

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Depuración de gases de una planta de compostaje

Autora: Rocío Sayago Carro

Tutor: Antonio Morales Carrasco

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Química

Depuración de Gases de una Planta de Compostaje

Autor:

Rocío Sayago Carro

Tutor:

Antonio Morales Carrasco

Profesor Asociado

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Depuración de Gases de una Planta de Compostaje

Autor: Rocío Sayago Carro

Tutor: Antonio Morales Carrasco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A la Ita

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradeceré a mi tutor, Antonio Morales por su paciencia durante estos meses y su amabilidad a la hora de resolverme todas las dudas.

A mis padres. Gracias por haberme apoyado desde pequeña en todas mis decisiones y haber estado conmigo en los momentos más difíciles de la carrera. Sin vosotros no habría podido conseguirlo.

A mis hermanas, por ser los dos pilares fundamentales en mi vida, por estar siempre conmigo y ser las mejores amigas que se puede tener.

A la Ita, la única persona de la familia que se ha sabido los nombres de las asignaturas. Gracias a ti y a tus velitas, son mágicas.

Al resto de mi familia, mis tías y mi primo Jesús, por haberme sacado una sonrisa siempre que lo he necesitado.

Por último, me gustaría agradeceré a Álvaro, la persona que ha estado conmigo desde el principio hasta el final y que no ha dejado nunca de estarlo.

El compostaje de residuos tiene como objetivo obtener reciclar la fracción orgánica de los residuos domésticos para obtener un producto, el compost, que puede ser usado en la agricultura y en la jardinería como enmienda del suelo además de en otras actividades como serían el control de la erosión de los terrenos o la recuperación de suelos dañados a partir de materia orgánica.

En la sociedad actual donde prima el consumismo, una buena gestión de residuos es esencial para mantener el equilibrio, aportando el compostaje de residuos domésticos (RD) parte de la solución a este problema, pues este proceso reduce el volumen y el peso de la fracción orgánica que contienen los RD.

Pero al igual que cualquier proceso industrial independientemente de que su objetivo sea más o menos ecológico, las plantas de compostaje traen consigo una serie de problemas medioambientales, entre ellos la producción de malos olores durante el proceso. Es en el control de estos en los que se basa este proyecto.

Una vez que los residuos llegan a la planta, tendrán que separarse para obtener la fracción orgánica y, por otro lado, enviar a plantas de reciclaje aquellos materiales que no forman parte de esta como plásticos, cartones, etc. Tras esto, el material seleccionado comenzará el proceso de compostaje. Esta transformación de la materia orgánica supondrá la liberación de ciertos gases (dependiendo de la composición de la materia prima) que producirán malos olores y que podrán ser un problema para la población cercana.

Es por ello, que al final del proceso se dispondrá de una serie de equipos de depuración de la corriente gaseosa.

En este proyecto, se ha diseñado un sistema de biofiltración para eliminar los olores. En primer lugar, los gases pasarán por un humidificador que los dotará de la humedad necesaria para ser tratados y eliminará partículas que resulten contaminantes y que dificulten su tratamiento. El mismo humidificador también hará la función de un absorbedor cuya función es retirar compuestos nocivos como el NH_3 y el SH_2 en el caso de que estuvieran presentes.

Finalmente, los gases pasarán por un biofiltro. Este equipo es el que se encarga de retirar el resto de compuestos contaminantes que no hayan sido eliminados anteriormente y de tratar los gases para que a su salida a la atmósfera no emitan malos olores que puedan perjudicar a la población cercana.

Abstract

The purpose of waste composting is to recycle the organic fraction of domestic waste to obtain a product, compost, which can be used in agriculture and gardening as a soil amendment, as well as other activities such as control of the erosion of the land or the recovery of damaged soil from organic matter.

In today's society where consumerism prevails, good waste management is essential to maintain balance, contributing the composting of household waste (RD) part of the solution to this problem, as this process reduces the volume and weight of the fraction organic that contain the RD.

But like any industrial process, regardless of whether its objective is more or less ecological, composting plants bring with them a series of environmental problems, including the production of bad odors during the process. It is in the control of these that this project is based on.

Once the waste reaches the plant, they will have to separate to obtain the organic fraction and, on the other hand, send to recycling plants those materials that are not part of this as plastics, cartons, etc. After this, the selected material will begin the composting process. This transformation of organic matter will mean the release of certain gases (depending on the composition of the raw material) that will produce bad odors and that may be a problem for the nearby population.

That is why, at the end of the process, a series of purification equipment for the gaseous current will be available.

In this project, a biofiltration system has been designed to eliminate odors. First, the gases will pass through a humidifier that will provide them with the necessary humidity to be treated and will eliminate particles that are contaminating and that hinder their treatment. The same humidifier will also act as an absorber whose function is to remove harmful compounds such as NH_3 and SH_2 if they were present.

Finally, the gases will pass through a biofilter. This equipment is responsible for removing the remaining pollutant compounds that have not been previously eliminated and for treating the gases so that when released to the atmosphere they do not emit bad odors that could harm the nearby population.

<i>Agradecimientos</i>	ix
<i>Resumen</i>	xi
<i>Abstract</i>	xiii
<i>Índice</i>	xv
<i>Índice de Tablas</i>	xvii
<i>Índice de Figuras</i>	xix
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Antecedentes</i>	1
1.2 <i>Objetivo y estructura</i>	1
1.3 <i>Legislación</i>	2
1.4 <i>Composición de los residuos domésticos (RD)</i>	4
2 PROCESO DE COMPOSTAJE	7
2.1 <i>Descripción y usos</i>	7
2.1.1 <i>Usos en la agricultura</i>	8
2.1.2 <i>Otros usos</i>	8
2.2 <i>Etapas del proceso de compostaje</i>	9
2.2.1 <i>Pretratamiento</i>	9
2.2.2 <i>Fermentación</i>	9
2.2.3 <i>Maduración</i>	10
2.2.4 <i>Afino</i>	10
2.3 <i>Sistemas de compostaje</i>	11
2.3.1 <i>Sistemas abiertos</i>	11
2.3.2 <i>Sistemas cerrados</i>	13
2.3.3 <i>Sistemas estáticos y dinámicos</i>	14
2.4 <i>Ventajas y desventajas del compostaje</i>	14
2.4 <i>Tratamiento de Lixiviados</i>	15
2.5 <i>Parámetros a controlar durante el proceso</i>	16
3 COMPOSTAJE EN TÚNEL	19
4 GESTIÓN DE OLORES	21
4.1 <i>Sentido del olfato</i>	21
4.1.1 <i>Medida de olores</i>	23
4.2 <i>Legislación relativa al control de olores</i>	24
4.3 <i>Parámetros a controlar</i>	25
4.4 <i>Métodos de depuración de gases</i>	26
4.4.1 <i>Adsorción en carbón</i>	26
4.4.2 <i>Condensación</i>	27
4.4.3 <i>Lavador de gases o scrubbers</i>	27
4.4.4 <i>Oxidación térmica</i>	28
4.4.5 <i>Bioscrubbers</i>	29
4.4.6 <i>Biofiltración</i>	30
5 MEMORIA DE CÁLCULO	35
5.1 <i>Datos de partida</i>	35

5.2	<i>Etapas del proceso</i>	36
5.3	<i>Recepción y Pretratamiento</i>	36
5.3.1	Recepción de los residuos	36
5.3.2	Triaje primario	37
5.3.3	Trómel Cribado	37
5.4	<i>Corriente de Gruesos</i>	38
	<i>Corriente de Finos</i>	39
5.4.1	Separación magnética	39
5.4.2	Fermentación	40
5.4.3	Maduración	42
5.4.4	Afino	43
5.5	<i>Biofiltro</i>	44
5.5.1	Cálculo del caudal de gases a tratar	44
5.5.2	Esquema general del Sistema	46
5.5.3	Válvula antirretorno	48
5.5.4	Extracción de los gases	48
5.5.5	Ventilación	49
5.5.6	Humidificador	54
5.5.7	Absorbedor	57
5.5.8	Biofiltro	58
6	<i>CONCLUSIONES</i>	61
7	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición media de los RD.	35
Tabla 2. Composición de las corrientes de finos y gruesos a la salida del trómel de cribado.	38
Tabla 3. Composición de la corriente de entrada al túnel.	39
Tabla 4. Composición del material dentro del túnel.	40
Tabla 5. Composición de los residuos a la salida del túnel.	42
Tabla 6. Composición del material en la zona de maduración.	43
Tabla 7. Corrientes de entrada y salida del túnel.	44
Tabla 8. Composición de la corriente de gases a tratar.	45
Tabla 9. Diámetro de la tubería en cada tramo.	49
Tabla 10. Valores de rugosidad relativa, número de Reynolds y coeficiente de fricción en cada tramo.	51
Tabla 11. Pérdidas de carga en cada tramo.	52
Tabla 12. Valores de K y pérdidas de carga en cada ensanchamiento.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferencias de composición de los RD entre países. (Universidad Pública de Navarra, 2015)	5
Figura 2. Composición de los RD. (Luna, 2014)	6
Figura 3. Tratamientos de los residuos domésticos. (Luna, 2014)	6
Figura 4. Aspecto del compost (Werner, 2018)	7
Figura 5. Diagrama de flujo de planta de compostaje. (Junta de Andalucía, s.f.)	11
Figura 6. Compostaje en hileras. (Hileras de Viento, s.f.)	12
Figura 7. Compostaje en pila estática aireada. (Junta de Andalucía, s.f.)	12
Figura 8. Compostaje en tambor rotatorio. (Tortosa, 2011)	13
Figura 9. Compostaje en túnel. (Diario de Navarra, 2015)	14
Figura 10. Clasificación de los sistemas de compostaje. (Plana, Maestro Compostador., 2008)	14
Figura 11. Evolución de la temperatura y el pH durante las etapas del compostaje (Costa, 1991)	17
Figura 12. Evolución de la relación C/N en el compostaje de estiércol de ovino y paja (Revista Argentina de Microbiología, 2017)	18
Figura 13. Esquema general de un túnel de compostaje.	19
Figura 14. Esquema del proceso olfativo. (Laffort, 1994)	22
Figura 15. Efectos sensoriales según la concentración de olor. (Epstein, 2011)	22
Figura 16. Nariz electrónica (González, 2018)	24
Figura 17. Carbón activo (Carbotecnia, s.f.)	26
Figura 18. Esquema de un lavador de gases (Condorchem Envitech, s.f.)	28
Figura 19. Esquema de un bioscrubber (Groenestijn, 2001)	29
Figura 20. Biofiltro (Natural Zone, s.f.)	30
Figura 21. Esquema de un biofiltro (Martín, 2014).	31
Figura 22. Eficacia de la biofiltración en distintos compuestos (Epstein, 2011)	32
Figura 23. Eficacia del biofiltro frente al tiempo de residencia (Epstein, 2011).	33
Figura 24. Esquema general de las etapas del proceso de compostaje.	36
Figura 25. Esquema general de los túneles y del sistema de filtrado.	46
Figura 26. Detalle de la parte izquierda del esquema general.	47
Figura 27. Detalle de la parte derecha del esquema general.	47
Figura 28. Ábaco de Moody (Universidad de Valladolid, s.f.)	50
Figura 29. Esquema de un humidificador (Torres de refrigeración y condensadores evaporativos, s.f.)	54
Figura 30. Diagrama psicrométrico (Diagrama psicrométrico, s.f.)	55
Figura 31. Porcentaje de huecos en función de la composición del material filtrante (R. E. Nicolai)	58
Figura 32. Relación entre la presión y el caudal de gases en el biofiltro (R. E. Nicolai)	59

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A lo largo de los años, la sociedad ha ido experimentando una gran multitud de cambios, produciéndose, sobre todo en las últimas décadas, un gran desarrollo científico y tecnológico. Además, la población mundial es cada vez más extensa y la mayoría de países tienen una tendencia creciente en términos económicos. Con todo ello, cada vez son más los residuos generados en todas partes del mundo. Así, existe una clara relación entre los residuos generados por un país determinado y su PIB. La sociedad debe hacer frente al gran problema que supone la gestión de los mismos, entre ellos los residuos orgánicos o biorresiduos.

Se conoce como biorresiduos a todos aquellos residuos biodegradables, originados principalmente en parques y jardines o restos de alimentos. También están entre ellos los lodos de depuración, los residuos agropecuarios y domésticos separados en origen (domicilio) o domésticos separados mecánicamente. (Cerem Comunicación, 2017)

Estos materiales orgánicos, una vez que se convierten en residuos, pueden ser tratados mediante dos procesos distintos: la biometanización (proceso anaerobio) o el compostaje (proceso aerobio). Ambos comparten el objetivo de reducir y estabilizar el residuo.

La biometanización tiene lugar en condiciones muy pobres de oxígeno y se obtiene como resultado una mezcla de gases en la que predomina el metano y el dióxido de carbono.

Por otra parte, el compostaje consiste en la descomposición de la materia en condiciones aerobias (en presencia de aire) con actividad microbacteriana. Una vez acaba la actividad de estos microorganismos, no solo se obtiene compost, sino también distintos gases que habrá que tratar antes de liberarlos a la atmósfera, pues pueden causar problemas graves de olores y contaminación.

Esto último será el tema central de este proyecto, ya que para realizar el tratamiento de los gases será necesario hacerlos pasar por un sistema de filtración a la salida de la planta de compostaje, compuesto por una válvula que regule su paso, un ventilador para impulsarlos, un humidificador, un absorbedor en el caso de que los residuos contengan NH_3 o SH_2 y, por último, un biofiltro.

Se supondrá que los gases a tratar en este trabajo provienen, concretamente, de una planta de compostaje en túnel.

1.2 Objetivo y estructura

El objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema de filtración de gases provenientes de una planta de compostaje de residuos domésticos que dará servicio a una población de 60.000 habitantes.

El fin de esto es la desodorización de los gases, así como la eliminación de todos los agentes que puedan resultar molestos para la población antes de su liberación a la atmósfera.

El proyecto tendrá dos partes:

1. En la primera se desarrollará un marco teórico en el cual se expondrá la composición de los Residuos domésticos (RD), los usos del compost, las ventajas y desventajas del proceso a tratar y una explicación detallada del mismo. Dentro de ésta, se ahondará en el compostaje en el túnel. También se explicarán los distintos métodos existentes para la depuración de los gases de compostaje, profundizando en el sistema de biofiltro.

2. En la segunda parte del proyecto contendrá la memoria de cálculos de la planta sobre la que se van a realizar el proyecto. A continuación, se realizará el balance de masa, desde la entrada de los residuos en la planta de compostaje, y el diseño de los equipos necesarios para la filtración de los gases.

1.3 Legislación

- Gestión de Residuos

La Directiva 75/442/CEE del 15 de julio de 1975, revisada y modificada posteriormente en distintas ocasiones, se crea con varios fines:

- Crear unas condiciones iguales en cuanto a gestión de residuos en toda la Comunidad Europea para que no se den incidentes en el mercado común.
- Proteger la salud del hombre y la del medio contra los efectos perjudiciales que puedan tener la gestión de residuos, desde su recogida hasta su depósito.
- Para favorecer la reutilización de los materiales y así conservar los recursos naturales.
- Para establecer una serie de normas en cuanto a seguridad y protocolo de las empresas encargadas de la gestión de residuos.
- Para establecer el principio de “quien contamina, paga”.

En ella, se define residuo como “cualquier sustancia u objeto del cual se desprenda su poseedor o tenga la obligación de desprenderse en virtud de las disposiciones nacionales en vigor” y se determina que la gestión de los mismos engloba la recogida, clasificación, transporten y tratamiento y finalmente su depósito o almacenamiento. También incluye dentro de gestión todas las actividades destinadas a reutilización, su recuperación o su reciclaje.

Además, se insta a los estados miembros a que adopten actitudes que promuevan la prevención, el reciclaje y la transformación de residuos, así como su reutilización. (Agencia Estatal, 2006)

Por otro lado, la Ley 22/2011, de 28 de Julio, de Residuos y suelos contaminados que traspone la Directiva 2008/98/CE, tiene como fin:

- Proteger la salud humana y el medio ambiente.
- Formular una jerarquía lógica en cuanto al orden de prioridad en el tratamiento de residuos, basada en (Legal Today, 2016):
 1. **Prevención:** consiste en tomar todas las medidas necesarias en la concepción del elemento que puede convertirse en un futuro en residuo para reducir la cantidad de residuo generado, su impacto en la salud y el medioambiente y el contenido en sustancias peligrosas. Entre las precauciones que se pueden tomar, se encuentran:
 - Reducción en el origen: esto se consigue mediante la aplicación de las mejores tecnologías disponibles para reducir la producción de residuos y así evitar su tratamiento o depósito final.
 - Minimización: se alcanza realizando un buen control sobre las materias primas que se poseen para no incumplir su fecha de caducidad y que no se deterioren sus propiedades convirtiendo los materiales en residuos, así como un adecuado tratamiento de las corrientes para evitar fugas o contaminaciones.
 - Reducción de volumen: separa los residuos peligrosos de la corriente total reduciendo su volumen y minimizando los gastos de tratamiento.
 2. **Preparación para la reutilización:** conjunto de procesos que comprueban y tratan todas las partes y componentes del residuo que puedan aprovecharse para volver a ser usadas sin necesidad de transformarlas.

3. **Reciclado:** los materiales del residuo son transformados con el fin de que puedan volver a usarse con la finalidad para la que fueron concebidos o para cualquier otra.
4. **Otro tipo de valorización, incluyendo la energética:** operaciones que tienen como objetivo reducir el volumen de residuos enviados a los vertederos y volver a darle uso a los materiales de los residuos con el fin de minimizar el gasto de recursos naturales. Dentro de la valorización de residuos, se encuentran:
 - Tratamientos biológicos: compostaje y digestión anaerobia.
 - Tratamientos térmicos: incineración, pirólisis y gasificación, procesos distinguidos entre sí en la cantidad de oxígeno que interviene en ellos.
5. **Eliminación o depósito:** se considera como eliminación cualquier otro tratamiento que se le de a los residuos distinto de la valorización, y depósito a la deposición última de estos en vertederos. El uso de los vertederos debe quedar como opción final ya que en el caso de no cumplir rigurosamente toda la normativa de vertederos pueden darse graves problemas de contaminación. Además, necesitan un gran mantenimiento hasta 30 años después de su clausura, puede provocar problemas de desplazamiento de tierras o de vertido de lixiviados, contaminación de las aguas subterráneas y supone una ocupación extensa del terreno.

Como podemos observar, el compostaje es uno de los métodos que permite reducir el volumen de residuos además de estabilizar el desecho.

Según la Directiva de Vertederos, es necesario reducir los residuos biodegradables antes de verterlos en ellos, por lo que el compostaje será una opción muy útil para conseguir este fin y que además aportará un producto comercializable como es el compost.

- **Gestión de olores**

- En España, la primera mención al control de olores fue el Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas (RAMINP) en el que se clasifican como molestas “las actividades que constituyan una incomodidad por los ruidos o vibraciones que produzcan o por los humos, gases, **olores**, nieblas, polvos en suspensión o sustancias que eliminen”. Además, incluye en la clasificación de actividades molestas, insalubres, nocivas o peligrosas “Obtención de abonos orgánicos y otros productos de igual condición (sangre desecada, estiércol, basuras, harina de huesos, harina de pescado, etc.)” por la producción de malos olores. También se aconseja que la distancia entre una planta que pueda provocar contaminación odorífera y un núcleo poblacional sea de, como mínimo, 2 km. El RAMINP está derogado pero sus recomendaciones, salvo que se haga un estudio de olores específico, se puede seguir utilizando (Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 1961).
- En Europa, la primera normativa que surgió en cuanto al control de olores fue la Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC). En ella se estableció que en la realización del proyecto básico era obligatorio incluir medidas de prevención y corrección de contaminación por olores.
- Esta Directiva fue traspuesta por la *Ley 16/2002*. En ella se prioriza en la política ambiental las medidas preventivas frente a las correctoras y se establecen una serie de medidas que tienen como fin la corrección y prevención de la contaminación por olores, así como la obligación de incluir en el proyecto básico equipos de tratamiento para la minimización de la misma.
- Más adelante, surge en España la *Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera*, donde se regulan los niveles de calidad del aire, de la zona urbana y de las emisiones industriales. Esta ley surge debido al crecimiento de instalaciones orientadas al tratamiento de residuos y al desarrollo de poblaciones cerca de estas plantas, lo que provoca protestas entre los ciudadanos.

En esta Ley se indica que los olores se integrarán dentro de los instrumentos de prevención y control ambiental:

- AAI (autorización ambiental integrada)
- AAU (autorización ambiental unificada)
- CA (calificación ambiental)

Las solicitudes de AAI o de AAU deberán contener un Estudio de Impacto Ambiental (art. 16.2) que, entre otros, deberá incluir:

- Identificación y valoración de impactos de las distintas alternativas
- Propuestas de medidas correctoras
- Por otra parte, es importante resaltar la norma EN-13725 (2003) en la que se establece la técnica para determinar la cantidad de olor, un término muy subjetivo. Queda establecido que esto se realizará mediante Olfatometría Dinámica.

Algunos países de la Unión Europea, como son Holanda, Alemania, Reino Unido, entre otros, utilizan esta normativa europea, aunque en cada uno de los países con distintos criterios, por ejemplo, Holanda marca un límite de inmisión $\leq 1,5$ uoE/m³. percentil 98 para plantas de compostaje, mientras que Irlanda, para el mismo tipo de plantas, marca un límite de ≤ 3 uoE/m³ a percentil 98. En España, dependiendo de la comunidad autónoma se está imponiendo límites de 3 a 5 uoe/m³.

