



Prevenir la contaminación de aguas por fuentes puntuales

**TOPPS**

**Sistemas de gestión de residuos  
de fitosanitarios en explotaciones  
agrícolas**

## TOPPS

TOPPS, acrónimo que proviene de **T**rain the **O**perators to prevent **P**ollution from **P**oint **S**ources (formación de los usuarios para prevenir la contaminación por fuentes puntuales) es un proyecto multidisciplinar de 3 años de duración en el que participan 15 países o estados de la Unión Europea. TOPPS ha sido financiado por la **European Commission's Life program** y por la **ECPA**, la **Asociación Europea para la Protección de las Plantas** (European Crop Protection Association).

Uno de los principales objetivos del proyecto TOPPS ha sido la identificación y amplia difusión de las Buenas Prácticas Fitosanitarias, a través de **actividades formativas, demostraciones prácticas, conferencias**, etc. a gran escala en todo el ámbito de la Unión Europea, siempre con el objetivo de reducir la contaminación de las aguas por el mal uso de los productos fitosanitarios. TOPPS se inició en Noviembre de 2005 y finaliza en Octubre de 2008.

Para más información visite: [www.TOPPS-life.org](http://www.TOPPS-life.org)

## Participantes



[www.ecpa.be](http://www.ecpa.be)



[www.pcfruit.be](http://www.pcfruit.be)



[www.harper-adams.ac.uk](http://www.harper-adams.ac.uk)



[www.landscentret.dk](http://www.landscentret.dk)



[www.insad.pl](http://www.insad.pl)



[www.imuz.edu.pl](http://www.imuz.edu.pl)



[www.deiafa.unito.it](http://www.deiafa.unito.it)



[www.esab.upc.edu](http://www.esab.upc.edu)



[www.cemagref.fr](http://www.cemagref.fr)



[www.arvalisinstitutduvegetal.fr](http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr)



[www.povlt.be](http://www.povlt.be)



[www.landwirtschaftskammer.de](http://www.landwirtschaftskammer.de)

## Contenidos

1. Introducción	4
2. Características de la explotación	8
3. Consumo de agua y fitosanitarios	8
4. Diseño de sistemas de bio purificación	12
5. Dimensionamiento	23
6. Mezclas de sustratos activos	24
7. Mezclas de sustratos	26
8. Procesos de degradación y absorción	27
9. Lixiviados	28
10. Gestión de los sustratos tras su utilización	29
11. Criterios de selección del sistema adecuado	29

## Agradecimientos

## Referencias bibliográficas

## Objeto de esta publicación

Esta publicación tiene por objeto informar a agricultores, técnicos y responsables de las diferentes Comunidades Autónomas sobre las posibilidades existentes para evitar la contaminación de aguas superficiales durante el uso de productos fitosanitarios, centrándose fundamentalmente en un manejo adecuado de los líquidos contaminantes que se generan durante las fases de llenado y limpieza de los equipos de aplicación en la explotación. El proyecto TOPPS ha definido la Guía de Buenas Prácticas Fitosanitarias para evitar la contaminación puntual de las aguas con productos fitosanitarios, y ha identificado el manejo de los líquidos contaminantes generados (residuos) como uno de los puntos críticos más importantes. **(Residuos: líquidos contaminados con fitosanitarios provenientes de los volúmenes residuales después de la primera limpieza en campo, las aguas de lavado del pulverizador, y las operaciones de llenado y mantenimiento en la explotación).**

En la mayoría de los países participantes en el proyecto se han detectado lagunas importantes en cuanto a recomendaciones y/o regulaciones en aspectos relacionados con el manejo y la gestión de los residuos líquidos durante el proceso de pulverización. Las recomendaciones de carácter generalista son en la mayoría de los casos insuficientes por lo que el objetivo de esta publicación es el de ofrecer recomendaciones claras y concretas basadas en las experiencias acumulada en los diferentes países.

## 1. Introducción a los sistemas de bio purificación

### a. Directiva Marco de Aguas (DMA)

La mayor parte de los Estados Miembros de la UE han realizado ya la correspondiente transposición de la Directiva Marco de Aguas (Water Frame Directive 2000/60/EC) a la legislación nacional correspondiente. El objetivo es mejorar y proteger el estado de las aguas no depuradas con el fin de alcanzar la clasificación mínima de “agua de calidad” en la próxima revisión prevista para el tercer periodo (2027).

Desde su entrada en vigor en diciembre de 2003, la Directiva Marco de Aguas propone un calendario de actuaciones que debe ser seguido escrupulosamente para alcanzar esos objetivos planteados. Estas actuaciones se inician con un inventario completo (lista de organismos oficiales competentes, establecimiento y caracterización de cuencas), puesta en marcha de operaciones de control y manejo de cuencas, etc. lo que deberá dar lugar a los informes correspondientes y al establecimiento de las medidas necesarias para mejorar la calidad de las aguas en la revisión periódica prevista cada seis años.

La Directiva Marco de Aguas incluye también las llamadas Directivas Filiales en Aguas Subterráneas (2006/118/EC – con entrada en vigor en enero de 2009) y

en Aguas Superficiales (Estándar de Calidad Ambiental prevista su entrada en vigor en 2010). Todas estas reglamentaciones establecen los criterios de calidad para las aguas superficiales y subterráneas. Tanto unas como otras son las que se utilizan en Europa para la producción y suministro de agua de boca. Y los requerimientos de calidad para el agua de boca en Europa preconizan como nivel máximo de presencia de fitosanitarios en agua el valor de 0.1 µg/l (98/88/EC). Esta concentración es equivalente a sólo 1 g de materia activa por cada 10 millones de litros de agua. Esta concentración máxima de 0.1 µg/l tiene además “tolerancia cero” para el caso de aguas potables. Para ayudar en la consecución de estos límites tan restrictivos, es necesaria la adopción de medidas específicas que mitiguen y reduzcan los riesgos de contaminación, siendo imprescindible la adopción de medidas de Buenas Prácticas Fitosanitarias. Si la concentración de fitosanitarios excede del límite de 0.1 µg/l, incluso antes de cualquier tratamiento de las aguas, los estados miembros tienen la potestad de restringir y/o reducir la lista de materias activas permitidas, lo que reducirá de forma alarmante las opciones disponibles por los agricultores para la gestión adecuada de sus producciones.

