

## COMPOSTAJE

### Fundamentos básicos

El compostaje de un determinado substrato, es un proceso de descomposición aerobia termofílica de sus constituyentes orgánicos, mediante la acción combinada de una serie de poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos, asociada a una sucesión de factores ambientales.

La obtención de un buen compost depende fundamentalmente de:

- Materia orgánica fermentable.
- Proceso biológico de fermentación.
- Proceso mecánico de depuración.

A continuación, se analizarán las características óptimas que deben darse en el proceso de compostaje.

### Materia Orgánica fermentable

La importancia de la materia orgánica fermentable, reside en el hecho de que es el substrato y fuente de nutrientes de los microorganismos que intervienen en el compostaje. El substrato se debe considerar bajo los aspectos físicos y químicos. Sus propiedades físicas van a condicionar el acceso a los nutrientes, oxígeno y agua de los microorganismos. Su composición química determina el tipo y cantidad de nutrientes disponibles.

La estructura molecular y su composición elemental son los factores químicos de mayor interés. La utilidad de los residuos como substrato dependen de la disponibilidad de sus elementos en sus moléculas constituyentes. Es muy frecuente que los microorganismos sólo pueden asimilar compuestos muy simples, por tanto, para que se pueda aprovechar una molécula completa, se tiene que romper en sus unidades constituyentes; así las proteínas en aminoácidos y estos en amoníaco, pudiéndose entonces asimilar. El mecanismo de ruptura es la reacción encimática, pero éstas se sintetizan por los microorganismos. El número y complejidad de los sistemas encimáticos implicados en el proceso llega a ser muy grande cuando aumenta la complejidad de la estructura molecular lo que, además, exige un mayor tiempo de tratamiento.

Cualquier producto fermentable puede ser compostado. Tradicionalmente, en la explotación agropecuaria, el estiércol debía hacerse o prepararse para posibilitar su uso agrícola. En la actualidad, son muchos los residuos de origen urbano agrario o industrial que pueden someterse a un proceso de compostaje para facilitar su aprovechamiento agrícola.

Es de gran importancia, en la planta de compostaje, preparar adecuadamente la masa que va a fermentar, pues será decisiva para obtener una buena calidad de producto final o compost, en condiciones

óptimas de tiempo y del menor costo posible; -Básicamente se tomará especial interés para reducir el contenido de inertes, en obtener una humedad adecuada una porosidad que garantice la aireación del proceso y una relación C/N comprendida entre 25-35.

Se van a contemplar en el presente trabajo solamente los residuos de origen urbano.

### Los residuos sólidos urbanos (RSU)

La calidad del compost está en función de la composición de los RSU más concretamente de la riqueza en productos orgánicos. De forma negativa influye la presencia de plásticos, vidrios y, en general, productos no fermentables.

Dado que las basuras urbanas o residuos sólidos urbanos contienen gran cantidad de productos no fermentables, el primer problema que presentan el compostaje de estos residuos, es la eliminación previa de la mayor cantidad posible de los productos inertes.

Los RSU españoles presentan una concentración en productos orgánicos del orden del 50%. Esta cifra que puede acercarse al 68% si se considera la fracción de papel y cartón. Deberán aplicarse las tecnologías adecuadas para retirar la mayor cantidad posible de productos inertes antes de proceder al compostaje.

Los lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR)

Los lodos desecados, obtenidos en las EDAR, presentan una elevada riqueza en materia orgánica, pero contienen una excesiva humedad, en torno al 75%, y una baja porosidad, lo que dificultará la fermentación si no se toman ciertas medidas. Estas, normalmente suelen ser:

a) Desecación del lodo en capas, hasta lograr una humedad próxima al 50%.

b) Realizar mezclas del lodo con "agentes que además de reducir la humedad, aumentarán considerablemente la porosidad.

El lodo desecado en capas o mezclado con agentes como viruta de madera, paja, residuos sólidos urbanos u otros productos, se encuentra en circunstancias adecuadas para poder compostarse.

### Proceso biológico de fermentación

Como se ha expuesto, el compostaje es una fermentación aerobia termofílica de un sustrato por la acción combinada de varios microorganismos.

Es de gran interés analizar las principales circunstancias

o parámetros que intervienen en la fermentación, con el fin de mantener estos parámetros en circunstancias óptimas, en aras de un buen compostaje, en el menor tiempo posible y, por lo tanto, con menor coste.

### Parámetros físicos

#### Aireación:

Es el parámetro básico de una fermentación aerobia. La ausencia de aireación en un proceso biológico de consumo de oxígeno y desprendimiento de anhídrido carbónico, originaría un ambiente más adecuado para fermentaciones de tipo aerobia distinta de las exigidas para un compostaje.

La concentración óptima de oxígeno en el interior de las pilas de fermentación está comprendida entre el 5 y el 15% en volumen. La ventilación de las pilas se asegura por volteos periódicos de la masa compostable o por medio del aire que se inyecta o se extrae por las tuberías perforadas situadas a lo largo de la pila de fermentación. La ventilación controlada puede servirnos además para regular la temperatura de fermentación.

#### Humedad:

Junto con la aireación, son los dos parámetros de gran importancia. Los microorganismos necesitan el agua como vehículo líquido para transportar los alimentos y elementos energéticos, a través de la membrana celular.

La descomposición de la materia orgánica depende del contenido de humedad. Los valores mínimos en los que tiene lugar la actividad biológica se sitúa entre el 14 y el 12%. Valores inferiores al 40% de humedad pueden limitar considerablemente el compostaje. El contenido óptimo de humedad se encuentra entre Por encima de este valor se puede presentar anaerobiosis.

A lo largo del compostaje y, sobre todo, en las primeras fases, se producen grandes pérdidas de agua, que si son críticas, habrá que corregir con la incorporación de agua, en el momento del volteo. En el compostaje de lodos de depuradora, se deberá reducir la humedad antes del compostaje, como se ha expuesto anteriormente.

#### Temperatura:

Durante el compostaje y siempre que la humedad y la aireación sean adecuadas, la temperatura sufre la siguiente evolución. Inicialmente, los residuos fermentables se encuentran a temperatura ambiente. En seguida, los microorganismos, que disponen de abundantes nutrientes, proliferan y la temperatura va incrementándose considerablemente. A los pocos días, se alcanzan los 40°, finalizando la llamada "fase mesofílica" y se alcanza la fase termofílica". La temperatura sigue subiendo y, la mayor parte de los microorganismos iniciales mueren y son reemplazados por otros resistentes a esas temperaturas. Más tarde, decrece gradualmen\_e y

se vuelve otra vez a temperaturas mesofílicas en un período denominado de "maduración" caracterizado por una reducción paulatina de la actividad biológica ~ por una estabilización de los productos orgánicos obtenidos.

La fase de incrementos de temperaturas, hasta valores altos que pueden superar los 70° C, junto con humedades considerables, tiene una gran importancia sanitaria por cuanto supone la eliminación de germen patógenos. Sin embargo, esta eliminación puede afectar a microorganismos que intervienen en el compostaje, con desfavorable repercusión en la prolongación excesiva del tiempo de fermentación. Cabe una solución de compromiso que fije la temperatura de compostaje en un valor, dentro del cual, se presenten garantías sanitarias y, a la vez, pueda existir una población de microorganismos que asegure un compostaje adecuado. Esta temperatura de trabajo se ha fijado en torno a los 55°C.

En la planta de compostaje, la regulación de la temperatura sólo puede ejercerse para reducir su valor, y se realiza mediante los volteos. También se hace mediante la regulación adecuada del caudal del aire de las soplantes que ventilan las pilas de fermentación a través de las tuberías perforadas.

### **Parámetros bioquímicos**

Para el crecimiento de la mayoría de las bacterias, el pH óptimo varía entre 6 y 7,5 mientras que en el caso de los hongos este rango se amplía entre valores de pH comprendidos entre 5.5 y 8. No obstante y como se ha expuesto, durante el compostaje hay una sucesión de diversos microorganismos y circunstancias variantes que hacen que el pH varíe considerablemente.

