add0c323ff000000/Guia-sobre-la-operacion-segura-de-las-plantas-con-secado-termico-de-lodos-en-las-depuradoras-de-aguas-residuales.pdf
15. Gebreyessus GD, Jenicek P. Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review. Bioengineering. 2016;3(15):1-14. <https://doi.org/10.3390/bioengineering3020015>
16. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s)). Eurostat-Tables, Graphs and Maps Interface (TGM). 2020 [consultado 28 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00030&language=en>

17. Rodríguez de Sancho MJ (Directora General de Calidad y Evaluación Ambiental). Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España. Madrid (España): Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Gobierno de España); 2009. p. 140. I.S.B.N.: 978-84-491-0956-0
18. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (Gobierno de España) [consultado 2 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Planes-y-Programas.aspx>
19. Sistemas de tratamiento. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (Gobierno de España) [consultado 26 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-compostaje.aspx>
20. Lodos de depuración. Junta de Castilla y León [consultado 26 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/calidad-ambiental/lodos-depuracion.html>
21. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado, número 164, (10 de julio de 2013).
22. Carrington EG. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction; 2001. 52 p. ISBN 92-894-1734-X
23. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. Boletín Oficial del Estado, número 142, (14 de junio de 2013).
24. Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado, número 171, (19 de julio de 2005).
25. Grau A, Farré O. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Madrid; 2011. 136 p. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/images/es/ressituacionvalorizacidae_tcm_30-178821.pdf
26. Colomer Mendoza FJ, Gallardo Izquierdo A, Robles Martínez F, Bovea MD, Herrera Prats L. Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. Ingeniería. 2010;14(3):177-190. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228512933_Opciones_de_valorizacion_de_lodos_de_distintas_estaciones_depuradoras_de_aguas_residuales
27. Manara P, Zabaniotou A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion. Renew Sustain Energy Rev. 2012;16(5):2566-2582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.074>

28. Tyagi VK, Lo S-L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery?. *Renew Sustain Energy Rev.* 2013;25:708-728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.029>.
29. Martínez L. Abonar fincas con lodos de depuradora: riesgos y ventajas. *Campo Galego.* 2019 [consultado 16 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.campogalego.es/abonar-con-lodos-de-depuradora-riesgos-y-ventajas-de-esta-practica/>
30. Zheng G, Wang Y, Wang X, Yang J, Chen T. Oxygen Monitoring Equipment for Sewage-Sludge Composting and Its Application to Aeration Optimization. *Sensors.* 2018;18(11):4017. <https://doi.org/10.3390/s18114017>
31. Kujawa S, Janczak D, Mazur A. Image Analysis of Sewage Sludge and Barley Straw as Biological Materials Composted under Different Conditions. *Materials.* 2019;12(22):3644. <https://doi.org/10.3390/ma12223644>
32. Pourcher A-M, Morand P, Picard-Bonnaud F, Billaudel S, Monpoeho S, Federighi M, Ferré V, Moguedet G. Decrease of enteric micro-organisms from rural sewage sludge during their composting in straw mixture. *J Appl Microbiol.* 2005;99(3):528-539. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02642.x>
33. Figliolo Senin C. El compostaje de residuos: Una mirada a los biosólidos. Fundación Nexus. 2003 [consultado 5 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://nexus.org.ar/trabajos%20publicados/Compostaje%20de%20residuos%20-%202003.pdf>
34. Bożym M, Siemiątkowski G. Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environ Sci Pollut Res.* 2018;25:34332–34342. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3335-x>
35. El Haggag SM. Charter 13 - Rural and Developing Country Solutions. En: Agardy FJ, Nemerow NL. *Environmental Solutions.* Burlington: Academic Press; 2005. p. 313-400. <https://doi.org/10.1016/B978-012088441-4/50015-0>
36. Álvarez-Uría Miyares P, Rodríguez ME. Optimización de la distribución de aire en túneles de compostaje. Universidad politécnica de Madrid. 2019 [consultado 16 de febrero de 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/315741574_Optimizacion_de_la_distribucion_de_aire_en_tuneles_de_compostaje
37. Román P, Martínez MM, Pantoja A. Manual de compostaje del agricultor. Santiago de Chile (Chile): FAO; 2013. p 112. Cap 3 - Fundamentos teóricos del compostaje. ISBN 978-92-5-307844-8

