

Editorial de la Universidad
Tecnológica Nacional

**Seminario de Procesos Fundamentales
Físico-Químicos y Microbiológicos
Especialización y Maestría en Medio Ambiente
Laboratorio de Química
F.R. Bahía Blanca – U.T.N.
2009**



**Microbiología de las aguas residuales - Aplicación de
Biosólidos en Suelo**

*Lic. Gustavo Fernando Merli,
Ing. Nestor Omar Ricciuti*

**Evaluación de la calidad del agua de los recursos hídricos
superficiales de la cuenca del arroyo Chasicó; Sudoeste
bonaerense**

Lic. Noelia Torres

**Celdas de Combustible
Ventajas de una generación de electricidad limpia y
eficiente vía electroquímica**

Ing. Carlos A. Pistones

**Los efectos de los Campos Electromagnéticos en la salud
*Roberto D'Elmar, Gabriel Mujica, José Luis Haure***

**Microbiología de la leche
*Ing. Mauricio Celis y Lic. Daniel Juárez***

**Síndrome del edificio enfermo
*Ing. Ma. Cecilia Montero***

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

edutecne@utn.edu.ar

2009

MICROBIOLOGÍA DE LAS AGUAS RESIDUALES – APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN SUELO

PROCESOS FUNDAMENTALES FÍSICO-
QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Bahía Blanca

LICENCIADO GUSTAVO FERNANDO MERLI
INGENIERO NESTOR OMAR RICCIUTI



INDICE

Índice.....	2	
Introducción.....	3	
Capítulo 1. AGUAS RESIDUALES.....	5	a la 13
Tratamiento de las Aguas Residuales.....	5	
Principios de los procesos biológicos del tratamiento secundario...	6	
Reacciones biológica.....	7	
Estequiometria.....	8	
Relaciones cinéticas básicas.....	9	
Métodos de tratamiento.....	11	
Metodología para la determinación de la calidad de un efluente.....	12	
Aprovechamiento total o parcial de los efluentes.....	13	
Capítulo 2. BIOSÓLIDOS.....	14	a la 22
Origen de los biosólidos y su composición.....	14	
Valor agronómico.....	14	
Aplicación del fango al suelo.....	15	
Características del fango que afectan a su aplicación al suelo.....	15	
Determinación del lugar de emplazamiento.....	16	
Determinación de las cargas de aplicación del proyecto.....	17	
Tasa de aplicación basada en la carga de contaminantes.....	17	
Tasa de aplicación basada en la carga de nutrientes.....	18	
Determinación de la superficie necesaria.....	20	
Técnicas de aplicación.....	20	
Consideraciones finales.....	21	
Conclusiones.....	23	
Referencias.....	24	

Introducción

Si bien el tratamiento de las aguas residuales no persigue la obtención de productos de valor comercial, puesto que las que entran en la planta de procesamiento, y después del tratamiento microbiano, producen aguas en condiciones de ser vertidas a los ríos o someterse a procesos de potabilización, en cierta medida puede considerarse como tal. Esta consideración surge teniendo en cuenta que en el proceso de transformación, con la utilización a gran escala de microorganismos, y a partir de los lodos, podemos obtener los biosólidos, los que sí tienen una cierta valoración comercial por su posibilidad de aplicación como fertilizante natural.

El objeto de los procesos biológicos que se emplean para el tratamiento de las aguas residuales son la remoción de la materia orgánica carbonosa del agua residual, medida como DBO, COT o DQO; la nitrificación; la denitrificación; la eliminación de fósforo; y la estabilización de los fangos producidos.

Los procesos biológicos aplicados al tratamiento de aguas residuales pueden ser de tipo aerobios, anóxicos, anaerobios, todos los anteriores combinados, o procesos en estanques o lagunas, y la elección de cada uno de los métodos depende, entre otras consideraciones, de las características de constructivas de las plantas de tratamiento, aunque tales procesos no son objeto del presente estudio. Si lo son los biosólidos generados por cualquiera de los procesos antes mencionados.

Los biosólidos generados mediante alguno de los procesos indicados anteriormente, y para completar el ciclo, deben ser tratados, puesto que contienen 90-99% de agua y una importante cantidad de Materia Orgánica Biodegradable, la que se puede reducir por sistemas aeróbicos, incluyendo el compostado, o anaeróbicos. La deshidratación de biosólidos es una parte fundamental del proceso para que puedan ser aplicados a, entre otros usos, la utilización agrícola, aunque se trate de un proceso complejo y costoso.

En condiciones normales de operación, y luego del proceso de obtención, los biosólidos a reutilizar y/o disponer tienen una sequedad aproximada del 28 %, la materia orgánica es reducida en un 45-55 %, lo que se complementa con la producción de biogás (principalmente 65/70 % CH₄, 30/35 % CO₂).

Es así que, en las condiciones mencionadas, los biosólidos se comportan como otros abonos orgánicos, pues su composición es relativamente semejante. Por lo tanto, el uso de biosólidos en agricultura es importante en muchos países como un sustituto parcial de los fertilizantes y como un corrector de las propiedades físicas, pues son un importante proveedor de nutrientes a los suelos, y ese aporte de nutrientes puede dar lugar a mayores rendimientos de cultivos y pasturas, en función de las características del ambiente y del manejo agrícola.

Por último, cabe destacar que tales biosólidos no son la solución mágica al reemplazo de éstos por fertilizantes, ya que la posible acumulación de algunos elementos (cadmio, cromo, níquel, y plomo), por el uso continuado, es uno de los principales problemas

que posee el uso agrícola de los biosólidos. Esta posible acumulación es consecuencia de la presencia de elevados tenores de estos elementos en algunos efluentes urbanos.

Las concentraciones de estos elementos en el biosólido, su carga anual aceptable en los suelos y otros elementos de juicio relativos a estos temas constituyen una parte esencial de las regulaciones existentes a nivel mundial y es la principal medida a tener en cuenta antes de su aplicación como sustituto de los fertilizantes.

Aguas Residuales

“Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.....” (Mara 1976)

Las aguas residuales contienen materia orgánica como inorgánica, y los microorganismos desempeñan un papel especialmente importante eliminando los compuestos orgánicos. Sin embargo, el tratamiento idóneo de las aguas residuales elimina los microorganismos patógenos, evitando que estos lleguen a los ríos o a otros abastecimientos de agua.

Así, de acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

- **Domésticas:** son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.
- **Industriales:** son líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.
- **Infiltración y caudal adicionales:** las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc. Hay también aguas pluviales, que son descargadas por medio de varias fuentes, como canales, drenajes y colectores de aguas de lluvias.
- **Pluviales:** son agua de lluvia, que descargan grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de esta agua es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo.

Tratamiento de las Aguas Residuales

El tratamiento de las aguas residuales es generalmente un proceso que se realiza en varios pasos, en los que se utilizan tratamientos químicos y biológicos.