Si como consecuencia de un encalado inicial, en la línea de desecación de lodos, se parte de un valor de pH elevado, se producirán pérdidas considerables de nitrógeno. La corrección del pH de una pila de compostaje para conseguir un crecimiento óptimo de

microorganismos, se ha comprobado que es una práctica poco eficaz

La curva de variación del pH en función del tiempo de fermentación es la siguiente: inicialmente, los residuos sólidos urbanos, presentan una reacción ácida correspondiente a los extractos de las sustancias orgánicas presentes, con valores próximos a 6. Con el inicio de la fermentación, los residuos adquieren mayor acidez debido a la actividad de las bacterias y a la formación de ácidos débiles. Posteriormente, el material fermentable adquiere una reacción alcalina como consecuencia de la formación de amonio al degradarse las proteínas y los aminoácidos. En la cumbre de la fase termófila, se pueden alcanzar valores próximos a 11. Finalmente, en la fase final de la fermentación el pH desciende a valores próximos a la neutralidad ligeramente alcalinos, debido a las propiedades naturales de amortiguador o efecto tampón, de la materia orgánica.

#### materia orgánica:

Durante el proceso de compostaje, las pérdidas de materia orgánica pueden alcanzar el 30%, medido como materia seca total. La mayoría de estas pérdidas es materia orgánica volátil, correspondientes a sustancias ricas en carbono. Estas pérdidas se producen en la primera fase de la fermentación, que como se ha expuesto, es la fase más activa, y no durante el período de altas temperaturas.

#### nitrógeno:

Si se tiene en cuenta que el destino del compost es su aplicación agrícola y que el nitrógeno es uno de los tres grandes nutrientes para los cultivos, se comprende el gran interés por evitar las pérdidas. Estas se producen cuando las cantidades de carbono asimilable son pequeñas respecto a las de nitrógeno. Este es el caso de sustancias que contienen carbono y que son resistentes al ataque microbiano, o por el contrario se producen pérdidas en sustancias que tienen un alto contenido en nitrógeno y son descompuestas con rapidez.

En el transcurso del compostaje, el contenido de nitrógeno disminuye debido a la volatilización del amoníaco. Las pérdidas mayores se producen en los primeros días cuando la amonificación es mayor y cuando las circunstancias de alto valor de pH y elevada temperatura favorecen las pérdidas amoniacales. Durante el proceso, las pérdidas suelen situarse en torno al 10%

#### Relación C/N:

Los microorganismos necesitan el carbono como fuente esencial de energía, y el nitrógeno para la síntesis de proteínas junto con otros elementos como el fósforo o el azufre.

Durante la fermentación aerobia los organismos vivos consumen de 25 a 35 unidades de carbono por cada unidad de nitrógeno. Este es el rango de valores de la relación C/N que se suele adoptar como óptimo en las plantas de compostaje a la hora de preparar las

mezclas o lo que se ha denominado en el presente artículo "materia orgánica fermentable". El nitrógeno se encuentra, casi en su totalidad, en forma orgánica de donde debe ser extraído y modificado por los microorganismos para poder ser utilizado por éstos.

Básicamente, una relación C/N elevada conducirá a tiempos de fermentación muy prolongados. Por el contrario, el compostaje de productos orgánicos con una relación C/N baja, aunque origina un rápido proceso de compostaje, lo hacen con grandes pérdidas nitrogenadas.

### higiene

Como ya se ha expuesto, durante el compostaje se presenta un proceso microbiológico dinámico, originado por la acción combinada de una población bacteriana y por hongos básicamente. La flora mesofílica que inicia el proceso, pronto es sustituida por una flora termofílica, pudiéndose alcanzar temperaturas por encima de los 75°C. Las temperaturas de trabajo, por el contrario, no suelen superar los 85°C para posibilitar una mayor actividad biológica y una reducción del tiempo de compostaje. A la vez esta temperatura más baja facilita la reducción de las pérdidas amoniacales.

Las altas temperaturas en un ambiente de elevada humedad posibilita la eliminación de las bacterias patógenas y, en general, origina una considerable reducción de los gérmenes patógenos.

Con relación a los huevos de moscas y, en general, de parásitos, las temperaturas iniciales de 20 a 25°C en medio húmedo y rico en sustancias nutritivas favorecen el desarrollo de parásitos. Sin embargo, al subir posteriormente las temperaturas, se produce una eliminación de estos parásitos. Este hecho se comprueba en las plantas de compostaje donde no se observan moscas en las pilas donde la fermentación se encuentra en fase avanzada. En algunas plantas de compostaje se ha empleado la práctica de distribuir compost maduro sobre las pilas nuevas con el fin de actuar como repelente de moscas.

Durante los primeros días del compostaje, se ha comprobado la muerte o destrucción de:

- Lombriz solitaria y sus huevos.
- Huevos y larvas de mosca.
- Semillas de plantas parásitas.

En el gráfico adjunto se expone la "Influencia de la temperatura y del tiempo de exposición en la destrucción de algunos gérmenes patógenos", según Feachem.

### Sistemas del proceso biológico de fermentación

Todos los sistemas de compostaje van orientados a fomentar la optimización de los parámetros que regulan el proceso, para obtener un buen compost en las circunstancias más favorables de menor espacio, menor tiempo de fermentación, menor producción de olores además de una mejor calidad del producto final.

Básicamente, se pueden distinguir dos sistemas y un tercero que sería una combinación de los anteriores. Estos sistemas son:

- Compostaje en recinto abierto y en recinto cerrado.

- Sistemas de compostaje en recinto abierto

Corresponde a los sistemas más tradicionales de compostaje en pilas o en montones al aire libre aunque, a veces, se realiza al abrigo de la lluvia en grandes naves.

Los sistemas más extendidos son:

a) Compostaje en pila estática

Es el sistema más antiguo y se realiza en pilas, de reducida altura ya que no se mueven durante el compostaje. La ventilación es la natural, a través de los interespacios de la masa a compostar.

b) Compostaje por volteo

La aireación se logra por volteo mecánico de toda la masa compostable. El tamaño de la pila fermentable es mayor, permitiendo alturas en torno a 2,5 m.

Recientemente están tomando gran importancia los sistemas de compostaje por volteo forzado por medio de volteadora con control automático.

Los residuos sólidos urbanos o su fracción orgánica \_ se colocan en hilera, pilas de fermentación o parvas, dentro del parque de compostaje, preparado para facilitar el movimiento de la máquina

volteadora. El parque de fermentación que normalmente está expuesto al aire libre, se encuentra dividido en franjas, donde se situará la masa a compostar en hileras. Por los límites laterales de estas franjas, circulará la máquina volteadora, normalmente sobre carriles. A veces, estos carriles se sitúan sobre muros o sobre unos pórticos.

La volteadora es la pieza clave y, básicamente, consta de un frente con un cilindro dentado o rejas fresadoras, que levanta la materia a compostar, la carga sobre una cinta y la descarga a continuación de la hilera. La mayoría de estos sistemas son automáticos y la volteadora suele pasar varias veces por la hilera; unas veces va desplazando y avanzando la masa a compostar a lo largo de la hilera y otros voltean sin desplazamiento de compost.

Los tiempos de fermentación o de estancia en el parque de volteo suele ser de dos a cuatro semanas. Transcurrido este tiempo, el compost deberá pasar al parque de maduración antes de proceder a su refinado o depuración.

### c) Compostaje Por ventilación forzada

La pila de fermentación es estática y en su formación se ha dispuesto de un sistema mecánico de ventilación por tubería perforada o por canal empotrado en la solera del parque de fermentación. Las tuberías se conectan con un ventilador que asegura la entrada de oxígeno y la salida de CO<sub>2</sub>. Esta ventilación puede ser por inyección o impulsión de aire o por subción o extracción.

#### - Sistemas de compostaje en recinto cerrado

Son sistemas desarrollados para reducir considerablemente la duración de la fermentación y, por tanto, de las superficies del parque de compostaje, mediante un mejor control de los parámetros de fermentación y además, un mejor control y reducción de los olores.

La primera fase más activa de fermentación, se realiza en un recinto cerrado y la segunda fase o maduración, se completa en parques abiertos o bajo cubierta.