## **b. Vías de entrada de los fitosanitarios en el agua**

### **I) Fuentes de contaminación puntual**

Las fuentes de contaminación puntual están directamente relacionadas con el manejo de los productos fitosanitarios. Los puntos críticos durante el proceso son el llenado, la limpieza y el manejo de los residuos líquidos. Estos residuos provienen fundamentalmente de los volúmenes que permanecen en el equipo si no se ha realizado la limpieza total en campo, los que se generan por salpicaduras o pérdidas por llenados defectuosos del tanque del pulverizador, y los que resultan de la limpieza interna y externa del equipo de tratamientos en la propia explotación. Diversos estudios ponen de manifiesto que las fuentes de contaminación puntual representan entre el 40 y el 90% de las entradas de fitosanitarios en el agua, siendo por tanto ésta la principal vía de contaminación.

### **II) Fuentes de contaminación difusa**

En general las fuentes de contaminación difusa se asocian al propio proceso de aplicación en campo. De entre las más importantes cabe destacar las pérdidas por escorrentía, vías de entrada a las aguas subterráneas por los sistemas de drenaje y la deriva durante la aplicación.

## **c. Sistemas de bio purificación**

### **I) Principio**

Los sistemas de bio purificación tratan el agua contaminada con productos fitosanitarios utilizando determinados microorganismos adaptados mezclados con adecuados sustratos que actúan de forma biológica consiguiendo la degradación y/o la rotura de las moléculas de las materias activas. Estos sistemas pueden

construirse y manejarse fácilmente en la propia explotación adaptándolos a los condicionantes específicos de cada caso. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que un dimensionamiento y un manejo inadecuado de estos sistemas pueden afectar de forma muy negativa a su eficiencia. Por tanto es preciso seguir esta guía para una correcta comprensión del funcionamiento y modo de construcción de estos sistemas. Varios trabajos de investigación han demostrado que los sistemas de bio purificación pueden alcanzar valores de eficiencia entre el 95 y el 99% en óptimas condiciones y para la mayoría de las materias activas. La Figura 1 muestra las líneas generales de un sistema de bio purificación (De Wilde *et al.*, 2007).

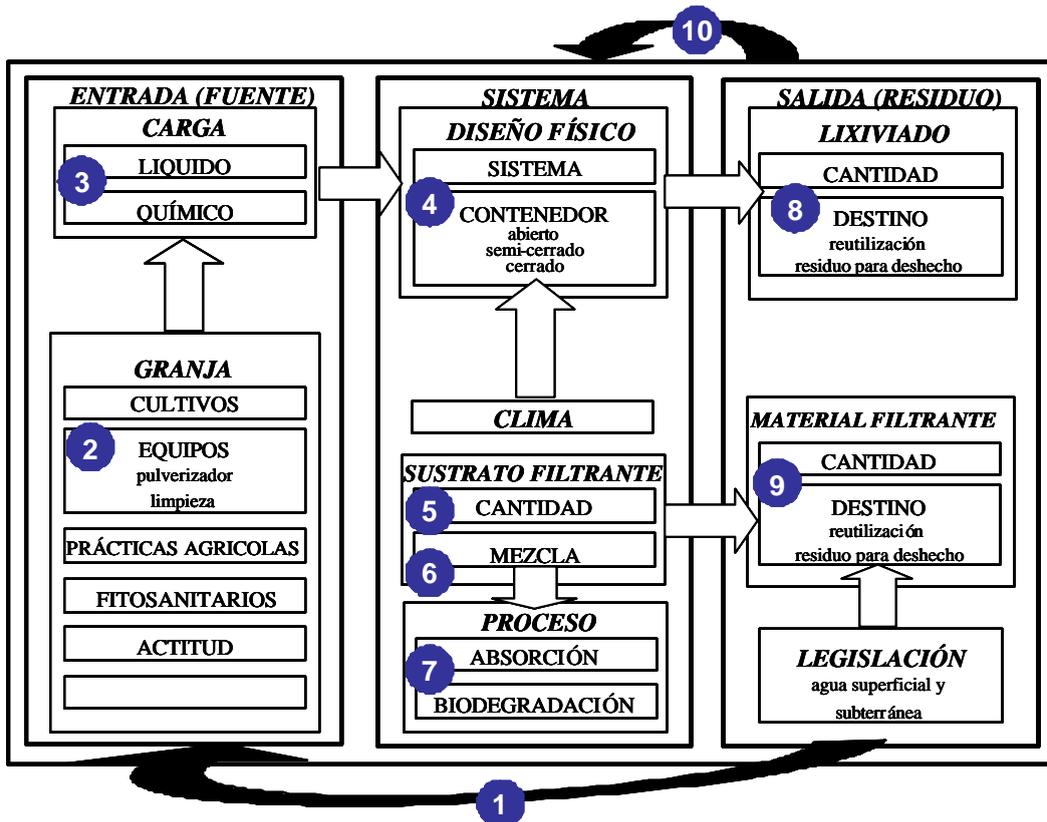


Fig. 1: Principio de funcionamiento de los sistemas de bio purificación. Los números hacen referencia a los títulos del texto (fuente: De Wilde *et al.* 2007).

## II) Sistema “Biobed”

El *Biobed* forma parte, o suele formar parte, de las zonas habilitadas en las explotaciones para los procesos de llenado y limpieza de los equipos de aplicación. Es importante destacar que para una correcta utilización y rendimiento del *biobed* es altamente recomendable que el equipo de aplicación se limpie previamente en el campo, inmediatamente después del tratamiento. De esta forma el sistema de bio purificación deberá gestionar únicamente aquellos residuos líquidos que no puedan extraerse del depósito o que no puedan ser distribuidos en la parcela. Esta reducción de la cantidad de líquido contaminado a gestionar redundará en una mayor purificación, y posibilitará la utilización de sistemas más pequeños y económicos.