- Finalmente, cabe destacar en Andalucía el Decreto 239/2011, de 12 de julio, por el que se regula la calidad del medio ambiente atmosférico y se crea el Registro de Sistemas de Evaluación de la Calidad del Aire en Andalucía. En él, se hace referencia a la norma EN-13725 mencionada anteriormente y se define el olor según su concentración, intensidad, carácter y tono hedónico. También menciona que las personas o entidades que generen emisiones de olores pueden ser requeridas para evaluar la incidencia e impacto generado en su entorno (Martín, 2014).

En definitiva, no existe una legislación específica a ningún nivel (Europeo, Estatal o andaluz) que regule la **emisión** de olores, aunque en las AAI se están aplicando límites a la **inmisión** de olores.

1.4 Composición de los residuos domésticos (RD)

La ley 22/2011 define los residuos urbanos como: “aquellos que se generan en las actividades desarrolladas en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias”. (Agencia Estatal, 2011)

Esta ley distingue entre dos tipos de RD:

- **Residuos domésticos:** Son todos los producidos en los hogares y domicilios como consecuencia de las actividades domésticas, así como los similares a estos generados en servicios e industrias. Dentro de la clasificación ellos encontramos también escombros originados en obras menores de construcción y reparación domiciliaria, ropa, pilas, aparatos electrónicos, etc, así como los restos procedentes de la limpieza de vías públicas, animales muertos y vehículos abandonados.
- **Biorresiduos:** aquellos procedentes de jardines y parques y alimentos que procedan de los restaurantes, hogares, plantas de procesado de alimentos, etc.

Los residuos urbanos recibirán un tratamiento u otro según su composición. Esta depende de distintos factores:

- Nivel de vida de la población.
- Zona (rural o urbana).
- Época del año.

Generalmente, se puede afirmar que existe una mayor producción en zonas urbanas o en zonas que presenten un gran desarrollo industrial.

De esta manera, se calcula que los países con un alto desarrollo presentan una generación de residuos diarios de 1,6 kg por habitante y en los países con menor industrialización de aproximadamente 0,36 kg. En España el valor se encuentra cercano a 1,5 kg por habitante y día y en Andalucía en torno a 1.75.

Cabe destacar que en zonas rurales o en los países con un menor desarrollo la fracción orgánica presente en los residuos es mayor. (Capítulo 8. Gestión y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos., 2008)

Componente	Nicaragua	Cataluña
Fración orgánica (restos comida)	82,3 %	45,0 %
Papel y cartón	4,0 %	25,0 %
Plástico	8,5 %	7,0 %
Metales férricos y no férricos	1,0 %	4,0 %
Vidrio	1,2 %	8,0 %
Otros residuos	3,0 %	11,0 %

Figura 1. Diferencias de composición de los RD entre países. (Universidad Pública de Navarra, 2015)

En España, los residuos domésticos se encuentran formados principalmente por:

- **Materia orgánica:** como se ha mencionado anteriormente, cuanto más desarrollada se encuentra la población, menor es el contenido en materia orgánica de sus residuos. Aún así, en España es la fracción dominante. Proviene sobre todo de restos de alimentos y de jardinería.
- **Papel y cartón:** es la segunda fracción predominante en los residuos españoles y su tendencia es creciente. Está formada principalmente por envases, periódicos, etc.
- **Plástico:** es la tercera porción en importancia tal y como se muestra en la Figura 2. Tiene una multitud de procedencias distintas. Destacan sobre todo los envases, las botellas y embalajes.
- **Vidrio:** procedente de botellas principalmente.

También es importante la presencia que tienen dentro de los residuos los materiales textiles, los metales (como la hojalata, procedente de envases alimenticios), las maderas (parte fundamental del mobiliario del hogar), etc.

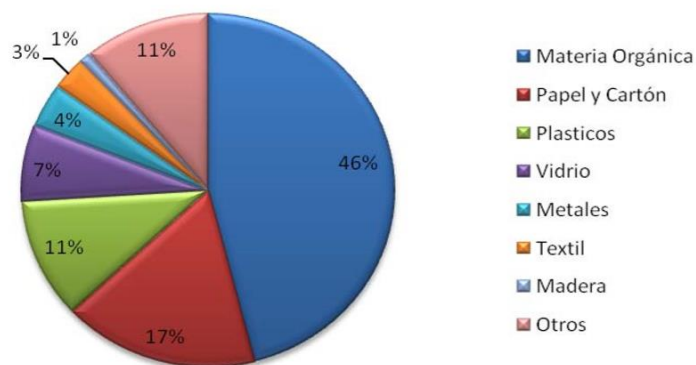


Figura 2. Composición de los RD. (Luna, 2014)

En la siguiente gráfica (Figura 3) se pueden observar los distintos tratamientos a los que son sometidos estos residuos y qué porcentaje suponen cada uno del total. Se puede apreciar que en torno a la mitad de ellos acaban depositados en vertedero sin haberles realizado ningún tipo de tratamiento, que como se ha explicado anteriormente, es la opción más indeseable.

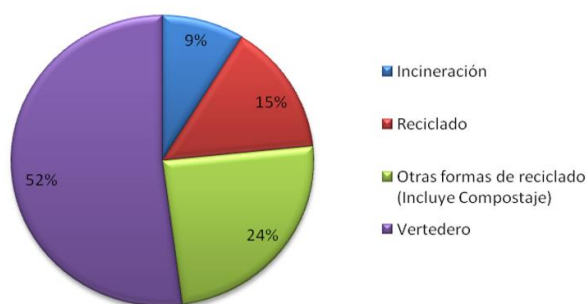


Figura 3. Tratamientos de los residuos domésticos. (Luna, 2014)

Es importante destacar que dentro de las otras formas de reciclado (porción verde de la Figura 3) se encuentran los residuos destinados a instalaciones de tratamiento mecánico-biológico, como serían el compostaje y la biometanización.

De estas dos tiene especial interés el compostaje, pues es una de las formas de valorización más empleadas, aunque también hay que aclarar que del material que entra en estas plantas no se recupera más del 25%.

2 PROCESO DE COMPOSTAJE

2.1 Descripción y usos

El suelo es la base principal en la que se asienta la agricultura, y por consiguiente, la vida de los seres vivos terrestres, por lo que es importante su cuidado y el mantenimiento de su calidad.

El compostaje, tal y como se ha explicado anteriormente, es un proceso de transformación de la materia orgánica en condiciones aerobias microbacterianas que busca la obtención de un producto principal, **el compost**.

También denominado humus, el compost tiene un aspecto terroso como el que se puede observar en la Figura 4, y gracias a la estabilización a la que se han sometido los residuos se encuentra libre de olores y patógenos.



Figura 4. Aspecto del compost (Werner, 2018)

El compost sirve como alimento para las plantas y de abono natural para mejorar las propiedades del suelo, es decir, ayuda a conservar y aportar fertilidad a la tierra.

Además, de forma indirecta se logra reciclar un porcentaje importante de los residuos orgánicos domésticos, lo cual supone un gran beneficio para el medio ambiente.

Dentro de las ventajas que tiene añadir materia orgánica al suelo en forma de compost se encuentran (Tortosa, 2011):

- **Mejora de sus propiedades físicas**

- Contribuye a la estabilidad del suelo mediante su estructuración. Consigue que los suelos arenosos tengan un mayor grado de compactación mientras que los suelos demasiado macizos disminuyan su grado de compactación.
- Favorece a la capacidad de retención del agua.
- Protege al suelo frente a la erosión, combatiendo los problemas de desertización.
- Aumenta la permeabilidad y favorece la porosidad, mejorando la aireación de las raíces.
- Aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo, impidiendo que las corrientes de agua arrastren los nutrientes solubles.

- **Mejora de sus propiedades químicas**
 - Aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Ca, Mg, K...), los cuales se encuentran involucrados en el crecimiento de las plantas.
 - Aportan a las plantas energía y nutrientes necesarios para su desarrollo.
- **Mejora de sus propiedades biológicas**
 - Favorece el crecimiento vegetal.
 - Estimula la actividad biológica, por el aporte de microorganismos.
 - Consigue el aprovechamiento del nitrógeno, evitando que se pierda por lixiviación o como amoníaco en el aire mediante la transformación del nitrógeno soluble en nitrógeno orgánico.
 - Pone a disposición de la planta los componentes minerales insolubles tras su descomposición.

De estos tres parámetros, es importante sobre todo la actividad biológica, ya que cuanto mayor sea esta, mayor será la calidad del suelo. El compost actúa directamente en él aumentando la cantidad de materia orgánica en el suelo y por consiguiente su fertilidad.

Actualmente, el compostaje es un gran medio para satisfacer los objetivos de reducción del volumen de los residuos. Operando la planta en condiciones adecuadas y con el uso de la tecnología disponible, no tienen por qué darse problemas de malos olores o contaminación.

2.1.1 Usos en la agricultura

El uso del compost en la agricultura puede tener tres fines distintos:

- Abono orgánico o fertilizante.
- Enmienda orgánica o húmica.
- Sustrato de cultivo.

En concreto, la enmienda orgánica o húmica tiene como objetivo frenar la pérdida de humus del suelo, conociéndose como humus la sustancia formada por productos orgánicos de naturaleza coloidal presente en la tierra. Proviene de la descomposición de materiales orgánicos y se encuentra en la parte alta del mismo. Este, aporta a los suelos propiedades parecidas a las descritas en el compost, pero de forma natural. Su desaparición genera problemas de erosión y deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que produce por consiguiente una disminución de la fertilidad. Por ello, es importante la adición de compost al suelo, que actuará igual que el humus natural. Tradicionalmente se ha usado como enmienda húmica el estiércol.

También se ha demostrado que el compost aporta al suelo oligoelementos que evitan la aparición de enfermedades por carencias de elementos en los cultivos, así como otras enfermedades de carácter fúngico.

El compost se ha usado tanto en cultivos de campo (patatas, maíz...) como en cultivos de invernadero (tomates, lechuga...).

La cantidad de abono que deberá aplicarse a cada suelo vendrá dada por varios factores, como por ejemplo, la necesidad de nutrientes que tenga el cultivo en concreto. Normalmente, se usa una cantidad de 20 a 50 Tm/ha cada 2-3 años en otoño o en primavera. Es aconsejable dejar un tiempo de reposo desde que se añade el compost hasta que se realiza la siembra.

El compost producido en Sevilla, por ejemplo, se aplica sobre todo a cultivos de arroz o de vid.

2.1.2 Otros usos

Además de los usos del compost que se han mencionado anteriormente, puede tener otras utilidades no menos importantes como serían (Usos del Compost, 2013):

- Recuperación de terrenos con el sustrato empobrecido.
- En grandes superficies se podría usar como sustrato y/o soporte orgánico.

- Regeneración de taludes.
- Fijación del suelo, de dunas o de terrazas.
- Aplicación de filtros terrosos para la paliación de malos olores.
- Formación de barreras vegetales.

2.2 Etapas del proceso de compostaje

Aunque hay diversas formas de realizar el compostaje (ver apartado 2.3), hay etapas generales que se dan durante cualquier proceso, independientemente del sistema escogido.

Por otro lado, en posteriores apartados se entrará más en detalle en cada una de las etapas, definiendo los equipos y procesos involucrados, así como las condiciones específicas de operación y diseño que deben seguir.

Estas etapas son las siguientes: pretratamiento, fermentación (y gestión de olores), maduración y afino.

2.2.1 Pretratamiento

En primer lugar, los residuos que llegan a la planta no están preparados para empezar el proceso de compostaje, debiéndose realizar una serie de tareas previas, entre las que se incluye (Epstein, 2011):

- **Recepción** en foso de los residuos
- **Triage** primario para separar los residuos más voluminosos
- Clasificación mediante un **trómel** para separar la materia orgánica (finos) del resto de residuos (gruesos).
- **Separación** de metales de la fracción de finos. Esto se puede realizar mediante el uso de un separador magnético. Su objetivo es la eliminación de todo material ferromagnético que se encuentre mezclado con la masa orgánica. Consiste en el avance de la materia por una cinta que posee otra cinta superior magnética que va atrayendo las partículas de este tipo. De esta forma es posible eliminar estas fracciones que impedirían que el proceso de compost se diera correctamente además de obtener un material valioso como es el hierro para su posterior venta. La eficacia de separación de esta maquinaria es del 80%. (Ibañez, 2015)

Tras estos pasos, los finos pueden pasar a la etapa de fermentación.

2.2.2 Fermentación

Esta etapa consiste en la descomposición de la materia en condiciones aerobias (en presencia de aire) con actividad microbacteriana. Una vez acaba la actividad de estos microorganismos, no solo se obtiene compost, sino también distintos gases que habrá que tratar antes de liberarlos a la atmósfera.

La fermentación es la etapa más importante del proceso, ya que es en la que se obtiene el producto que se pretende conseguir. En el apartado 2.5 se indican los parámetros a controlar en esta etapa.

Así, hay multitud de formas de realizar la fermentación para producir el compost, las cuales se pueden dividir en dos grandes grupos: sistemas abiertos y sistemas cerrados. En el apartado 2.3 se explican algunos métodos, incluyendo el compostaje en túnel.

Dentro de la fase de fermentación, se distinguen tres sub-fases independientes (Grupo de Gestión de Residuos., 2010)

2.2.2.1 Etapa Mesofílica

En un principio hay una gran cantidad de bacterias y hongos. Debido al aumento de la actividad microbiológica (los microorganismos se multiplican rápidamente), la temperatura empieza a aumentar hasta los 40 °C y dura entre una y dos semanas. El pH disminuye hasta 5.5-6 y se produce CO₂.

2.2.2.2 Etapa Termofílica

Tras alcanzarse la temperatura de 40 °C, si no hay buen control de la relación C/N, puede aumentar la producción de amoníaco y el pH aumenta hasta 7.5-8, valor que ya permanecerá prácticamente constante en lo que resta del proceso, gracias a los microorganismos termofílicos. Los microorganismos mesofílicos de la anterior etapa desaparecen debido al aumento de temperatura, que llega hasta los 60-70 °C. Por otro lado, es una fase en la que hay una gran demanda de oxígeno.

2.2.2.3 Etapa de Enfriamiento

Cuando los nutrientes llegan a valores mínimos, y como consecuencia de la disminución de la actividad microbiológica, la temperatura empieza a descender, alcanzando la temperatura ambiente. Al llegar a 40°C reaparecen los microorganismos mesofílicos y mueren los termofílicos. El pH disminuye ligeramente y, como es lógico, la demanda de oxígeno disminuye.

2.2.3 Maduración

Tras el proceso de fermentación, aunque el producto que se obtiene es similar al compost final, hay que someter este a un proceso de maduración, con una duración muy variable que puede ir desde 4 a 12 semanas. El compost se coloca en pilas estáticas durante este periodo y en función del tiempo de maduración se obtendrán tres tipos de productos (Bazo, 2016) :

- **Compost fresco:** Se produce tras terminar la fase termofílica. Se eliminan los patógenos, pero no hay humificación. Puede utilizarse como preparación del suelo entre cosechas, pero no directamente sobre cultivos.
- **Compost:** Tras un periodo de maduración, ya puede utilizarse sobre cultivos, aunque no como sustrato de crecimiento.
- **Compost curado:** Finalmente y una vez completado el proceso de maduración, el producto se encuentra altamente estabilizado y puede ser utilizado como enmienda orgánica.

2.2.4 Afino

El afino consiste en eliminar las impurezas contenidas en el compost, para aportarle de mayor calidad al material. Esta etapa es opcional y consiste en pasar el producto por un trómel para separar la corriente en finos (producto final) y gruesos (rechazo). Esta corriente de gruesos puede recircularse, tal y como se expone en el apartado 4 de esta memoria.

En la Figura 5 se puede observar cómo sería el proceso general que se ha explicado por el que pasan los residuos desde su llegada a la planta hasta que se convierten en compost.

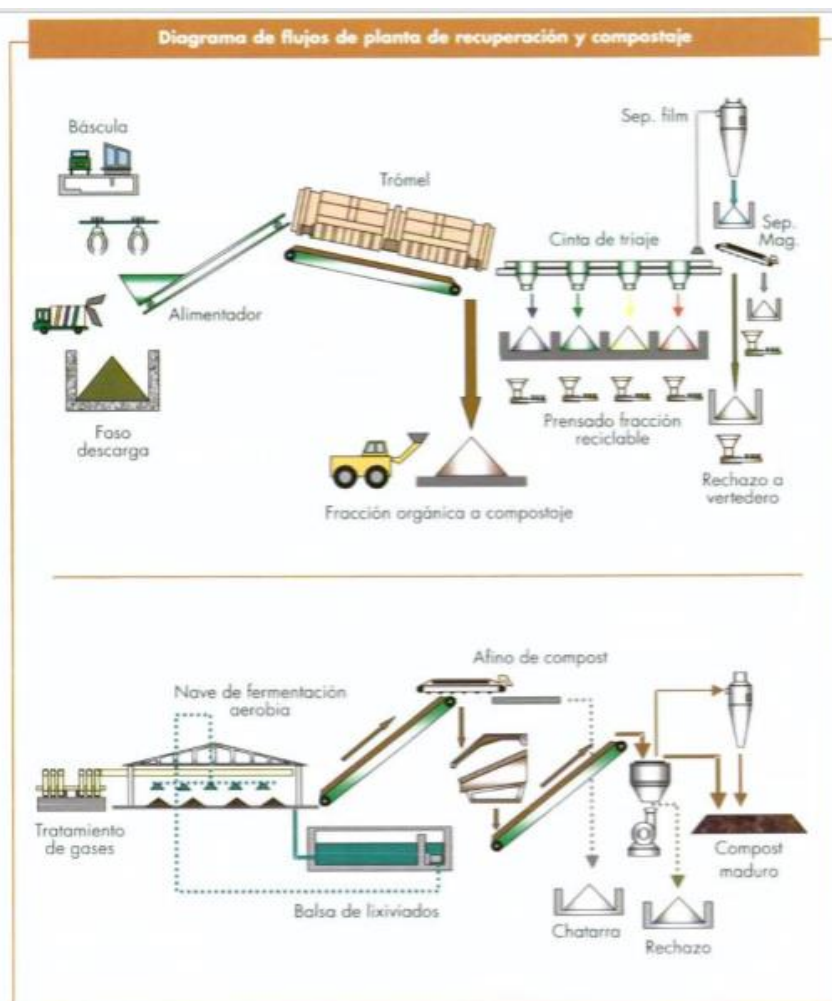


Figura 5. Diagrama de flujo de planta de compostaje. (Junta de Andalucía, s.f.)

2.3 Sistemas de compostaje

Existen distintas formas de realizar el compostaje de los residuos orgánicos, es decir, la etapa de fermentación. En todas ellas se persigue el mismo objetivo, pero cada una sigue una variación tecnológica distinta.

En general, se puede realizar una clasificación de los sistemas de compostaje en dos grandes grupos: sistemas abiertos y sistemas cerrados.

2.3.1 Sistemas abiertos

Es el método más sencillo para realizar el compostaje de los residuos y también el que supone un menor coste, aunque esto no implica que sean menos eficientes. Se aplican principalmente a pequeñas o medianas poblaciones con una elevada disponibilidad de terreno.

En este sistema, los residuos se colocan en pilas o parvas.

Como su nombre indica, se encuentran abiertos al medio, por tanto, son más susceptibles a las condiciones meteorológicas del entorno, tales como lluvias (que podrían provocar el lixiviado de algunos compuestos), vientos, etc. Por ello, pueden encontrarse cubiertos parcial o totalmente. (Plana, Maestro Compostador., 2008)

Dentro de los sistemas abiertos, se encuentran distintos tipos:

- **Compostaje en hilera:** este método procede del sistema básico de compostaje al aire libre. En él, se disponen los residuos en hileras, las cuales se dejan reposar y se voltean periódicamente para conseguir un residuo lo más homogéneo posible y mantener la porosidad de la pila, realizando el volteo por medios mecánicos (AguaMarket, 2015) . Las dimensiones de las filas varían entre 2 y 2,5 m de alto y 4 o 5 m de ancho, dependiendo el tamaño de la base de los equipos que tratarán los residuos. También dependen en gran medida del material que esté siendo procesado. La forma más común para disponer el material suele ser la trapezoidal, pues minimiza el espacio necesario. (Docampo, 2013)
La temperatura se debe mantener altas las primeras semanas (alrededor de 55°C). Para que esto ocurra, las pérdidas de calor de la pila deben ser menores que el calor generado por los procesos metabólicos, por lo que el tamaño de las pilas debe de ser suficiente para permitir este proceso.
El volteo contribuye al control de la temperatura, que suele ser mayor en el centro de la pila y menor en la superficie, consiguiendo distribuirla y disminuirla si es excesiva. Además, favorece la aireación. En las primeras semanas puede realizarse hasta dos veces, completándose la etapa de fermentación en, aproximadamente, ocho semanas (Juan Pablo Silva, s.f.) (Carrasco, 2018).



Figura 6. Compostaje en hileras. (Hileras de Viento, s.f.)

- **Compostaje en pila estática aireada:** en este tipo de compostaje, el material se dispone encima de una red de tuberías conectadas a una bomba de vacío o soplador, dependiendo de si se extrae o se inyecta el aire, respectivamente. Normalmente, se realiza extrayendo el aire, pues provoca una menor dispersión de los olores.
El equipo de aireación cuenta con una doble función: por un lado, controlan la cantidad de oxígeno circulando por la masa a fermentar, y por otro, realiza un control de temperatura de la pila, por ello es importante realizar una elección de equipo que cumpla las características requeridas en el proceso concreto (Juan Pablo Silva, s.f.) . En este caso, la altura de las pilas puede ser de hasta 3 m.



Figura 7. Compostaje en pila estática aireada. (Junta de Andalucía, s.f.)

Dentro de los sistemas abiertos, existen otras variantes menos comunes como serían el compostaje en mesetas, donde la base de las pilas adquiere una mayor anchura, y el compostaje en zanjas, donde los residuos se introducen en agujeros en el terreno (Plana, Maestro Compostador., 2008).