Algunos de estos sistemas son:

a) Compostaje en celdas: El proceso es precedido de una separación de metales y productos no fermentables. Los orgánicos se colocan en celdas de cemento sometidas a aireación y con sistema de recogida de lixiviados. Este sistema apenas se usa.

b) Bioestabilizador Dano: De origen danés, consiste en un tratamiento continuo mecánico de los residuos dentro de un cilindro de grandes dimensiones de 2 a 3 metros de diámetro, con una velocidad de 2 r.p.m. El tiempo de permanencia de los residuos dentro del fermentador, es de uno a tres días. Una vez concluida la

fermentación, la fase de maduración se realiza en pilas estáticas de fermentación fuera del bioestabilizador.

c) Fermentadores verticales: La pieza principal es un depósito cilíndrico de grandes dimensiones, colocado verticalmente y dividido en varias plantas que tienen una parte perforada. La materia a compostar se coloca en el piso más alto y mediante dispositivos mecánicos se traslada la masa hasta encontrar el piso perforado, por donde caerá al piso inferior. Además, puede existir un suministro de agua para corregir la humedad pero, normalmente, se aprovecha el vapor de agua que se desprende de la evaporación de las capas de pisos inferiores. Cuando la fracción orgánica ha descendido al último piso, se da por concluida la fermentación y el compost sale al parque de maduración.

El tiempo de residencia en el fermentador es de una semana.

### Proceso mecánico de depuración

La composición de la materia orgánica fermentable exige la necesidad de imponer un proceso mecánico que elimine los inertes, no orgánicos. El proceso consta de un conjunto de operaciones mecánicas encaminadas a reducir el contenido de inertes como vidrio, plástico, metales, etc. y a obtener una granulometría adecuada que facilite su aprovechamiento en los suelos agrícolas.

El tipo de proceso mecánico depende de la composición de la materia orgánica fermentable y, más concretamente, de la presencia de inertes no orgánicos, fenómeno que se cae en la fermentación de los residuos sólidos urbanos o en sus mezclas con lodos de depuradoras. Es decir, se distinguen dos procesos:

- Depuración de lodo compostado, sólo o en mezclas con agentes orgánicos.
- Depuración de compost de RSU o de mezclas con lodo urbano.

### Depuración de lodo compostado

El lodo, compostado después de un proceso de desecación sin mezclas, o en los casos de compostaje de lodo mezclado con astillas y otros residuos orgánicos, se somete a un proceso muy sencillo de cribado y/o molienda. Este proceso se realiza por medio de un trómel o criba giratoria, y a veces, con un molino. Al final de este proceso de depuración, se obtiene un compost de granulometría inferior a 15 mm. La fracción gruesa, integrada básicamente por rechazos o por los productos de mezcla, se retirarán a vertedero o se volverán a reutilizar como nuevo agente de mezcla.

### Depuración de compost de RSU

El compost obtenido por la fermentación de los RSU o por mezclas con lodos, posee una gran cantidad de inertes que es preciso eliminar. Existen numerosos sistemas de eliminación de estos inertes, pero por su importancia se describe, a continuación, el proceso desarrollado por la empresa nacional Adaro, en su planta de reciclaje de Valdemingómez (Madrid).

Concluida la fermentación, el compost es conducido a la planta depuradora de compost. La masa fermentada se deposita en la tolva dosificadora y desde allí, a través de una cinta transportadora, el compost llega al equipo donde se eliminan los inertes, en razón de su forma redondeada.

El separador balístico consta de una cinta inclinada, con movimiento ascendente, donde cae el producto a depurar. Los productos inertes redondeados, rodarán y se separarán de otra fracción que se fija a la cinta y que ascenderá y seguirá el proceso.

A continuación, la fracción orgánica sufre un cribado a través de un tamiz de 25 mm de luz. Los rechazos de este tamiz están integrados por tejidos y productos plásticos, así como por trozos de maderas y vidrios. La fracción inferior a 25 mm pasará por una malla elástica, obteniéndose un rechazo de granulometría comprendida entre 25 y 10 mm. La fracción fina pasará por la deschinadora donde se extraerán los inertes vidrio, cerámica, tierra, etc., y se obtendrá el compost de alta calidad.

Otra fracción de compost se obtiene en el ciclón de la deschinadora. En efecto, la eliminación del chinarro se efectúa en un proceso de flotación con aire de la fracción fina que llega de la malla elástica. Este aire, que arrastra partículas sólidas, se depura de estos sólidos, en el ciclón, antes de salir al exterior. Esta fracción fina de compost tiene un excelente aspecto, quizás mejor que el compost, sin embargo, hay que indicar que en su composición presenta un ligero aumento, de uno a dos puntos, de mayor contenido en cenizas, integrado por partículas finas inorgánicas.

#### - Características de los Productos obtenidos y destino de los mismos.

En el proceso mecánico de depuración del compost, se han obtenido una serie de productos que se pueden agrupar en dos grandes bolques: rechazos y compost depurado.

Algunos rechazos pueden tener una utilización o aprovechamiento como es el caso del rechazo de la criba elástica. Estos, después de una eliminación de vidrio, pueden aprovecharse como combustibles. Los rechazos del trómel están integrados por trozos de tejidos sintéticos, plásticos, maderas y otros compuestos combustibles, pero sin embargo, también contienen productos inertes como vidrio, metales, cerámica y otros. El aprovechamiento energético de estos rechazos sólo se podrá realizar en hornos de parrilla móvil, que permita eliminar la formación de escorias durante el proceso de combustión.

Los rechazos de la deschinadora, compuestos por vidrio, cerámica y otros inertes, pueden usarse en la consolidación de terraplenes.

Por último, los rechazos del equipo balístico, no tiene posibilidad de aprovechamiento, por lo cual, habrá que depositar en un vertedero controlado.

Las dos fracciones de compost, la obtenida en el ciclón y la de la deschinadora, tienen un aprovechamiento agrícola como enmienda o abono orgánico de los suelos.

#### Características del Compost

La composición de un compost varía considerablemente en función de los residuos y éstos, a su vez, dependen de la época del año, del nivel socioeconómico de la comunidad, el grado de industrialización, etc. Además, como queda expuesto, el proceso de compostaje influye sobre la calidad del compost.

El compost es un producto orgánico estable con una granulometría inferior a 15 mm., con bajo contenido en inertes y alto valor fertilizante.

## UTILIZACION DEL COPOST

### LEGISLACION

La Directiva (86/278/CEE) del Consejo de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura", es el marco legal para la aplicación de lodos a los suelos cultivados. La transposición de esta norma comunitaria a la legislación española se hace por el "Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario". (BOE 262 de 01-11-90). Anteriormente, el Real Decreto 72/1988 de 5 de febrero sobre fertilizantes y afines, menciona el fertilizante o abono orgánico y la enmienda orgánica, sin precisar mucho.

Estos Reales Decretos junto con la "Orden Ministerial de 14 de junio de 1991 sobre productos fertilizantes y afines" (BOE nQ 146 de 19-06-91) son las normas jurídicas que regulan la aplicación agrícola de lodo y compost.

Se resumen, a continuación, los datos más destacados de los textos legales.

Según la Orden Ministerial de 14 de junio de 1991, el compost es "un producto obtenido por fermentación controlada de residuos orgánicos" al que se le exige un contenido orgánico del 1% s.m.s, una materia orgánica total del 25%, una granulometría inferior a 2 mm, no superar el 40% de humedad y unas concentraciones de elementos pesados similares a los de la Directiva 86/278/CEE que se expondr;n luego.

En el Real Decreto 1310/1990 que transpone la Directiva comunitaria 86/278/CEE, se contemplan unas exigencias que se comentan seguidamente.

Además de las exigencias de documentación y de fijar la metodología de análisis, la aplicación de lodos deberá cumplir las siguientes especificaciones técnicas.

### En relación con el suelo

Los suelos sobre los que podrán aplicarse los lodos tratados deberán presentar una concentración de metales pesados inferior en (mg/kg) a:

#### En relación con los lodos

a) Sólo podrán ser utilizados en la actividad agraria, lodos tratados, es decir, por vía biológica, química o térmica, almacenada a largo plazo o por cualquier otro procedimiento que reduzca, de forma significativa, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización.

b) El contenido en metales pesados, no superarán los valores límites (en mg/Ks) siguientes:

### En relación con los cultivos

a) Se prohíbe aplicar lodos tratados en pradera, pastizales y demás aprovechamientos a utilizar en pastoreo directo por ~ ado, con una a;ntrelación menor de tres semanas respecto a la fecha de comienzo del citado aprovechamiento directo.

b) Se prohíbe aplicar lodos tratados en cultivos hortícolas y frutícolas durante su ciclo vegetativo, con la excepción de los cultivos de árboles frutales, o en un plazo menor de 5 meses antes de la recolección y durante la recolección misma, cuando se trate de cultivos hortícolas o frutícolas cuyos órganos o partes vegetativas a comercializar y consumir en fresco estén normalmente en contacto directo con el suelo.