Todos los *biobed* recomendados (Torstensson *et al.*, 1997 & 2000; Basford *et al.*, 2004) deben construirse de forma que se prevea y evite cualquier tipo de lixiviado que pueda contaminar las aguas subterráneas. En general se trata de excavaciones en el terreno (*biobed*) o construcciones superficiales (*biobac*) que permiten la recogida y el procesado de los líquidos residuales. En ambos casos, el espacio generado es rellenado, tras la correspondiente impermeabilización, con una mezcla activa formada por tierra proveniente de las capas superficiales del terreno (que contienen los microorganismos naturales que se encargan de la rotura y degradación de las materias activas), turba y paja.



Fig. 2: *Biobed* (fuente: Visavi)



Fig. 3: *Biobac* (fuente: Mybatec)

El revestimiento o impermeabilización del *biobed* debe realizarse con materiales impermeables como hormigón o plásticos resistentes, con una superficie abierta en la parte superior. En estos casos, los *biobed* impermeabilizados se consideran sistemas cerrados, ya que los efluentes que se generan son almacenados y evaporados de forma natural. En algunas zonas el *biobed* suele recubrirse con un material vegetal (hierba) que facilita la eliminación de los líquidos a través de la transpiración de la masa vegetal de la superficie. Algunos sistemas de *biobed* pueden utilizarse también como zonas de llenado y limpieza del equipo de aplicación, colocando éste en la parte superior (figura 2). Sin embargo en la mayoría de los casos el *biobed* se utiliza en combinación con otras zonas separadas de llenado y limpieza, desde las que el exceso de agua es drenado directamente al *biobed* o almacenado en depósitos intermediarios que permiten la alimentación indirecta y progresiva del sistema de bio purificación (figura 3). En este último caso, los líquidos contaminados pueden distribuirse de forma uniforme y homogénea en toda la superficie de tratamiento y repartir la cantidad total en el tiempo  $t$  que permite una utilización óptima y una mayor eficiencia. En zonas de lluvias abundantes o riesgo de tormentas es recomendable cubrir el *biobed* para prevenir su saturación con el agua de lluvia (variación del tipo de *biobed*: en zonas donde la intensidad baja en la utilización de fitosanitarios y el riesgo de lixiviados es muy bajo, se pueden utilizar *biobed* sin impermeabilizar, aunque la Guía de Buenas Prácticas Fitosanitarias recomienda su impermeabilización, especialmente en el caso de nuevas construcciones).

Un *biobed* tipo contiene aproximadamente de 10 a 30 m<sup>3</sup> de sustrato activo. En general su uso está pensado para tratar grandes volúmenes de líquidos

contaminados por grandes comunidades de agricultores, o bien para pequeñas explotaciones en régimen de utilización compartido. Dado que la vida útil media de un *biobed* se estima en 6 a 8 años, es al final de ese periodo cuando se debe reemplazar y gestionar el residuo sólido generado (sustrato activo). La recomendación general es la de distribuir uniformemente en el campo este residuo sólido con un remolque esparcidor de estiércol. Esta recomendación es oficial, no obstante, solo en algunos países miembros, por lo que se recomienda siempre consultar con los responsables de cada zona antes de realizar la distribución de los residuos.

### III) Sistema “*Biofilter*”

El principio de funcionamiento del *biofilter* es similar al del *biobed*. En ambos casos se recomienda la limpieza del pulverizador en el campo para que únicamente aquella fracción de líquido contaminado que no pueda extraerse sea tratada en el sistema de bio purificación elegido. Ello redundará en una mayor eficiencia y eficacia, posibilitando el diseño de elementos más pequeños y económicos.

El *biofilter* (Pussemier *et al.*, 2004) está formado por un conjunto de contenedores de aproximadamente 1m<sup>3</sup> de capacidad dispuestos verticalmente uno encima del otro y rellenos con una mezcla de sustrato activo similar al del *biobed* (figura 4). Este sistema puede modificarse (Debaer & Jaeken, 2006) añadiendo alguna unidad (contenedor) adicional colocada en el suelo y que contendrá material vegetal en su superficie para acelerar el proceso de purificación y evaporación (figura 5). En general, el *biofilter* es un sistema de purificación mucho más reducido y con mucha menor cantidad de sustrato activo, *biomix* (2-5 m<sup>3</sup>) que el *biobed*. En el caso de prever el manejo de grandes volúmenes se recomienda instalar sistemas *biofilter* en paralelo. El agua contaminada se recoge en un depósito o contenedor independiente, en la zona de llenado y limpieza, y se bombea hasta el contenedor superior del *biofilter*. Estos sistemas de gestión son en general sistemas abiertos con posibles lixiviaciones que deben ser recogidas. Estas a su vez se reciclan y bombean nuevamente al *biofilter* para su purificación, y una vez terminado el proceso pueden aplicarse en pulverización por ejemplo durante la aplicación de algún herbicida no selectivo. El diseño modular del *biofilter* es muy flexible, barato y no requiere grandes superficies. El concepto de recogida del líquido contaminado y el posterior bombeo progresivo diario de aproximadamente 30 litros hacia los contenedores de purificación permite distribuir en el tiempo todo el proceso de alimentación de los contenedores, evitando de este modo las sobrecargas del sistema. Este procedimiento además permite el mantenimiento continuo de un grado de humedad adecuado en el sustrato, lo que garantiza la pervivencia de los microorganismos y asegura la calidad de la acción degradante. En determinadas circunstancias la instalación de una cubierta evita la acumulación de humedad como consecuencia de las aguas de lluvia.



Fig.4: Biofilter (fuente: CRAw)



Fig.5: Biofilter modificado (pcfruit)

De la misma manera que ocurre en el *biobed*, el *biofilter* requiere la adición periódica de materiales degradables para compensar la mineralización del sustrato activo. El *biofilter* puede utilizarse sin grandes modificaciones durante 6 a 8 años (tras este periodo es necesaria una sustitución total de todo el sustrato activo). Como recomendación general se propone distribuir el sustrato sustituido en campo, utilizando un distribuidor de estiércol. Es importante señalar que esta recomendación es oficial únicamente en algunos países de la UE, por lo que se recomienda antes de proceder realizar la correspondiente consulta a los responsables locales.