2.3.2 Sistemas cerrados

Este tipo de sistemas se encuentra diseñado para realizar un mayor control de los parámetros determinantes en el compostaje, principalmente la temperatura y la cantidad de oxígeno, generando a su vez un acortamiento de la duración del proceso. Además, consigue que el proceso se encuentre protegido frente a los posibles efectos adversos de la meteorología (Sistemas y Técnicas para el Compostaje., s.f.).

Todo ello, hace que el coste del mismo sea superior al de los sistemas abiertos, pues hay que añadir el valor de las instalaciones y del mantenimiento de estas.

Una de sus mayores ventajas se encuentra en la posibilidad de recoger y tratar los lixiviados, así como los gases a la salida del proceso, lo cual será el motivo principal de este proyecto. Este tratamiento de los gases da lugar a una reducción del impacto ambiental que pueda producir el compostaje.

En los sistemas cerrados, el tiempo de fermentación se reduce hasta unas tres semanas, aproximadamente.

Dentro de los sistemas cerrados hay varias clasificaciones:

- **Compostaje en tambores:** en este método, la masa a fermentar se deposita en un tambor rotatorio que se mueve lentamente con el fin de conseguir una masa de residuos homogénea, consiguiendo un menor tiempo del proceso en general. Para el uso de estos equipos es necesario contar con una gran superficie disponible pues son de gran tamaño. Tienen además un elevado consumo eléctrico.



Figura 8. Compostaje en tambor rotatorio. (Tortosa, 2011)

- **Compostaje en túnel:** los residuos se introducen en el interior de un espacio cerrado denominado túnel. El suelo de este es de hormigón y bajo él se sitúa un falso suelo recorrido por una red de tubería que recogen los lixiviados y los conducen hasta el lugar de recogida y tratamiento de estos. La recogida de lixiviados supone una gran ventaja frente al resto de métodos de compostaje, pues es el único en el cual se puede realizar.

Esta red de tubería también tiene como objetivo aportar a la masa de residuos la cantidad de aire que necesita para fermentar. Este será impulsado por un ventilador a través de las tuberías, realizando un exhaustivo control de la cantidad de oxígeno en el proceso.

En la parte superior del túnel se pueden encontrar rociadores de agua, que confieren a la mezcla la humedad requerida. En este tipo de compostaje se basa el proyecto, suponiendo que los gases a tratar por el sistema de filtrado provienen de un proceso de este tipo. Es por esto que se dedicará un apartado a la explicación de este sistema más adelante (Ibañez, 2015).



Figura 9. Compostaje en túnel. (Diario de Navarra, 2015)

2.3.3 Sistemas estáticos y dinámicos

Además de la clasificación en sistemas abiertos y sistemas cerrados, los métodos de compostaje pueden catalogarse de otras dos formas:

- **Sistemas estáticos:** una vez depositada la masa a compostar, no se realiza ningún movimiento ni volteo de esta durante el proceso.
- **Sistemas dinámicos:** cada cierto tiempo, se realiza el volteo o movimiento del material (Plana, Maestro Compostador., 2008).

En la siguiente imagen se puede ver cómo algunos métodos de compostaje se clasifican en sistema abierto o cerrado y sistema estático o dinámico simultáneamente.

En cuanto al compostaje en túnel, se considera que es cerrado y estático.

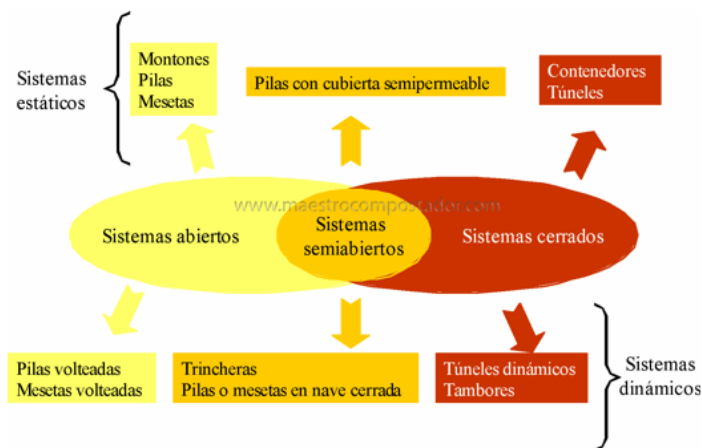


Figura 10. Clasificación de los sistemas de compostaje. (Plana, Maestro Compostador., 2008)

2.4 Ventajas y desventajas del compostaje

El compostaje de residuos tiene una serie de ventajas cuyos **beneficios** hacen que sea una alternativa altamente

recomendada, por ejemplo:

- De la gran cantidad de residuos generados en una población, muchos de ellos son compostables y por tanto se les puede dar un nuevo uso antes de desecharlos totalmente. Entre estos encontramos los biosólidos municipales e industriales, restos de alimentos, desechos de jardín, etc. Una sola instalación industrial de compostaje puede hacerse cargo de dar una nueva vida a todos estos residuos.
- Se puede diseñar de forma que se minimice el impacto ambiental controlando los olores y los bioaerosoles provenientes del proceso.
- Es un buen sistema para reducir el volumen de residuos en los vertederos así como para cumplir los objetivos de reciclaje.
- Sirve para descomponer y degradar multitud de compuestos orgánicos.
- El producto de este proceso, el compost, es utilizable. Sirve para acondicionar los suelos de cultivo, conservar la humedad de los mismos, reducir la erosión y mejorar la filtración.
- Además, el compost añade carbón al suelo, reteniendo de esta forma el carbono que contribuye al efecto invernadero.

Entre sus **desventajas** más destacadas se encuentran:

- Las emisiones de olores, polvos y aerosoles que pueden darse durante el proceso. Este es un aspecto importante que puede paliarse tomando las medidas oportunas en el diseño de la instalación y en el diseño de equipos de filtración de gases.
- Este tipo de sistema ocupa una mayor cantidad de espacio que otros sistemas de gestión de residuos.
- El producto que se obtiene del proceso debe comercializarse.

2.4 Tratamiento de Lixiviados

Según la Directiva Europea relativa al Vertido de Residuos (Abril, 1999) el lixiviado es “cualquier líquido que penetre a través de los residuos depositados y que sea emitido o esté contenido en un depósito controlado. Se trata de un agente gravemente contaminante, derivado del hecho del vertido”. Según esta directiva se tomarán una serie de medidas con el objetivo de controlar el agua de las precipitaciones que caiga sobre el residuo, impedir que penetre en estos y recoger y tratar de forma adecuada las aguas contaminadas formadas.

Generación de lixiviados

Los lixiviados de la planta de compostaje tienen distintas procedencias. Se pueden considerar como principales focos los siguientes:

- El foso de recepción inicial de los residuos domésticos. Aquí puede haber agua de lixiviado procedente de las formas de recogida de estos residuos y de las condiciones climatológicas. Aquí se puede encontrar bastante más agua de la que procede de la propia humedad que contienen los RD. Este foso se encontrará en pendiente para que el agua de lixiviados pueda ser recogida con más facilidad.
- Lixiviado procedente del proceso de compostaje. Durante el compostaje de los residuos es importante mantener unas condiciones de humedad óptimas por lo que será necesario humectar el residuo. De aquí y del propio contenido de agua de la materia prima, se producirá una cantidad de lixiviado. Este podrá ser recogido y filtrado para volver a introducir en el proceso y poder aprovechar parte de este líquido.
- El agua de lavado del biofiltro percolada también será tratada como un lixiviado.
- Lixiviados producidos en la planta en procesos ajenos al compostaje como sería la limpieza de la planta, de los vehículos, etc.

Gestión de lixiviados

Los lixiviados producidos en la planta de compostaje serán recogidos mediante un sistema de tuberías y conducidos hacia una balsa que tendrá las dimensiones necesarias para tratar el caudal producido (Bazo, 2016).

Esta se encontrará en la zona más baja de la planta para que los lixiviados lleguen a ella por acción de la gravedad. Contará con un equipo de bombeo que retorne los lixiviados a la etapa de compostaje para regar los residuos con ellos.

Estos tendrán que ser gestionados mediante una de las siguientes 3 formas:

- Llevarlos a una planta de tratamiento externa.
- Utilizarlas de nuevo en el proceso de compostaje para regar las pilas y mantener la humedad necesaria.
- Tratarlos dentro de la planta de compostaje.

Esta última opción quedará descartada ya que el volumen de lixiviados generado se podrá usar en su mayor parte de nuevo en el proceso de compostaje. En el caso puntual de que la cantidad generada sea mayor de lo normal, serán transportados a una planta de tratamiento externo.

Según la normativa será necesario recoger cada cierto tiempo una muestra de los lixiviados producidos en la planta y medir ciertos parámetros en ellos entre los que se encuentran la DQO y la DBO5 (Castro, 2018).

2.5 Parámetros a controlar durante el proceso

Para que la fase de fermentación se dé en condiciones óptimas y se pueda producir un compost de calidad que cumpla con los requerimientos y la legislación vigente, es necesario controlar y vigilar ciertas variables que pueden influir de manera negativa en el proceso si se salen fuera del rango estándar (Márquez, s.f.)

Estos parámetros a controlar serán (Ministerio del trabajo y asuntos sociales España, s.f.):

Aireación: como el proceso de compostaje es un proceso aerobio es necesaria la presencia de oxígeno y la evacuación adecuada de CO₂. Para ello, se procede a la aireación, la cual debe mantenerse en unos niveles adecuados y variantes pues dependerán de la fase del proceso en la que se encuentre: en la fase mesófila el nivel de oxígeno requerido es bajo, en la fase termófila es máximo y al final del proceso va decreciendo. Es importante tener en cuenta que la aireación no puede ser excesiva pues afectaría a la temperatura y a la humedad.

Temperatura: este es uno de los parámetros más importantes a controlar porque una pequeña variación de temperatura afecta de forma más importante que una variación en el pH, en la humedad o en la relación C/N, existiendo una relación directa entre la temperatura y el nivel de degradación de la materia. Al principio todo el material a compostar se encuentra a la misma temperatura, sin embargo, esta va aumentando conforme aumenta la actividad microbiana. Se pueden observar tres fases:

-Fase mesófila inicial: la temperatura se encuentra por debajo de los 45°C. Al final de ella se producen los ácidos orgánicos.

-Fase termófila: la temperatura es mayor de 45°C. Este crecimiento se debe al aumento de la actividad microbiana que genera calor. La temperatura puede llegar a alcanzar entre 60-70°C.

-Fase mesófila final: la temperatura alcanzará el mismo valor que en la etapa inicial y entonces podrá considerarse terminado el proceso.

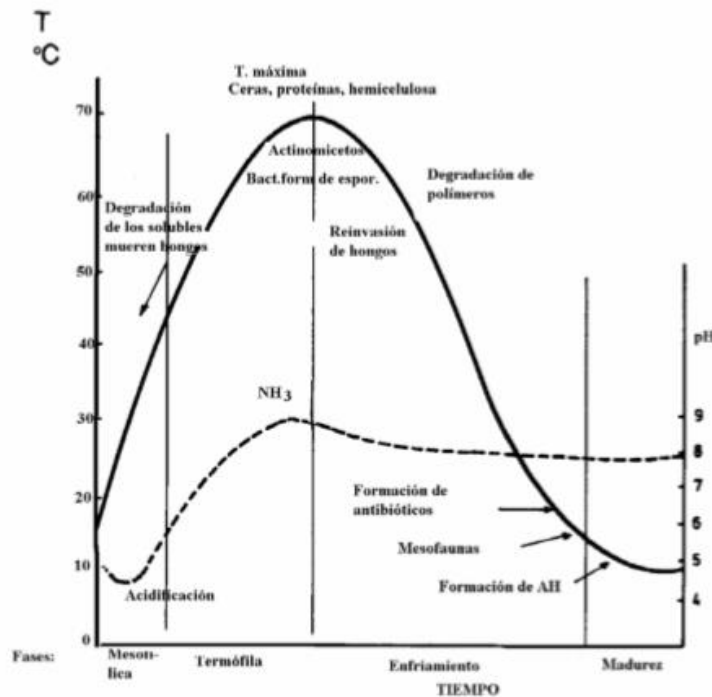


Figura 11. Evolución de la temperatura y el pH durante las etapas del compostaje (Costa, 1991)

Humedad: durante el proceso de compostaje la presencia de agua es imprescindible para que los microorganismos puedan realizar sus actividades metabólicas. El nivel de humedad óptimo será aquel en el que el agua no llegue a ocupar los poros de la masa en su totalidad y permita a su vez la circulación de oxígeno por el interior de esta. La actividad microbiana disminuye cuando la humedad se encuentra por debajo del 30% o por encima del 70% ya que en este caso se reduce la transferencia de oxígeno y comienzan a darse condiciones anaerobias, produciéndose la putrefacción de la materia orgánica con los consiguientes malos olores y la disminución de la velocidad del proceso. Por tanto, se considerará un nivel óptimo de humedad cuando se encuentre entre 50-70%, dependiendo este del tipo de material.

Un exceso de humedad puede ser corregido mediante una correcta aireación de la pila, mientras que con un buen control de humedad y aireación puede llegar a controlarse la temperatura.

pH: su influencia en el proceso se debe a su actuación sobre los microorganismos. Siguiendo la variación del pH se puede realizar un control indirecto de la aireación, pues si las condiciones pasan a ser anaerobias se liberan una serie de ácidos que disminuirían el valor del pH. Al igual que en el perfil de temperatura, se observan tres fases distintas en cuanto a variación del nivel de acidez del proceso:

-Durante la fase mesófila hay una disminución del nivel de pH por el comienzo de la actividad microbiana sobre la pila de residuos que da lugar a la formación de ácidos orgánicos.

-En la segunda fase se da una alcalinización del medio pues se pierden ácidos orgánicos y se genera amoníaco por la descomposición de las proteínas, alcanzando el valor más alto de aproximadamente 8,5.

-En la tercera y última fase, el pH alcanza valores cercanos a la neutralidad, 7-8, debido a las propiedades tampón de la materia orgánica.

Relación C/N equilibrada: son dos constituyentes principales de la materia orgánica, siendo su relación óptima 25-35 dependiendo de las materias primas que forman el compost. Si es >35 el proceso se alarga considerablemente mientras que si es <25 se producen pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco. Es un factor importante porque, como se puede observar, dependiendo de su valor la fermentación se realizará o no de forma correcta. Esta relación va disminuyendo a medida que avanza el proceso como se puede ver en la gráfica. En esta se muestra la evolución de este parámetro durante el compostaje de estiércol y paja.

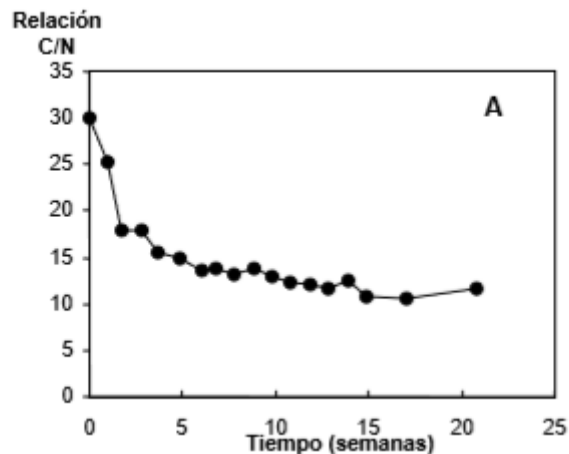


Figura 12. Evolución de la relación C/N en el compostaje de estiércol de ovino y paja (Revista Argentina de Microbiología, 2017)

Población microbiana: el tipo de microorganismos y la cantidad presentes en cada etapa depende del tipo de material a compostar que se tiene inicialmente. En la primera etapa, la flora mesófila de los materiales orgánicos comienza su desarrollo, provocando la intensa actividad de hongos y bacterias un aumento de la temperatura en el interior de la masa de compostaje. Al aumentar la temperatura, la población de hongos y bacterias crece, cuya actividad provoca que se alcancen fácilmente los 70°C . Esta temperatura se mantendrá durante varios días. Finalmente, cuando la materia orgánica se ha consumido, la temperatura comienza a disminuir.

3 COMPOSTAJE EN TÚNEL

El compostaje en túnel pertenece a los sistemas cerrados, tal y como se ha indicado anteriormente y como se muestra en el esquema de la Figura 10. Se aplica tanto grandes como a las pequeñas instalaciones y es muy eficaz en el control de olores.

Este tipo de sistema consiste en la construcción de una serie de contenedores donde se introducen los residuos. Las medidas generales de estos túneles son 3 metros de alto, 4-5 metros de ancho y con un fondo de alrededor de 30 metros de profundidad, todo completamente sellado.

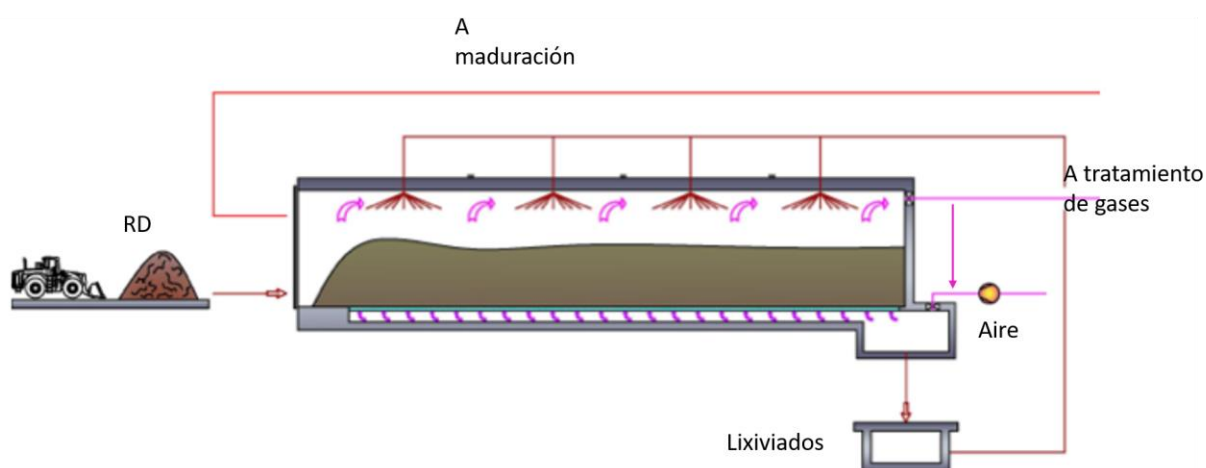


Figura 13. Esquema general de un túnel de compostaje.

El sistema podrá estar formado por unas instalaciones fijas formadas por varios túneles en serie o por contenedores transportables.

Los túneles cuentan con un sistema de tuberías para la recogida de los lixiviados producidos durante el proceso, así como un sistema de riego que aportará humedad cuando los residuos lo requieran, suponiendo estos dos puntos grandes ventajas en el proceso. Además de esto, el suelo está dotado de unas ranuras que crean un sistema de aireación forzada.

La temperatura, la humedad y el nivel de oxígeno del proceso se medirán mediante una serie de sondas colocadas en el interior de los túneles y controladas mediante un sistema de control automatizado.

La aireación del medio se realizará usando aire fresco, aire reciclado o una mezcla de ambos según los valores de temperatura y nivel de oxígeno medidos mediante las sondas.

La humedad se regulará mediante el sistema de riego, el cual introducirá más o menos agua en el sistema en función de las condiciones de entrada del material y de las condiciones de operación.

En cuanto al control de la temperatura, este podrá hacerse buscando patrones de comportamiento y descubriendo los límites de los períodos termófilos y mesófilos.

El aire, una vez que ha pasado por la pila de residuos y conteniendo los productos que producen el olor, se recogen por el techo del túnel y se envían al sistema de tratamiento de olores.

Un posible perfil de temperatura de un proceso con una duración de 10 días podría ser el siguiente:

- **Inicio del proceso:** esta etapa dura un día. La temperatura alcanzada será aproximadamente 35°C.
- **Etapa mesofílica:** durante esta fase se alcanzará una temperatura comprendida entre 35°C y 40°C y su duración aproximada serán 4 días.

- **Etapa termofílica:** como su nombre indica, en esta etapa la temperatura será superior a la anterior. Es una fase en la que se persigue el objetivo de higienizar los residuos, es decir, eliminar todos los agentes patógenos que puedan portar. Por ello, deberán mantenerse durante al menos 3 días a una temperatura no inferior a 60°C.
- **Etapa final:** enfriamiento del proceso durante 2 días.

Es importante destacar que el producto que se obtiene de los túneles deberá seguir un proceso de maduración controlada durante al menos 2 meses más. Finalmente se requerirá una preparación final del producto mediante cribado u otras técnicas. Suele necesitarse un espacio para curar aunque el mismo túnel puede utilizarse para este fin.

Este sistema suele operarse de forma discontinua. En el interior de los contenedores suelen realizarse las fases que requieren un control mas exhaustivo de la temperatura y la humedad para que se higienice de forma correcta. Además, en este período la generación de gases será mayor.

Por tanto, el compostaje en túnel presenta varias **ventajas** frente a otros procesos de obtención de compost:

- Control de las variables críticas (temperatura, humedad y nivel de oxígeno).
- Recogida de lixiviado y posibilidad de recirculación de los mismos. Estos pueden usarse para rehumectar la masa que se está fermentando. Una vez realizado un análisis de los mismos, en el caso de ser adecuados, podrán usarse para el riego.
- Recogida de los gases producidos y posibilidad de enviar los mismos a un sistema de biofiltración y/o de desodorización (eliminación de olores).

4 GESTIÓN DE OLORES

La depuración y el control de los gases producidos durante el proceso de compostaje es uno de los parámetros últimos en él, pero a su vez uno de los más importantes, pues sin un buen diseño del sistema de filtración la planta no podrá funcionar.

Como se ha mencionado anteriormente, la emisión de gases procedentes de una planta de compostaje puede provocar problemas de malos olores en los alrededores y contaminación ambiental.