#### Dosis de aplicación

Las cantidades máximas de lodos que podrán apGrtarse al suelo por hectárea y año, serán las que, de acuerdo con el contenido en metales pesados de los suelos y lodos a aplicar, no rebasen los valores límites de incorporación de los metales siguientes:

PARAMETRO	VALORES LIMITE (kg/Ha/año)
Cadmio	15
Cobre bre	12
Níquel	3
Plomo	15
Zinc	30
Mercurio	0,10
Cromo	3

## EL COMPOST EN ESPAÑA

La cantidad de R.S.U destinada a compostaje en España, en 1987 era de unos dos millones de toneladas/año, es decir, el 15% de los R.S.U generados en municipios de más de 5.000 habitantes.

Existen 38 plantas de compostaje con una capacidad de tratamiento variable entre 6 y 800 toneladas/día. Las plantas se sitúan en su mayoría en el área mediterránea, donde la demanda es mayor.

Existe una demanda considerable de productos orgánicos, fundamentalmente por parte de cultivos intensivos. Cada vez más se está exigiendo un compost de calidad que deberá fabricarse si se quiere seguir con el compost como fuente orgánica para la agricultura.

## EL LODO DE ESTACION DEPURADORA

En 1987, en España, existían 84 estaciones depuradoras que generaban lodo en cantidades significativas. La cantidad de lodo generado se sitúa próximo a las 850.000 toneladas anuales con una humedad en torno al 75%, lo que integra una producción algo superior a las 2.300 toneladas de lodo al día. Si se cumplen las previsiones de instalación de nuevas plantas de las diversas Comunidades Autónomas con una generación de 1.800.000 de toneladas, en España se podrán generar 2,7 millones de toneladas de lodo bruto, lo que supondrá una producción de 7.400 T/día.

Con relación a los demás parámetros de interés agrícola, los lodos estudiados tienen las siguientes características:

La materia orgánica total, o volátiles, oscila en la mayoría de los casos en torno al 50%, el pH suele oscilar muy poco en torno al valor de 7 y la salinidad suele ser inferior a 2.5 milimhos por centímetro. Sin embargo, valores más desfavorables se obtienen cuando en la EDAR se ha empleado como floculante de los lodos, cal y cloruro férrico, subiendo el pH a valores por encima de 11,4, bajando el contenido de la materia orgánica total y subiendo considerablemente la salinidad.

Los valores clásicos de fertilidad (N, P, K) presentan valores en torno a : el nitrógeno total varía entre 1,1 y 4,4%, el  $P_2O_5$  entre 0,64 y 4% y en menor concentración el  $K_2O$ , con valores que varían de 0,05 al 1%.

El 50% del lodo generado tiene un destino agrícola, su aplicación se rige por dos criterios: la proximidad a la estación depuradora y la demanda de productos orgánicos por la agricultura de tipo intensivo, principalmente del sureste español. Cuando no se aplica lodo, es porque ha habido rechazo por el agricultor o porque no se ha presentado una fuerte demanda de producto.

Cuando las producciones de la EDAR son pequeñas, en torno a las cinco toneladas/día, el agricultor de la zona suele llevárselo y lo aplica preferentemente a cultivos de huerta, jardinería urbana,

monte, etc. sin ningún tipo de tratamiento previo .

El máximo consumo de lodo, así como de otros productos orgánicos se presenta en la agricultura intensiva y en el viñedo. Se aplica lodo en la zona de Jérez de la Frontera para uva de vino, en la uva de mesa de Málaga y Almería, así como en los cultivos hortícolas bajo plástico y en el cultivo de flor, en los cítricos y frutales de Valencia y Murcia, en los frutales de Lérida y en los cultivos forzados de Canarias y Cataluña. También fuera de esta zona clásica se encuentran algunos núcleos de interés en los cultivos frutales y espárrago de Cáceres y en el viñedo de La Mancha.

Las dosis de aplicación son muy variadas en función de los cultivos y de la frecuencia de la aplicación.

#### CULTIVOS DE TIPO INTENSIVO

Los cultivos de tipo intensivo son los que presentan mayores necesidades en abonos orgánicos y minerales. El uso del compost se está extendiendo considerablemente ante la carencia de estiércol y los elevados costos de turbz importada. Considerable importancia

adquieren en el Levante español y en Canarias, destacando sobre todo los cultivos protegidos o de invernadero en Canarias y Almería, y dentro de éstos los cultivos de exportación.

Por otra parte, estos abonos orgánicos elevan la temperatura del suelo y contribuyen a adelantar la maduración de las cosechas, fenómeno de gran interés en el mercado internacional. En Francia, el cultivo del champiñón ocupa el segundo lugar como consumidor de compost. En este tipo de cultivo se emplea compost, o mejor dicho la fracción orgánica de los residuos sólidos orgánicos antes de haber sufrido la fermentación (normalmente con menos de 8-10 días de fermentación) con el fin de obtener el máximo de bacterias termófilas.

Este incipiente compost se destina a favorecer el comienzo de la fermentación y sobre todo para desecar el substrato del cultivo. A este fin se utiliza un compost de textura gruesa, normalmente de granulometría inferior a 30 mm, y absolutamente desprovisto de cristales y fragmentos metálicos. Normalmente, el compost se añade a los otros materiales del substrato-en proporciones que oscilan entre el 15-20% en peso.

#### CULTIVO DE LA VID

Los resultados de algunas experiencias desarrolladas con la aplicación del compost a cultivos de la vid en la zona andaluza, son optimistas, alcanzándose un incremento superior al 3;% en la producción de uva.

En Francia, en las viñas de la zona de Champaña, se realizan aportes de compost de unas 100 T/ha cada 3 años. En la zona francesa de Pirineos Orientales, se realizan aportes masivos de 150 a 200 T/h en el momento de realizar la plantación, sobre todo con vistas a luchar contra la fuerte acidez de los suelos ricos en Mn y Al de cambio.

#### LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Es un proceso biológico mediante el cual la materia orgánica en ausencia de oxígeno y por medio de un grupo de bacterias específicas se descompone en una serie de productos gaseosos (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>; H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ...) o "biogás" y otros productos donde se encuentran la mayor parte de los componentes minerales (N, P, K, Ca ...) y otros compuestos de difícil degradación.

## ASPECTOS BIOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

La bioquímica y microbiología de los procesos anaerobios es mucho más complicada que para los procesos aerobios, esto se debe a la existencia de numerosas rutas que puede utilizar una comunidad anaerobia para la bioconversión de la sustancia orgánica.

Las rutas y mecanismos no se conocen al detalle, pero en los últimos años se han escrito amplias líneas de estos procesos.

El mecanismo anaerobio puede representarse como un proceso en tres etapas:

1. Fase de hidrólisis: mediante la cual las macromoléculas orgánicas se descomponen en productos más simples.

2. Fase de Acidogenesis-Acetogénesis: conduce a la formación de ácidos grasos volátiles.

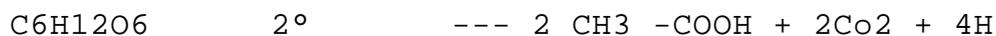
3. Fase de metanogénesis: Fase última de producción de metano a partir de ácido acético o de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, producidos de las etapas anteriores.

Básicamente la degradación anaerobia se realiza por dos grupos de bacterias, bacterias productoras de ácidos y bacterias productoras de metano, que a su vez pueden subdividirse en dos grupos cada uno de ellos, es decir:

- Bacterias productoras de ácidos.
- Bacterias formadoras de ácido (propiónico, butírico, heptanoico, ...).
- Bacterias acetogénicas (acético e hidrógeno).
- Bacterias productoras de metano.
- Bacterias metanogénicas acetoclásticas (acetofílica).
- Bacterias metanogénicas (hidrogenofílicas).

### Bacterias formadoras de ácidos.

Existen diversos grupos de bacterias que fermentan los hidratos de carbono anaerobicamente para producir CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y una mezcla de ácidos (acético, propiónico, butírico, etc.) en función de la concentración de H<sub>2</sub> en el medio, de acuerdo con las ecuaciones:



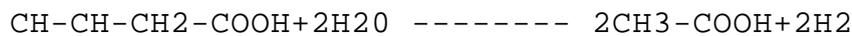
C6H12O6            2°            ---- 2 CH3-CH2-COOH+2H2O

Son bacterias de crecimiento rápido, cuyo tiempo mínimo de doblaje es de 30 minutos.