38. Negro MJ, Villa F, Aibar J, Alarcón R, Ciria P, Cristóbal MV, de Benito A, García Martín A, García Muriedas G, Labrador C, Lacasta C, Lezaún JA, Meco R, Pardo G, Solano ML, Torner C, Zaragoza C. Producción y gestión del compost. Digital.CSIC [consultado 2 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/16792/1/2000%20Compost%20CIEMAT.pdf;2000>
39. Bueno Márquez P, Díaz Blanco MJ, Cabrera Capitán F. Factores que afectan al proceso de compostaje. Digital.CSIC [consultado 17 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>
40. Robledo Mahón T. Estudio de los procesos biológicos y de la estructura de las comunidades microbianas en el proceso de compostaje de lodos de depuradora de aguas residuales urbanas en sistemas de membrana semipermeable. [Tesis doctoral]. [Granada]:Universidad de Granada; 2018. ISBN: 978-84-9163-885-8 URI: <http://hdl.handle.net/10481/51695>
41. Tortosa G. Sistemas de compostaje. Compostando Ciencia. 10 de febrero de 2015 [consultado 28 de diciembre de 2020]. Disponible en: <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>
42. Álvarez de la Puente JM. Estudio de mercado de los compost en España. Egmasa. 2017. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.17537.86883>
43. Monsalve M, Delgado EL, Giraldo E. Modelación del compostaje de biosólidos en pila estática aireada. Academia Edu. 2000. https://www.academia.edu/19510064/MODELACION_DEL_COMPOSTAJE_DE_BIOS%3%93LIDOS_EN_PILA_ESTATICA_AIREADA
44. Compostaje de residuos orgánicos: Trincheras dinámicas. 2012 [consultado 28 de diciembre de 2020] Disponible en: http://www.metrocompost.com/es/descargas/metrocompost_trincherasdinamicas.pdf
45. Haug RT. The practical handbook of compost engineering. Lewis publishers;2018. 758 p. ISBN 0-87371-373-7
46. Requisitos técnicos para instalaciones de compostaje de residuos. Junta de Castilla y León. 2017.
47. Garrido Ibáñez AM. Ingeniería básica de una planta de compostaje en túneles [Trabajo Fin de Grado]. [Sevilla]: Universidad de Sevilla, 2015 [consultado 17 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90483/fichero/TFGAidaGarrido.pdf>

48. Chang JI, Chen YJ. Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresour Technol.* 2010;101(15):5917-5924. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.042>
49. Hu J, Yang Z, Huang Z, Li H, Wu Z, Zhang X, Qin X, Li C, Ruan M, Zhou K, Wu X, Zhang Y, Xiang Y, Huang J. Co-composting of sewage sludge and *Phragmites australis* using different insulating strategies. *Waste Manag.* 2020;108:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.012>
50. Uçaroğlu S, Alkan U. Composting of wastewater treatment sludge with different bulking agents. *J Air Waste Manag Assoc.* 2016;66(3):288-295. <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1131205>
51. Vico López A. Reciclaje de lodos de depuradora: Estudio del efecto del agente estructurante usado y de la proporción de lodo [Trabajo Fin de Master]. [Elche]: Universidad Miguel Hernández, 2015 [consultado 5 de enero de 2021]. Disponible en: <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2028/1/TFM%20Vico%20L%20C3%B3pez%20%20Alberto.pdf>
52. Banegas V, Moreno JL, Moreno JI, García C, León G, Hernández T. Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. *Waste Manag.* 2007;27(10):1317-1327. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.09.008>
53. Kebibeche H, Khelil O, Kacem M, Kaid Harche M. Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;168:423-430. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.075>
54. Valencia de Don Juan mapa. Satellites pro. [consultado 11 de febrero de 2021]. Disponible en: https://satellites.pro/mapa_de_Valencia_de_Don_Juan#42.291427,-5.546780,14
55. EDAR de Valencia de Don Juan. iAgua data. [consultado 23 de enero de 2021] Disponible en: <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/edar/valencia-don-juan>
56. García R. Valencia de Don Juan dispondrá de una depuradora de aguas residuales. *Diario de León* [consultado 26 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.diariodeleon.es/content/print/valencia-don-juan-dispondra-depuradora-aguas-residuales/20040825000000732311>
57. Pliego prescripciones técnicas particulares para la contratación de la gestión de las estaciones depuradoras de aguas residuales de Medina de Rioseco, Villalpando, Sahagún, Valencia de Don Juan y la estación de tratamiento de agua potable y el abastecimiento mancomunado de campos góticos. Somacyl. [consultado 23 de enero de 2021]. Disponible en: <https://somacyl.es/documentos/PPTP%20CS-2016-01.pdf>