Los principales compuestos de los desechos que pueden originar problemas de este tipo son el azufre y el nitrógeno.

El método que predomina para realizar el control de olores es la biofiltración y en menor medida los sistemas químicos.

4.1 Sentido del olfato

Los olores del entorno son percibidos por el ser humano a través del sentido del olfato. Gracias a esto es posible detectar sustancias del alrededor, así como cuerpos y objetos extraños.

El cuerpo humano cuenta con alrededor de 100 millones de células nerviosas que funcionan como receptoras de la sensación olfativa. Este número varía dependiendo de cada individuo por lo que cada persona tendrá sensaciones muy distintas ante los mismos compuestos. Una de las características más importante de este sentido es que solo se precisa de una muy pequeña concentración del estimulante en el aire para que se active la sensación olfativa, por ello es tan importante un buen control de los olores procedentes de cualquier planta que se encuentre en una zona cercana a una población.

Se cuenta con tres vías olfativas (Octavio Maldonado Saavedra, 2012):

- El sistema olfativo arcaico: este primer sistema es el que gestiona los reflejos olfativos básicos.
- El sistema antiguo: consiste en el reconocimiento automático de olores como el de los alimentos, así como el rechazo a aquellos que no se encuentran en buenas condiciones para su ingestión o productos tóxicos.
- El sistema que se encarga de la percepción consciente de los olores.

El sentido del gusto y del olfato están relacionados entre sí, formando ambos parte del sistema sensorial químico del cuerpo humano.

La manera en que los olores llegan al cerebro es la siguiente:

1. El aire es inhalado a través de las fosas nasales. Las moléculas que flotan en el aire se disuelven en la mucosa de las mismas.
2. Bajo esta mucosidad se encuentra el epitelio, donde están las células receptoras del olfato, que transmiten la información al bulbo olfatorio que se encuentra en la parte de atrás de la nariz.
3. Los bulbos olfatorios poseen receptores sensoriales que envían información a los centros primitivos del cerebro, donde se estimulan recuerdos y emociones, así como a la neocorteza donde se modifican los pensamientos conscientes.
4. Finalmente, se limpian las mucosas olfativas, mediante una solución enzimática segregada por unas glándulas del epitelio olfativo, eliminando así las moléculas que han excitado las neuronas.

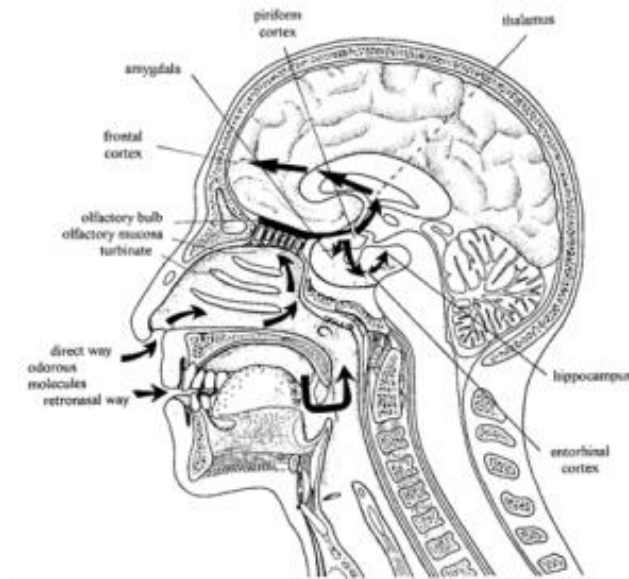


Figura 14. Esquema del proceso olfativo. (Laffort, 1994)

En la Figura 15, se muestran los efectos sensoriales producidos cuando se da un aumento de la concentración del olor percibido. Cuando la concentración de la sustancia que ha activado el sistema olfativo es baja, tan solo se produce la detección del olor en cuestión, aunque tiene que aumentar un poco más para poder reconocerlo. Cuando la concentración alcanza el nivel 3, el olor puede comenzar a ser molesto e incluso intolerable. Si la concentración pasa de un determinado punto, se puede producir irritación e incluso toxicidad, llegando así al nivel más peligroso.

Concentration	Level	Effect
	1	Odor detection
	2	Odor recognition
	3	Odor annoyance
	4	Odor intolerance
	5	Perceived intolerance
	6	Somatic irritation
	7	Toxicity

Figura 15. Efectos sensoriales según la concentración de olor. (Epstein, 2011)

En el caso de una planta de compostaje, los olores proceden de compuestos presentes en la materia prima. Existen algunos compuestos que no son molestos ni aunque exista una gran concentración de ellos, sin embargo, hay otros que incluso en pequeña cantidad pueden resultar intolerables.

Los principales olores emitidos por una planta de compostaje proceden de los COVs, cuya emisión comienza cuando se reciben los residuos, pero se intensifica sobretodo en las primeras fases del proceso. Algunos de los compuestos orgánicos volátiles generados más comúnmente son (Martín, 2014):

- Hidrocarburos alifáticos.
- Hidrocarburos aromáticos.
- Alcoholes.
- Cetonas.
- Ésteres.
- Aldehídos.
- Ácidos.
- Terpenos.

Es importante mencionar la generación de compuestos de azufre, que son conocidos por su mal olor, como el ácido sulfúrico. De igual forma, hay que destacar la formación de compuestos de amoníaco como el nitrógeno, proveniente de la descomposición de proteínas y otras sustancias orgánicas.

4.1.1 Medida de olores

Existen varias formas de caracterizar los olores: según su cantidad, su intensidad, su persistencia y sus características (Epstein, 2011).

Los olores no se pueden caracterizar por la concentración de los compuestos que posee, ya que algunos pueden encontrarse en una concentración elevada pero no ser tan olorosos como otros que se encuentran en pequeña proporción.

La cantidad de olor se puede caracterizar por el ratio D/T (dilution-to-threshold ratio), que es el número de diluciones que hay que hacer para que un 50% de un grupo de personas (entre 8 y 10 individuos normalmente) deje de detectar el olor.

La intensidad del olor es la fuerza relativa de este, y se compara normalmente con un compuesto estándar como sería el n-butanol. Viene expresado en partes por millón de n-butanol (ppm de n-butanol). Si el valor de este compuesto es alto, se considera que el olor es fuerte. La relación entre la intensidad y la concentración viene expresada por la siguiente ecuación:

$$I = k \cdot C^n$$

Siendo:

- I la intensidad del olor.
- C la concentración del compuesto que emite olor en mg/m^3 .
- k y n constantes que toman uno u otro valor dependiendo del compuesto a estudiar.

La persistencia del olor por su parte indica cuánto tiempo permanece el olor, lo cual dependerá de la velocidad de dilución de este. Se determina diluyendo de forma progresiva el olor y midiendo su intensidad con cada dilución que se realiza.

El carácter del olor determina el tipo de olor o la molestia que puede provocar. Esto se evalúa comparando el olor con otros olores.

Por otro lado, hay que determinar el tono hedónico del olor, que es la tolerancia o rechazo que provoca la exposición a este. Una forma de cuantificarlo es en una escala de -10 a +10, donde 0 es un olor neutro, -10 extremadamente desagradable y +10 muy agradable.

La medida de olores se puede realizar en campo o en laboratorio, donde se utilizan tubos de detección. En campo se puede realizar la medida mediante olfatometría dinámica, una técnica sensorial, que expresa este valor en términos de unidades de olor europeas por metro cúbico.

Una de las técnicas más recientes para realizar esta olfatometría es el uso de una nariz electrónica como la que se muestra en la Figura 16. Esta es capaz de detectar los COVs de una muestra y discriminar si es olorosa o no

mediante una serie de sensores químicos que posee en su interior y un programa quimiométrico. (Busto, s.f.)



Figura 16. Nariz electrónica (González, 2018)

4.2 Legislación relativa al control de olores

La primera normativa que surgió en cuanto al control de olores fue la Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC). En ella se estableció que en la realización del proyecto básico era obligatorio incluir medidas de prevención y corrección de contaminación por olores.

Esta Directiva fue traspuesta por la *Ley 16/2002*. En ella se prioriza en la política ambiental las medidas preventivas frente a las correctoras y se establecen una serie de medidas que tienen como fin la corrección y prevención de la contaminación por olores, así como la obligación de incluir en el proyecto básico equipos de tratamiento para la minimización de la misma.

Es destacable a su vez el Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas (RAMINP) en el que se clasifican como molestas “las actividades que constituyan una incomodidad por los ruidos o vibraciones que produzcan o por los humos, gases, olores, nieblas, polvos en suspensión o sustancias que eliminen”. Además, incluye en la clasificación de actividades molestas, insalubres, nocivas o peligrosas “Obtención de abonos orgánicos y otros productos de igual condición (sangre desecada, estiércol, basuras, harina de huesos, harina de pescado, etc.)” por la producción de malos olores. También se aconseja que la distancia entre una planta que pueda provocar contaminación odorífera y un núcleo poblacional sea de, como mínimo, 2 km. Debido al avance de las tecnologías, el uso de este Reglamento ha quedado obsoleto (Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 1961).

Más adelante, surge en España la *Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera*, donde se regulan los niveles de calidad del aire, de la zona urbana y de las emisiones industriales. Esta ley surge debido al crecimiento de instalaciones orientadas al tratamiento de residuos y al desarrollo de poblaciones cerca de estas plantas, lo que provoca protestas entre los ciudadanos.

Por otra parte, es importante resaltar la norma EN-13725 (2003) en la que se establece la técnica para determinar la cantidad de olor, un término muy subjetivo. Queda establecido que esto se realizará mediante Olfatometría Dinámica, explicada anteriormente.

Finalmente, cabe destacar en Andalucía el Decreto 239/2011, de 12 de julio, por el que se regula la calidad del medio ambiente atmosférico y se crea el Registro de Sistemas de Evaluación de la Calidad del Aire en Andalucía. En él, se hace referencia a la norma EN-13725 mencionada anteriormente y se define el olor según su concentración, intensidad, carácter y tono hedónico. También menciona que las personas o entidades que generen emisiones de olores pueden ser requeridas para evaluar la incidencia e impacto generado en su entorno (Martín, 2014).

4.3 Parámetros a controlar

Los parámetros que se deben controlar para evitar la emisión de olores son los siguientes (Epstein, 2011):

Condiciones climáticas

El clima afecta a la dispersión del olor y de las partículas de COVs, así como a la dispersión de polvos y bioaerosoles. Es posible modificar el efecto del clima mediante los llamados cinturones de protección, consistentes en hileras de árboles que frenan el flujo de aire. Los cinturones de protección crean una barrera física contra el movimiento del viento y del aire. Además, los árboles absorben la energía del viento, reduciendo su velocidad en la zona cercana al suelo. El resultado de esto será que en las zonas cercanas a la planta de compostaje habrá menos partículas de polvo y menor cantidad de gases olorosos dispersos.

Ajuste de la relación C/N

Para los organismos microbianos los componentes más importantes son el carbono, que supone un aporte de energía para su crecimiento y el nitrógeno, que participa en la creación de nuevas células y en la síntesis de proteínas.

Durante el crecimiento microbiano se necesitan 25-30 partes de carbono por una de nitrógeno. En el caso de que la cantidad de carbono sea excesivamente alta o el nitrógeno bajo, el carbono no se usa en su totalidad. Si la relación C/N presente en el material que se está compostando es baja (es decir, hay una gran cantidad de nitrógeno respecto al carbono presente), existirá más nitrógeno del que los microorganismos pueden procesar. El resto de nitrógeno será convertido en amoníaco, NH_3 , el cual es bien conocido por su fuerte y desagradable olor.

Control de las condiciones anaerobias

En el caso de que la humedad de la pila de residuos sea excesiva, se puede producir un taponamiento de los poros por los que circula el aire, produciendo una disminución del oxígeno que circula por ella.

Una baja frecuencia en el volteo de los residuos o un inadecuado control de la aireación forzada de los mismos también puede dar lugar a una disminución de la cantidad de oxígeno.

En ambos casos se producirán parcialmente condiciones anaerobias dentro de la masa que se está compostando. Si esto ocurre, se liberarán ácidos orgánicos muy olorosos producidos por los microorganismos.

Una forma lógica de remediarlo es realizando un control exhaustivo de la humedad presente en los residuos, así como un buen control de la aireación de los mismos.

En el compostaje en sistemas abiertos puede ser beneficioso para el control de olores añadir encima de la pila una capa del compost ya maduro, aprovechando así una de sus propiedades.

Además del control de estos parámetros, se realizará una depuración de los gases, que terminará de eliminar los olores y los compuestos nocivos para el medio ambiente y la salud.

Humedad

La humedad puede afectar a la tasa de descomposición. Si el contenido de humedad es inferior al 40%, la actividad microbiana se ve reducida. Si es mayor del 60%, el espacio poro libre se reduce ya que los poros se ven ocupados por agua por lo que se propician las condiciones anaerobias que favorecen a la aparición de malos olores.

Temperatura

El control de la temperatura es fundamental para el control de malos olores, y que es importante para destruir los patógenos de forma adecuada.

Estructura física adecuada de la matriz

La estructura física, principalmente la porosidad, es una parte integral importante de la matriz de compostaje. La porosidad es una medida del espacio de aire. Como se ha indicado, el poro libre es el espacio, que permite

que el oxígeno llegue a los organismos, que es importante para mantener condiciones aeróbicas. El mantenimiento de la porosidad adecuada se logra mediante el dimensionamiento de las partículas y el uso de enmiendas o agentes de relleno.

4.4 Métodos de depuración de gases

Para la eliminación de los olores producidos durante el proceso de compostaje existen actualmente distintas tecnologías que podemos agrupar en los siguientes bloques:

- Métodos físicos → Adsorción en carbón y condensación.
- Métodos químicos → Scrubbers y oxidación térmica.
- Métodos biológicos → Bioscrubbers y biofiltración.

Dentro de estas técnicas, la que se considera más ventajosa y en la cual se centra este proyecto es la biofiltración, ya que al tratar la corriente de olores mediante esta técnica no se generan residuos distintos a los tratados y su coste de operación es especialmente bajo.

A continuación, se expondrá una breve explicación de cada una de ellas, ahondando, como se ha dicho anteriormente, en el sistema de biofiltro (Rafael López Núñez, 2012).

4.4.1 Adsorción en carbón

El carbón activo es un adsorbente carbonáceo caracterizado por poseer una gran cantidad de microporos.

Las primeras aplicaciones de materiales similares al carbón activo fueron carbones vegetales o maderas desvolatilizadas y son tan antiguas que es imposible dar una fecha exacta de ello. Sin embargo, la primera aplicación industrial del carbón activo se dio en Inglaterra en 1974, cuando se usaba como compuesto decolorizante en la industria azucarera. Sin embargo, no fue hasta 1880 que R.Von Ostrejko desarrolló varias formas de producir carbón activo tal y como se conoce en la actualidad con el objetivo de la adsorción de contaminantes (Internet Archive Wayback Machine, 2009).

Industrialmente en la actualidad tiene gran utilidad en la purificación de aire, agua y gases.

La adsorción es un proceso por el cual partículas de líquidos o gases (adsorbato) son retenidas en una superficie (adsorbente). Este proceso es ampliamente usado para la eliminación de contaminantes de distintas corrientes.

Para que un compuesto pueda ser adsorbido por carbon activo debe reunir una serie de condiciones como que quepa en el interior de los poros del carbón, que sea no polar o poco polar (aceites minerales, BTEX, polihidrocarburos aromáticos, cloruro) y que su peso molecular sea mayor de 55 g/mol. Cabe destacar que la mayoría de los compuestos orgánicos cumplen con estos requisitos. Por ello, es muy utilizado en la depuración de gases y líquidos contaminados con compuestos orgánicos volátiles. En el caso de purificación de gases es posible someter al carbón a un tratamiento que le permita retener moléculas que no cumplan las características (Adsorción y Desodorización, s.f.).



Figura 17. Carbón activo (Carbotecnia, s.f.).

4.4.2 Condensación

La condensación es una técnica que ayuda a reducir de forma considerable los olores y el contenido en compuestos orgánicos volátiles de una corriente gaseosa. Su principal limitación es la gran cantidad de energía que consumen además de su alto coste.

Existen distintos métodos de condensación (ITENE, s.f.):

- Condensadores de contacto directo: en este caso, el vapor del gas se condensa tras ser rociado con líquido enfriado.
- Condensadores de contacto indirecto: en este método, existen unos tubos centrales por cuyo interior circula el líquido a baja temperatura. La corriente del gas, que se encuentra alrededor de estos tubos, condensa en la parte externa de los mismos.
- Condensadores de aire frío: el funcionamiento es similar al caso anterior, pero en esta ocasión lo que circula por el interior de los tubos es aire frío en lugar de líquido.
- Condensadores presurizados: antes de ser enfriado, el gas sufre un proceso de compresión.

Este método es muy común en la industria química con corrientes gaseosas con gran concentración de compuestos orgánicos generadores de olores y cuyas corrientes a tratar son de gran caudal.

4.4.3 Lavador de gases o scrubbers

El lavado de gases es una técnica mediante la cual se elimina un compuesto contaminante (vapores, olores o gases tóxicos) de una corriente gaseosa para emitirlos de forma limpia a la atmósfera. Al entrar en contacto con una corriente de líquido, se produce el paso de las moléculas a eliminar desde el seno de la corriente gaseosa hasta la corriente líquida por un proceso de absorción (Condorchem Envitech, s.f.).

La absorción es un proceso en el que se separan uno o varios componentes de una mezcla gaseosa utilizando un solvente líquido con el que formará una disolución. Involucra un paso de fase de las partículas para incorporarse en un volumen que se encuentra en la misma fase. No se debe confundir con el proceso de adsorción explicado anteriormente (proceso físico o químico que provoca la retención de átomos, iones o moléculas sobre la superficie de un material). (Ing. Chirinos, s.f.)

La mayor parte de los compuestos contaminantes contenidos en los gases se pueden oxidar o absorber en un medio ácido, como los compuestos derivados del nitrógeno, o en un medio alcalino, como las especies derivadas del azufre.

En ocasiones, los contaminantes son solubles en agua por lo que no es necesario ningún otro tipo de absorbente químico.

Los scrubbers tienen una serie de ventajas a la hora de ser elegidos como técnica de tratamiento de gases:

- No tienen limitaciones en el caudal de gas tratado.
- Rendimiento elevado.
- Suelen estar automatizados por lo que el coste de mantenimiento y operación es bajo.
- Gran versatilidad ya que pueden tratar una gran cantidad de gases distintos.

Son ampliamente usados en las depuradoras de gases residuales, en la industria alimentaria, en la industria química y farmacéutica, para tratar gases de incinerización y en las plantas de compostaje.

Respecto a su funcionamiento, los gases se introducen por la parte inferior del scrubber, que se encuentra lleno parcialmente del líquido absorbente. Cuando se produce el paso de los gases por la torre, abandona esta por la parte superior ya libre de sustancias contaminantes. En el esquema inferior se puede apreciar el funcionamiento del lavador.

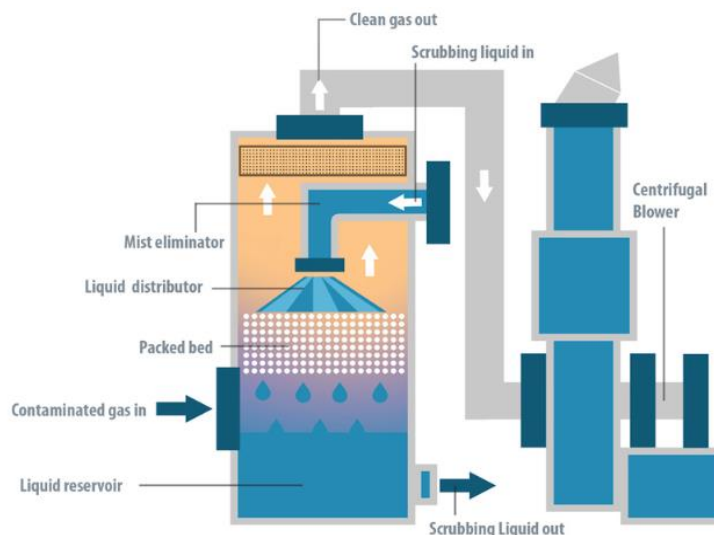


Figura 18. Esquema de un lavador de gases (Condorchem Envitech, s.f.)

4.4.4 Oxidación térmica

Este tratamiento para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles y de olores consiste en la oxidación de estos compuestos a CO_2 y H_2O haciendo pasar la corriente por un equipo que se encuentra a suficiente temperatura para ello. Dentro de la oxidación térmica existen tres tipos (ITENE, s.f.):

1. Oxidación térmica regenerativa: en este tipo de oxidación se utilizan 2 o 3 torres rellenas de material cerámico que retiene y cede calor de combustión produciéndose así un ahorro importante del combustible a utilizar. Este tipo de oxidación se emplea cuando los caudales de gas a tratar son elevados. Dentro de sus principales ventajas se encuentran:
 - Su gran eficiencia energética.
 - Recuperación de hasta el 95% del calor de los gases que abandonan la cámara de combustión.
 - Ahorro de combustible.
 - Aprovechamiento energético de los compuestos orgánicos volátiles.
 - Automatización del proceso.
 - Casi inexistente formación de NO_x .

Por otra parte, este sistema también cuenta con una serie de inconvenientes, como serían:

- Necesidad de aporte extra de combustible si la concentración en COVs es baja.
- Temperatura elevada.
- Necesidad de una gran cantidad de espacio.
- Selección precisa de rellenos.

Estas instalaciones están previstas para trabajar en continuo pero también pueden hacer turnos de 16 horas al día.

2. Oxidación térmica recuperativa: este método está formado por una cámara de combustión con un quemador y con un intercambiador de calor. En este último se calienta el aire de entrada y se enfría el tratado. El coste de inversión es menor que en el caso anterior pero el coste de operación es mayor. Dentro de sus principales ventajas se encuentra:
 - Rendimiento > 99%.