### Bacterias Acetogénicas

Su bioquímica no se conoce al detalle pero se cree que su metabolismo está también inhibido por elevadas concentraciones de H<sub>2</sub> en el gas.

Son bacterias que convierten los ácidos propiónico y butírico en ácido acético de acuerdo con las ecuaciones:



Su tiempo mínimo de doblaje es de 1,5 a 4 días.

### BACTERIAS METANOGENICAS

Constituyen un único grupo de bacterias que están compuestas de varias especies distintas con diferente forma y estructura celular. Son esenciales para la digestión anaerobia porque son los únicos organismos que pueden catalizar anaeróbicamente acetato e hidrógeno para dar productos gaseosos en ausencia de luz o aceptores de electrones exógenos distintos al CO<sub>2</sub>. Se encuentran en la naturaleza en ausencia total de oxígeno.

Su pared celular no contiene mureina y su membrana citoplasmática está constituida fundamentalmente de hidrocarburos isoprenoides, en lugar de ésteres de glicerina y ácidos grasos, como el resto de las bacterias.

Estas bacterias se diferencian igualmente del resto por el hecho de que fluorescen verde a una determinada excitación de luz ultravioleta debido a que contienen coenzimas específicas que no han sido encontradas en otros organismos.

### Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Son las bacterias metanogénicas que producen metano a partir de ácido acético, crecen demasiado lentamente (tiempo mínimo de doblaje 2-3 días) y no les afecta la concentración de H<sub>2</sub> del gas.

Normalmente controlan el pH del medio por la eliminación del acético y producción de CO<sub>2</sub> que disuelto forma una disolución tampón de bicarbonato, de acuerdo con la ecuación.



### Bacterias metanogénicas utilizadoras de H<sub>2</sub>

Su reacción característica es:

CO+4H2 ----- CH4+2H2O

Como producen metano y además eliminan el H<sub>2</sub> (que controla las velocidades a las que los ácidos propiónico, butírico, etc ~e convierten en acético) se considera que estas bacterias regulan la digestión anaerobia. Son de crecimiento rápido, su tiempo de doblaje es del orden de 6 horas.

#### OTROS TIPOS DE BACTERIAS EN LOS DIGESTORES ANAERÓBIOS: SULFOBACTERIAS

Además de las bacterias señaladas anteriormente, existe un grupo de bacterias denominadas sulfobacterias que son organismos capaces de reducir los sulfatos a sulfuros. Su importancia es grande ya que pueden competir con la metanobacterias impidiendo la formación de metano ya que pueden utilizar en acetato para su desarrollo y por otra parte, pueden reducir los sulfatos utilizando como donador de electrones el hidrógeno dando lugar a ácido sulfhídrico

Ante la importancia científica y técnica de dichas interacciones, se vienen realizando experiencias para determinar su alcance, utilizando distintos soportes, con el fin de conocer la influencia de éstos en el desarrollo de ambos grupos de bacterias.

#### PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONTROL DE LOS PROCESOS ANAERÓBIOS

La elección de las condiciones ambientales que se deben mantener en el interior del digestor se realiza en función de los conocimientos básicos sobre la microbiología, cinética y energía del proceso.

El objetivo básico del digestor es mantener la mayor actividad bacteriana posible. La cantidad de microorganismos retenidos depende, en gran medida, de la configuración y diseño del equipo. El estado en que se encuentren, y el lograr una flora equilibrada es función de los parámetros de operación.

Para que el proceso tenga lugar con la máxima eficacia se debe conseguir:

- 1.- Mantener la actividad máxima de los microorganismos: para lo cual es necesario controlar tiempo de retención de lodos, ya que si los digestores operan con concentraciones muy elevadas de biomasa activa consiguen mejores condiciones de estabilidad, y también las condiciones físico-químicas adecuadas, como pH, potencial redox y temperatura.

. pH:

Las bacterias metanogénicas tienen la máxima actividad metabólica entre pH 6,5 y 7,5; siendo prácticamente inhibidas para el resto de los valores de pH.

. Potencial redox:

La tolerancia de las bacterias metanogénicas a los cambios en el potencial redox es menor que la de otras especies implicadas, al ser anerobias estrictas. Existe unanimidad en recomendar el mantenimiento de un nivel por debajo de -350 mV en el valor del potencial redox.

. Temperatura:

Los microorganismos metanogénicos, son extremadamente sensibles a la temperatura. Existen tres rangos de temperatura: el psicrófilo (5-20°C), el mesófilo (35-40°C) y el termófilo que a su vez se divide en: termotolerantes (alrededor de 50°C pero también a 35°C) y los termofílicos estrictos (>45°C).

. Nutrientes:

Una de las ventajas inherentes al proceso de digestión anaerobia es la de sus bajas necesidades de nutrientes. Los principales nutrientes necesarios para su crecimiento son el N y P. Su evaluación resulta posible si se conoce la producción celular por unidad de sustrato utilizado así como la composición celular. Una fórmula empírica frecuentemente aceptada para expresar la composición de estas bacterias es C<sub>5</sub>H<sub>9</sub>O<sub>3</sub>N. La relación DQO/N es de 11,4 mientras que la relación masa celular/N es de 9,4. Para el fósforo se admite una relación respecto al nitrógeno de 1:5 a 1:7.

2.- Mantener una concentración mínima de productos intermedios (ácidos volátiles) puesto que es un indicador del equilibrio existente entre los microorganismos implicados en las diferentes fases del proceso. Para conseguir mantener baja la concentración de estos y otros compuesto intermediarios se debe tener en cuenta dos factores:

. Homogeneización:

Ya que se consigue un desarrollo uniforme de las diferentes poblaciones bacterianas así como el mantenimiento del pH en el digestor ya que el bicarbonato formado actúa como tampón.

. Tiempo de residencia hidráulico:

Es el parámetro que nos permite controlar el caudal del efluente tratado. Si hay acumulación de productos intermediarios por ser mayor la alimentación de substrato que la de su degradación es conveniente disminuir el tiempo de residencia apropiadamente

3.- Conseguir aumentar la velocidad de aquella etapa que limite, globalmente la velocidad del proceso, en este caso la etapa controlante corresponde a las bacterias metanogénicas.

## TECNOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La transformación en energía de los residuos orgánicos mediante la fermentación anaerobia es un proceso que se viene practicando desde hace más de 100 años y actualmente, en países no desarrollados hay instalados millones de digestores familiares (China e India). Sin embargo, la tecnología utilizada en estos países es muy primitiva y no se puede aplicar en países desarrollados por su bajo rendimiento y el negativo impacto ambiental que producen.

El conocimiento más profundo del proceso, tanto a nivel microbiológico como de los parámetros que regulan esta fermentación ha permitido progresar notablemente en esta tecnología mejorando considerablemente su eficacia.

Existe en la actualidad un gran número de tecnologías adaptadas al tratamiento de los residuos por digestión anaerobia. La elección de una u otra depende sobre todo de las características del vertido a tratar.

Según se lleve a cabo el proceso se puede hacer una primera división en: Digestores Discontinuos y Continuos.

### Digestores discontinuos

En éstos la carga se realiza de forma discontinua es decir, una vez finalizada la fermentación es preciso descargar el digestor y volverlo a cargar nuevamente con residuo fresco. La eficacia del

proceso es baja y el biogás que se produce es de forma intermitente lo que también dificulta su utilización. Suele emplearse prácticamente sólo para residuos sólidos y lo utilizan más en países poco desarrollados.

### Digestores continuos

Al no existir paradas de carga y descarga tienen un rendimiento mucho mayor. Este sistema ha sido el que más se ha estudiado en los últimos años desarrollándose a su vez nuevas tecnologías.

En este sentido, atendiendo al mecanismo de retención de la biomasa en los digestores, éstos se pueden clasificar en:

- Sistemas con microorganismos en suspensión.
- Sistemas con microorganismos adheridos a superficies fijas o móviles.

### Digestores con biomasa suspendida

Son los que primero se desarrollaron, en ellos los microorganismos se encuentran "flotando" es decir, no están fijos a ninguna superficie y a su vez se pueden reclasificar de menor a mayor grado de complejidad técnica en digestores de:

- Mezcla completa
- Flujo pistón - Contacto anaerobio - Lecho expandido de lodos (UASB)

Mezcla completa:

Son reactores técnicamente sencillos, sin recirculación de lodos. No hay retención de la biomasa suspendida lo que supone que sus tiempos de retención de sólidos sean iguales a sus tiempos de retención hidráulica (TRH) y por tanto éstos han de ser altos (10-30 días), Las concentraciones de biomasa activa (anaerobia) que se pueden conseguir son limitadas lo que supone que las cargas volumétricas y las producciones de gas de estos reactores sean bajas. Se emplean principalmente para vertidos con alta concentración de sólidos en suspensión, como por ejemplo residuos ganaderos y lodos de depuradoras.