## 2. Características de la explotación

Las características específicas de la explotación son las que determinan la cantidad total de agua contaminada que se va a generar y que el sistema de bio purificación elegido deberá procesar. Esta información es básica para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema. El número y tipo de cultivos, y el calendario previsto de aplicaciones permiten establecer el número de veces que se deberá limpiar el equipo de aplicación para prevenir posibles daños y/o residuos en el cultivo siguiente. Además, independientemente del modo de acción del operario, el tipo de pulverizador será determinante en el cálculo del volumen total de agua contaminada a gestionar. Los pulverizadores hidráulicos convencionales (barras) presentan valores superiores de contaminación en el interior, mientras que los pulverizadores hidroneumáticos (atomizadores para frutales y viña fundamentalmente) presentan mayor contaminación en el exterior de la máquina. En cualquier caso, las cantidades totales de agua contaminada dependerán de las características particulares de cada caso (longitud de la barra, capacidad del depósito, diseño del equipo...). La capacidad del depósito auxiliar y la disponibilidad de agua para el lavado en la

parcela determinarán a su vez la cantidad total de agua contaminada a gestionar por el sistema de bio purificación en la explotación. Un equipo con un volumen residual reducido y un depósito de limpieza grande cumplirá todo lo recomendado en la Guía de Buenas Prácticas Fitosanitarias y reducirá considerablemente el volumen de aguas contaminadas a tratar en el *biofilter* o el *biobed*, según cual haya sido la elección.

### 3. Consumo de agua y fitosanitarios

Una de las cuestiones más importantes a determinar previa la instalación de un sistema de bio purificación es la determinación de la concentración de materias activas media en el depósito del pulverizador y el volumen medio de aplicación. Además de los problemas de contaminación generados por pérdidas y salpicaduras de material concentrado durante el proceso de llenado y preparación de la mezcla, la principal fuente de contaminación de las aguas proviene del inadecuado manejo de los residuos internos y externos en el equipo de aplicación después del tratamiento.

La norma europea EN 12761 establece los requerimientos mínimos para un equipo de aplicación de fitosanitarios. Un factor importante es el que hace referencia al máximo volumen residual, definido por la norma ISO 13440. Este volumen residual se define como el volumen de mezcla que no puede ser distribuida por el equipo a la presión de trabajo previamente establecida. En la práctica se establece que este momento ocurre cuando la presión en el manómetro cae un 25%. Los límites máximos recomendados en la norma europea EN 12761-2 para pulverizadores hidráulicos y EN 12761-3 para pulverizadores hidroneumáticos (frutales y viña) se muestran en las tablas 1 y 2.

La norma europea EN 12761 permite calcular de forma aproximada la cantidad total de líquido residual que deberá ser tratado, en función de las características del equipo. En cualquier caso si se dispone de información detallada por parte del fabricante del equipo será esa la que se deba utilizar para el cálculo de los volúmenes a gestionar (diferentes trabajos de investigación han puesto de manifiesto grandes diferencias en función del tipo de equipo y del fabricante).

Tabla 1: Máximo volumen residual para pulverizadores hidráulicos (barras)

Volumen residual total en l (EN 12761-2)				
Depósito		Barra		Litros totales
Capacidad	0,5%	Ancho m	2 l/m	
800	4	15	30	34
3000	15	21	42	57
4200	21	36	72	93

Tabla 2: Máximo volumen residual para atomizadores (frutales y viña)

Volumen residual total en l (EN12761-3)		
Capacidad del depósito	%	Litros totales
400	4%	16
800	3%	24
1500	2%	30

Además del volumen residual anterior, hay que tener en cuenta el volumen de agua generado durante el proceso de limpieza externa del equipo de aplicación. La mayoría de los agricultores realizan la limpieza externa del pulverizador en la explotación. Sin embargo trabajos de investigación llevados a cabo ponen de manifiesto que la limpieza externa del depósito es mucho más efectiva si se realiza en la misma parcela al finalizar el tratamiento, especialmente si se trata de atomizadores para frutales. Otro requerimiento importante especificado en la Norma Europea es el que hace referencia a la capacidad del depósito auxiliar y de agua limpia para lavado. Esta deberá ser, para el caso de los pulverizadores hidráulicos, al menos del 10% del volumen nominal del depósito principal, o al menos 10 veces el valor del volumen residual.

El usuario deberá prestar especial atención a lo especificado en la normativa europea, ya que ensayos realizados en diferentes centros de investigación han puesto de manifiesto que no todos los equipos cumplen con lo especificado. Un uso más eficaz y económico del agua de lavado es esencial, especialmente si la limpieza externa del equipo se debe transferir a la parcela como una de las medidas más importantes para reducir la contaminación.

Basándose en los resultados de ensayos siguiendo el protocolo de ENTAM, Debaer *et al.* 2008 han demostrado la importancia de la dilución del volumen residual del pulverizador con la práctica del triple enjuagado. Para pulverizadores hidráulicos el contenido de materias activas en el volumen residual se redujo a 1/72 entre el testigo sin diluir (2900 g de materia activa) frente a la muestra tras el triple enjuague (40 g de materia activa). El método de lavado y enjuagado tiene pues una influencia capital en las características del volumen de agua contaminada que debe ser gestionada posteriormente por el sistema de bio purificación. Las figuras 6 y 7 muestran las diferencias entre pulverizadores, y el efecto del método de enjuagado en pulverizadores hidráulicos e hidroneumáticos.

Para los equipos con asistencia de aire (atomizadores), el principal foco de contaminación son las partes exteriores del mismo. Dependiendo del diseño y las características constructivas, sistema de asistencia de aire, tipo de boquillas y caudal de aire del ventilador, la contaminación externa varía entre el 0.33% y el 0.83% de la cantidad total aplicada (Balsari, 2006 /ISO-tests). Ejemplo: un productor de manzanas utiliza una media de 25 kg. de materia activa por hectárea y año. La contaminación externa del equipo de aplicación puede variar entre 82.5 g y 207.5 g por hectárea tratada.