- Posibilidad de tratar COVs halogenados.
- Tolerancia de partículas.

Su principal desventaja es el coste tal y como se ha comentado anteriormente.

3. Oxidación catalítica: en este sistema la combustión se consigue en un rango de temperaturas inferiores a las anteriores ya que hay un catalizador en la cámara de combustión. Estos equipos ocupan menos espacio al ser más compactos y precisan de menos combustible al trabajar a menor temperatura.

4.4.5 Bioscrubbers

Los bioscrubbers para el tratamiento de gases residuales realizan una separación física (absorción) de los compuestos volátiles en agua. Posteriormente, a esta corriente de agua cargada de contaminantes disueltos se le da un tratamiento biológico que consiste en su regeneración en un bioreactor. Normalmente, este bioreactor es un tanque que contiene lodo activo suspendido y que se airea con burbujas de aire. El agua limpia se recircula a la parte superior del scrubber. Para garantizar la acción microbiana se agrega una solución nutritiva a la fase acuosa. También se agregan ácidos para controlar el pH de la fase acuosa que puede ser importante para que se de una actividad biológica óptima.

Como la biomasa y los compuestos disueltos se pueden acumular en la fase acuosa, se produce una corriente de aguas residuales.

A continuación, se puede observar un esquema completo de un bioscrubber, donde el gas residual es introducido en el absorbedor, donde los contaminantes son transferidos a la fase acuosa. Posteriormente, el agua es transferida a un bioreactor donde los contaminantes son biodegradados (Groenestijn, 2001).

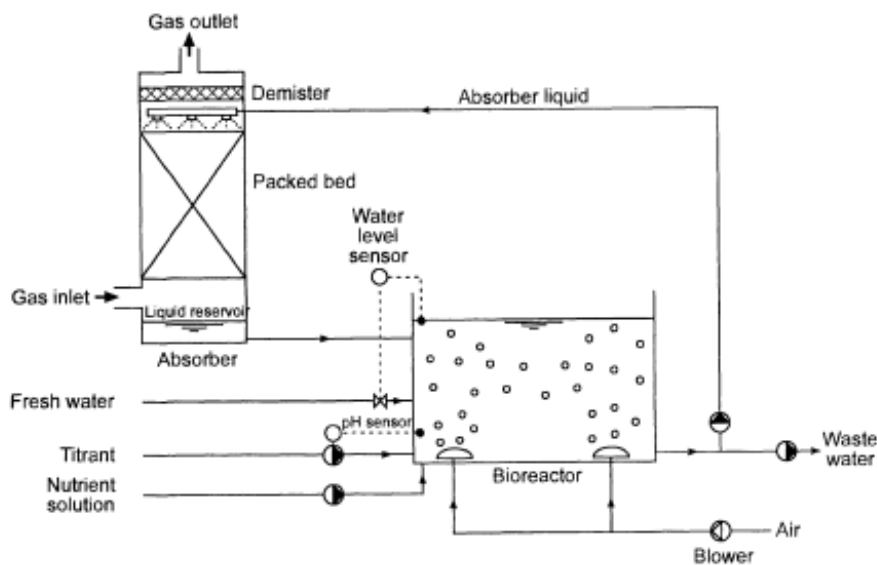


Figura 19. Esquema de un bioscrubber (Groenestijn, 2001)

4.4.6 Biofiltración

Definición

El proceso de compostaje produce la emisión de gases tras la descomposición aeróbica de la materia. Mediante el uso de ventiladores, los gases son aspirados y dirigidos al sistema de depuración, donde se saturan de humedad pasando finalmente al biofiltro. La biofiltración fue la primera tecnología desarrollada para el tratamiento biológico de gases con un bajo impacto ambiental. (Ecotec, 2013)

Los biofiltros o filtros biológicos son dispositivos formados por un lecho de material orgánico, en este caso de compost maduro mezclado con materiales que le aportan estructura como serían rocas porosas, corteza de árboles, tierra etc. Su objetivo principal es eliminar los compuestos contaminantes de la corriente a tratar (Epstein, 2011).

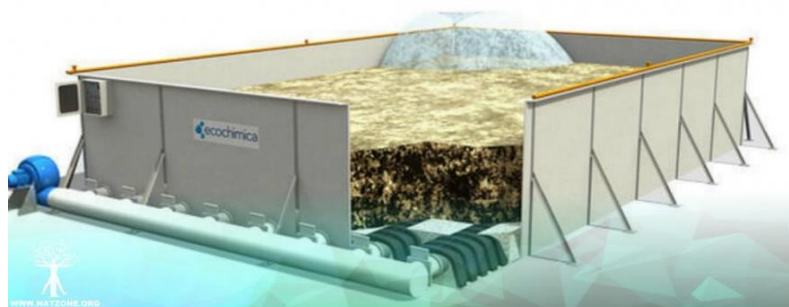


Figura 20. Biofiltro (Natural Zone, s.f.)

Tipos de biofiltros

Existen dos tipos de biofiltros:

- **Abiertos:** El gas entra por la parte inferior del biofiltro, atraviesa los macroporos del material filtrante y sale por la parte superior.
- **Cerrados:** el flujo se puede alimentar por el fondo o por la parte superior.

En el caso de este proyecto se hará uso de un biofiltro abierto.

En la parte inferior del equipo hay un distribuidor que tiene como objetivo la distribución homogénea del gas por todo el lecho con el fin de que todas las partes se aprovechen en igual magnitud. Tras este falso suelo se encuentra una capa de grava que sigue distribuyendo la corriente de forma uniforme.

A continuación, se encuentra la última capa de aproximadamente 1 metros de altura que forma los componentes activos del biofiltro. Esta capa se encuentra formada principalmente por cortezas de árboles, aunque también está mezclada con compost maduro, que tiene más estabilidad y su degeneración es más lenta que la de otros materiales. En ella viven los microorganismos que se alimentan de las sustancias aportadas por la corriente de gas tratada.

Los microorganismos presentes en el material biológico se alimentan de los compuestos orgánicos de los gases que queremos eliminar. En este proceso de digestión y metabolización, los compuestos son transformados en otros que ya no producen emisión de olores:

- Los compuestos orgánicos dan lugar a dióxido de carbono y agua.
- El amoníaco se transforma en ácido nítrico.
- El ácido sulfhídrico se sustituye por ácido sulfúrico.

Bajo el lecho se dispone una capa de grava con la intención de distribuir los gases que penetran en él.

Los microorganismos, principalmente las bacterias y los hongos se encuentran unidas al medio filtrante. Las

bacterias heterotróficas (aquellas que se reproducen y sobreviven gracias al alimento del medio), son las más útiles durante el proceso de filtración, pues se valen para realizar sus actividades vitales de los compuestos orgánicos volátiles.

Los microorganismos involucrados en este proceso pueden ser de muchos tipos, siendo los más comunes bacterias (actinomicetes, micrococcus, bacillus cereus, etc.) y hongos (circinella, penicillium sp, ovularia sp, etc.)

Compuestos tratados mediante biofiltración

A continuación, se muestran una serie de compuestos que pueden ser tratados mediante biofiltración:

- Acetona
- Metanol
- Etanol
- Isopropanol
- Éter
- Formaldehído
- Tolueno
- Benceno
- Mercaptanos
- Amoniacos
- Otros

Es importante la situación del biofiltro, que se colocará de la forma más próxima posible al lugar donde se produce la fermentación de los residuos y de esta manera a la corriente gaseosa a tratar. (Tumiri, 2017)

Los compuestos olorosos son eliminados mediante dos mecanismos distintos que se dan simultáneamente:

- **Adsorción/absorción:** la molécula del gas se difunde en la superficie del medio filtrante y después se absorbe por una molécula de agua, por lo que la humedad será un parámetro esencial para controlar las condiciones del biofiltro.
- **Biooxidación:** una vez los compuestos a depurar se encuentran en el interior del material que conforma el lecho los microorganismos se encargan de degradarlos, sirviéndoles a su vez como fuente de energía.

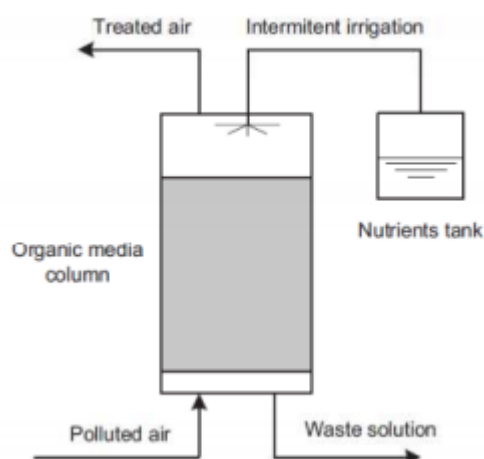


Figura 21. Esquema de un biofiltro (Martín, 2014).

Eficacia de los biofiltros

El rendimiento de los biofiltros depende de la naturaleza y composición de la corriente tratada, pero por lo general se encuentra alrededor del 90%. Depende de distintos parámetros, entre ellos:

- Tipo de soporte físico usado.
- Caudal de paso por unidad de área.
- Temperatura del lecho
- Porosidad.
- Velocidad de carga.
- Aporte de nutrientes.
- Control de pH.
- Humedad.

En la Figura 22, se puede observar la eficacia del biofiltro en la eliminación de los compuestos orgánicos volátiles más comunes producidos durante el compostaje.

Biofilter Efficiency in Removing VOCs Produced during Composting

Compound	Biofilter Inlet ppb	Biofilter Outlet ppb	Percent Removal
Acetone	2,450	9.7	99.9
Carbon disulfide	17	5.1	70
2-Butanone	545	Not detected	100
Toluene	9.3	1.9	80
2-Hexanol	5.5	Not detected	100
Styrene	4.6	Not detected	100
<i>m,p</i> -Xylene	1.8	Trace	99
1,4-Dichlorobenzene	1.4	Trace	99
Methylene chloride	Not detected	Trace	—
Carbonyl sulfide	47	3.4	99
Methyl mercaptan	550	Not detected	100
Carbon disulfide	26	5.5	79
Dimethyl sulfide	294	Not detected	100
Dimethyl disulfide	266	Not detected	100
Hydrogen sulfide	60	Not detected	100

Figura 22. Eficacia de la biofiltración en distintos compuestos (Epstein, 2011)

Ventajas y desventajas de los biofiltros

El método de depuración de gases mediante biofiltración cuenta con las siguientes ventajas (Epstein, 2011):

- Tiene un coste inferior a otras tecnologías de reducción de contaminantes/olores.
- No hace uso de productos químicos que puedan alterar el estado del equipo o aumentar el coste de operación de este.
- Los costes de operación y de mantenimiento son bajos.
- Alta eficacia en eliminación de compuestos orgánicos volátiles.

A pesar de sus múltiples aspectos positivos, también cuenta con algunos puntos en contra como serían:

- Mayor necesidad de espacio que otros equipos que usan productos químicos.
- Sensible a los cambios de temperatura.

- Sensible a la presencia de amoníaco, pues los niveles superiores a 100 ppm pueden resultar tóxicos.

Diseño del biofiltro

Las características elegidas para el biofiltro son importantes para determinar el rendimiento de operación que tendrán posteriormente (Epstein, 2011).

- Medio filtrante: El primer parámetro para determinar será el material que conformará el medio filtrante. Cuando se comenzó a usar la biofiltración era común el uso de filtros de suelo. Sin embargo, estos no se usan actualmente debido a la cantidad de espacio que requieren. En la actualidad es más común el uso de un medio compuesto por una mezcla de compost, astillas de madera mixta y turba.
- Humedad: el contenido de humedad es fundamental para el correcto funcionamiento del biofiltro, ya que será necesaria una película de agua para la absorción y biooxidación de los compuestos olorosos. El rango de humedad por Haugh (1993), está entre el 50-70%. La humedad se controla mediante el uso de aspersores y asegurando la humidificación de la corriente de gas que entra en el biofiltro.
- pH: este deberá encontrarse cercano a 8.
- Porosidad: la relación espacio entre poros y volumen total del medio deberá mantenerse entre 40-60%.
- Caída de presión: es importante controlarla ya que podría afectar al flujo de aire que circula por el interior de los poros. La caída de presión aumenta por la presencia de partículas muy finas y de compactación por lo que será necesario vigilar estos aspectos.
- Temperatura: la temperatura máxima de entrada al biofiltro deberá ser inferior a 40°C. Si la temperatura en las filas de compost fuera superior a esta, podría ser necesario diluir el aire con aire procedente del exterior. No es recomendable una temperatura mayor ya que se podría producir muerte microbiana.
- Amoníaco: el nivel de amoníaco en los gases se podrá reducir diluyendo los gases de entrada con aire fresco.
- Tiempo de residencia: el tiempo que deberán estar los gases en el interior del biofiltro será de más de 30 segundos, pero menos de 60. El tiempo de retención afecta a la eficacia de eliminación. En la Figura 23 se muestra cómo afecta el tiempo de residencia a la eficacia del biofiltro.

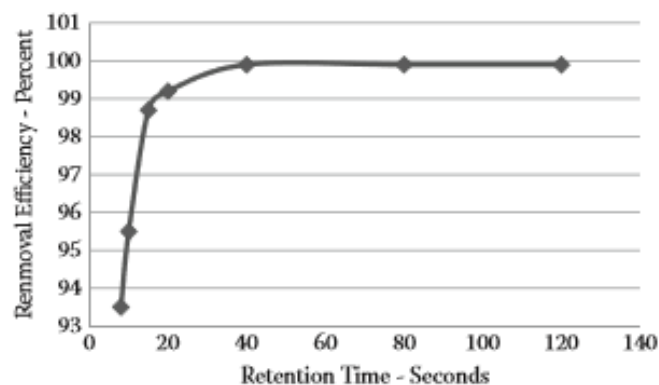


Figura 23. Eficacia del biofiltro frente al tiempo de residencia (Epstein, 2011).

Los problemas asociados a un mal funcionamiento del biofiltro suelen tener su origen en las elevadas cargas de compuestos orgánicos e inorgánicos, en una mala distribución de los flujos de aire por el interior del mismo, así como un bajo contenido en humedad, por lo que será necesario un control adecuado de todas estas condiciones de operación para así asegurar su rendimiento máximo de funcionamiento. (Martín, 2014)

5 MEMORIA DE CÁLCULO

En este apartado se describe el proceso completo, desde la recepción de los residuos hasta la obtención del compost para su venta y distribución, haciendo especial hincapié en el diseño de los equipos necesarios para el control de olores.

5.1 Datos de partida

Para la planta objeto de este proyecto, se han considerado los siguientes datos, los cuales serán necesarios para realizar todo el proceso de diseño:

- Población: 60.000 habitantes
- Producción media de residuos: 1.6 kg / habitante y día
- Densidad de los residuos: 400 kg / m³
- Días que opera la planta al año: 365 días
- Horas de trabajo al día en la planta: 14 horas
- Poder adquisitivo: medio-alto

Además, no se considera que la localidad en cuestión se trate de una zona turística, por lo que no se esperan picos de producción de residuos en todo el año.

Aun así, teniendo en cuenta que la producción de residuos es algo que puede aumentar con el paso de los años y que se espera que la población crezca de forma sostenida a medio plazo, se tratará de sobredimensionar los equipos de la planta para hacer frente a un futuro crecimiento.

La composición media que se espera de los residuos domésticos a tratar (RD) es la que se muestra en la Tabla 1, valorando el hecho de que se trata de una población urbana con un poder adquisitivo alto:

Material	Porcentaje
Materia Orgánica	47 %
Papel y Cartón	23 %
Plásticos	9 %
Vidrio	6 %
Metales	4 %
Maderas	1 %
Otros	10 %

Tabla 1. Composición media de los RD.

Por otro lado, la cantidad media de residuos que llegan a la planta por hora será:

$$m \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{60.000 \cdot 1.6}{14} = 6857 \frac{kg}{h}$$

El volumen que llega por hora puede obtenerse fácilmente sabiendo la densidad media de los residuos que llegan:

$$V \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{6857.1}{400} = 17.1 \frac{m^3}{h}$$

5.2 Etapas del proceso

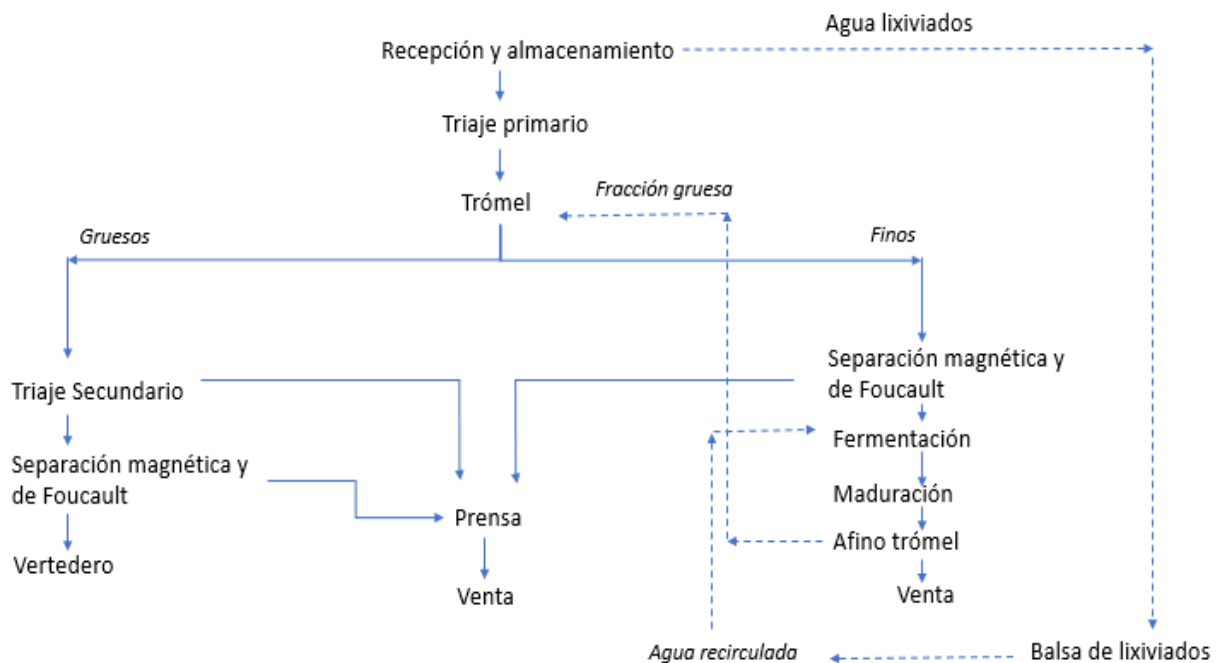


Figura 24. Esquema general de las etapas del proceso de compostaje.

5.3 Recepción y Pretratamiento

5.3.1 Recepción de los residuos

En primer lugar, los camiones llegan a la planta y dejan los residuos en un foso de almacenamiento, previo paso por una báscula para controlar la cantidad de residuos que llegan a la planta y así registrar automáticamente otros datos de interés como fecha de llegada y procedencia.

Además, se recogen algunas muestras para estudio de composición y análisis.

Para decidir el tamaño que debe tener el foso, es importante considerar el tiempo medio de almacenamiento de

los mismos. Normalmente, estos no están más de 3 días antes de pasar a la siguiente etapa, por periodos en los que no se trabaje en la planta (festivos, fines de semana...). Por otro lado, es importante dejar un espacio adecuado para el movimiento de la maquinaria.

Así, los cálculos para obtener el volumen necesario del foso se muestran a continuación:

$$V(m^3) = \frac{60.000 \cdot 1,6 \cdot 3}{400} = 720 m^3$$

Aplicando un margen de seguridad en torno al 10%, el foso deberá tener un volumen de **800 m³**. Por otro lado, deberá dimensionarse las dimensiones del foso sabiendo que la profundidad de este tipo de fosos no suele superar los 10 metros y que se debe permitir operar con facilidad a la maquinaria correspondiente.

5.3.2 Triaje primario

La primera operación que se lleva a cabo sobre la corriente de residuos es el triaje de voluminosos. En esta etapa, el objetivo principal es retirar aquellos residuos que destaquen por su voluminosidad y tamaño, de modo que no interfieran en etapas posteriores. Entre los elementos que hay que retirar se encuentran: electrodomésticos, botellas de vidrio enteras, papel y cartón, y cualquier cosa que destaque por su tamaño. Estos residuos, tras un segundo triaje, pueden llevarse a vertedero directamente o realizar algún proceso para venderlo posteriormente.

El triaje normalmente es manual (realizado por dos o tres operarios), aunque ya hay propuestas y avances para automatizar todo o gran parte del trabajo a realizar.

Se estima que en el triaje primario se retira en torno al 1% del papel y cartón que entra y un 0.5% del vidrio. De este modo, se eliminan:

- 15.77 kg/h de papel y cartón
- 2.06 kg/h de vidrio

Así, de los 6857 kg/h que entran, **salen del triaje primario unos 6839 kg/h.**

5.3.3 Trómel Cribado

El trómel es una maquinaria cuyo objetivo es la eliminación de impropios de la materia inicial mediante cribado para obtener la materia orgánica limpia sin el resto de material que conforman el residuo como plásticos, cartones... El material se introduce en el cilindro de chapa perforada que se encuentra girando y que cuenta con un ángulo de inclinación para facilitar el avance de la masa a través de él. Este permite la salida del material según el tamaño de agujero. Es también habitual que cuente en su interior con una serie de cuchillas que romperán las bolsas de plástico. Al final del trómel se obtendrán los residuos que no forman parte de la materia orgánica a compostar mientras que esta saldrá por los orificios.

Por tanto, el objetivo final de esta etapa es conseguir separar la fracción orgánica (que iría en la corriente de finos) de la fracción inorgánica (corriente de gruesos).