Para plantear la estrategia de tratamiento, es fundamental conocer:

- Para el dimensionamiento de las instalaciones de tratamiento: Caudal / variación = $f(t)$.
- A los fines de la determinación del tipo de tratamiento a efectuar: Caracterización de los contaminantes (cantidad/origen/tipo)

El tratamiento inicial consiste solamente en separaciones físicas. El material que entra en la planta de tratamiento pasa a través de unas rejillas y cribas que eliminan los objetos grandes, y luego de efluentes se deja reposar durante varias horas para permitir que se sedimenten los sólidos.

Debido a la fuerte carga de nutrientes que quedan en el efluente, después del tratamiento inicial, las plantas de tratamiento emplean un proceso de **tratamiento**

secundario para reducir la carga orgánica de las mismas hasta niveles aceptables, antes de liberarlo a las conducciones naturales del agua. El tratamiento secundario está íntimamente ligado a procesos microbiológicos.

El tratamiento terciario, que puede complementar los anteriores, se utiliza cuando se prevé la reutilización del agua, para fines de recreación (piletas/natatorios) y hasta para el consumo humano. Para lograrlo, se utilizan procesos de precipitación, filtración y cloración, lo que permite reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos, como así también la carga de patógenos del efluente final. Estos métodos de tratamiento no han sido ampliamente difundidos por el costo que implica su tratamiento.

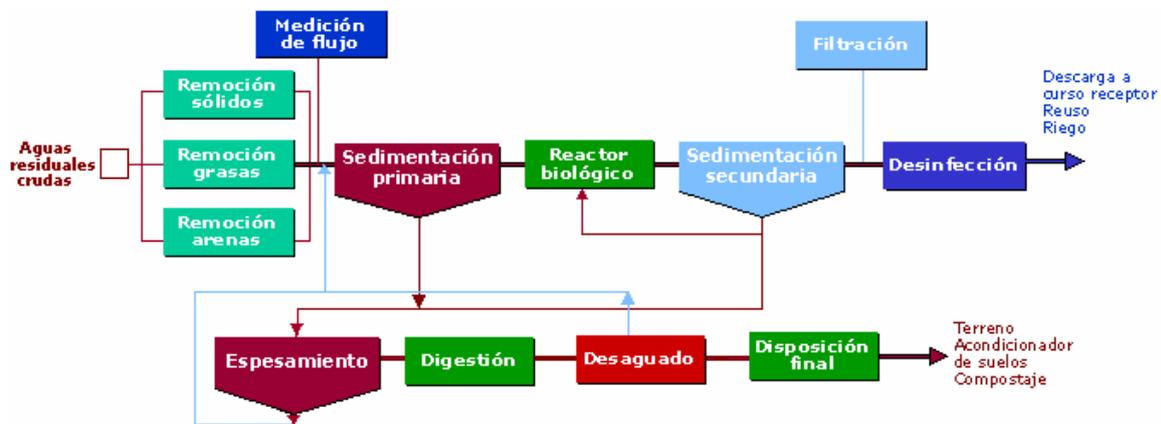


Figura 1- Esquema de una planta de tratamiento convencional

A los fines del estudio a realizar, nos centraremos en los procesos secundarios, puesto que los biosólidos son producto de éste proceso, como resultado del tratamiento de las aguas.

Principios de los procesos biológicos del tratamiento secundario

Un proceso biológico de tratamiento o depuración de aguas residuales es un sistema en el cual se mantiene un cultivo de microorganismos (**biomasa**) que se alimenta de las impurezas del agua residual (**sustrato** o alimento) (Figura 2). Estas impurezas son la materia orgánica biodegradable, el amonio, el nitrato, el fosfato y otros contaminantes a menor concentración.

El lugar donde se ponen en contacto la biomasa con el agua residual para llevar a cabo el tratamiento se denomina reactor biológico, o biorreactor, y puede ser de diferentes tipos.

Hay que remarcar que en la mayoría de los casos la biomasa se genera espontáneamente en el reactor biológico, a partir de pequeñas concentraciones de microorganismos presentes en el agua residual o en el aire, y de las reacciones biológicas que en el diseño y operación de la planta se procura favorecer.

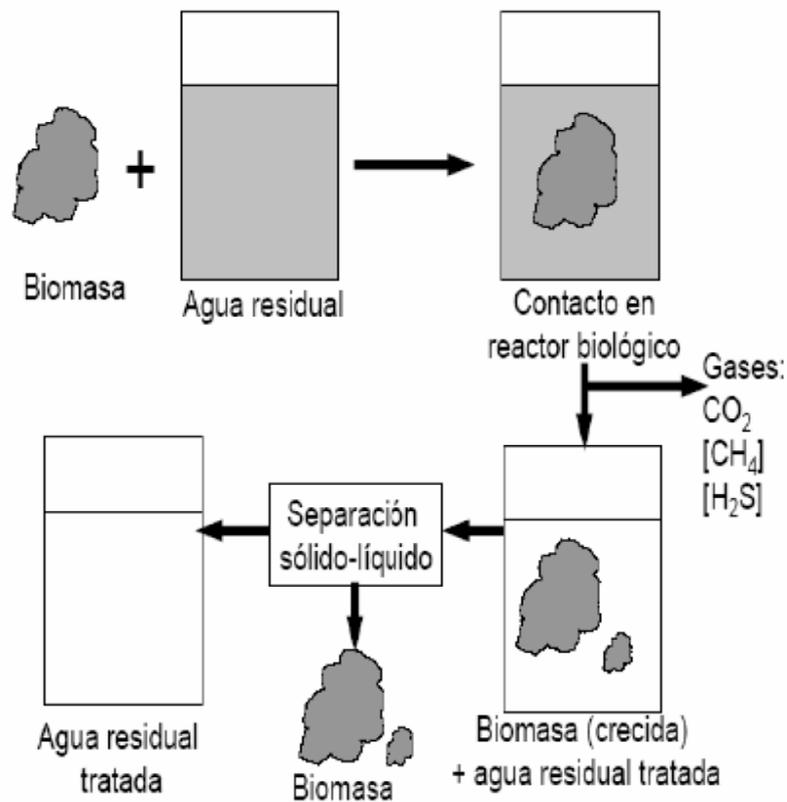


FIGURA 2 – Esquema elemental de un proceso biológico de tratamiento. ¹

Reacciones biológicas

Las reacciones biológicas más importantes son aerobias, anaerobias o fotosintéticas. En la Figura 3 se observa un esquema general de las actividades de síntesis y respiración que se producen por las actividades biológicas. Como se muestra en la figura, hay fuentes nutritivas necesarias como C, O₂, H₂, N₂, P, ya sea como orgánicas o inorgánicas que deben ser transportadas a la célula en forma soluble.

La energía debe suministrarse como energía contenida en compuestos orgánicos o como energía radiante de la luz solar. Una fracción de la energía es usada para la biosíntesis de biomasa y la restante es dispersada como calor.