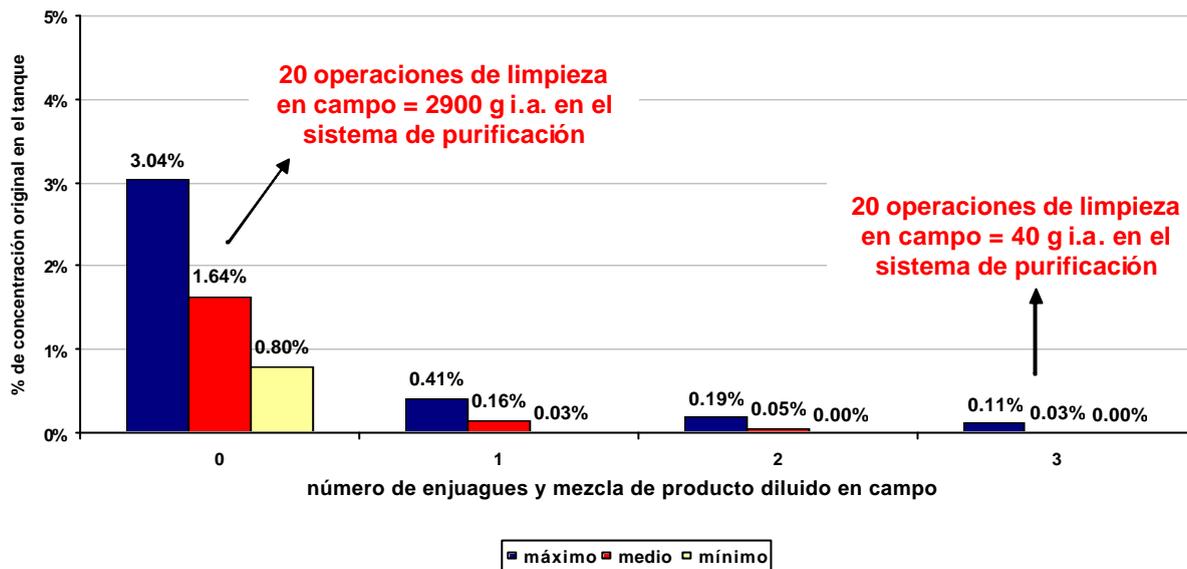


Fig. 6: Cantidad de materia activa que debe ser tratada por el sistema de bio purificación. Ensayo basado en el protocolo ENTAM para pulverizadores hidráulicos (94 modelos distintos) dependiendo del diseño del equipo y el método de limpieza. En el caso de 20 operaciones de limpieza en la parcela, y una concentración del líquido a pulverizar de 1000 g de materia activa en 250 litros/ha, el triple enjuague puede reducir en 2860 g la cantidad total de materia activa que retorna a la explotación para ser tratada, por pulverizador y año (fuente: Debaer et al, 2008).

En el caso de pulverizadores hidráulicos la contaminación externa puede variar entre el 0.01% -0.1% de la cantidad total aplicada, mientras que se pueden alcanzar valores de hasta el 0.47% para los mismos equipos pero con asistencia de aire (Wehmann, 2006 / ISO tests). En el caso de un agricultor que utilice una media de 1.5 kg de materia activa por hectárea, esto se traduce en 1.5 g de producto contaminante por hectárea, con un pulverizador hidráulico convencional, y en 7.5 g por hectárea en el caso de utilizar asistencia de aire.

La limpieza externa del pulverizador en el campo reduce enormemente la cantidad de producto a gestionar en el sistema de bio purificación, siendo este un aspecto especialmente crítico en el caso de pulverizadores hidroneumáticos. (Nota: la contaminación externa de los equipos puede sufrir variaciones importantes en función de las prácticas de aplicación).

La limpieza externa del pulverizador en campo cuando está todavía húmedo es mucho más efectiva que la limpieza en la explotación cuando el residuo externo se ha secado. Ejemplo: a baja presión (4 bar) el 97.5% del cobre depositado en las paredes exteriores del depósito puede eliminarse fácilmente cuando la limpieza se realiza inmediatamente después de la aplicación, consumiendo solo 2.55 litros por m<sup>2</sup> (Debaer et al., en preparación). Si el equipo se limpia 10 horas después de la aplicación, solo es posible eliminar el 70% del cobre depositado, y después de 20 horas la eficiencia de la limpieza a baja presión se reduce únicamente al 40% con la misma cantidad de agua. La misma eficacia en la limpieza tras más de 10 horas transcurridas desde la aplicación requieren al menos 5 veces la cantidad de agua

consumida a baja presión (12.75 litros por m<sup>2</sup>) Para unas dimensiones medias de un pulverizador hidroneumático convencional, estimadas en una superficie de 10 m<sup>2</sup>, la diferencia entre los procesos de limpieza en la parcela y en la explotación se cifra en unos 100 litros de agua limpia (25.5 litros en el campo frente a 127.5 litros en la explotación).

Los sistemas de limpieza a alta presión incrementan la eficiencia del proceso y permiten reducir la cantidad de agua necesaria (figuras 8 y 9). Cualquier residuo contaminante que permanezca en el exterior del depósito es fuente importante de contaminación, especialmente en determinadas condiciones ambientales (zonas de lluvias importantes).

Para limitar la cantidad de material contaminante es preciso, por tanto, realizar el proceso de limpieza en la parcela. Esta práctica no solo reduce el riesgo de contaminación de las aguas, sino que también reduce las dimensiones y las necesidades del sistema de bio purificación seleccionado para la explotación.