Por este motivo, es importante elegir una luz de malla adecuada, de forma que no sea demasiado pequeña (la corriente de finos sería de gran calidad pero se perdería materia orgánica) ni demasiado grande (la corriente de finos estaría más contaminada). Un valor típico en estos casos es de 60 mm, como en el Complejo medioambiental Vélez de Benaudalla (Servicio de Tratamiento de Residuos Municipales, s.f.).

Se considera que la eficacia del trómel para cada fracción de la corriente de residuos es la siguiente:

- 70% para la materia orgánica.
- 20% para papel y cartón.
- 10% para plásticos.

- 85% para vidrios.
- 25% para metales.
- 80% para maderas.
- 70% para otros.
-

De esta forma, se tendrá la siguiente composición en la corriente de finos y en la corriente de gruesos:

Material	Gruesos (kg/h)	Finos (kg/h)
Material orgánico	966,8	2255,9
Papel y cartón	1261,7	315,4
Plástico	555,4	61,7
Vidrio	61,7	349,7
Metal	205,7	68,6
Madera	13,7	54,9
Otros	205,7	480,0

Tabla 2. Composición de las corrientes de finos y gruesos a la salida del trómel de cribado.

5.4 Corriente de Gruesos

Triaje Secundario

La corriente de gruesos que sale del trómel pasa a continuación por un proceso de triaje secundario en el que mediante selección manual se retirarán todos aquellos residuos que no sean parte de la materia orgánica como:

- Vidrio
- Materiales plásticos
- Papel y cartón
- Metales no férricos

Los residuos separados en el triaje secundario serán conducidos mediante una cinta transportadora a la prensa.

Separación magnética y de Foucault

Al final de la línea donde se realiza el triaje secundario se encontrará un separador magnético por el que pasará la corriente de residuos para recuperar los materiales férricos de ella, así como por un separador de Foucault cuyo objetivo será separar los materiales metálicos no férricos.

Vertedero

Los residuos no metálicos que han sido separados anteriormente se depositarán en un vertedero controlado.

Finalmente, los materiales que han sido separados de la corriente de gruesos por selección manual y por separación magnética y de Foucault se dirigirán hacia una prensa que los convertirá en balas de material destinado para la venta.

Corriente de Finos

5.4.1 Separación magnética

La corriente de finos de 3586 kg/h que sale del trómel contiene materiales metálicos que no deben formar parte del compost, ya que podría quedar contaminado.

Por ello, antes de llevar la corriente de finos al túnel de compostaje, se hace pasar la corriente por un separador magnético y un separador por corriente de Foucault.

Aunque estos dos equipos están destinados a la separación de materiales metálicos de los no metálicos, siempre habrá parte de no metales que se mezcla con la corriente de metales, y viceversa.

Así, se considera que la eficacia de separación para cada fracción de la corriente es la siguiente:

Se considera que la eficacia de separación magnética para cada corriente es la siguiente:

- 1% para la materia orgánica.
- 1% para papel y cartón.
- 5% para plástico.
- 0% para vidrio.
- 90% para metales.
- 0% para madera.
- 0% para otros.

Por tanto, se tiene a la salida 3496 kg/h que va al túnel de compostaje:

Material	Entrada al túnel (kg/h)
Materia orgánica	2233,3
Papel y cartón	312,3
Plástico	58,6
Vidrio	349,7
Metal	6,9
Madera	54,9
Otros	480,0
Total	3495,8

Tabla 3. Composición de la corriente de entrada al túnel.

5.4.2 Fermentación

Tal y como se ha comentado en anteriores apartados, el proceso de fermentación en la planta objeto de este proyecto se hará en túneles.

En esta fase se produce la degradación de la materia orgánica durante 14 días. De este modo, habrá 14 túneles, los cuales se irán llenando cada día.

La cantidad de residuos que llega al túnel a lo largo del día será, sabiendo que la planta opera 14 horas al día:

$$3495,8 \frac{kg}{h} \cdot 14 \frac{h}{día} = 48940,8 \frac{kg}{día}$$

De este modo, cada túnel deberá tener capacidad para mantener en su interior 48940,8 kg. Además, aplicando un factor de seguridad del 10%, se dimensionará el túnel de forma que pueda albergar hasta 53834,8 kg.

La cantidad de materia que habrá de cada fracción en el túnel será:

Material	Entrada al túnel (kg)
Materia orgánica	31268,2
Papel y cartón	4371,8
Plástico	820,8
Vidrio	4896,0
Metal	96,0
Madera	768,0
Otros	6720,0
Total	48940,8

Tabla 4. Composición del material dentro del túnel.

La densidad inicial de la materia que entra en el túnel puede variar entre 150 y 250 kg/m³, mientras que a medida que avanza el proceso de compostaje la densidad va aumentando hasta 600-700 kg/m³ (Manual del Compostaje del Agricultor, 2013).

Por tanto, el túnel tendrá una capacidad mínima (caso más desfavorable) de **359 m³**.

$$53834,8 \text{ kg} \cdot 1 \frac{m^3}{150kg} = 358,9 \text{ m}^3$$

La dimensión de cada túnel será:

- Ancho: 6 metros
- Alto: 5 metros, aunque sólo se llenarán hasta una altura de 3,5 m.
- Largo: 17 metros

5.4.2.1 Sistema de ventilación

En los túneles de compostaje es de especial importancia instalar un sistema de ventilación acorde a la cantidad de materia que se pretende compostar. Los objetivos del sistema de ventilación son:

- Suministrar el oxígeno necesario a los microorganismos para la reacción.
- Control de la temperatura.
- Control de la humedad.

Para calcular el aire a introducir en el túnel, se deben realizar los cálculos correspondientes para estudiar cuál de los tres procesos a controlar es más restrictivo. Se dimensionará el sistema de ventilación en función de la cantidad de oxígeno que requiera el proceso más restrictivo, ya que será suficiente para controlar los tres procesos.

Por otro lado, las necesidades de ventilación va cambiando según la fase de la fermentación en la que se encuentre el residuo. Por ello, es necesario que el caudal de ventilación que entre en el túnel sea fácilmente regulable.

La ventilación se realizará por medio de boquillas situadas en el suelo del túnel, alimentadas por medio de tuberías conectadas al ventilador.

5.4.2.2 Sistema de rociado

Para controlar la humedad del producto, la cual debe estar entre el 40 y el 60%, se colocará un sistema de rociado en la parte superior del túnel por medio de boquillas que pulverizan homogéneamente el agua en el túnel y así controlar la humedad.

Si la humedad es demasiado baja, la actividad microbiana puede verse ralentizada, mientras que si es demasiado alta se favorece la aparición de malos olores, debido a la fermentación parcial anaeróbica producida por una reducción de la porosidad.

5.4.2.3 Balance

Al finalizar el proceso de fermentación, se produce una reducción del 60% de los sólidos de materia orgánica y un 15% de los sólidos de papel y cartón. Considerando que la materia orgánica tiene una humedad del 50% y el papel y cartón una humedad del 20%, es fácil obtener la cantidad de materia orgánica y papel/cartón que se pierde en el proceso de la fermentación:

$$2233,3 \frac{\text{kg materia orgánica}}{h} \cdot 14 \frac{h}{\text{día}} \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,5) = 9379,9 \frac{\text{kg materia orgánica}}{\text{día}}$$

$$283,8 \frac{\text{kg papel y cartón}}{h} \cdot 14 \frac{h}{\text{día}} \cdot 0,15 \cdot (1 - 0,2) = 476,8 \frac{\text{kg papel y cartón}}{\text{día}}$$

La composición de los residuos que salen de los túneles será, entonces:

Material	Salida del túnel (kg/día)
Materia orgánica	21886,3
Papel y cartón	3847,2,4
Plástico	820,4
Vidrio	4846,8
Metal	96,6
Madera	760,2
Otros	6720
Total	39035,7

Tabla 5. Composición de los residuos a la salida del túnel.

5.4.3 Maduración

El producto resultante del proceso de fermentación se lleva a la zona de maduración. La etapa de maduración, como se comentó en el apartado 2 del presente proyecto, es la más larga del proceso de compostaje.

La zona de maduración consiste en un espacio abierto, pero con techo para resguardar el producto de la lluvia donde este se dispone en hileras.

En esta planta, se tendrá un período de maduración de 10 semanas, con el objetivo de obtener un compost de mayor calidad (compost curado). De esta forma, la zona de maduración tendrá un volumen tal que permita colocar hasta 2703,9 toneladas, que es la cantidad de material que sale de la fase de fermentación en 10 semanas.

Aplicando un margen de seguridad del 10% y sabiendo que la densidad tras finalizar la fermentación puede estar entre 600 y 700 kg/m³, es fácil obtener el volumen necesario para la zona de maduración:

$$2703869 \frac{kg}{10 \text{ semanas}} \cdot 1,1 \cdot \frac{1 m^3}{600 kg} = 4957 m^3$$

Las hileras de producto tendrán unas dimensiones de 450 m³:

- Alto: 3 metros
- Ancho: 5 metros
- Largo: 30 metros

De este modo, se necesitarán 11 pilas de producto.

Por otro lado, sabiendo que la separación entre pila y pila tiene que ser de un metro y que debe haber 5 metros entre el extremo de cada lado de la zona de maduración y la pila más externa de cada lado, se obtiene el área que debe comprender esta zona:

$$\begin{aligned} \text{largo} &= 2 \cdot 5 + 30 = 40 \text{ metros} \\ \text{ancho} &= 2 \cdot 5 + 10 \cdot 1 + 11 \cdot 5 = 75 \text{ metros} \end{aligned}$$

En cuanto al balance de materia en esta fase, se considera que se tienen unas pérdidas del 50% de materia orgánica y un 20% de papel y cartón (Epstein, 2011).

De este modo, el balance resultante de la etapa de maduración resulta:

Material	Compost maduro (kg/día)
Materia orgánica	10943,1
Papel y cartón	2797,1
Plástico	820,4
Vidrio	4846,8
Metal	96,6
Madera	760,2
Otros	6720
Total	26984,2

Tabla 6. Composición del material en la zona de maduración.

5.4.4 Afino

La fase de afino, como se comentó anteriormente, es una etapa opcional para aportar de mayor calidad al producto, eliminando impurezas y partículas que pueden ser indeseadas. Las propiedades químicas necesarias ya quedaron consolidadas tanto en la fermentación como en la maduración.

Para proceder con esta fase se requiere otro trómel para procesar el producto obtenido en la maduración. La corriente de gruesos resultante se recircula al primer trómel antes del proceso de fermentación para compostarlo de nuevo.

En el trómel se realizará un cribado con una luz de malla de 10mm (siguiendo las especificaciones del Real Decreto 506/2013) (Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 2013) para disgregar el material y facilitar su paso por la mesa densimétrica. En el trómel se generan unas pérdidas del 15% (corriente de gruesos).

La corriente de finos es el producto final destinado para la venta, y que será de **22936.6 kg/día** de compost maduro.

Sabiendo que en la planta entran 96000 kg al día de residuos, se tiene un rendimiento de la planta completa para

obtener compost maduro del 24%.

5.5 Biofiltro

Antes de comenzar con el cálculo y dimensionamiento de equipos es necesario conocer el caudal de gases a tratar por el sistema de control de olores.

Para ello, se realizará un balance de materia en el túnel que dará como resultado el caudal de aire que se debe introducir en el mismo. En los siguientes apartados se dimensionarán y se expondrán los equipos necesarios para la gestión de olores de la planta, así como las características principales de los equipos escogidos.

5.5.1 Cálculo del caudal de gases a tratar

Las corrientes de entrada y salida del túnel estarán compuestas por:

Entrada	Salida
Aire seco a 20°C	Gases a 50°C
Residuo seco a 20°C	Residuo seco a 40°C
Humedad de los residuos	Humedad de los residuos
Agua de rociado	

Tabla 7. Corrientes de entrada y salida del túnel.

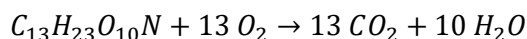
Los residuos que se introducen en el túnel tendrán una humedad del 45%.

Por tanto, de los **48940,8 kg** que entran en la zona de fermentación (ver apartado 4.5.2), **22023,36 kg** corresponderán a agua. Saldrán **39035,73 kg** de residuos a 40°C.

La materia orgánica que reaccionará será la diferencia entre la entrada y la salida del túnel:

$$\text{Materia orgánica reaccionante} = 31268,16 - 21887,71 = \mathbf{9380,45 \text{ kg}}$$

Considerando que la reacción que se produce es:



Reaccionarán **26573,51 moles** de materia orgánica sabiendo que el peso molecular es de 353 g/mol.

Así, el O₂ que reacciona serán **11054,58 kg**.

De este modo, los productos serán:

- 15200,05 kg de CO₂.

- 4783,23 kg de H₂O.

Nótese que el nitrógeno de la materia orgánica no aparece en la corriente de salida como NH₃. Esto se debe a que ese nitrógeno es consumido por las bacterias para que se produzca la fermentación correctamente, por lo que puede considerarse despreciable el amoníaco de la salida en comparación con el resto de compuestos.

Por otro lado, se considera que la cantidad de aire a introducir en el túnel será 2 veces la necesaria para producir la reacción. Esto es así porque se deberá aportar más aire para controlar que la temperatura no aumente más de lo deseado en el interior del túnel. De este modo, se introducirán 22109,16 kg de O₂.

Por tanto, sabiendo ya la cantidad de O₂, es fácil obtener la cantidad de N₂ (que no reaccionará y que saldrá por la corriente de salida):

$$\text{Cantidad de } N_2 = 22109,16 \cdot \frac{0,77}{0,23} = 83172,55 \text{ kg } N_2$$

Por último, el O₂ que saldrá por la corriente de salida será **11054,58 kg**.

A continuación, se muestra una tabla resumen con la composición de la corriente de gases a tratar en la etapa de gestión de olores.

Compuesto	kg/día	kg/h	Densidad (kg/m ³)
O ₂	11054,58	460,61	1,247
N ₂	83172,55	3465,52	1,091
CO ₂	15200,05	633,34	1,714
Total	109427,28	4559,47	1,193

Tabla 8. Composición de la corriente de gases a tratar.

Como se tienen 14 túneles, saldrán **63832,58 kg/h** de gases a tratar en total.

Usando el valor de la densidad de cada uno de ellos, serán **3821,85 m³/h** por cada túnel, es decir, **53505,93 m³/h** en total.

5.5.2 Esquema general del Sistema

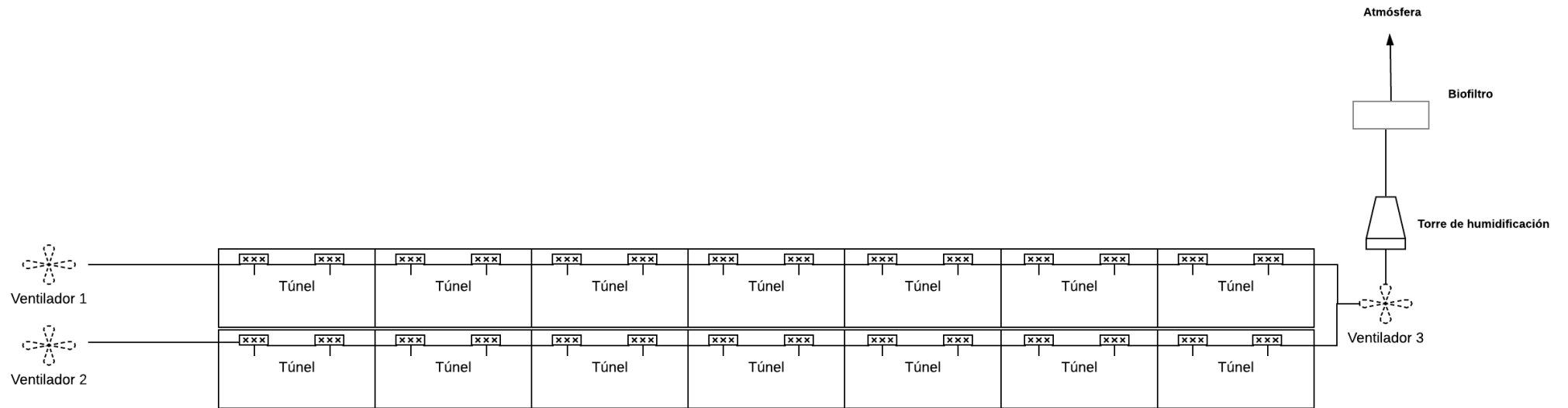


Figura 25. Esquema general de los túneles y del sistema de filtrado.

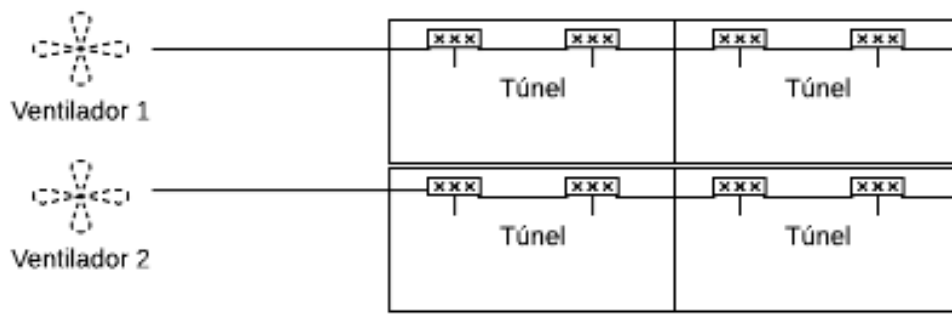


Figura 26. Detalle de la parte izquierda del esquema general.

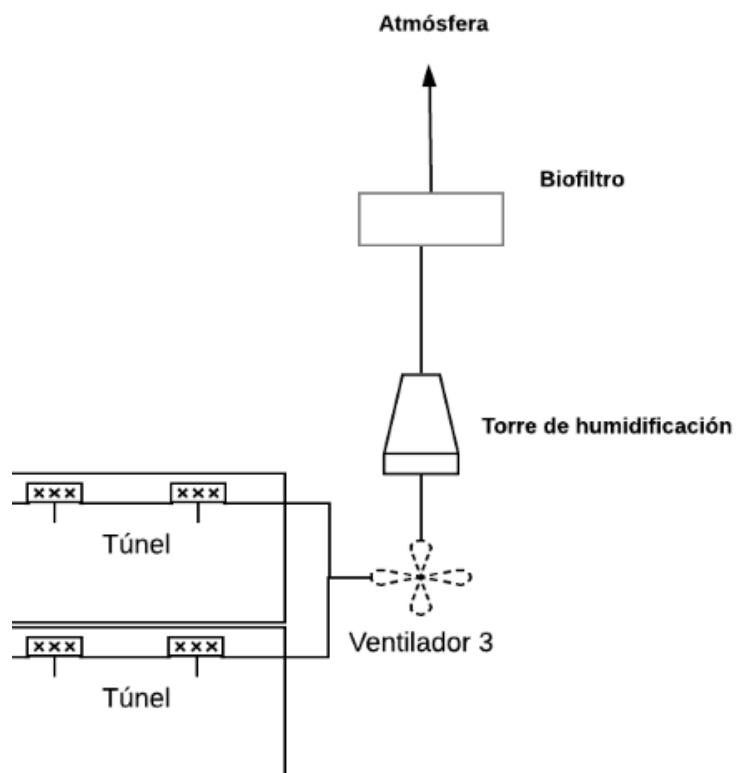


Figura 27. Detalle de la parte derecha del esquema general.

5.5.3 Válvula antirretorno

En cada túnel habrá dos puntos de extracción de gases.

En dichas tuberías de extracción se deberá instalar una válvula antirretorno para impedir que los gases circulen en la dirección incorrecta.

Al producirse 3821,86 m³/h por cada túnel, cada válvula deberá admitir hasta **1910,93 m³/h**.

5.5.4 Extracción de los gases

Para la extracción de los gases, se pondrá dos tuberías de extracción en cada túnel. Siguiendo la Norma UNE 60670, la velocidad en las tuberías está limitada a unos 20 m/s. Por tanto, para calcular el diámetro de la tubería deberá considerarse esta limitación, así como el caudal que debe absorber la misma (1910,93 m³/h).

Así, el área transversal de la tubería puede ser calculada fácilmente:

$$A(m^2) = \frac{\frac{1910,93}{3600}}{20} = 0.0265 m^2$$

De este modo, el diámetro de la tubería será de **184 mm**.

Por otro lado, sabiendo que se tienen dos sectores con siete túneles cada uno y que en cada túnel hay dos puntos de extracción, la tubería a la que confluyen (en cada sector) los gases del túnel, se pueden dividir en 13 tramos de diferente diámetro para asegurar que la velocidad en la misma está en torno a 20 m/s.

Las tuberías serán de acero inoxidable.

Así, para un sector, se tendrá:

Tramo	Caudal (m ³ /h)	Diámetro (mm)
1	1910,93	184
2	3821,86	260
3	5732,79	318
4	7643,72	368
5	9554,65	411
6	11465,58	450
7	13376,51	486
8	15287,44	520
9	17198,37	551
10	19109,3	581

11	21020,23	610
12	22931,16	637
13	24842,09	663
14	26753,02	688

Tabla 9. Diámetro de la tubería en cada tramo.

Sabiendo que cada túnel tiene 17 metros de largo, y que la tubería ocupa la longitud de los 7 túneles, se tienen 84 metros de tubería común hasta la última tubería de extracción. Cada tramo tendrá una longitud de 8.5 metros. La longitud de la tubería de extracción se considera despreciable en comparación con el resto de la red.

El otro sector de siete túneles tendrá la misma distribución de tuberías.

Para terminar, los últimos tramos de tubería de cada uno de los dos sectores (tramo 14) se unen en una sola, para tener solo un equipo humidificador, absorbedor y biofiltro. La pérdida de carga producida tras juntar las dos tuberías se puede despreciar.