Para mezclar el contenido del digestor y para romper o evitar las costras que pueden formarse se utilizan agitadores mecánicos y/o una recirculación de biogás. Los segundos tienen la ventaja de que no necesitan abrir el digestor para el mantenimiento.

Flujo Pistón:

Este tipo de digestor se emplea para el tratamiento de vertidos de ganadería es decir, aquellos residuos que contienen ya

un inóculo de microorganismos anaerobios. Los digestores están constituidos por canales excavados en el terreno, cubiertos generalmente con plástico, que sirve a la vez como depósito del biogás y como aislamiento térmico.

En estos digestores existe un flujo horizontal de las sustancias dentro del digestor, por medio de agitación mecánica lateral o de inyección. Los tiempos de residencia hidráulica son similares a los de mezcla completa. Un problema típico de estos digestores es la formación de espuma y de costras que dificulta el desprendimiento del gas y la degradación de los sólidos en suspensión.

Contacto:

En estos digestores existe una separación y recirculación de lodos en el efluente por medio de un decantador con lo que aumenta la concentración de biomasa (sólidos) en el digestor, disminuye por tanto el TRH (2 a 6 días) y aumenta la eficacia del proceso (el tiempo de residencia del sólido es superior al hidráulico). Estos digestores, por lo tanto, pueden trabajar con cargas más altas que las vistas sin recirculación obteniendo a su vez producciones más altas de biogás.

Se emplea principalmente para el tratamiento de residuos de industrias agroalimentarias (azucareras, papeleras, ...).

Lecho expandido de lodos o UASB

La tecnología de lecho expandido de lodos está basada en la acumulación de microorganismos en un reactor con decantación interna. El agua a tratar entra repartida por toda la superficie inferior del digestor y atraviesa en flujo ascendente un lecho de partículas bacterianas agregadas mantenidas en expansión por el gas producido.

Los principales requisitos que deben reunir ese tipo de digestor son lodos con buenas características de sedimentabilidad, dispositivo de separación gas-líquido y un sistema que uniformice la entrada del influente en la base del reactor.

Los mecanismos de formación de gránulos de alta densidad que se encuentran en los reactores UASB pueden ser biológicos o físico-químicos. En el primer caso se seleccionan bacterias que granulan y en el segundo se utilizan precipitantes (sulfuros, carbonatos) para arrastrar las bacterias. Se emplean para residuos de industrias agroalimentarias (patatera, azucarera, pasta de papel).

El tipo de residencia hidráulica para estos digestores es de 1-2 días.

Se pueden conseguir cargas volumétricas mayores que en el

proceso de contacto (del orden de 10-20 Kg DQO/ml.d).

### Digestores con biomasa adherida

Se caracterizan porque la biomasa es retenida en el interior del digestor mediante su adhesión a un soporte inerte que rellena el digestor y a través del cual se hace pasar agua residual para su depuración. Dependiendo de si el relleno está fijo o no se pueden clasificar en:

- Biomasa adherida a superficies fijas

Dentro de éstos podemos diferenciar:

- . Filtros No Orientados o de Película Fija
- . Filtros Anaerobios

La diferencia entre ellos se basa en la colocación del relleno en el interior del digestor, es decir, de si éste está o no orientado. Los digestores de Filtro No Orientado (figura 7) suelen ser de flujo ascendente, es decir tienen la entrada del influente por la parte inferior del digestor, lo que permite una mejor retención de los microorganismos, sin embargo a veces presentan problemas de colmatación y de caminos preferenciales. Los de Película Fija suelen ser de flujo descendente.

El relleno ha de tener gran porosidad y superficie específica (100-200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), además ha de ser de un material ligero y barato.

Aunque no consiguen cargas muy elevadas (5-15 ~g DQO/m<sup>3</sup>.d) son reactores muy estables.

Los tiempos de residencia hidráulica son similares a los de tecnología UASB, oscilan entre 0,5 y 3 días.

- Biomasa adherida a superficies móviles

En estos digestores las bacterias colonizan partículas de material inerte (arena, plástico, etc) de pequeño tamaño, formando un lecho a través del cual circula el fluido con una velocidad superficialmente elevada como para provocar una expansión o fluidización, según sea de una forma o de otra estos digestores, a

su vez, se dividen en:

. Lecho expandido: Se considera de lecho expandido cuando se logra una expansión del orden del 20%.

. Lecho fluidizado: La expansión puede alcanzar el 100%. Para lograr estas elevadas velocidades de flujo suele ser necesario recircular parte del efluente.

La superficie específica por unidad de volumen de las partículas es muy elevada, oscilando entre 1000 y 4000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Estas tecnologías pueden soportar cargas elevadas (10-40 g DQO/m<sup>3</sup>.d) y emplean unos tiempos de residencia hidráulica de 0,3-1 días.

#### Digestor de Dos Fases:

Como ya hemos visto, el proceso de digestión anaerobia tiene lugar en varias etapas. En cada una de ellas intervienen diferentes tipos de microorganismos con características metabólicas diferentes.

El digestor en dos fases está constituido por dos fermentadores en cada uno de los cuales se realiza una parte del proceso fermentativo.

Esta separación de fases es muy interesante cuando las condiciones ambientales óptimas de las diferentes poblaciones bacterianas que intervienen en el proceso no son las mismas; de esta forma se pueden favorecer ambas por separado.

Se han realizado experiencias separando la fase acidogénica y la metanogénica y también realizando la hidrólisis en un digestor y la acidogénesis y metanogénesis en el otro.

## VERTEDERO CONTROLADO

De forma general se puede admitir que un vertedero controlado se comporta como un digestor anaerobio que mediante un proceso microbiológico genera una mezcla de gases o "biogás" a través de 4 etapas:

1. La fase inmediata al vertido, es una fase aerobica en la que predomina el N<sub>2</sub> Y hay una creciente formación de CO<sub>2</sub>. Viene a durar 15 días.

2. Se caracteriza por la ausencia de aire, es una fase anaerobica donde se produce la formación de ácidos de fermentación y al final de la misma se alcanza la mayor concentración de CO<sub>2</sub>, la aparición de H<sub>2</sub> Y el descenso de la proporción de N<sub>2</sub>. Esta fase dura aproximadamente 2 meses.

3. Es una fase anaerobica donde se produce el comienzo de la aparición de metano y el descenso de los demás productos. Su duración se estima alrededor de los 2 años.

4. Fase de esterilización que tiene una duración entre 10 y 20 años, dependiendo de las condiciones del vertedero. Esta fase se caracteriza por la composición de CH<sub>4</sub> y CO en proporciones variables próximas al 60 y 40% respectivamente.

La estimación de producción de biogás depende de diversos factores (humedad del residuo, composición, técnica de vertido, temperatura, etc) pero se estima que por Kg de residuo orgánico pueden producirse 0,20 m<sup>3</sup> de biogás.

Actualmente en España se está extrayendo gas en dos vertederos controlados, Garraf (Barcelona) y Artigas. Sólo en este último se están obteniendo 400 m<sup>3</sup> de biogás a la hora, lo que supone una producción energética de 2215 Tep/año.

## INSTALACIONES DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Una planta de digestión anaerobia es una instalación de tratamiento de residuos en la cual se lleva a cabo la depuración de los mismos mediante la transformación de la materia orgánica en metano y anhídrido carbónico. Las plantas de digestión anaerobia se construyen con objeto de depurar los residuos orgánicos generados en una explotación ganadera o en una industria. La elevada concentración en materia orgánica de estos residuos hace económicamente inviable el tratamiento aerobio debido fundamentalmente al consumo energético.