Los microorganismos producen también productos de desecho que dependen de las especies consideradas y las condiciones ambientales. Los productos más deseables son gases como CO₂, N₂, O₂ y CH₄, que pueden ser fácilmente separados de la fase líquida. Otros gases como H₂S, NH₃ y aminas son indeseables. Un requerimiento importante para la mayor parte de los procesos biológicos usados en el tratamiento de efluentes es la producción de microorganismos floculantes, que pueden ser fácilmente separados por medios físicos como sedimentación por gravedad, centrifugación o filtración. Desde el punto de vista de la

¹ *Tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas y su impacto en los sistemas acuáticos* - Dr. Antoni Escalas Cañellas (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México) - Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 5 de julio de 2006

polución el microorganismo debe considerarse como un producto no deseable. La facilidad de separación y la destrucción por autooxidación son también aspectos de gran importancia.

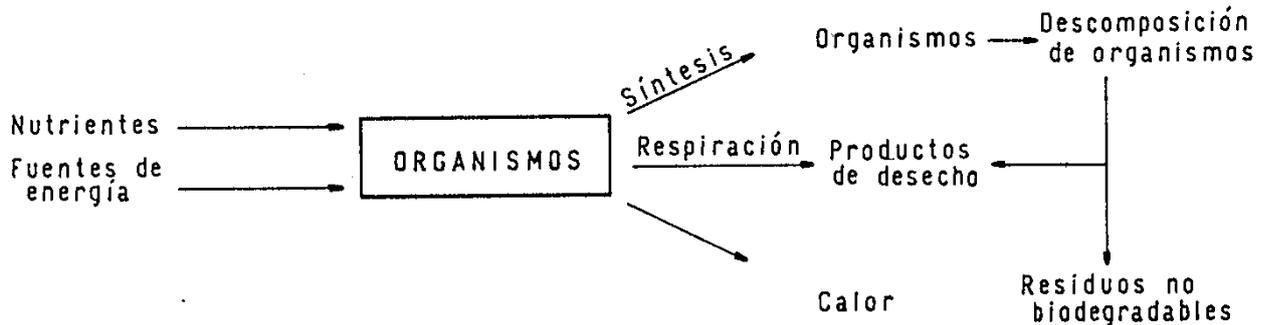
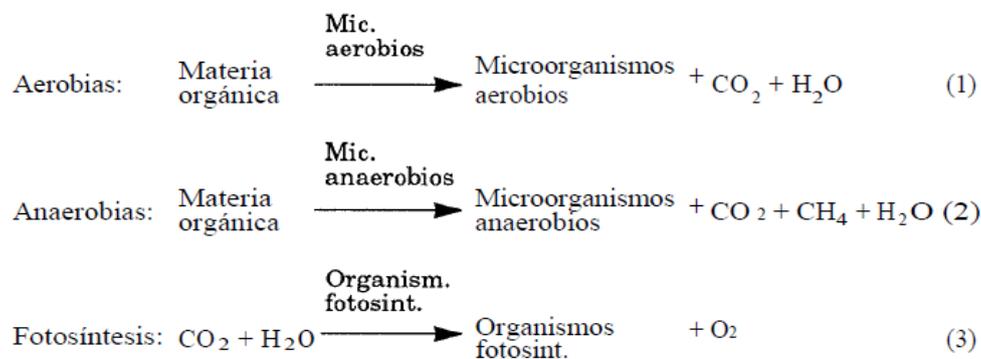


FIGURA 3 – Reacciones biológicas fundamentales

Las reacciones biológicas pueden influenciar las reacciones químicas en la fase líquida del medio ambiente. Por ejemplo el consumo de CO_2 por las algas durante el día puede aumentar el pH y esto ocasiona la fijación del SH_2 como sulfuro.

Estequiometria

La estequiometria de las reacciones involucradas en los distintos tipos de tratamiento es altamente influenciada por las especies de microorganismos presentes, los compuestos existentes y las condiciones ambientales impuestas sobre el proceso. Las reacciones típicas son como sigue:

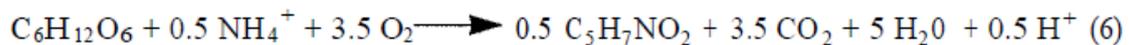


Estas reacciones pueden ocurrir al mismo tiempo, por ejemplo en una laguna: fotosíntesis en la parte superior, aerobiós en la parte media y anaerobiosis en la inferior. Un inconveniente de las reacciones fotosintéticas es que el C inorgánico (CO_2) es convertido en C orgánico, que es un agente de polución.

Se pueden considerar ecuaciones de balance efectuando un análisis elemental en el sistema orgánico y en el microorganismo producido. Un ejemplo para un proceso aerobio es el que se reproduce a continuación (Ecuaciones 4 y 5), en el cual se considera que el sustrato orgánico tiene la misma composición que la glucosa, y el microorganismo la fórmula $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$. Las reacciones biológicas serían:



Si se considera un coeficiente de rendimiento de 0.5 moles de microorganismo por mol de glucosa tendremos:



Dado que el tiempo de residencia de los organismos en los procesos biológicos es suficientemente largo, es necesario considerar también una reacción de autooxidación o descomposición que no se considera nunca en procesos de fermentación normales.



Todas las reacciones son exotérmicas, pudiéndose calcular el calor liberado por las reacciones netas o por la muerte del organismo en base a los calores de combustión de los productos y reactantes. El cálculo del calor liberado es importante en los procesos de compost y digestión aerobia termofílica, en los cuales la concentración de materia destruida es suficientemente alta para que el calor liberado haga aumentar la temperatura.

Como ya vimos la relación estequiométrica entre el sustrato orgánico consumido y el microorganismo producido se expresa como un coeficiente de rendimiento (Ecuación 8)

$$\frac{dX}{dt} = -Y_{x/s} \frac{ds}{dt} \quad \text{ó sea} \quad (8)$$

$$Y_{x/s} = - \frac{dX}{ds}$$

dX/dt = Variación de la Concentración en función del Tiempo

ds/dt = Variación del Sustrato en función del Tiempo

$Y_{x/s}$ = Coeficiente de Producción Bacterial Máximo (definido como la relación de la masa de células formadas en comparación con la masa consumida de sustrato, medida durante cualquier periodo finito del crecimiento) (mgSSV/mgDQO).

La aplicación de esta ecuación en tratamiento de efluentes se complica porque el sustrato es generalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos solubles e insolubles y la concentración microbiana es difícil de medir. La DBO o DQO son comúnmente usadas como una medida de la concentración del sustrato.

Una ventaja de los procesos anaerobios sobre los aerobios es que $Y_{x/s}$ es menor para los anaerobios, lo que resulta en una producción menor de desechos.