5.5.5 Ventilación

Al tener dos secciones paralelas, se tendrá también dos ventiladores (Ventilador 1 y ventilador 2) que suministrarán el aire por la parte inferior de los túneles.

Los túneles se mantienen con una pequeña depresión (1 a 2" de ca) y así evitar que los gases salgan del túnel. Por lo tanto, para extraer los gases de los túneles y impulsarlos a través del humidificador y del biofiltro se instala un tercer ventilador.

Por lo tanto, las pérdidas de carga que tiene que vencer el ventilador 3 son las pérdidas provocadas por las tuberías, las pérdidas en el humidificador y las pérdidas en el biofiltro.

A) Pérdidas en las tuberías.

Las pérdidas más complejas de calcular son las que ocurren en las tuberías, y son las primeras que se van a desarrollar.

Nótese que al existir diferentes tramos de tubería con caudales y diámetros diferentes, la pérdida de carga en cada tramo no será la misma. La pérdida de carga que se producirá en las tuberías será la suma total de las pérdidas de carga parciales por tramo.

Para calcular estas pérdidas de carga, se hace uso de la fórmula general de Darcy-Weisbach, la cual puede expresarse en función de la velocidad del gas (20m/s) o en función del caudal (que varía en cada tramos):

$$\Delta P(Pa) = \rho \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2}$$

Siendo ρ la densidad del gas, L la longitud del tramo en cuestión, D el diámetro interno de la tubería, v la velocidad del gas (20m/s), g la aceleración de la gravedad (9,8 m/s²) y f un coeficiente de fricción (también llamado λ).

Este coeficiente es el único que se debe calcular para obtener las pérdidas de carga. Sin embargo, el cálculo de este término no es trivial y existen numerosas expresiones y métodos iterativos para calcularlo. Algunos

ejemplos pueden ser la ecuación de Von Karman, Nikuradse, Hagen-Poiseuille (para régimen laminar), Blasius, Hazen-Williams, Manning, etc (Cátedra de Ingeniería Rural, s.f.)

En este proyecto se opta por un método visual y gráfico para calcular este término: el diagrama de Moody.

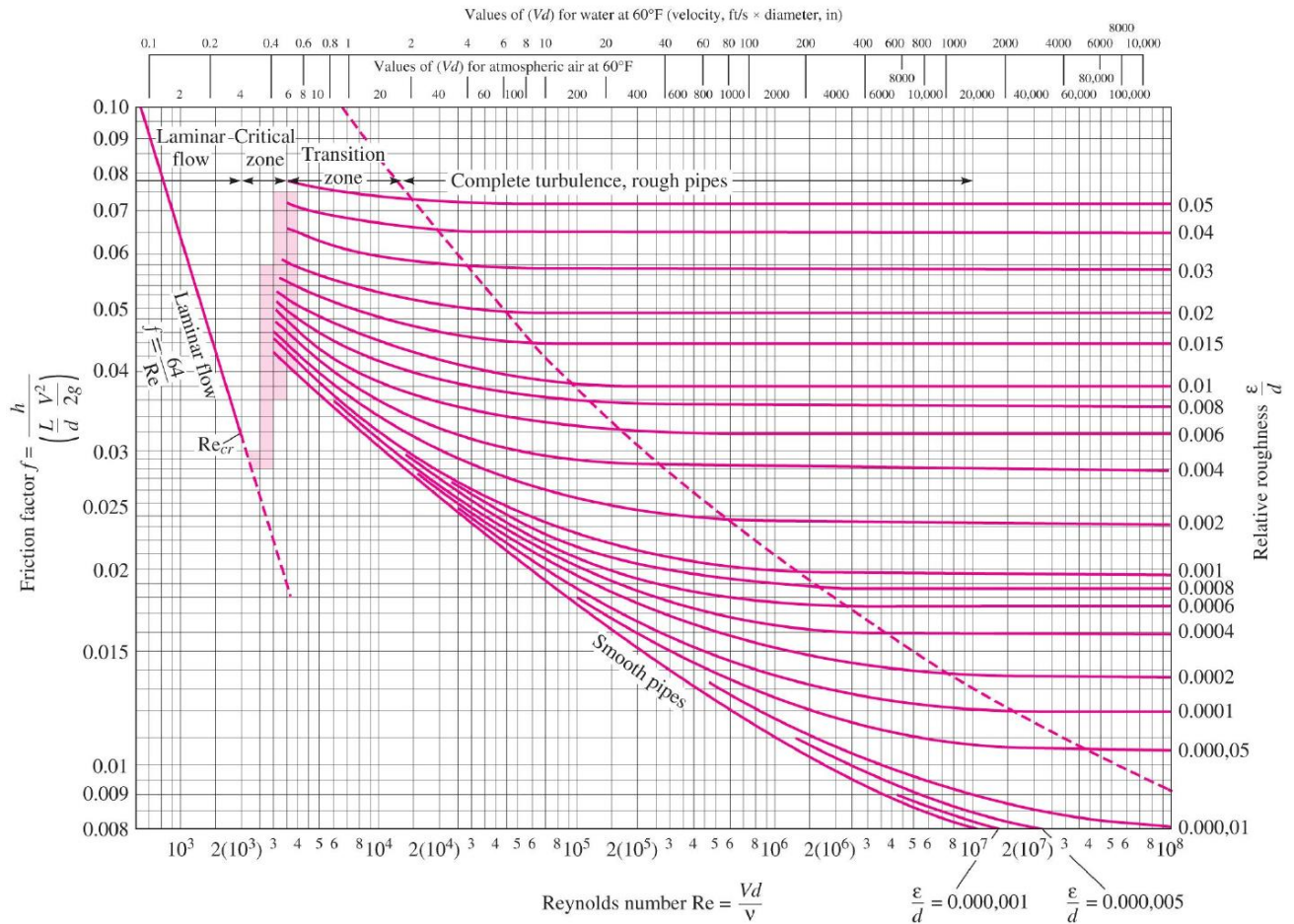


Figura 28. Ábaco de Moody (Universidad de Valladolid, s.f.)

De este modo, se establece una relación gráfica entre el coeficiente de fricción f , el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa de la tubería (ϵ/D , siendo $\epsilon=0,15$ mm) (Cálculo de la rugosidad, 2012) por ser las tuberías de acero galvanizado, y D el diámetro en milímetros.

El número de Reynolds será dependiente del diámetro de la tubería:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1.193 \cdot 20 \cdot D(m)}{10^{-5}} = 2,386 \cdot 10^6 \cdot D(m)$$

Así, en la siguiente tabla se muestran los valores de rugosidad relativa, número de Reynolds y coeficiente de fricción en cada tramo:

Tramo	Diámetro (mm)	e/D	Re	f
1	184	8,16E-04	4,39E+05	0,020
2	260	5,77E-04	6,20E+05	0.018
3	318	4,71E-04	7,60E+05	0.017
4	368	4,08E-04	8,77E+05	0.017
5	411	3,65E-04	9,81E+05	0.016
6	450	3,33E-04	1,07E+06	0.015
7	486	3,08E-04	1,16E+06	0.015
8	520	2,88E-04	1,24E+06	0.015
9	551	2,72E-04	1,32E+06	0.015
10	581	2,58E-04	1,39E+06	0.015
11	610	2,46E-04	1,45E+06	0.015
12	637	2,36E-04	1,52E+06	0.015
13	663	2,26E-04	1,58E+06	0.015
14	688	2,18E-04	1,64E+06	0.014

Tabla 10. Valores de rugosidad relativa, número de Reynolds y coeficiente de fricción en cada tramo.

Con estos factores, es posible calcular las pérdidas de carga en los 14 tramos:

Tramo	F	Diámetro (mm)	ΔP (Pa)
1	0,018	280	220,65
2	0.017	396	140,42
3	0.016	485	108,28
4	0.016	560	93,78
5	0.016	626	78,94
6	0.015	686	67,56
7	0.015	741	62,55
8	0.015	792	58,51
9	0.015	840	55,16
10	0.015	885	52,33
11	0.014	928	49,90
12	0.014	970	47,77
13	0.014	1009	45,90
14	0.014	1047	41,28

Tabla 11. Pérdidas de carga en cada tramo.

La suma total sale **1123,02 Pa**.

A continuación se debe calcular la pérdida de carga debido a los ensanchamientos suaves (20°) de la tubería. Para ello, se debe aplicar la siguiente expresión:

$$\Delta P(Pa) = \rho \cdot K \cdot \frac{v^2}{2}$$

Siendo K un factor adimensional que depende de la relación entre diámetros, según la expresión:

$$K = 0,4 * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)$$

(OpenCourseWare Universidad de Sevilla , s.f.)

Así, se muestra en la siguiente tabla los valores de K en cada ensanchamiento (13 en total), con su correspondiente pérdida de carga:

Ensanchamiento	K	ΔP (Pa)
1-2	0,200	47,72
2-3	0,133	31,81
3-4	0,100	23,86
4-5	0,080	19,09
5-6	0,067	15,91
6-7	0,057	13,63
7-8	0,050	11,93
8-9	0,044	10,60
9-10	0,040	9,54
10-11	0,036	8,68
11-12	0,033	7,95
12-13	0,031	7,34
13-14	0,029	6,82

Tabla 12. Valores de K y pérdidas de carga en cada ensanchamiento.

Siendo el total de la pérdida de carga provocada por los ensanchamientos de **214,89 Pa**.

A continuación, se calcula las pérdidas de carga provocadas por las conexiones de las tuberías de extracción con la tubería principal. El factor K_i típico de este tipo de tuberías suele estar en torno a 0.4 (Jiménez, s.f.).

Por tanto, si se tienen 14 tuberías de extracción, la pérdida de carga total será de **1336,16 Pa**.

B) Pérdidas de carga en humidificador y biofiltro.

Las pérdidas de carga en humidificador y el biofiltro serán de 47 Pa y 60 Pa, respectivamente, tal y como se verá en los siguientes apartados.

Por lo tanto, el ventilador 3 debe suministrar : 50 (depresión en túnel) + 1336 + 1123 + 215 + 47 + 60 Pa = 2831 Pa.

Para tener en cuenta otras posibles pérdidas de carga menores y la carga dinámica , se considera que el ventilador debe suministrar una carga total de **3300 Pa**.

5.5.6 Humidificador

El aire que sale del ventilador pasa a continuación a una torre de humidificación de gases.

La instalación de un humidificador antes de la entrada de estos al biofiltro tiene varios objetivos (Ibañez, 2015):

- Eliminar las partículas que arrastra el caudal de gas, ya que podrían provocar problemas en el biofiltro. Estas pequeñas partículas podrían disminuir la porosidad del filtro biológico disminuyendo a su vez el rendimiento del mismo.
- Disminuir la temperatura de los gases. Como se mencionó en el apartado 5.4.6 sobre biofiltración, los gases no podrán entrar en el biofiltro a una temperatura superior a 40°C ya que podría provocar daños en el sistema.
- Aumentar el nivel de humedad de la corriente para que a la entrada del biofiltro se encuentre en las condiciones óptimas.
- Eliminar ciertos gases de la corriente que podrían ser tóxicos para el biofiltro, como por ejemplo, el amoníaco.

Las torres de humidificación son equipos de forma cilíndrica que constan de una superficie para el intercambio de calor y una corriente humedecida mediante un sistema de rociado de agua. La corriente de gas a tratar se introduce por la parte inferior de la torre y se pone en contacto con el líquido que se rocía por la parte superior. Los gases una vez tratados salen por la parte superior del humidificador. (Arnabat, 2018)

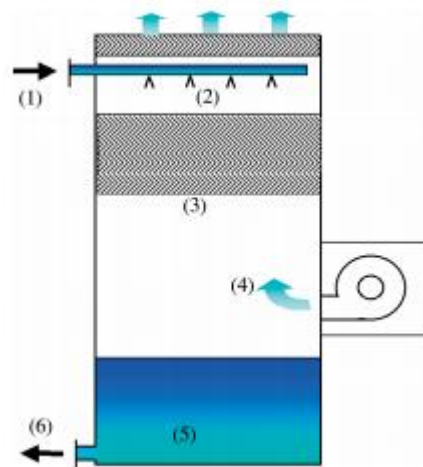


Figura 29. Esquema de un humidificador (Torres de refrigeración y condensadores evaporativos, s.f.).

El agua que se va poniendo en contacto con los gases cae a un depósito en la parte inferior de la torre. Este líquido será enviado de nuevo a los aspersores mediante una bomba que evitará el desperdicio de ese agua.

Para realizar el dimensionado del humidificador, es necesario en primer lugar conocer las condiciones de entrada y salida del aire de la torre. Esto se realizará con ayuda de un diagrama psicrométrico.

- Se conoce que los gases de entrada se encuentran a una temperatura de $T_1=50^{\circ}\text{C}$ y una humedad de aproximadamente el 40%. Con estos datos se obtiene una humedad absoluta $Y_1=0,0385 \text{ kg de vapor/kg de aire seco}$.
- A la salida se quiere obtener una humedad relativa del 95% pues estas serán las condiciones óptimas a las que se debe encontrar la corriente. Como se mantiene la misma entalpía que a la entrada, se obtiene una humedad absoluta de $Y_2= 0,044 \text{ kg de vapor/kg de aire seco}$ y una temperatura de $T_2=40^{\circ}\text{C}$.

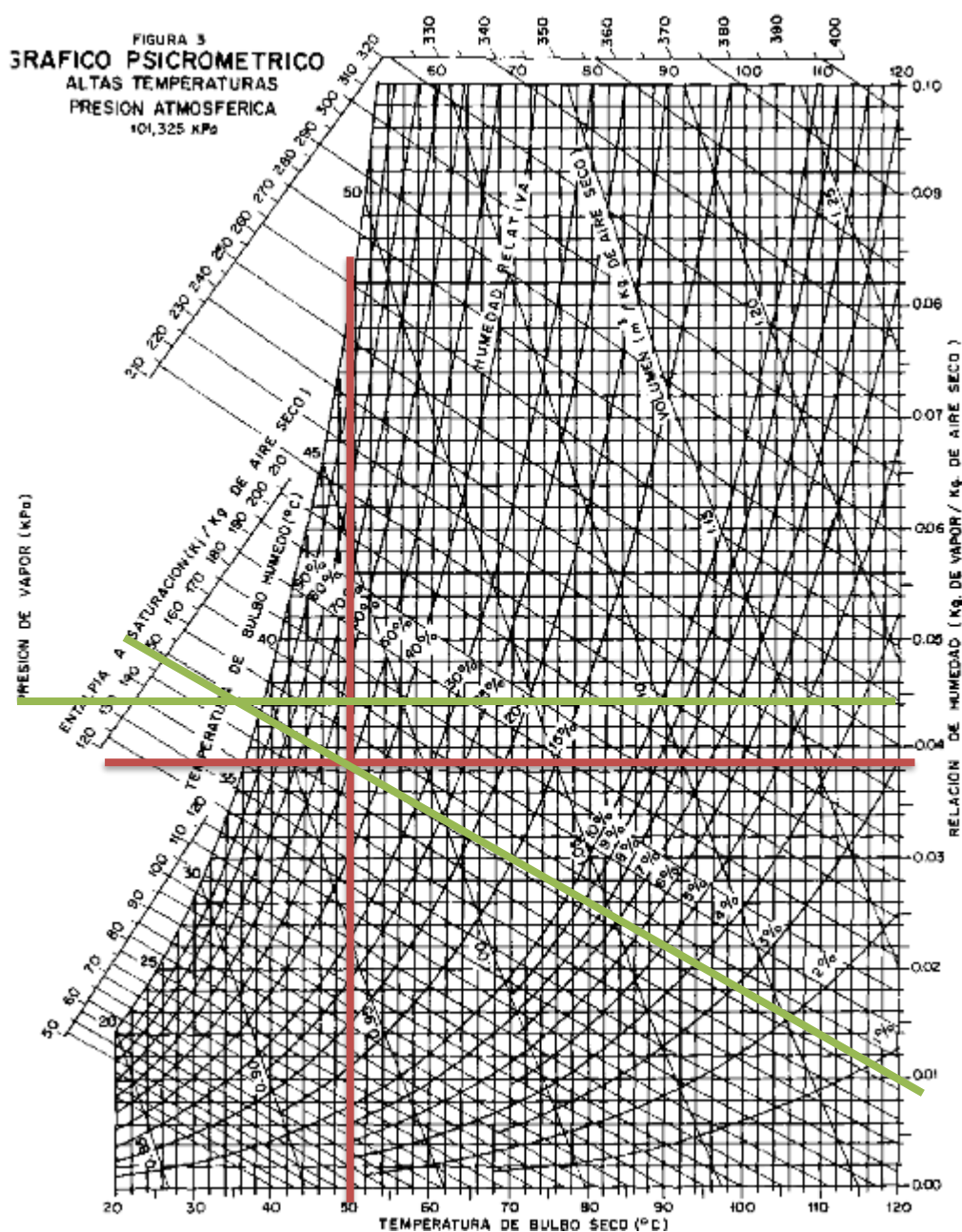


Figura 30. Diagrama psicrométrico (Diagrama psicrométrico, s.f.)

Con estos datos es posible calcular la cantidad de agua a reponer:

$$\text{Agua de reposición} = G_S(Y_2 - Y_1) = 61142,32 \cdot (0,044 - 0,0385) = 336,28 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ agua}$$

Para tener en cuenta la cantidad de agua arrastrada en forma de gota por los gases (1 %) y la necesidad de purga de agua (3 %) para evitar la acumulación de partículas y gases absorbidos, se considerará un caudal de agua de reposición de 350 l/h.

Siendo G_S el caudal de aire seco calculado de la siguiente manera:

$$G_S = \frac{64096,06}{1 + 0,044} = 61142,32 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ aire seco}$$

A continuación, se va a calcular el área y el volumen del humidificador:

- Para calcular la velocidad del gas, se hará uso de la ecuación de Souders-Brown:

$$v_G = K_S \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{0,5} = 0,05 \cdot \left(\frac{1000 - 1,193}{1,193} \right)^{0,5} = 1,45 \text{ m/s}$$

Siendo:

- K_S la constante de diseño, la cual depende de las propiedades de los fluidos, la geometría, y la presión entre otros factores. Se tomará un valor de 0,05 m/s (American Petroleum Institute, 12J., 2008)
- ρ_L la densidad del líquido con un valor de 1000 kg/m³.
- ρ_G la densidad del gas con un valor de 1,193 kg/m³.

- Por tanto, el área del humidificador será:

$$\text{Área (A)} = \frac{\text{Caudal de gases}}{\text{Velocidad del gas}} = \frac{53505,93}{1,45} = 10,25 \text{ m}^2$$

- Ahora se realizará el cálculo de la altura del relleno de la torre (z) según esta ecuación:

$$z = \frac{G_S}{A} \cdot \frac{y_2 - y_1}{K_{ya} (y^*(T_{As}) - y_{ml})}$$

$$\begin{aligned} y^*(T_{As}) - y_{ml} &= \frac{(y^*(T_{As}) - y_2) - (y^*(T_{As}) - y_1)}{\ln \left(\frac{y^*(T_{As}) - y_2}{y^*(T_{As}) - y_1} \right)} = \frac{(0,045 - 0,044) - (0,045 - 0,0385)}{\ln \left(\frac{0,045 - 0,044}{0,045 - 0,0385} \right)} \\ &= 0,00294 \end{aligned}$$

Siendo:

- $y^*(T_{As})$ la humedad absoluta. correspondiente a una humedad relativa del 100% con un valor en este caso de 0,045.

$$K_{ya} = \frac{H_A}{C_S}$$

- C_S el calor específico húmedo calculado como un promedio entre los de la entrada y la salida del humidificador.

$$C_{S1} (y_1 = 0,0385) = 0,250 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

$$C_{S2} (y_2 = 0,044) = 0,258 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

Por tanto, el valor medio será $C_S = 0,254 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

- Por otra parte, H_A es el coeficiente volumétrico de transferencia de calor y se puede calcular, según McCabe (José Íñiguez, 2010), de la siguiente manera:

$$H_A = \frac{0,5 \cdot G_S^{0,67}}{D} \left[\frac{BTU}{ft^3 \cdot h \cdot ^\circ F} \right]$$

Siendo G_S el caudal por unidad de área en $lb / ft^2 \cdot h$ y D el diámetro en ft. Sabiendo que el área es $10,25 \text{ m}^2$, el diámetro será de 3,61 metros (11,86 ft). G_S será $5965,1 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ h}$ ($1221,73 \text{ lb} / \text{ft}^2 \cdot \text{h}$).

Así, el valor de H_A será de $4,93 \text{ BTU} / \text{ft}^3 \text{ h } ^\circ\text{F}$ ($76 \text{ kcal} / \text{m}^3 \text{ h K}$).

De este modo, es fácil la obtención de $K_{ya} = 3110 \text{ kg} / \text{m}^3 \text{ h}$.

Por último, despejando de la ecuación de z , se obtiene una altura de 3,59 metros. La altura total del humidificador será:

$$H = 3,59 + 0,5 (\text{almacenam agua}) + 0,5 (\text{pulverizadores}) = \mathbf{4,59 \text{ metros}}$$

Por último, la pérdida de carga provocada por la zona de relleno se puede obtener mediante la siguiente expresión empírica (Aguirre López & Villaruel Muños, 2007):

$$\Delta P (Pa) = 3,94 \cdot 10^{-8} \cdot (9,85z + 5) \cdot G_S \cdot \frac{1}{\rho}$$

Siendo G_S el caudal másico por unidad de aire ($5965,1 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ h}$), ρ la densidad del gas ($1,193 \text{ kg/m}^3$) y z la altura (3,59m). Así, la pérdida de carga es de **47 Pa**.

5.5.7 Absorbedor

La siguiente etapa del sistema de depuración de gases es el absorbedor.

Este se instala para eliminar de la corriente de gases el amoníaco (NH_3), el cual es altamente tóxico.