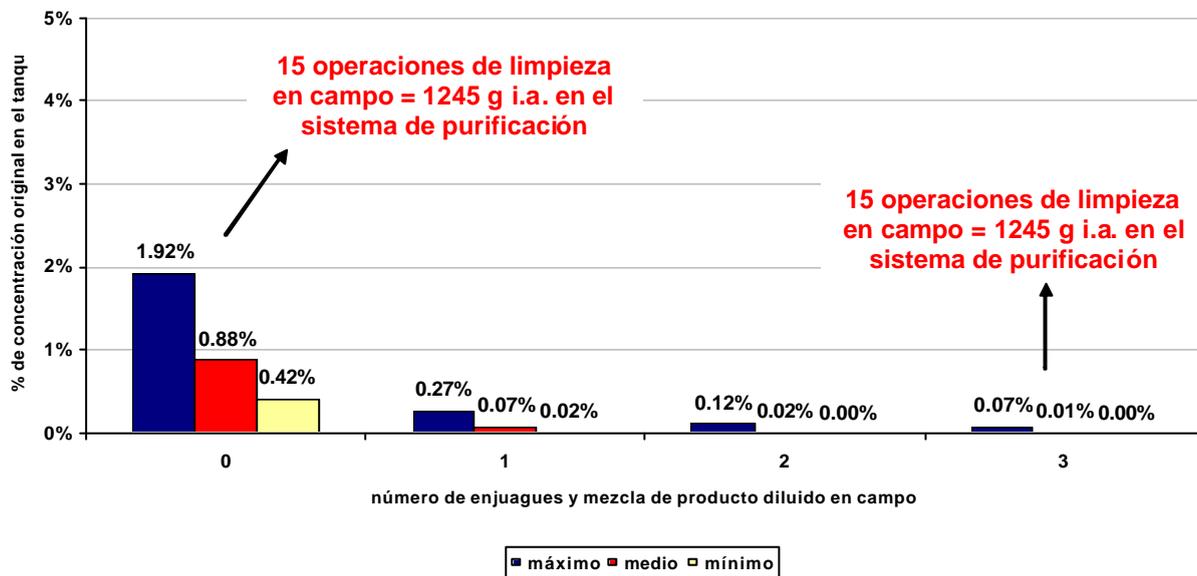


Fig. 7: Cantidad de materia activa que debe ser tratada por el sistema de bio purificación. Ensayo basado en el protocolo ENTAM para atomizadores (23 modelos distintos) dependiendo del diseño del equipo y el método de limpieza. En el caso de 15 operaciones de limpieza en la parcela, y una concentración del líquido a pulverizar de 2000 g de materia activa en 250 litros/ha, el triple enjuague puede reducir en 1232 g la cantidad total de materia activa que retorna a la explotación para ser tratada, por pulverizador y año (fuente: Debaer et al, 2008).

### a. Resumen del sistema de bio purificación

El sistema de bio purificación debería ser considerado como el paso final en el ciclo de prevención de riesgos de contaminación de las aguas por fitosanitarios.



Fig. 8 y 9: Limpieza exterior de un atomizador (fuente: pcfruit) y de un pulverizador hidráulico (LWK-NRW)

La cantidad total de agua contaminada y de materia activa a tratar determinarán las características y funcionamiento del sistema de bio purificación elegido. Para procesar pequeñas cantidades de líquido contaminante con bajas concentraciones de materia activa y lavados en la parcela combinados con algunas operaciones de lavado en la explotación, será suficiente con la construcción de un pequeño *biofilter*.

Grandes cantidades de líquido contaminante a alta concentración necesitarán para su adecuada gestión, un sistema de bio purificación en combinación con algunas infraestructuras más costosas como puntos específicos de llenado y limpieza. Esto será especialmente importante en el caso de que la limpieza no se realice en la parcela. En estos casos el sistema recomendable es el de un gran *biobed*.

#### 4. Diseño de los sistemas de bio purificación

La construcción de una zona integrada de llenado y limpieza permite combinar varios procesos de forma estructurada y reduce considerablemente el riesgo de contaminación en la explotación (figura 10). En estas condiciones cualquier vertido accidental puede ser recogido y procesado convenientemente.

##### a) Áreas de llenado y limpieza juntas o separadas

Las zonas de llenado y limpieza se pueden ubicar directamente sobre el *biobed* o en su proximidad. Ejemplos de *biobed* combinados con áreas de llenado y de limpieza se muestran en las figuras 11 y 12. En el caso de que el tractor y el equipo de tratamientos deban colocarse sobre el *biobed* es necesaria una estructura superior lo suficientemente resistente para soportar el peso de ambas unidades. En estos casos la siembra de una capa de hierba en la superficie del *biobed* facilita el mantenimiento de la humedad y ayuda a la eliminación del agua recogida (evapotranspiración). En estas circunstancias, y dado que el líquido contaminante fluye directamente del equipo de aplicación, la distribución regular en toda la superficie del *biobed* resulta en algunos casos difícil de conseguir. En otras circunstancias particulares, únicamente se coloca sobre el *biobed* el equipo de aplicación, quedando fuera el tractor (figura 13).

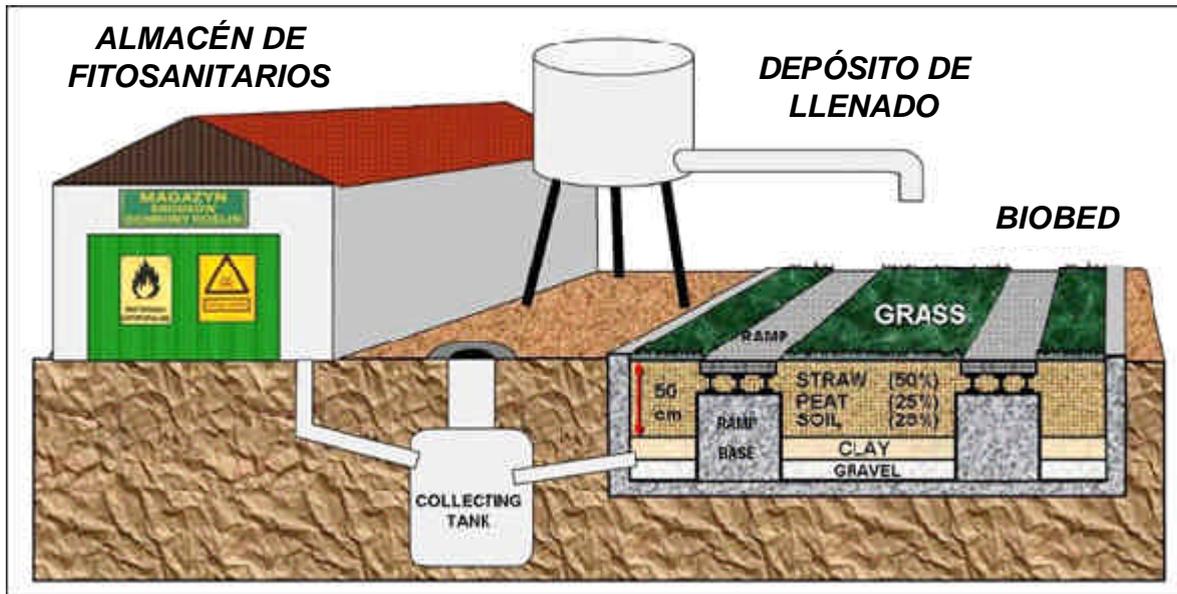


Fig. 10: Esquema de un sistema integrado de llenado y limpieza (fuente: ISK).