Relaciones cinéticas básicas

Se utilizan las siguientes expresiones fundamentales:

$$r_x = \mu X \quad (9)$$

r_x = Tasa de crecimiento bacteriano (masa/unidad de volumen-tiempo)

μ = Tasa específica de crecimiento (tiempo⁻¹)

X = Concentración de microorganismos (masa/unidad de volumen)

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (10)$$

μ = Tasa específica de crecimiento (tiempo⁻¹)

μ_m = Tasa específica máxima de crecimiento (tiempo⁻¹)

S = Concentración en la solución del sustrato limitante del crecimiento (masa/unidad de volumen)

K_s = Constante de velocidad media, concentración del sustrato en la mitad de la velocidad máxima de crecimiento (masa/unidad de volumen)

Esta relación es muy usada, aunque debe reconocerse que existen otros factores, además de una concentración limitante. La fuente de C y energía, medida como DBO o DQO es generalmente considerada el sustrato limitante en los procesos biológicos aerobios. Sin embargo, es bien conocido que la velocidad de crecimiento de microorganismo puede ser controlada por otras sustancias como amoníaco, fosfatos, sulfatos, sales de hierro, CO₂, etc. El control (sustrato limitante) por amoníaco o fosfatos puede ser de especial importancia en el tratamiento de residuos industriales deficientes en estas sustancias. El crecimiento de algas en procesos fotosintéticos puede ser controlado por la luz o CO₂, entre otras sustancias.

El control puede ser ejercido por la transferencia de masa al interior de la célula, lo mismo que por la reacción química dentro de la misma, y en baja concentración de sustrato ambas pueden ser de importancia. Se ha demostrado la significación de la transferencia de materia en procesos biológicos para tratamiento de efluentes. La ecuación (10) puede ser usada si K_s es considerada una variable dependiente del grado de mezclado. La importancia de transferencia de masa en estos procesos está reflejada en el hecho de que los valores de K_s son comúnmente de un orden de magnitud mayor que para cultivos puros de microorganismos.

El tamaño de los flóculos o el espesor del film en estos procesos están medidos en milímetros, lo que en microorganismos individuales se mide en micrones.

En la mayor parte de los procesos usados en tratamiento de efluentes, los microorganismos son retenidos en el reactor el tiempo suficiente como para que la autooxidación o la descomposición de microorganismos sean importantes, de manera tal que el proceso de digestión aerobia es diseñado para que la destrucción del microorganismo sea la reacción clave.

La ecuación (9) puede ser modificada para incorporar ese aspecto:

$$r_x = (\mu - K_d) X \quad (11)$$

K_d = velocidad específica de descomposición del organismo

K_d es usado en el sentido de un término que incluye el efecto de todos los factores, aparte del sustrato, que puede resultar en un cambio de la masa de los organismos

involucrados. Entre esos factores están el metabolismo endógeno, la muerte con lisis consiguiente y el crecimiento críptico. El valor de K_d , que es generalmente sin importancia en experimentos cortos de interés microbiológicos, es sin embargo de gran significado en los procesos biológicos largos. Comúnmente usado en procesos biológicos de tratamiento de efluentes, K_d no es realmente una constante, ya que decrece con la edad del organismo. Sin embargo, el concepto de un valor constante de K_d ha sido postulado como muy satisfactorio cuando se aplica en un rango limitado de edades.

Métodos de tratamiento

Los sistemas biológicos utilizados a nivel industrial que se aplican por lo general como tratamiento secundario pueden ser de tipo aerobio y anaerobio. Entre los procedimientos aeróbicos existe una diversidad de tecnologías disponibles tales como:

TABLA 1 – Semejanzas y diferencias entre tratamientos biológicos y procesos microbianos

	Tratamiento biológico	Procesos microbianos
Sustratos	No es posible seleccionarlo, cualquiera está presente	Seleccionado
Medio de cultivo	Sólo se pueden agregar algunas sales (N y P)	Predeterminado
Microorganismo	Poblaciones mixtas no seleccionadas	Cultivo único seleccionado
Sustancias tóxicas	Pueden estar presentes	No están presentes Son excluidas
pH	Poco o nada controlado	Generalmente controlado
Temperatura	No controlada	Controlada
Tipo de reactores	Abiertos a la intemperie	Rara vez a la intemperie
Esterilización	Nunca practicada	Casi siempre necesaria
Principios de aireación y agitación		Similares
Cinética de crecimiento		Similares

1. **Barros activados** en los cuales los materiales solubles coloidales y en suspensión son transformados en CO_2 , H_2O y células con recirculación de los barros formados.
2. **Lagunas de aireación** que emplean aireación artificial en una laguna y que puede ser completa o parcialmente aerobia.
3. **Filtros percoladores** que consisten en lechos de material de tamaño variable o sintético que por acción del tratamiento lleva adherido un limo formado por el material biológico a través del cual el efluente fluye.
4. **Discos rotatorios**, que constituyen una modificación de los sistemas de filtración fija y consisten en discos rotantes que van montados en un eje horizontal.
5. **Piletas de estabilización** que son sistemas de bajo costo que utilizan bacterias y algas para reducir los componentes orgánicos y eliminar los microorganismos patógenos.

Los procesos anaeróbicos son fundamentalmente procesos de digestión que pueden aplicarse a residuos líquidos o sólidos e incluyen generalmente separación y aprovechamiento del gas producido. La transformación de la materia orgánica en metano y CO_2 se lleva a cabo

en 3 etapas consecutiva en las cuales intervienen diferentes grupos de bacterias con formación de ácido acético, propiónico, butírico, láctico, fórmico, CO_2 e H_2 , para llegar finalmente a metano y CO_2 . Los digestores anaerobios varían mucho en relación a la complejidad y diseño y se ha demostrado que un solo diseño no es adecuado para distintos efluentes. Además de los digestores tradicionales se han desarrollado últimamente nuevos tipos de reactores a lecho fluidizado y otros basados en filtros anaerobios.

Cuando se comparan procesos aerobios con anaerobios se suele enfatizar que existe una marcada preferencia por el uso de procedimientos anaerobios debido fundamentalmente a la economía de energía lograda, dado que los costos de operación de los sistemas aerobios son cada vez más elevados. Sin embargo, la comparación debe hacerse en forma más completa. Por ejemplo, debe tenerse en cuenta la presencia de compuestos tóxicos (como el fenol) o de los llamados recalcitrantes o xenobióticos, que son aquellos cuya biodegradabilidad es muy dificultosa.

Existen tres factores fundamentales para determinar la capacidad de un tratamiento biológico de efluentes que contengan compuestos tóxicos o recalcitrantes. Esos factores son:

1. **La naturaleza de la conversión química necesaria:** Por ejemplo los derivados halogenados aromáticos son más fácilmente atacados por comunidades anaeróbicas, mientras que en el caso de comunidades aeróbicas los compuestos tienden a polimerizarse primero, haciéndose más difícilmente atacables después.
2. **La ecofisiología de los microorganismos comprendidos:** La digestión anaeróbica puede considerarse como un proceso en serie y es por lo tanto más vulnerable que la aeróbica que comprende microorganismos y caminos metabólicos que actúan en paralelo. Una variedad de compuestos como amoníaco, agua oxigenada, sulfitos, sulfatos e hidrógeno sulfurado, que no interfieren en tratamientos aerobios pueden ser inhibidores de las bacterias metanogénicas.
3. **Diseño del proceso y operación de la planta:** A pesar de que existen procesos aerobios muy difundidos y eficientes para tratamiento de aguas residuales que contienen fenoles, amoníaco y cianuros, se ha demostrado recientemente que también pueden tratarse anaeróticamente con reactores de filtro, empleando carbón activo, lo cual demuestra la importancia del adecuado diseño del proceso. La tendencia moderna considera que los sistemas son, más que excluyentes, complementarios, ya que las comunidades microbianas anaeróbicas son específicamente ventajosas a altas temperaturas y altas concentraciones de sustratos, especialmente insolubles, mientras que las comunidades microbiológicas aeróbicas son indispensables para bajos niveles de sustratos, condiciones ambientales variables y distintos productos químicos.