Sin embargo, gran parte de la cantidad de amoníaco producida es absorbida en el humidificador, siempre que la planta sea de residuos domésticos mezclados, como es el caso. Así, la pequeña corriente de amoníaco que sale del humidificador no será un problema para el biofiltro, por lo que se cumplirá debidamente con la reglamentación relativa a la emisión de NH_3 a la atmósfera.

Además, esto supondrá un ahorro de costes, espacio y mantenimiento importante, por lo que queda justificado que no existe la necesidad de disponer de absorbedor en la planta.

5.5.8 Biofiltro

En este último apartado se trata de determinar el área del biofiltro a utilizar, así como la cantidad y composición del material filtrante. Tal y como se explicó en el apartado 5.4.6 sobre biofiltración, el biofiltro escogido será de tipo abierto, con una altura del lecho de 1 metro y un tiempo de residencia entre 30 y 60 segundos, diseñándose para 40 segundos.

Así, si el tiempo de residencia es de 40 segundos, y sabiendo que el caudal de gases a tratar es de 53505,93 m³/h, es fácil obtener el volumen del lecho, mediante la siguiente expresión:

$$V_{lecho} = 40 * \frac{53505,93}{3600} = 594,51 \text{ m}^3$$

Sabiendo que la altura del lecho se fijará en **1 metro**, el área transversal del biofiltro será de **594,51 m²**.

Al ser el biofiltro con área transversal rectangular, las dimensiones del mismo será de **27 metros de largo y 22 metros de ancho**.

Por último, el material filtrante estará formado por un 40% de compost maduro y un 60% de cortezas de madera.

Sabiendo que la densidad del compost maduro es de 600 kg/m³ y que la mezcla de cortezas de madera tendrá una densidad de 250 kg/m³ (Fernando Herraiz Garrido, s.f.), la densidad global del material filtrante será de 390 kg/m³.

Por tanto, la cantidad de material filtrante necesario será de **231,9 toneladas** (92,7 de compost y 139,1 de cortezas de madera).

En cuanto a la pérdida de carga producida por el biofiltro, esta se calcula considerando que en el material filtrante escogido, formado por un 40% de compost maduro y un 60% de cortezas de madera, tiene un porcentaje de huecos del 52,8% (ver tabla).

Media mixture ratio by weight (compost vs. wood chips)	Mass mean dia. (cm)	Percent voids (Five gallon pail method)
50:50	1.04	53.7%
40:60	1.14	52.8%
30:70	1.42	59.9%
20:80	1.81	60.6%
10:90	1.96	63.1%
0:100	1.98	63.3%
60:40 screened	0.99	47.0%
50:50 not screened	0.51	39.0%
30:70 screened	1.39	56.5%

Figura 31. Porcentaje de huecos en función de la composición del material filtrante (R. E. Nicolai)

A lo largo de la vida del biofiltro, los huecos se van obturando y para ser conservadores se ha asumido que el porcentaje de huecos será del 40%.

Sabiendo esto, y observando la siguiente imagen, se obtiene la caída de presión en el biofiltro:

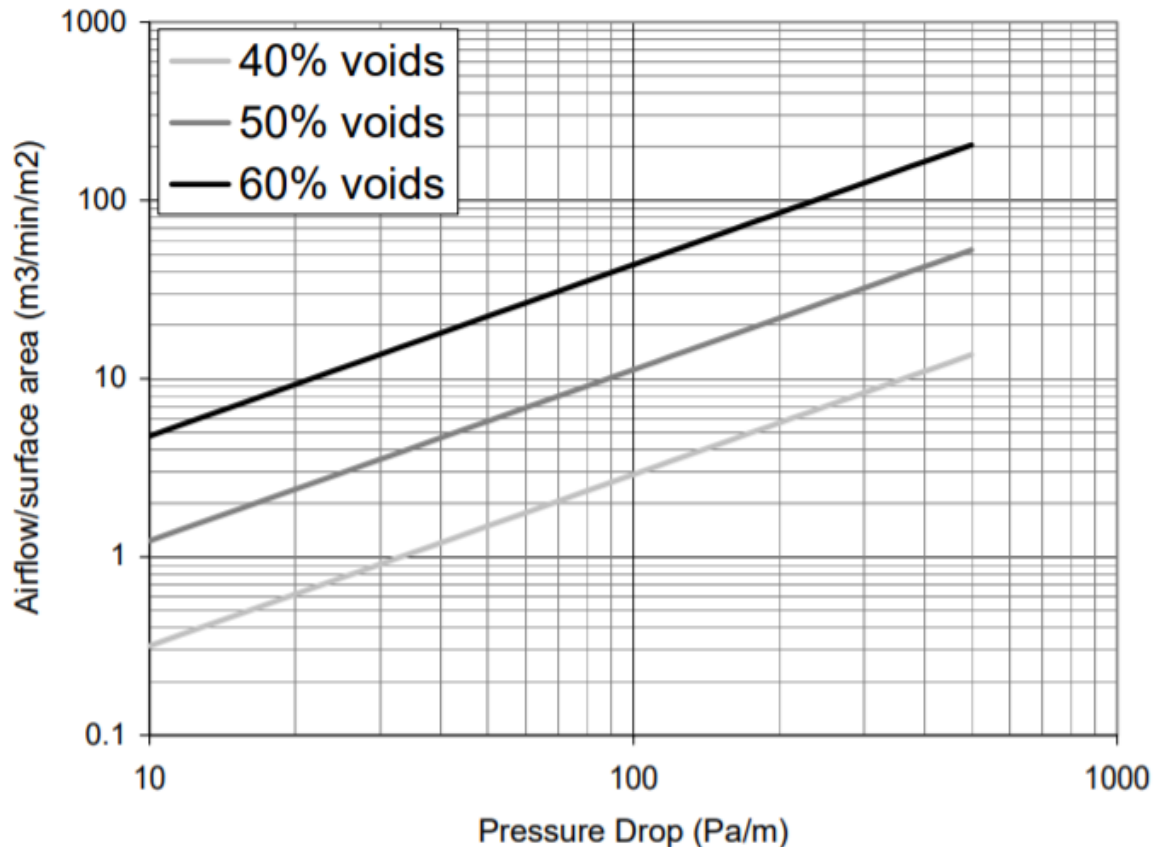


Figura 32. Relación entre la presión y el caudal de gases en el biofiltro (R. E. Nicolai)

Siendo el caudal de $1,5 \text{ m}^3/\text{min m}^2$, la caída de presión por longitud será de 60 Pa/m . Al ser la longitud del lecho de 1 metro, la pérdida de carga en el biofiltro será de 60 Pa .

También hay que considerar otro elemento dentro del biofiltro llamado plenum. Se trata de una placa perforada situada debajo del biofiltro que tiene como objetivo principal la distribución de la corriente de gases a tratar por todo el biofiltro para evitar que se dirija todo hacia un mismo punto.

Por otra parte, es importante mencionar que durante el tratamiento de gases en el biofiltro se formarán lixiviados que serán recogidos para aportar de la humedad necesaria al material filtrante, de modo que se sitúe entre un 40 y un 60%, que son las condiciones óptimas para que se lleven a cabo las reacciones de degradación de los contaminantes (Arana de Pablo, 2010). Así, es importante recoger los lixiviados del plenum para recircularlos (previa depuración biológica de los mismos) al sistema de riego, que consistirá en una serie de aspersores situados en la parte superior del biofiltro, después del material filtrante. Se colocarán hasta 16 aspersores para cubrir todo el área equitativamente.

Por último, la frecuencia de riego dependerá de la actividad de la planta, así como de la humedad que posee en cada momento el material filtrante, obtenida mediante sensores específicos de humedad. De esta forma, si el contenido de humedad es adecuado, no se activará el sistema de riego, mientras que si es menor que la requerida, se activará para volver a los niveles óptimos.

6 CONCLUSIONES

En el desarrollo de este proyecto, se pretende poner de manifiesto la importancia que tiene en la actualidad una buena gestión de los residuos, cada vez más numerosos, que produce la creciente población.

Una vez que se genera el residuo, este debe recibir un tratamiento adecuado para que su impacto ambiental sea el menor posible. Si el total de la basura generada se recogiera de los contenedores y se enviara directamente a vertederos o a incineradoras, probablemente en poco tiempo se convertiría en una situación insostenible, ya que el espacio disponible es limitado y además puede provocar problemas medioambientales, sociales y de salud. Es por esto que es esencial someter cada desecho a un procedimiento específico que fomente el menor depósito posible en vertederos o en incineradoras.

Para que esto sea posible, es importante que la población desarrolle a todos los niveles una mentalidad comprometida con el medio ambiente, pues repasando el proceso de producción de residuos, se observa que es una responsabilidad global.

Poniendo como ejemplo una prenda de vestir, se va a realizar un repaso en la jerarquía de tratamiento de residuos, desde su creación hasta su desecho. Esta jerarquía fue establecida en el artículo 8 de la Ley 22/2011, pero no toda la población la conoce ni sabe la responsabilidad que tiene sobre ella.

En primer lugar, se realiza el diseño de la prenda. Cuando esta se concibe, sería importante que el diseñador utilizara materiales reutilizados (pues ya existen prendas que se realizan de esta forma) y que se diseñara de forma que se minimizaran los materiales a utilizar (prevención).

Una vez que esta prenda llega al mercado, es el momento de que los consumidores la compren. Aquí, cada persona debería plantearse: ¿la necesito realmente o estoy comprando una prenda, que va a terminar convirtiéndose en un residuo por comprar? Aquí está la responsabilidad individual de la población (minimización).

Cuando esta prenda es comprada, cada persona debe intentar que su vida útil sea la mayor posible para así no tener que comprar más prendas a menos que sea necesario. Si no se quiere seguir usando esta prenda y se encuentra en buen estado, se puede donar a otra persona (reutilización).

En el caso de que la prenda ya no se encuentre en buen estado, es compromiso de cada persona el llevarla a un punto de recogida específico donde se aprovechará el material textil para su reciclaje (reciclado) o si no es posible se realizará su desecho final (eliminación).

Como se puede observar, si cada persona dentro de la cadena de producción de residuos cumple correctamente con su papel, es fácil disminuir el volumen de basura generada.

Una vez que esta basura llega a los contenedores adecuados, será recogida y clasificada para su posterior tratamiento.

Este proyecto tiene su foco en una de esas vías de tratamiento de residuos, en concreto en aquella que trata la materia orgánica que se genera tanto en el hogar como en la industria. El objetivo final es conseguir que el residuo tenga un valor y no sea desechado y convertido en un contaminante sin más. En este caso, la materia orgánica se convierte en compost.

El inconveniente se encuentra en que en este proceso de reciclaje o de valorización de los residuos también se generan otros contaminantes que habrá que tratar respectivamente.

Este proyecto se basa en la solución de uno de estos problemas, como es el olor y los compuestos nocivos que se emiten a la atmósfera durante el proceso de compostaje como se ha visto en el desarrollo de la memoria.

La solución escogida ha sido el tratamiento de estos gases mediante un sistema de biofiltración, ya que se considera que es uno de los métodos que menor impacto ambiental tiene actualmente.

Se puede concluir que gracias a esto, se consigue una importante minimización en la producción de olores durante el proceso de compostaje.

También cabe destacar que es una responsabilidad importante de la empresa que se encarga del compostaje el mantenimiento del biofiltro, ya que si no se realiza de una forma adecuada puede perder su eficacia y no realizar la desodorización de los gases de forma conveniente.

Como conclusión final, es importante que, como se ha visto con el ejemplo de la prenda, se realice una concienciación social sobre realizar un mayor aprovechamiento de cualquier producto desde su diseño y compra hasta su eliminación final.

Esta de aquí es una tarea que concierne no solo a la empresa productora sino a toda la población, convirtiéndose así en un ejercicio social.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Adsorción y Desodorización.* (s.f.). Obtenido de Venfilter:
https://www.venfilter.es/sites/default/files/adsorcion_y_desodorizacion.pdf
- Agencia Estatal.* (27 de Abril de 2006). Obtenido de Boletín Oficial del Estado:
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2006-80689>
- Agencia Estatal.* (29 de Julio de 2011). Obtenido de Boletín Oficial del Estado:
<https://boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-13046>
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.* (7 de Diciembre de 1961). Obtenido de
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1961-22449
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.* (10 de Julio de 2013). Obtenido de
<https://www.boe.es/boe/dias/2013/07/10/pdfs/BOE-A-2013-7540.pdf>
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.* (2011). Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-13046>
- AguaMarket. (2015). *AguaMarket*. Obtenido de Compostaje en pilas o hileras.
- Aguirre López, J., & Villarroel Muños, C. (2007). *Diseño de una torre de enfriamiento de agua para una planta ensambladora de vehículos*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- American Petroleum Institute, 12J. (2008). *Specification for oil and gas separators*.
- Arana de Pablo, Á. (2010). *Biofiltro edificio de tamices de la E.D.A.R de Arazuri: Estudio y propuestas de mejora*. Universidad Pública de Navarra.
- Arnabat, I. (17 de Agosto de 2018). Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/que-es-torre-de-refrigeracion-enfriamiento-funcionamiento-seguridad.html#funcionamiento>
- Bazo, V. A. (2016). *Planta de Compostaje en Autol (La Rioja)*. Obtenido de Trabajo Fin de Grado:
https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE002747.pdf
- Busto, O. (s.f.). *enoreports.com*. Obtenido de http://www.acenologia.com/ciencia60_2.htm
- Cálculo de la rugosidad.* (20 de Diciembre de 2012). Obtenido de
<https://es.slideshare.net/cosmeacr/coeficientes-de-rugosidad-haestad>

Capítulo 8. Gestión y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos. (2008). En P. y. Andrés, *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica*.

Carbotecnia. (s.f.). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/producto/carbon-activado-para-olores-de-drenaje-vapacid/>

Carrasco, A. M. (2018). *Apuntes Asignatura Gestión y Tratamiento de Residuos*.

Castro, L. R. (2018). *Diseño básico de una planta de reciclaje de residuos sólidos urbanos con una capacidad de 50000 Tm/año*. Sevilla.

Cátedra de Ingeniería Rural. (s.f.). Obtenido de Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Prob_hidraulica/FormulasHidraulica.pdf

Cerem Comunicación. (26 de Mayo de 2017). *¿Nos desafían los biorresiduos?* Obtenido de Cerem International Business School: <https://www.cerem.es/blog/nos-desafian-los-biorresiduos>

Condorchem Envitech. (s.f.). Obtenido de Scrubbers y Lavadores de Gases: <https://condorchem.com/v2/lavadores-de-gases-scrubbers/>

Costa. (1991).

Diagrama psicrométrico. (s.f.). Obtenido de http://www.fastonline.org/CD3WD_40/INPHO/VLIBRARY/X0057S/ES/X0057S0T.GIF

Diario de Navarra. (20 de Febrero de 2015). Obtenido de https://www.diariodenavarra.es/noticias/navarra/pamplona_comarca/2015/02/20/la_produccion_tunel_es_duplica_compost_mancomunidad_195767_1002.html

Docampo, R. (2013). *Compostaje y Compost*. INIA.

Ecotec. (2013). Obtenido de Biofiltros para el tratamiento biológico de gases: <http://www.ecotec.es/biofiltros-para-tratamiento-biologico-de-gases.php>

Epstein, E. (2011). *Industrial Composting. Environmental Engineering and Facilities Management*. New York: CRC Press.

Fernando Herraiz Garrido, J. G. (s.f.). *Interempresas*. Obtenido de Universidad Católica de Ávila: <http://www.interempresas.net/Madera/Articulos/103297-Characterizacion-corteza-Pinus-pinaster-Ait-generada-aserraderos-provincia-Avila-uso.html>

- González, J. A. (3 de Febrero de 2018). *Diario Vasco*. Obtenido de <https://www.diariovasco.com/tecnologia/investigacion/huele-nariz-electronica-20180203150630-ntrc.html>
- Groenestijn, J. W. (2001). *Environmental Pollution*, vol 4. Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0930-9_5
- Grupo de Gestión de Residuos*. (2010). Obtenido de Proyecto de Gestión de Residuos en la Facultad de Ciencias de la UDC.: <https://proyectogestionderesiduos.wordpress.com/2009/12/15/etapas-del-proceso-de-compostaje/>
- Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. s.L. CRC Press.
- Hileras de Viento*. (s.f.). Obtenido de <http://efc.syr.edu/wp-content/uploads/2016/08/Hileras-de-Viento.pdf>
- Ibañez, A. M. (2015). *Ingeniería Básica de una Planta de Compostaje en Túnel*. Sevilla.
- Ing. Chirinos, A. (s.f.). *Diferencia entre absorción y adsorción*. . Obtenido de <https://www.diferencias.cc/absorcion-adsorcion/>
- Internet Archive Wayback Machine*. (16 de Septiembre de 2009). Obtenido de El Carbón Activado: <https://web.archive.org/web/20090916134716/http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqca tex.htm>
- ITENE. (s.f.). *Guía de Tecnologías Limpias en el Ámbito de Olores*. Obtenido de <https://www.malosolores.org/pdf/cliente/guia-tecnologias-limpias-olores.pdf>
- Jiménez, S. I. (s.f.). *Hidráulica Fácil*. Obtenido de <https://www.hidraulicafacil.com/2017/07/perdida-de-carga-localizada-o-en.html>
- José Íñiguez, E. L. (Enero de 2010). *Revista ingeniería primero*. Obtenido de http://www.fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin15/URL_15_QUI01.pdf
- Juan Pablo Silva, P. L. (s.f.). *Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje*. . Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>
- Junta de Andalucía*. (s.f.). Obtenido de Planta de recuperación de compostaje.: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/CA-221-10-EJECUCION_DEL_PLAN_DIRECTOR_TERRITORIAL_DE_GESTION_DE_RESIDUOS_URBANOS_DE_ANDALUCIA/CA-221-10/3_PLANTAS_DE_RECUPERACION_Y_COMPOSTAJE.PDF

- Junta de Andalucía.* (s.f.). Obtenido de Sistemas y técnicas para el compostaje: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf
- Laffort, P. (1994). *Aspects of the olfactory information.* Amsterdam, The Netherlands.
- Legal Today.* (2016). Obtenido de <http://www.legaltoday.com/>
- Luna, J. C. (2014). *SlideShare.* Obtenido de <https://es.slideshare.net/capi8081/residuos-slidos-urbanos-generalidades>
- Manual del Compostaje del Agricultor.* (2013). Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Márquez, P. B. (s.f.). *CSIC.* Obtenido de Factores que afectan al proceso de compostaje.: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>
- Martín, M. d. (2014). *Determinación y control de olores en la gestión de residuos orgánicos.* Córdoba.
- Ministerio del trabajo y asuntos sociales España.* (s.f.). Obtenido de Planta de compostaje para el tratamiento de residuos: https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_597.pdf
- Natural Zone.* (s.f.). Obtenido de Utilizaci: <http://natzone.org/index.php/areas-de-investigacion/desarrollo-tecnologico/item/139-utilizacion-de-biofiltros-para-el-tratamiento-de-gases>
- Octavio Maldonado Saavedra, K. G. (2012). El sistema olfatorio: el sentido de los olores. *La Ciencia y el Hombre.*
- OpenCourseWare Universidad de Sevilla .* (s.f.). Obtenido de http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_20.htm
- Plana, R. (2008). *Maestro Compostador.* Obtenido de Los tratamientos biológicos de residuos orgánicos.: <http://www.maestrocompostador.es/compostaje/sistemas/SAbiertos/SAbiertos.html>
- Plana, R. (2008). *Maestro Compostador.* Obtenido de <http://www.maestrocompostador.es/compostaje/sistemas/sistemas.html>
- R. E. Nicolai, K. J. (s.f.). *Determining Pressure Drop through Compost-Woodchip Biofilter Media .*

- Rafael López Núñez, I. C.-W.-H. (2012). *BIOFILTRACIÓN DE A-PINENO CON COMPOST DE RSU Y RESIDUOS DE PODA*. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/63081/3/Biofiltración%20de%20A-Pine4no%20con%20compost.pdf>
- Revista Argentina de Microbiología*. (10 de Octubre de 2017). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754117301050>
- Servicio de Tratamiento de Residuos Municipales*. (s.f.). Obtenido de Diputación de Granada: http://www.resurgranada.es/cma_velez_benaudalla.php
- Sistemas y Técnicas para el Compostaje*. (s.f.). Obtenido de https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf
- Torres de refrigeración y condensadores evaporativos*. (s.f.). Obtenido de https://www.msbs.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/4_leg.pdf
- Tortosa, G. (10 de Junio de 2011). *Compostando Ciencia*. Obtenido de I+D+i+d sobre el compost y los abonos orgánicos y biológicos.: <http://www.compostandociencia.com/2011/06/la-importancia-de-la-materia-organica-html/>
- Tumiri, J. F. (6 de Julio de 2017). *Natural Zone*. Obtenido de Utilización de biofiltros para el tratamiento de gases: <http://natzone.org/index.php/areas-de-investigacion/desarrollo-tecnologico/item/139-utilizacion-de-biofiltros-para-el-tratamiento-de-gases>
- Universidad de Valladolid*. (s.f.). Obtenido de Ingeniería Fluidomecánica: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-de-valladolid/ingenieria-fluidomecanica-i/otros/diagrama-de-moody/1043075/view>
- Universidad Pública de Navarra*. (2015). Obtenido de Composición típica de los RSU según países: <http://cmap.unavarra.es/rid=1NTVKZ07R-224B2PG-55T/Composiciones%20t%C3%ADpicas%20de%20los%20RSU%20seg%C3%ADn%20pa%C3%ADses.bmp>
- Usos del Compost*. (2013). Obtenido de https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2016/01/usosdelcompost_web.pdf
- Valvias*. (s.f.). Obtenido de Densidad gases: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php>
- Werner, L. (2018). *Ecosiglos*. Obtenido de <https://ecosiglos.com/como-hacer-compost-en-casa/>