Instalaciones y procedimientos similares pueden emplearse cuando los líquidos contaminados se recogen independientemente y se envían con posterioridad al *biofilter* (figura 14). Esta opción permite una distribución más regular en el tiempo y en el espacio de los líquidos contaminantes en el sistema de bio purificación. Sin embargo en este caso la utilización de capas de hierba en el *biofilter* no es recomendable (la hierba no sobrevive ante la cantidad de líquido contaminado con herbicidas). El *biofilter* debe incorporar una cubierta para evitar la entrada del agua de lluvia, y la recirculación de los lixiviados es necesaria para prevenir el excesivo secado de la capa superior, especialmente en el caso de cargas irregulares. Los vertidos accidentales (salpicaduras, excesos de carga) durante las fases de llenado y limpieza deben ser a su vez recogidos y almacenados en el *biofilter*.

Las áreas separadas de llenado y limpieza en la explotación deben ser impermeables (hormigón) y deberán drenar directamente al contenedor de líquidos del sistema de bio purificación (figuras 15, 16 y 17). El disponer de estas zonas separadas permitirá la recogida de todos los líquidos primero, y su posterior circulación o bombeo al sistema de purificación. Esto permitirá la distribución uniforme en el tiempo, lo que evitará colmataciones o sobrecargas del sistema. En cualquier caso, si no existe cubierta de protección para el agua de lluvia, es preciso incorporar un circuito separado que evite la entrada de estas aguas en el circuito.

Algunos trabajos de investigación han demostrado que los vertidos accidentales durante la fase de llenado, incluso en las áreas asignadas, pueden acabar en las aguas superficiales, aún transcurridos largos periodos de tiempo. Por esta razón es preciso prever una limpieza periódica de la zona de llenado y lavado, y el consiguiente recogido y procesado de las aguas contaminadas que se generen.



Fig. 11: Guías sobre el biobed (fuente: Visavi). Fig. 12: Rejilla sobre un biobed

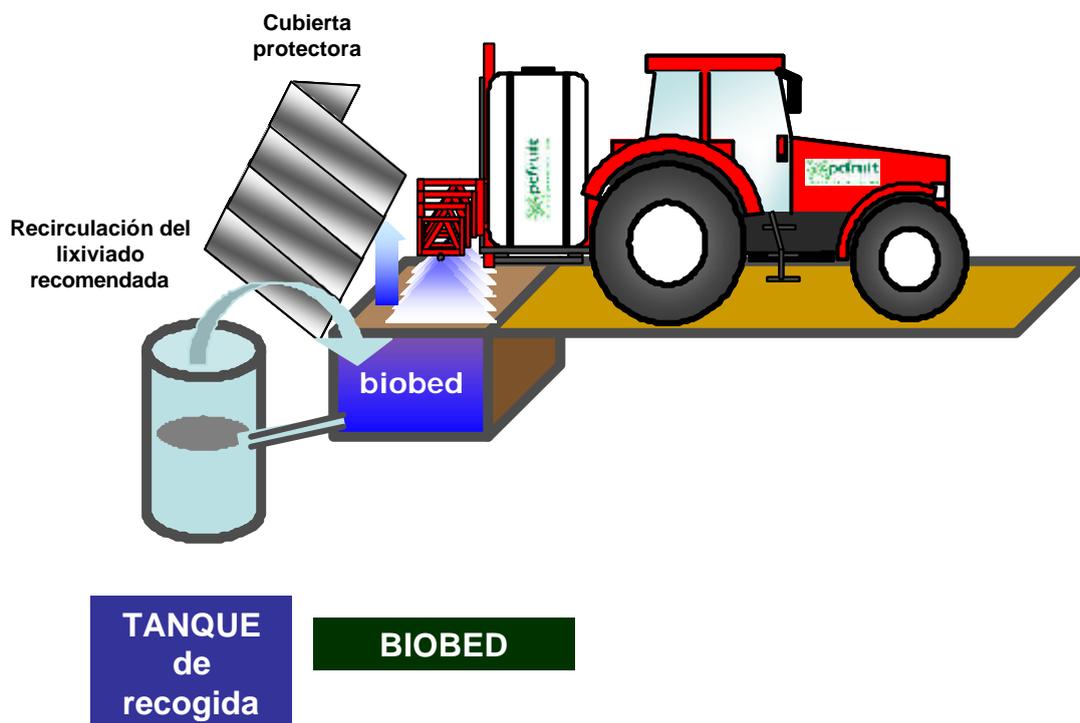
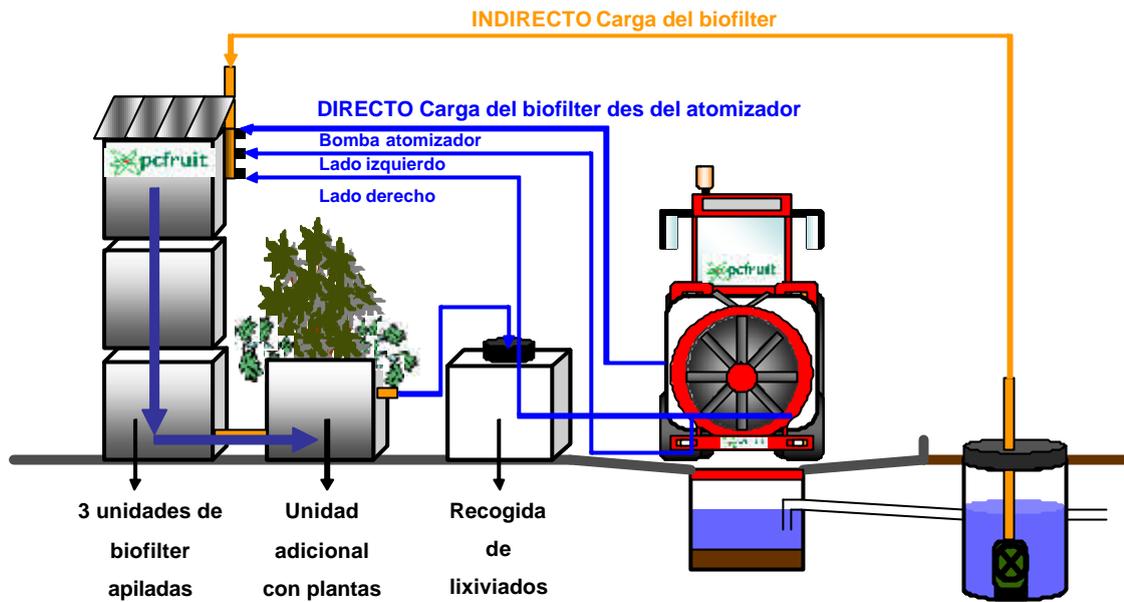


Fig. 13: Esquema de un biobed utilizado como zona de limpieza. El equipo de aplicación se coloca directamente sobre el biobed para recoger el volumen residual diluido (fuente: pcfuit).