58. Hernández Jiménez J. Planta de tratamiento y valorización de lodos de depuradora para la cogeneración de energía [Trabajo Fin de Master]. [Valladolid]: Universidad de Valladolid, 2020 [consultado 11 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/>
59. Valencia de Don Juan. Sede Electrónica del Catastro [consultado 23 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?pest=rustica&from=OVCBusqueda&ZV=NO&ZR=NO&RCCompleta=&pol=414&par=16&DescProv=LEON&prov=24&muni=191&DescMuni=VALENCIA%20DE%20DON%20JUAN&TipUR=R&refcat=24191A41400016&del=24&mun=191>
60. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado, número 181, (29 de julio de 2011).
61. Yuan J, Chadwick D, Zhang D, Li G, Chen S, Luo W, Du L, He S, Peng S. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. Waste Manag. 2016;56:403-410. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.017>
62. Barcenilla Diez A. Proyecto de planta de peletizado de paja de cereal en el término municipal de Antigüedad (Palencia) [Trabajo Fin de Grado]. [Valladolid]: Universidad de Valladolid, 2017 [consultado 29 de diciembre de 2020]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25050>
63. La cosecha de cereal 2018 en Castilla y León superará los 7 millones de toneladas, la segunda mejor campaña de los últimos cinco años. Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Junta de Castilla y León; 2018 [consultado 29 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://comunicacion.jcyl.es/web/jcyl/Comunicacion/es/Plantilla100Detalle/1281372057130/_/1284816684350/Comunicacion#:~:text=Saltar%20al%20inicio,-.La%20cosecha%20de%20cereal%202018%20en%20Castilla%20y%20Le%C3%B3n%20superar%C3%A1,de%20los%20%C3%BAltimos%20cinco%20a%C3%B1os&text=La%20buena%20campa%C3%B1a%20de%20cereal,de%201.200%20millones%20de%20euros.
64. Valverde VH. Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya [Trabajo Fin de Master]. [Elche, Alicante]: Universidad Miguel Hernández, 2018 [consultado 11 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/5931/1/TFM%20Valverde%20Orozco%20V%C3%ADctor%20Hugo.pdf>
65. Tras la recolección del cereal, llega el momento de las alpacas o balas de paja. Maquituls. 2015 [citado 25 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.maquituls.es/noticias/alpacas-de-paja-pacas-de-paja/>

66. Tamborero del Pino JM, Marínez del Cerro I. Seguridad en el almacenamiento de materiales mediante paletizado y apilado sobre el suelo. Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo (Gobierno de España) 2018. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/382595/ntp-1112w.pdf/1a3cadf2-98c9-44ad-8ade-008f7d2b25ce>
67. Manual de compostaje. Amigos de la Tierra. Madrid (España): Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Gobierno de España); 2009. p. 8-21. NIPO: 770-09-354-2.
68. Resolución de 26 de octubre de 2020, de la Secretaría General de la Consejería de Fomento y Medio Ambiente, por la que se concede autorización ambiental para el proyecto de una planta de compostaje en el término municipal de Santas Martas (León), promovido por «Agro Gestión Integral, Sociedad Cooperativa». Boletín Oficial de Castilla y León, número 238, (16 de noviembre de 2020).
69. Ávila Ruiz WA, Moyano Hernández JP. Propuesta Metodológica para el Dimensionamiento de Plantas de Compostaje en Municipios con Generación de Residuos Orgánicos Aprovechables a Partir de 100 Ton/Día [Trabajo Fin de Grado]. [Bogotá]: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019 [consultado 17 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/15556/AvilaRuizWendyAndrea2019.pdf;jsessionid=F9439FA04256D3B098572CA80CA13C57?sequence=1>
70. Granada Torres CA, Prada Millán Y. Caracterización del lixiviado agroecológico a partir de residuos orgánicos de cultivos. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 2015;6(2) ISSN 2145-6097
71. Valencia de Don Juan. Climate-Data.org [citado 27 de enero de 2021]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/valencia-de-don-juan-74022/>
72. Montero Avendaño JE. Diseño de máquina volteadora de compost. [tesis doctoral]. [Chile]: Universidad Austral de Chile; 2006 [consultado 25 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcm778d/doc/bmfcm778d.pdf>
73. Ramos E. ¿Cuánto cuesta un Tractor? Precios de tractores de las principales marcas. Tractores y máquinas. 2021 [consultado 25 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.tractoresymaquinas.com/cuanto-cuesta-un-tractor-precios-de-tractores/>