Metodología para la determinación de la calidad de un efluente

Son fundamentalmente dos las técnicas de medida que se utilizan para determinar la calidad de un efluente:

- a) DBO, o sea la demanda biológica de O_2 , y
- b) la demanda química, que puede determinarse por el valor de KMnO_4 o por el $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$, que es el que más se utiliza como demanda química y se lo simplifica como DQO.

El ensayo de DBO es un intento de simular las condiciones de una corriente de H_2O . Una muestra del efluente es diluida con H_2O aireada y la concentración de O_2 es

determinada antes y después de 5 días de incubación a 20 °C. El ensayo es simple, pero se requiere:

- Si la muestra no puede ser medida inmediatamente debe conservarse a 5 °C.
- La dilución debe ser tal que por lo menos 30% del O₂ disponible debe estar presente en el ensayo después de 5 días de incubación.
- Las botellas deben tener una capacidad de 250 ml.
- La temperatura de incubación debe ser 20 °C ± 0,5 °C durante 120 h. Las botellas deben conservarse en la oscuridad y
- El valor de pH debe estar entre 6.5 - 8.2.

El valor de KMnO₄ es un ensayo empírico de las sustancias oxidables químicamente empleando una solución de KMnO₄ N/80.

La demanda química es el valor de O₂ absorbido por un litro de muestra cuando una alícuota de la muestra es calentada a reflujo durante 2 horas con solución de Cr₂O₇K₂. En la tabla 2 se dan algunos valores de las demandas biológicas y químicas de algunos efluentes.

TABLA 2 – Valores de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Valor de Permanganato (VP) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) expresados en mg l⁻¹ de varios efluentes.

Efluente	DBO	VP	DQO
Azúcar de remolacha	850	80	1,150
Efluente doméstico	350	100	300
Lavado de ropas	1,600	170	2,700
Almidón de harina	12,000	3,600	17,150

Aprovechamiento total o parcial de efluentes

El aprovechamiento o la valorización más conveniente de un efluente por vía microbiana depende del producto a ser obtenido o más precisamente de las aplicaciones y aceptación por parte del mercado de ese producto. Por acción de los microorganismos sobre la materia orgánica puede obtenerse:

- Energía a partir de residuos sólidos o líquidos, como es el caso del metano,
- Fertilizantes o acondicionadores del suelo, a partir de residuos sólidos (biosólidos),
- Alimentos de tipo no convencional, como proteínas unicelulares, y
- Metabolitos específicos, como alcohol, enzimas, etc.

En el presente trabajo nos abocaremos específicamente a la utilización de los efluentes como acondicionadores del suelo a partir de su aplicación de los biosólidos en el terreno.

Biosólidos

Origen de los biosólidos y su composición

Como ya hemos visto, los biosólidos son principalmente materiales orgánicos producidos durante el tratamiento de aguas residuales, los cuales pueden ser utilizados en diversos usos benéficos.

Un ejemplo de tales usos es la incorporación de biosólidos al terreno para abastecerlo de nutrientes y para renovar la materia orgánica del terreno. Esta actividad se conoce como aplicación al terreno. Los biosólidos se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación.

Valor agronómico

La valorización agrícola de los biosólidos de plantas depuradoras es una salida lógica a dos problemas: la necesidad de aportar nutrientes a los cultivos y la de dar un uso racional a sus residuos cloacales. La búsqueda de un destino para los biosólidos de las ciudades representa hoy un importante desafío ecológico a nivel mundial. La aplicación de estos productos a los suelos es considerada normalmente una alternativa aceptable.

Está comprobado que el incremento del contenido de materia orgánica del suelo; por su aporte de N orgánico, aumenta el contenido de N mineral disponible para los cultivos y por su nivel de nutrientes influye en la concentración de fósforo, calcio, potasio, magnesio, cinc, boro y cobre del suelo. Por lo tanto, el uso de biosólidos en agricultura es importante en muchos países como un sustituto parcial de los fertilizantes y como un corrector de las propiedades físicas. La Unión Europea, Estados Unidos y otros países desarrollados destinan un porcentaje importante de los biosólidos para la agricultura, llegando en algunos casos al 60 %.

Los biosólidos son un importante proveedor de nutrientes a los suelos, y ese aporte de nutrientes puede dar lugar a mayores rendimientos de cultivos y pasturas, en función de las características del ambiente y del manejo agrícola. Los biosólidos actúan como un sustituto parcial de los fertilizantes y generalmente se encuentran respuestas positivas por parte de los cultivos (biomasa y rendimiento) a su agregado. Estas respuestas en rendimiento pueden ser semejantes a las encontradas con fertilizantes químicos y aun superiores. Sin embargo, en todos los casos las respuestas suelen estar limitadas por las condiciones hídricas durante el ciclo del cultivo.

Por otro lado, como otros abonos orgánicos, los biosólidos son considerados mejoradores de las propiedades físicas de los suelos, lo cual se hace evidente cuando se usan como enmienda en suelos degradados. La degradación del suelo se vincula con la pérdida de la estabilidad estructural, el encostramiento y las densificaciones, a lo cual se une la reducción de la actividad biológica y procesos de degradación química (disminución del contenido de materia orgánica y agotamiento de nutrientes). El problema se agrava cuando la magnitud del proceso conduce a la pérdida del horizonte A. La remoción de este horizonte reduce considerablemente la productividad de los suelos y afecta los agrosistemas. Además

de la producción agropecuaria, muchas otras actividades (minería, construcción, etc.) provocan degradación de suelos y la pérdida del horizonte superficial.

Aplicación del fango al suelo

Como se dijo anteriormente, la aplicación de biosólidos al suelo, a los que llamaremos en forma genérica fangos, se viene realizando con éxito en varios lugares del mundo, desde hace varias décadas. También hemos dicho que su aplicación aporta una solución a la disposición final de los fangos producto del tratamiento biológico de los efluentes cloacales, reduciendo la cantidad de efluentes a tratar mediante otros métodos de gestión, medioambientalmente menos amigables, como la evacuación a vertederos controlados, la incineración o la evacuación al mar.

La aplicación al suelo del fango de aguas residuales se define como la distribución del fango sobre el terreno o inmediatamente por debajo de la superficie del mismo.²

Independientemente del tipo de terreno en el que se aplique, ésta aplicación al suelo se diseña con el objetivo de conseguir un tratamiento adicional a los fangos. La luz solar, los microorganismos que habitan el suelo y la desecación, se combinan para destruir los organismos patógenos y muchas de las sustancias tóxicas presentes en el fango. Los metales de traza quedan atrapados en la matriz del suelo, y los nutrientes los consumen las plantas y los convierten en biomasa útil. En el caso de terrenos para uso agrícola, terrenos forestales o terrenos marginales, el fango se utiliza para la mejora de las condiciones del terreno, acondicionando el suelo para facilitar el transporte de nutrientes, aumentar la retención de agua y mejorar la aptitud del terreno para el cultivo.