A esto hay que añadir, como ventajas del proceso anaerobio sobre el aerobio, la producción de biogás, que con un 65% de metano tiene un poder calorífico inferior de 5.500 Kcal/Nm y la menor producción de lodos, que siempre representan un problema. Con objeto de evaluar la viabilidad de una planta de digestión anaerobia para tratar un determinado residuo, se deben considerar previamente los siguientes aspectos:

- Características del residuo: composición, caudal diario, posible presencia de inhibidores, origen y fluctuaciones diarias, semanales y anuales.
- Grado de depuración a conseguir.
- Tecnología apropiada y necesidad, en su caso, de realizar alguna prueba previa en laboratorio o planta piloto.
- Estimación del grado de depuración y de la cantidad de biogás producido.
- Características de la industria o explotación: operaciones que se realizan, disponibilidad de personal para operar y mantener la planta, consumos energéticos y posibilidad de sustitución de alguno o todos sus consumos por biogás.
- Ubicación de la planta: existencia de terreno apropiado, infraestructura con que cuenta la zona (agua, electricidad, etc), proximidad al punto de generación del residuo, proximidad al punto de vertido, clima de la zona.

Son aspectos críticos la caracterización del residuo en todos los aspectos anteriormente citados y la selección de un proceso de tratamiento acorde con los medios técnicos del usuario, para asegurar el funcionamiento de la instalación.

## DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de tratamiento de un residuo varía en función de sus características y del tipo de industria o explotación en que se instale la planta. Para el caso más general: un residuo líquido y un proceso de tipo continuo, el diagrama de procesos y productos, de forma muy esquemática sería:

### Recogida y conducción

Los vertidos se recogen en el punto en que se generan y se conducen por tuberías hasta la planta de tratamiento. Normalmente existen varios focos emisores de aguas residuales, que deben conocerse y caracterizarse, con objeto de establecer cuáles de las corrientes generadas serán conducidas a la planta. Esta separación de corrientes se realiza cuando existen vertidos muy dispares en concentración y caudal, con objeto de reducir los costes de instalación, siempre que los vertidos no tratados en planta sean admitidos en una depuradora urbana o se puedan verter sin tratar. También se hace cuando es previsible la presencia de inhibidores en alguna de las corrientes.

La conducción a la planta de tratamiento se hace, siempre que es posible, por gravedad. En el diseño del sistema de recogida y conducción se debe tener presente la existencia de sólidos y el arrastre por causas accidentales de algún cuerpo de mayor tamaño que puedan causar obstrucciones.

### Pretratamiento

Con objeto de asegurar una composición lo más constante posible en la alimentación del digestor, acorde con los parámetros de diseño, así como para evitar problemas en los equipos que constituyen la planta, en todas las instalaciones se suele realizar un pretratamiento del vertido.

Las operaciones más habituales son:

#### - Separación sólido/líquido:

Se realiza con objeto de proteger los equipos mecánicos, evitar sedimentaciones y obstrucciones en las tuberías y evitar la disminución del volumen útil del digestor.

Los equipos que se utilizan son tamices (vibratorios o estáticos) y rejillas (de limpieza mecánica o manual).

Los sólidos que constituyen el rechazo, se envían al vertedero o se transforman en abono orgánico.

#### - Neutralización:

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en un rango de pH de 6-8, por lo que será necesario ajustar el pH de aquellos residuos que queden fuera del mismo.

Los reactivos que se utilizan habitualmente son: la cal y el ácido sulfúrico por ser los más baratos y de fácil manejo. Menos frecuentes, aunque también se emplean, son la sosa, el carbonato sódico y los ácidos clorhídrico y nítrico. Ejemplo típico de un vertido que requiere neutralización es la vinaza, debido a su acidez.

#### - Homogeneización:

Uno de los criterios a tener en cuenta en la operación del digestor es mantener siempre las condiciones más estables posibles, por tanto se procura mantener constante la composición de la alimentación, homogeneizándola en una balsa anterior al digestor.

La homogeneización debe impedir la formación de decantados en la balsa de alimentación y asegurar la concentración de sólidos de entrada establecida en el diseño del digestor. Se lleva a cabo mediante agitadores mecánicos o colocando un bypass en la bomba de alimentación al digestor. La balsa de homogeneización actúa como almacén de la alimentación al digestor y permite que ésta se haga de forma temporizada a lo largo del día.

#### - Enfriamiento:

En ocasiones los vertidos proceden directamente de un foco caliente, como en el caso de las vinazas, con temperaturas que pueden llegar a 90°C. Si el proceso anaerobio se lleva a cabo a 35-37°C, el exceso de calor deberá disiparse, pudiendo ser recuperado para mantener la temperatura del digestor o en la propia industria. Si no se instala un intercambiador de calor, el vertido se retiene en un depósito hasta que se enfría.

### Digestión anaerobia

El residuo se alimenta al digestor de forma semicontinua, es decir, repartido a lo largo del día, permaneciendo en él un tiempo fijo que depende de la tecnología del digestor y de las características físicoquímicas del residuo. El tiempo de retención hidráulica varía desde 20-25 días para digestores de mezcla completa y lodos urbanos, a 1 día o varias horas para los de lecho móvil y residuos muy diluidos. Durante este tiempo, la materia orgánica, fundamentalmente la soluble, se transforma en metano y anhídrido carbónico, que son los principales constituyentes del biogás.

La mayoría de los digestores en operación trabajan en el rango mesofílico de temperaturas entre 35 y 37°C, por lo que requieren disponer de un sistema de calefacción.

La calefacción del digestor puede realizarse mediante un serpentín que recorre su interior y por el que circula agua caliente o bien mediante un intercambiador de calor exterior. Se tiene a

instalar intercambiadores de calor externos al digestor que calientan la alimentación al digestor y/o la recirculación de la masa del mismo. De esta manera si hay alguna rotura o avería no es necesario vaciar el digestor.

Por norma general, el calor necesario para la digestión anaerobia se obtiene a partir del biogás obtenido.

El aislamiento del digestor reduce notablemente las pérdidas de calor a través de las paredes y reduce, por tanto, el autoconsumo de biogás.

Otro aspecto importante en el diseño del digestor es la agitación. Esta debe proporcionar una buena mezcla del sustrato y los microorganismos y una distribución homogénea de la temperatura. La agitación debe evitar la formación de zonas muertas dentro del digestor, donde se acumulen productos intermedios de las reacciones e impedir la formación de costras y espumas.

La agitación puede ser:

- Mecánica
- Por recirculación de biogás
- Por recirculación de líquido

Tradicionalmente se han empleado agitadores mecánicos que pueden ser de paletas, de hélice o de tornillo sin fin. No son muy efectivos cuando se trata de agitar líquidos espesos o cuando el volumen a agitar es grande. Tienden a caer en desuso, siendo sustituidos por los otros sistemas.

Los sistemas de agitación por recirculación presentan un mantenimiento más sencillo (ya que todas las bombas, válvulas y demás accesorios son externos), lo cual facilita el trabajo y la detección de posibles averías.

En el caso de la recirculación de biogás, pueden producirse obturaciones en las boquillas de salida por presencia de sólidos de mayor densidad. Si el contenido en H<sub>2</sub>S del biogás es muy alto pueden causarse inhibiciones en el proceso o corrosión en los equipos.

El volumen útil del digestor se determina en función del caudal diario a tratar y del tiempo de retención hidráulica que a su vez depende de la concentración del vertido y la tecnología empleada en el digestor:

$$V_u = V_d \cdot \theta_H$$

Donde:

$V_u$  = Volumen útil del digestor (m<sup>3</sup>)

$V_d$  = Volumen a tratar por día (m<sup>3</sup>)

$\theta_H$  = Tiempo de retención hidráulica (días)

A su vez:

$$\theta_H = S / B_v$$

Donde:

S = concentración en materia orgánica de la alimentación (Kg/m )

Bv = carga orgánica del digestor (Kg/m de digestor . día)

Siendo:

$$Bv = S / H$$

$$Vu = Vd \cdot S / Bv$$

El volumen útil es un 85% del volumen total del digestor.

Los materiales con los que se construye habitualmente un digestor son hormigón armado o chapa de acero, con tratamiento interior para prevenir la corrosión.

Como materiales aislantes se utilizan lana de vidrio, poliuretano y poliestireno. En el caso de los digestores de hormigón, a veces se utilizan hormigones que llevan incorporados el aislante y otras, cuando los volúmenes son grandes, se construyen con paredes muy gruesas.

Los digestores se pueden construir enterrados o apoyados sobre el suelo y de diversas formas, siendo en general paralelepípedos o cilíndricos, con p L.dientes en el fondo y en el techo.

### Postratamiento

La digestión anaerobia tiene un rendimiento en eliminación de materia orgánica del orden del 65%. El efluente del digestor tiene todavía una elevada carga contaminante por lo que, en general, no puede ser vertido, debiendo someterse a un tratamiento complementario.