74. Presupuesto New Holland T4 110 LP CAB [consultado 25 de febrero de 2021] Disponible en: <https://masquemaquinasagricolas.com/2018/11/19/presupuesto-new-holland-t4-110-lp-cab/>
75. Compostaje. EMO. [consultado 23 de febrero de 2021] Disponible en: <https://www.emolatina.es/tecnologia-y-productos-emo-france/estabilizacion-higienizacion/compostaje/>
76. Song U, Lee EJ. Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill. ScienceDirect. 2010;54(12):1109-1116. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.005>
77. Composting Fertilizer. Alibaba [consultado 19 de marzo de 2021] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/trade/search?IndexArea=product_en&CatId=&fsb=y&viewtype=&tab=&SearchScene=&SearchText=fertilizante+compostaje
78. Brezmes G. Precio de la tierra en España. Tasagronomos. 4 de noviembre de 2018 [consultado 25 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://tasagronomos.com/precio-tierra-espana-2018/>
79. Arroyo C. ¿Cuánto cuesta la impermeabilización por m²?. Crono Share Blog. 25 de mayo de 2019 [consultado 26 de febrero de 2021] Disponible en: <https://www.cronoshare.com/blog/cuanto-cuesta-la-impermeabilizacion-m2/>
80. Zahorra artificial ZA-25 Cantera Perea. [consultado 26 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://canteraperea.com/producto/zahorra-artificial-za-25>
81. Malla simple torsión 2 m. de alto 25 m. de largo. Macro Jardín. [consultado 26 de febrero de 2021] Disponible en: https://www.macrojardin.com/ficha.php?Id=426/&gclid=CjwKCAiA1eKBBhBZEiwAX3gql-ntnvyEvxVcs3E34ZFH3TKMS66ThqBJJfvh7LQ9lrEs20kdJgrX8hoCXG0QAvD_BwE
82. Suardi A, Stefanoni W, Bergonzoli S, Latterini F, Jonsson N, Pari L. Comparison between Two Strategies for the Collection of Wheat Residue after Mechanical Harvesting: Performance and Cost Analysis. Sustainability. 2020;12(12):4936. <https://doi.org/10.3390/su12124936>
83. El potencial fertilizante y económico de los lodos de depuradora para los cultivos agrícolas. Instituto superior del medio ambiente. 2015 [consultado 16 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.ismedioambiente.com/el-potencial-fertilizante-y-economico-de-los-lodos-de-depuradora-para-los-cultivos-agricolas/>

84. Barros Rosales DG, Ortiz Solano JN. Evaluación de rendimientos en el sistema de gestión final de los residuos sólidos del cantón mejía [Trabajo Fin de Grado].[Quito]: Escuela Politécnica Nacional, 2010 [consultado 23 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2410/1/CD-3142.pdf>
85. Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. Boletín Oficial del Estado, número 25, (29 de enero de 2011).
86. Guerra Cabanillas A. Estudio de impacto ambiental refundido del proyecto para construcción de planta de compostaje en el polígono 142 parcela 1 del T.M. de Mérida (Badajoz). Inno Campo Ingeniería y Consultoría. [consultado 24 de marzo de 2021]. Disponible en: http://extremambiente.juntaex.es/files/EIAmb_Simplificado%20Refundido%20con%20planos.pdf
87. Ley 5/2009, de 4 de junio, del ruido de Castilla y León. Boletín Oficial del Estado. (Última modificación 29 de diciembre de 2014)
88. Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. Boletín Oficial del Estado, número 25, (29 de enero de 2011).
89. Valencia de Don Juan. Spain Viajes. [consultado 24 de marzo de 2021]. Disponible en: <http://www.spainviajes.com/que-ver-en-leon/valencia-de-don-juan>