Para el diseño de un sistema de aplicación se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Caracterización de la cantidad y calidad del fango.
2. Revisión de la normativa en todos los estamentos de legislación, en cuanto a la posibilidad de aplicación.
3. Evaluación y elección del emplazamiento y de la opción de evacuación.
4. Determinación de los parámetros de diseño del proceso – cargas de superficie de terreno necesaria, método y calendario de aplicación.

Características del fango que afectan a su aplicación al suelo

Para diseñar un sistema de aplicación al suelo, se deben estudiar las características del fango que afecten su aptitud. Tal es el caso del contenido de materia orgánica (medido como sólidos volátiles), nutrientes, patógenos, metales y compuestos orgánicos tóxicos.

La materia orgánica degradable presente en el fango no estabilizado puede originar problemas de olores y atraer vectores a los lugares de aplicación. Estos vectores pueden propagar enfermedades en caso de estar en contacto con el hombre.

En cuanto a los nutrientes, no se eliminan substancialmente durante el proceso de tratamiento del fango, pero son consumidos por las plantas una vez aplicados al suelo. De

² **INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES – Tratamiento, Vertido y Reutilización** – Metcalf & Eddy, Inc. – Tercera Edición – MADRID - 1995

entre los nutrientes, es el nitrógeno el de mayor interés, debido al riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Es por esto que el consumo de nitrógeno por parte de la vegetación presente o futura es un parámetro clave al momento de determinar las tasas de aplicación. De todas maneras, en la mayoría de los casos, el fango de agua residual solo puede satisfacer parte de las necesidades globales de nutrientes de las plantas.

Otro de los factores a considerar son los metales de traza y compuestos orgánicos, los que quedan atrapados en el suelo y crean posibles riesgos tóxicos para plantas, animales y el hombre. El metal que mayor atención merece es el cadmio, puesto que se puede acumular en las plantas hasta alcanzar niveles que resultan tóxicos para el hombre y los animales, sin llegar a serlo para las plantas. Es por ello que generalmente la tasa de aplicación es determinada por la cantidad de cadmio presente en la misma.

También contienen compuestos orgánicos cuya degradación es muy lenta, y cuyo principal problema no es generado por el consumo por parte de las plantas, sino por la ingesta directa por parte de los animales. Tal es el caso de los PCBs. También pueden ser absorbidos en algunas superficies de cultivos, por lo tanto, en el diseño de sistemas de aplicación de fangos, será necesario establecer valores límite de carga para compuestos orgánicos específicos.

Determinación del lugar de emplazamiento

Uno de los problemas más importantes que se puede presentar al momento de la decisión de aplicación de fangos en suelo es la elección del lugar de emplazamiento. Las características de éste determinarán el diseño final e influirán en la efectividad global del sistema de aplicación al suelo.

A efectos de un análisis previo del emplazamiento, es necesario hacer una estimación inicial de la superficie de terreno necesaria para cada una de las opciones de aplicación considerada.

Los factores más importantes a tener en cuenta para determinar los parámetros que regularán la aplicación son:

- **Topografía:** cuya importancia radica en cuanto al potencial de erosión y escorrentía superficial del fango aplicado.
- **Suelos:** los suelos más indicados para la aplicación al terreno son suelos de permeabilidades relativamente bajas (0,5 a 1,5 cm/h); suelos entre moderadamente y bien drenados; suelos alcalinos o neutros (pH mayor 6,5), lo que permitirá la solubilidad de los metales; y estratos profundos de textura relativamente fina, que permitan gran capacidad de almacenamiento de humedad y nutrientes.
- **Profundidad del nivel freático:** de manera que la aplicación de los fangos no afecte en mayor medida que una buena práctica agronómica tradicional las aguas subterráneas. Para cumplir con este objetivo se debe tener en cuenta las calidades de las aguas subterráneas adyacentes previas a la aplicación, estableciendo una profundidad mínima, que relacione la cantidad de fangos a aplicar con la profundidad del nivel freático.
- **Accesibilidad y proximidad a zonas críticas:** El emplazamiento de éste tipo de sistema debe considerar una distancia de amortiguación respecto a zonas urbanas, viviendas, aguas superficiales, pozos de agua y carreteras. Preferentemente, los

emplazamientos deberían estar aislados, sin llegar a generar problemas de acceso. Las distancias pueden variar entre 15 y 450 metros, dependiendo del tipo de aplicación y de la zona crítica circundante (urbanización, estanques y lagos, niveles freáticos, etc.)

Determinación de las cargas de aplicación del proyecto

Para determinar la carga de aplicación de fango, ya sea para la aplicación a terrenos de uso agrícola, u otros, se deben tener en cuenta dos parámetros fundamentales, que son:

- la concentración de contaminantes (establecidos en las normativas aplicables)
- la carga de nutrientes necesaria para satisfacer la demanda de la vegetación o plantación.

Tasa de aplicación basada en la carga de contaminantes

Normalmente se tienen en cuenta los determinados por cada región en su normativa, aunque generalmente se utilizan los establecidos por la EPA. Para la aplicación a terrenos de uso agrícola se pueden establecer límites de carga anuales de contaminantes y cargas acumuladas máximas.

En fangos que contienen cantidades importantes de contaminantes, los límites de aplicación anuales pueden depender de uno de sus constituyentes, como el cadmio.

Teniendo en cuenta esto, puede ocurrir que la tasa de aplicación límite del contaminante más perjudicial haga que su aplicación no satisfaga la demanda de nitrógeno necesario para el crecimiento del cultivo.

La cantidad acumulada de fango que se puede aplicar se determina a partir de la obtención del límite de aplicación de cada contaminante. A partir de allí se comparan los resultados obtenidos y se fija la tasa máxima de aplicación en función del contaminante más perjudicial.

La ecuación que definen los límites de aplicación es la siguiente:

$$R_m = \frac{L_m}{(C_m) (1.000)}$$

R_m = cantidad máxima de fango que se puede aplicar a lo largo de la vida útil del emplazamiento (ton secas/ha)

L_m = cantidad máxima de contaminante que se puede aplicar a lo largo de la vida útil del emplazamiento especificada en la normativas aplicables (kg de contaminante/ha)

C_m = contenido porcentual de contaminantes en el fango, expresado en tanto por uno (p.e. con 50 ppm de cadmio, $C_m = 0,00005$).

TABLA 3 – Dosis de carga anual de contaminantes ((Resolución MDSyPA 97/01)

PARÁMETRO	CARGA ANUAL (Kg/ha.año)
ARSÉNICO	2
CADMIO	0,15
CINC	30
COBRE	12
CROMO TOTAL	3
MERCURIO	0,1
NIQUEL	3
PLOMO	15
BIFENILOS POLICLORADOS	1,2

Tasa de aplicación basada en la carga de nutrientes

El proyecto de la aplicación del fango a terrenos agrícolas, turberas o forestales, se basa en el uso del fango de agua residual como fertilizante. En la mayoría de los casos la tasa de aplicación de fango la determina la demanda de nitrógeno de los cultivos, aunque en algunos casos se puede calcular en base a la carga de fósforo.