En general, se continúa el proceso de eliminación de materia orgánica con un tratamiento biológico aerobio. La selección del proceso depende de la concentración y caudal del efluente del

digestor, las exigencias de calidad del vertido, la disponibilidad de terreno y los costes de instalación y mantenimiento.

Los procesos aerobios convencionales tipo lodos activos son grandes consumidores de energía para oxigenación y agitación del líquido y, por otra parte, producen importantes cantidades de lodos para los que hay que prever una evacuación.

Los sistemas de bajo coste como el lagunaje, requieren disponer de gran superficie de terreno para que resulten efectivos y, aunque el coste de mantenimiento es bajo, no ocurre lo mismo con su construcción.

En algunos casos, como los lodos de depuradora, el postratamiento consiste en un espesamiento y deshidratación para reducir.

### Aprovechamiento del biogás

El biogás producido en el digestor contiene aproximadamente un 65% de metano, un 30% de anhídrido carbónico y un 5% compuesto por diversos gases como H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, CO y vapor de agua.

Conocida la composición del residuo a tratar y el volumen digerido diariamente, se puede estimar la producción diaria de biogás considerando que se generan 0,4 m de biogás/Kg DQO alimentado. Este es un valor medio que puede variar con la composición de la materia orgánica.

El biogás, a medida que se va produciendo en el digestor, se

acumula y se extrae por su parte superior.

A la salida del digestor, el biogás se encuentra saturado en vapor de agua, éste se elimina por condensación al enfriarse en una trampa de agua.

Cuando el contenido en SH<sub>2</sub> del biogás es superior al 0,1% en volumen y se vaya a utilizar en un motor de combustión interna, el biogás debe depurarse de dicho compuesto para evitar corrosiones.

Existen diversos sistemas para eliminar el SH<sub>2</sub>, actualmente se tiende a emplear la depuración mediante óxidos de hierro que eliminan el sulfhídrico del gas mediante la reacción:



Con objeto de asegurar un caudal constante de biogás en los equipos que lo consumen, éste se almacena en gasómetros. Generalmente se utilizan gasómetros de baja presión (inferior a 50 mbar) del tipo de campana flotante o de goma hinchable, tal y como se representan en la Figura 3. Se consideran gasómetros de media presión cuando trabajan hasta 10 bar y de alta presión por encima de dichos valores.

Las aplicaciones del biogás son:

- Transformación en energía calorífica en calderas
- Transformación en energía eléctrica y calorífica en motogeneradores con recuperación de calor.

La aplicación más sencilla técnicamente es la combustión en caldera. El agua caliente se utiliza para calentar el influente del digestor y mantener la temperatura de éste, el excedente se consume en la explotación o en la industria. La caldera debe estar provista de doble quemador: para biogás y otro combustible de apoyo que suele ser propano o fuel, ya que en la puesta en marcha de la planta no existe gas para mantener la temperatura del proceso.

En muchas ocasiones la explotación o industria no presenta una demanda térmica capaz de absorber la energía procedente de la caldera, siendo más interesante la obtención de electricidad, para cubrir el consumo de la planta de tratamiento y de parte de la industria. En este caso el calor disipado en la refrigeración del motor se utiliza para calentar el digestor, instalándose una caldera de apoyo.

El rendimiento eléctrico de un motor de combustión interna es del 25-30% y el rendimiento térmico entorno al 60%.

### Medidas de control

El grado de automatización y control de una planta de digestión anaerobia depende de la capacidad técnica de la industria o explotación. Como mínimo, es necesario controlar la temperatura del digestor, la producción diaria de biogás y la composición de influente, efluente y contenido del digestor.

La temperatura del digestor se mide en uno o varios puntos, según el tamaño del mismo. La sonda térmica dispone de un termostato que actúa sobre la caldera cuando la temperatura de la masa en digestión desciende por debajo de los 35-C.

Para medir la producción de biogás se instala un contador en la línea de gas a continuación de los equipos de tratamiento del mismo. Un descenso acusado en el volumen diario, manteniéndose constante la concentración de materia orgánica de la alimentación, puede ser indicio de alguna anomalía en el proceso. Se instalan además puntos de toma de muestra para controlar la composición del gas.

La composición del efluente y del contenido del digestor se analiza periódicamente cada semana o quince días. Con este fin, el digestor está dotado de válvulas para toma de muestras o distintas alturas.

Además de estos controles que son específicos de una planta de biogás, existen los propios de los distintos equipos que lo constituyen (bombas, soplantes, motor, caldera, etc).

### Seguridad

El metano es explosivo con el aire cuando se encuentra en un porcentaje de 5-15% en volumen. A diferencia de otros gases como el butano o el propano, más pesados, cuando escapa a la atmósfera no se acumula a ras de suelo.

Se deben instalar equipos antideflagrantes en aquellas zonas en que sea previsible la acumulación de biogás, de forma habitual o accidental.

En la línea de gas se instalan válvulas limitadoras de presión, cortallamas y antorcha para quemar el gas excedente. En el proyecto se han de tener en cuenta los reglamentos sobre equipos e instalaciones de gas inflamable, instalaciones eléctricas de baja tensión y normativas locales.

### DIGESTORES DISCONTINUOS

Fueron los primeros digestores que se construyeron. Las plantas de digestión discontinuas con más sencillas técnicamente pero requieren más mano de obra. En general, se aplican a residuos sólidos que no se pueden bombear.

La recogida del residuo se suele hacer manualmente, transportándose mediante tractor con remolque al digestor.

El digestor se construye con una boca de alimentación lo suficientemente grande como para que permita la carga y descarga sin dificultad.

Debido a la casi total ausencia de elementos mecánicos en el proceso de tratamiento, estas plantas presentan un bajo consumo eléctrico. En contrapartida, los rendimientos en biogás son bajos y con tiempos de residencia elevados, superior a 30 días.

El aprovechamiento del biogás es análogo al de una planta continua.

Estos digestores son característicos de zonas rurales, en ellos se trata estiércol y residuos agrícolas como la paja. En ocasiones el digestor no es más que el tanque en el que el agricultor almacena residuos.

## ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA DE BIOGAS

El interés por la digestión anaerobia se despertó en Europa en los años 40, cuando, a raíz de la II Guerra Mundial, las fuentes de energía escaseaban. Este interés fue decayendo después, con el consumo creciente de los combustibles fósiles.

A partir de la crisis del petróleo de 1973 resurgió el interés en la metanización en los países europeos: se impulsaron programas de investigación y desarrollo y se construyeron plantas industriales. Desde entonces, y hasta la actualidad, el objetivo energético inicial que impulsó el desarrollo de la digestión anaerobia, se ha ido transformando en un objetivo de depuración.

La evolución de la digestión anaerobia en Europa se puede seguir a través de los informes que ha publicado la Comisión de las Comunidades Europeas, recogiendo la experiencia de los distintos países.

Actualmente, el número de digestores a escala industrial en el continente europeo es de unos 1000, en los que no se incluyen los digestores de lodos urbanos. En los países integrantes de la Comunidad Europea el número aproximado es de unos 700.

El volumen total de los digestores de la Comunidad Europea se puede estimar en 61.500 m<sup>3</sup>, con un volumen medio de reactor de 500 m<sup>3</sup>. De acuerdo con los informes de la Comunidad Europea, la digestión anaerobia se difundirá aún más en el ámbito del medio ambiente,

considerando como ventajas adicionales la obtención de energía y la menor producción de lodos.

En Estados Unidos, excepto los digestores construidos en las plantas de aguas residuales urbanas, no existe realmente una fuerte demanda de plantas de biogás, comparable a la europea.

Con respecto a los países en desarrollo, China tiene el mayor número de digestores, estimado en más de dos millones; son digestores de tecnología sencilla, implantados en zonas rurales, su capacidad media es de 10 m<sup>3</sup>, suministran la energía que se emplea en usos domésticos, mientras que el efluente se utiliza en agricultura.

En España, desde 1981, se ha venido desarrollando, a nivel estatal, un programa de digestión anaerobia financiado por los ministerios de Industria y Agricultura, con el fin de promover en nuestro país la utilización de este proceso y desarrollar distintas tecnologías. El Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo y las Comunidades Autónomas han apoyado también la construcción de plantas industriales. Es posible que el número de instalaciones crezca notablemente a medida que se hagan cumplir con rigor las normativas de vertidos.