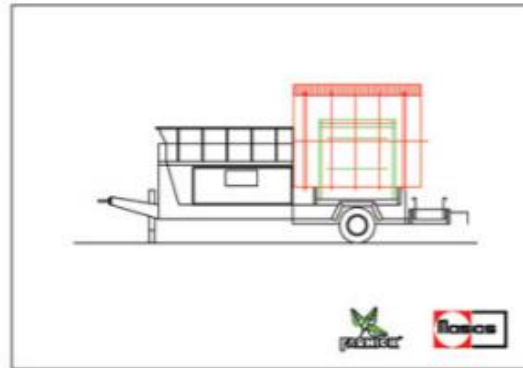
8. ANEXOS

8.1. Anexo I: Características del tractor

Marca	Modelo	Especificación		Evolución presupuestos (todos sin IVA)
New Holland	T4 110 LP Cab	Motor	FPT; 4 cilindros, 3400 cm3; Tier 4A; EGR + DOC (sin DPF); Turbo con válvula de descarga; intercooler; Escape vertical; 2 memorias de régimen; Ventilador viscoso; Refrigerador de gasoil	Precio venta
		Potencia y par	ECE R 120 (ISO TR14396): 107 CV (2300 rpm); 444 Nm	
		Depósito	98 L	
		Transmisión	32+16 con Hi-Lo; Inversor powercluth; 0,7-40 km/h	
		TDF	540/540 E; Conexión electrohidráulica	
		Eje delantero	DT conexión electrohidráulica; Diferencial multidiscos de deslizamiento limitado;	
		Eje trasero	Frenos disco; Bloqueo diferencial electrónico; Suplemento guardabarros de goma	
		Sistema hidráulico	Centro Abierto; 2 bombas: elevador y servicios externos de 80 L/min + dirección 35 L/min; 2 distribuidores ventrales EH con joystick función megacaudal; 3 distribuidores doble efecto EDC traseros	
		Disco, Llanta	Atornillados	
		Pesos máximos y batalla	MMA 5200 kg (2500 kg eje delantero y 3700 kg eje trasero); Batalla 2180 mm	
		Neumáticos	280/70 R20; 420/70 R28	
		Freno remolque	Válvula hidráulica según reglamento UE	
		Elevador trasero	Control elevador en giros (Lift O Matic); Mecánico (MDC); Brazo derecho ajustable hidráulico; Estabilizadores ajustables hidráulico; enganches rápidos	
		Cabina	BlueCab nivel 4; AA y calefacción; 2 espejos exteriores; Asiento neumático Grammer; Limpia trasero	
		Luces y eléctrico	Delanteros + traseros: 2+2 faros de trabajo; Rotativo en techo	
Guardabarros	Sin delanteros			
Contrapesos	Delanteros (6*40 kg + soporte 18 kg); traseros 4*50 kg			
Otros	Caja de herramientas Enganche corredera			
Tractor a cambio	No hay			

8.2. Anexo II: Características de la criba trómel

Criba Joker (Marca Komptech)



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Accionamiento:	Motor de gasolina o diesel de 14 kW Honda o Lombardini
Rendimiento:	hasta 35 m ³ /h
Dimensiones de la máquina:	Longitud total: 7.160 mm Ancho total: 2.550 mm Altura total: 4.000 mm Peso total autorizado: 5.000 kg
Tambor de cribado:	Diámetro: 1.800 mm Longitud: 2.440 mm
Tolva de carga:	Capacidad: 2,3 m ³ Ancho: 2.635 mm Profundidad: 1.136 mm Altura de carga: 2.270 mm



(67)

8.3. Anexo III: Cálculos para el flujo de caja

Tiempo (años)	1	2	3	4
Coste inicial (€)	666.231	0	0	0
Costes fijos (€)	0	270.754	270.754	270.754
Costes totales (€)	666.231	270.754	270.754	270.754
Ganancias (€)	0	429.939	429.939	429.939
Beneficio (€)	-666.231	159.185	159.185	159.185

5	6	7	8	9
0	0	0	0	0
270.754	270.754	270.754	270.754	270.754
270.754	270.754	270.754	270.754	270.754
429.939	429.939	429.939	429.939	429.939
159.185	159.185	159.185	159.185	159.185
-29.491	129.694	288.879	448.065	607.250