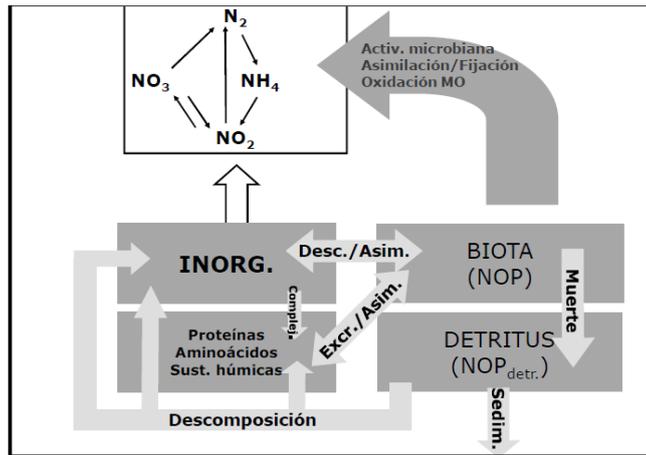
Independientemente de lo indicado en el párrafo anterior, las cargas a aplicar deben respetar los límites de aplicación de contaminantes, por lo tanto, la tasa de aplicación final será la menor de las obtenidas a partir de las cargas de nutrientes y contaminantes.

El cálculo de las tasas de aplicación de fangos basadas en los límites para la aplicación de nitrógeno se compleja, debido a que parte del nitrógeno presente en el fango está en forma orgánica, hecho que implica una mineralización lenta y una conversión en el suelo a formas aptas para el consumo por parte de la vegetación que puede demandar varios años (Tablas 4 y 5).

TABLA 4 – CICLO DEL NITRÓGENO – Procesos biológicos

1. Fijación de N ₂ atmosférico	N ₂ → NH ₄	→	NH₂
2. Amonificación	NOP-NOD	→	NH₄
3. Nitrificación	NH ₄	→	NO₃
4. Desnitrificación	NO ₃ → NO ₂	→	N₂
5. Asimilación de NO ₃ y NH ₄			
6. Transformación de NOP en NOD			

TABLA 5 – Transformación del Nitrógeno



La cantidad de anual de nitrógeno disponible aportado por la aplicación de fango se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$N_a = (1.000) [NO_3 + k_v (NO_4) + f_n (N_0)]$$

N_a = cantidad de nitrógeno contenido en el fango disponible anualmente para el consumo de las plantas (Kg. N /ton sólidos secos . año).

NO_3 = porcentaje de nitratos presentes en el fango (expresado en tanto por uno)

k_v = factor de volatilización del amoniaco

NO_4 = porcentaje de amoniaco presente en el fango (expresado en tanto por uno)

f_n = factor de mineralización del primer año (según tabla 6)

N_0 = porcentaje de nitrógeno orgánico presente en el fango (expresado en tanto por uno)

El nitrógeno disponible después de la mineralización del nitrógeno orgánico aplicado en años anteriores se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$N_{ap} = 1.000 \sum f_2(N_0)_2 + f_3(N_0)_3 + \dots f_n(N_0)_n$$

N = nitrógeno disponible para el consumo de las plantas resultante de la mineralización del nitrógeno orgánico aplicado durante los n años anteriores (en Kg nitrógeno / ton solido secos . año)

$(N_0)_n$ = fracción de nitrógeno orgánico presente en el fango aplicado el n -ésimo año (expresado en tanto por uno)

f = factor de mineralización (según tabla 6). Los subíndices indican el año de aplicación correspondiente.

N_0 = porcentaje de nitrógeno orgánico presente en el fango

TABLA 6 – Tasas de mineralización del nitrógeno orgánico presente en el agua residual

Tiempo transcurrido desde la aplicación del fango (en años)	TASA DE MINERALIZACIÓN (%)		
	Fangos crudos	Fangos digeridos por vía anaerobia	Fangos compostados
1	40	20	10
2	20	10	5
3	10	5	3
4	5	3	3
5	3	3	3
6	3	3	3
7	3	3	3
8	3	3	3
9	3	3	3
10	3	3	3

Teniendo en cuenta lo deducido anteriormente, la cantidad total de nitrógeno disponible en un determinado año resulta de la suma de la cantidad disponible de N por la

aplicación del fango durante ese año (N_a), más la cantidad disponible por la tasa de mineralización del fango aplicado durante los años anteriores (N_{ap}).

Por lo tanto, para calcular la tasa anual de aplicación de fango en función del N, se aplicará la siguiente expresión:

$$R_n = \frac{U_n}{N_a + N_{ap}}$$

R_n = tasa anual de aplicación durante el n-ésimo año (ton sólido secos/ha . año)
 U_n = consumo anual de N por parte de los cultivos (Kg. N/ha.año)

Ya hemos determinado la tasa de aplicación de biosólidos en función del N. Pero en los casos en que el parámetro limitante es el consumo de fósforo por parte de los cultivos, la tasa de aplicación del biosólido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{U_p}{(C_p) (1.000)}$$

R_p = tasa anual de aplicación de biosólidos limitada por la carga P (ton de fósforo/ha . año)
 U_p = consumo anual de P por parte de los cultivos (Kg. N/ha.año)
 C_p = contenido porcentual de P en el biosólido, expresado como tanto por uno.

Habiendo establecido la cantidad máxima de biosólidos a aplicar al proyecto, en base a la carga de contaminantes y la carga máxima de nutrientes (N y P), nos queda determinar la superficie del terreno necesaria para el emplazamiento, la que surge de la siguiente ecuación:

Determinación de la superficie necesaria

Una vez determinada la tasa de aplicación del proyecto, se debe efectuar el cálculo de la superficie del terreno necesaria, la que surge de la caracterización de los fangos y las tasas aplicación para el tipo de terreno. La ecuación que define el área queda determinada por la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q_s}{R_d}$$

A = superficie de aplicación necesaria (hectáreas)
 Q_s = producción total de fango (toneladas de sólido seco/año)
 R_d = tasa de aplicación de fango de proyecto (toneladas de sólidos secos/ha . año)

Técnicas de aplicación

Existen diversos métodos para la aplicación de biosólidos al terreno. La selección del método depende del tipo de terreno y de la consistencia de los biosólidos. Como dijimos anteriormente, los biosólidos líquidos contienen esencialmente del 94 al 97 por ciento de agua y cantidades de sólidos relativamente bajas (del 3 al 6 por ciento). Éstas características posibilitan que su aplicación al suelo sea por medio de su inyección, mediante vehículos diseñados especialmente, o simplemente aplicados superficialmente.

Los vehículos para la inyección de biosólidos al suelo, tal como se muestra en la Figura 4, tienen mangueras que salen del tanque de almacenamiento hacia las toberas de inyección, desde donde se liberan los biosólidos.

Para la aplicación superficial de biosólidos, generalmente se utilizan equipos agrícolas convencionales, los que pueden llegar a tener algunas modificaciones para el uso que se les va a dar (Figura 5).



FIGURA 4 – Equipo de inyección de biosólidos



FIGURA 5 – Aplicación de biosólidos en superficie

Consideraciones finales

A fin de determinar la conveniencia de aplicación de éste tipo de tecnología, se deben considerar tanto las ventajas como las desventajas que la misma ocasiona.

En cuanto a las ventajas, la aplicación al terreno es una forma excelente de reciclar los sólidos contenidos en las aguas residuales. Esta consideración debe considerarse siempre

y cuando se controle la calidad del material. En efecto, los biosólidos retornan nutrientes valiosos al terreno y mejoran las condiciones para el crecimiento de la vegetación.

Otra de las ventajas que ofrece su aplicación, es la de ser una opción relativamente económica, puesto que la inversión de capital es generalmente mucho menor comparada con otros métodos de manejo de biosólidos. De hecho los equipos para el transporte y para la aplicación al terreno son de tecnología similar a la que se utilizan para la aplicación de otros productos al terreno, lo que implica la utilización de tecnología en uso. Otro aspecto positivo es en cuanto a las necesidades de espacio para la planta de tratamiento de efluentes, puesto que su tamaño puede ser considerablemente menor que una de similares características con una disposición final diferente para los fangos.

En cuanto a las desventajas, aun cuando la aplicación al terreno requiere un capital relativamente menor, se puede necesitar un extenso esfuerzo laboral.

Otro aspecto a tener en cuenta es la necesidad de control por parte de personal especializado, puesto que un mal manejo de los biosólidos puede constituirse en más problemas que beneficios.

También puede considerarse como una desventaja el hecho que su aplicación está también limitada a ciertas épocas del año, especialmente en los climas más fríos. En efecto, los biosólidos no deben ser aplicados en terrenos congelados o cubiertos de nieve, y a veces los campos de cultivo no son accesibles durante la estación de crecimiento. Por lo tanto, es necesario proporcionar una capacidad de almacenamiento junto con programas de aplicación al terreno. Incluso cuando se logra una sincronización adecuada (por ejemplo, antes de plantar las cosechas en usos agrícolas), el estado del tiempo puede interferir con la aplicación. Las lluvias de primavera pueden hacer imposible que el equipo de aplicación llegue a los campos agrícolas, haciendo necesario el almacenaje de los biosólidos hasta que mejoren las condiciones climatológicas.

Otra desventaja de la aplicación al terreno es la posible oposición pública, la cual se desarrolla principalmente cuando el sitio de uso se ubica cerca de las áreas residenciales. Una de las principales causas de la oposición pública es el olor. Éste aspecto negativo puede subsanarse, ganando el apoyo público, a través de una comunicación efectiva, siendo éste un componente absolutamente esencial en la aplicación benéfica de los biosólidos.

Conclusiones

Teniendo en cuenta lo expuesto precedentemente, se puede concluir que si bien la aplicación de biosólidos al terreno ofrece una solución tangible a la producción de biosólidos producto de las aguas residuales generadas en cualquier comunidad, en cuanto a la disminución de fangos que de otra manera se les debería aplicar algún otro tipo de tratamiento antes de su disposición final, no podemos considerar que éstas técnicas ofrecen una solución mágica a la generación y disposición de los desechos, puesto que una mala gestión de los mismos podría aportar más problemas que soluciones.

En efecto, a pesar de tener diversos efectos positivos en el ambiente, la aplicación al terreno puede tener impactos negativos en el agua, el suelo y el aire si dicha aplicación no se realiza correctamente.

Como ya hemos visto, los impactos negativos en el agua resultan por la aplicación de biosólidos utilizando tasas que exceden los requerimientos nutritivos de la vegetación calculados mediante los métodos expuestos. Éste exceso de nutrientes presente en los biosólidos (principalmente los compuestos de nitrógeno) pueden lixiviarse del suelo y llegar al agua subterránea. La escorrentía pluvial puede también transportar un exceso de nutrientes al agua superficial. Sin embargo, debido a que los biosólidos son un fertilizante de liberación lenta, la probabilidad de que los compuestos de nitrógeno sean lixiviados de suelos mejorados con biosólidos, es menor a la del uso de fertilizantes químicos.

En cuanto a los impactos negativos al suelo, éstos pueden resultar del mal manejo de la aplicación de biosólidos al terreno.

Respecto a los efectos sobre la calidad del aire, los olores producidos por la aplicación de biosólidos representan el principal impacto negativo. No obstante ello, la mayoría de los olores asociados con la aplicación al terreno son una molestia más que una amenaza a la salud humana o al ambiente. A fin de evitar esos efectos, las actividades para el control de olores se deberán centrar en reducir la generación de éstos olores.

Otro aspecto fundamental que surgió como corolario del presente trabajo es el hecho que la aplicación al terreno será una opción confiable para el manejo de biosólidos en la medida que se diseñe el sistema tomando en consideración temas tales como el almacenamiento o el manejo alternativo de biosólidos durante los períodos en los cuales no se pueda realizar la aplicación debido a las condiciones desfavorables del tiempo o del terreno.

Por último, cabe concluir que la oposición pública, más que las limitaciones técnicas, han sido la razón más común por la cual se descontinuaron la mayoría de los programas de aplicación al terreno, y es uno de los puntos a apuntar al momento de encarar un emprendimiento de ésta naturaleza.

Referencias

1. PROCESOS BIOLÓGICOS APLICADOS AL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL – Ingeniera Civil Elida Nodal Becerra, Especialista de la Empresa de Aguas de La Habana – LA HABANA – Octubre 2000.
2. INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES – Tratamiento, Vertido y Reutilización – Metcalf & Eddy, Inc. – Tercera Edición – MADRID - 1995
3. FOLLETO INFORMATIVO DE BIOSÓLIDOS DE LA EPA - Fuente: www.epa.gov EPA 832-F-00-064 - Septiembre de 2000
4. STANDARDS FOR THE USE OR DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE – Environmental Protection Agency – Washington D.C – 1993.
5. BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING SIMPOSIUM N° 2, BIOLOGICAL WASTE TREATMENT – Ed. Raymond Canale, John Wiley and Sons – 1971
6. PROCEEDINGS 4TH EUROPEAN CONGRESS ON BIOTECHNOLOGY. VOL 4 – Ed. O.M. Neijssel, R. Van der Meer y K. Luyben Elsevier – 1987
7. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN EL CAMPO – Raúl S. Lavado y Miguel A. Taboada – Buenos Aires – Septiembre de 2002
8. BIOSOLIDS RECYCLINGS: BENEFICAL TECHNOLOGY FOR A BETTER ENVIRONMENT – Environmental Protection Agency – EPA 832-R-94-009 – 32 p.p. E.U. – (1994).
9. BIOSOLIDS GENERATION, USE AND DISPOSAL IN THE UNITED STATES – Environmental Protection Agency – EPA EPA 530-R-99-009 – 81 p.p. E.U. – (1999).