**BIO FILTER**

**Zona de llenado y limpieza del equipo**

**Recogida y bombeo**

Fig. 14: Esquema de un biofilter con sistemas de carga directo e indirecto. La carga directa permite únicamente la gestión del volumen residual del equipo de aplicación. La alimentación indirecta desde la zona de limpieza y de llenado permite gestionar todos los líquidos contaminados (fuente: pcfruit).



Fig. 15: Zona destinada al llenado y limpieza del pulverizador (hormigón). En esta instalación se observan además equipamientos específicos para el llenado y la limpieza, así como puntos de drenaje de las aguas contaminadas para su posterior tratamiento en el sistema de bio purificación (fuente: DAAS).



Fig. 16 y 17: Zonas independientes de llenado y limpieza que permiten la recogida y gestión de las aguas sucias. Zona impermeable de hormigón (izquierda) o rejilla de drenaje (derecha) (fuente: ADAS).

Es preciso garantizar que las zonas de llenado y limpieza dispongan de una estructura independiente rodeada por un borde impermeable y/o una pendiente adecuada para garantizar la recogida de las aguas contaminadas.

### b) Depósito colector

La instalación de un depósito colector de aguas contaminadas tiene un coste adicional, pero es altamente recomendable ya que permite una adecuada gestión del volumen y del tiempo a la hora de alimentar el sistema de bio purificación de una manera uniforme. El tamaño del depósito colector deberá ser igual al volumen anual de líquido a gestionar. Dependiendo de las condiciones climáticas, un sistema de bio purificación funciona una media de 200-300 días por año. Las bajas temperaturas en invierno reducen considerablemente la actividad microbiana del sistema. Por otra parte, las operaciones de limpieza de los equipos no se distribuyen uniformemente a lo largo del año. Para un adecuado funcionamiento, la carga del *biobed* o *biofilter* debe realizarse de forma uniforme a lo largo de todo el periodo activo del sistema para asegurar continuidad en la actividad biológica.

Ejemplo: si la producción anual de agua contaminada es de 5000 litros, y el periodo de actividad del sistema (días con temperatura entre 15 y 20 °C) es de 200 días, significa que se deberían incorporar 25 litros diarios al purificador. La utilización de estos depósitos intermedios permite una mejora en la eficiencia y el rendimiento de las instalaciones, y posibilita diseños más reducidos. Para la carga del sistema con pequeños volúmenes de agua diarios, es necesaria la instalación de una bomba de bajo caudal conectada con un programador electrónico (discontinuo) o una bomba dosificadora (continua), como se aprecia en las figuras 18 y 19.

En situaciones en las que la dilución previa de los residuos contaminantes no pueda realizarse en campo, el depósito de acumulación permite la dilución añadiendo agua limpia, lo que facilitará la acción de los microorganismos del sistema de bio purificación.

### c) Sistemas abiertos frente a sistemas cerrados

La figura 20 presenta un esquema de un *biobed* abierto y un *biobed* cerrado. En los sistemas cerrados el exceso de agua o de humedad únicamente pueden perderse a través de la evaporación. En estos casos  $1\text{m}^3$  de sustrato es capaz de evaporar una media de 400-500 litros de agua/año, dependiendo de las condiciones climáticas. Esto representa que un sistema cerrado necesita  $2\text{m}^3$  de sustrato para tratar 1000 litros de agua contaminada (los datos se refieren a la situación en Bélgica, con una temperatura media de  $11\text{ }^\circ\text{C}$  y una pluviometría de 800 mm anuales). Se recomienda comprobar las condiciones particulares de cada caso. Los sistemas cerrados tienen el inconveniente de presentar riesgo de saturación en el caso de bajas tasas de evaporación y/o grandes cantidades de líquido contaminado a tratar. En estos casos la saturación afecta negativamente a la capacidad de absorción y degradación de las materias activas por parte del sustrato, y se generan elevadas cantidades de lixiviados (Fogg *et al*, 2004). Los problemas de saturación pueden reducirse colocando cubiertas protectoras para la lluvia y distribuyendo uniformemente la carga. La principal ventaja de los sistemas cerrados es que se elimina el problema de la generación de lixiviados, pero eso es únicamente cierto si la tasa de evaporación es capaz de eliminar el total de líquido contaminado.



Fig. 18 y 19: Ejemplo de depósito de auxiliar de polietileno de 4000 litros de capacidad y depósito enterrado de hormigón de 5000 litros, cercanos ambos a la zona de llenado y limpieza y con válvula de separación del agua de lluvia (fuente: pcfruit).

Los sistemas abiertos, por su parte permiten eliminar una porción importante del agua contaminada, mientras que el resto se recoge y almacena como lixiviado. En un sistema de estas características  $1\text{m}^3$  de sustrato puede procesar  $1.5\text{ m}^3$  de agua contaminada, de los cuales  $0.5\text{ m}^3$  se evaporan y el resto ( $1\text{ m}^3$ ) permanece como lixiviado. Los datos indican que los sistemas abiertos son capaces de gestionar y depurar una mayor cantidad de agua contaminada para un mismo volumen de sustrato, pero los lixiviados deben ser recogidos convenientemente en un depósito auxiliar. Estos lixiviados pueden utilizarse para su aplicación como herbicidas no selectivos en campo, o ser nuevamente reciclados haciéndolos circular nuevamente

por el *biofilter*. El uso de una cubierta vegetal añade mayor poder purificante y aumenta la tasa de evapotranspiración. Y en cuanto a la humedad, valores medios del 95% en el interior del sistema han mostrado los mejores resultados.

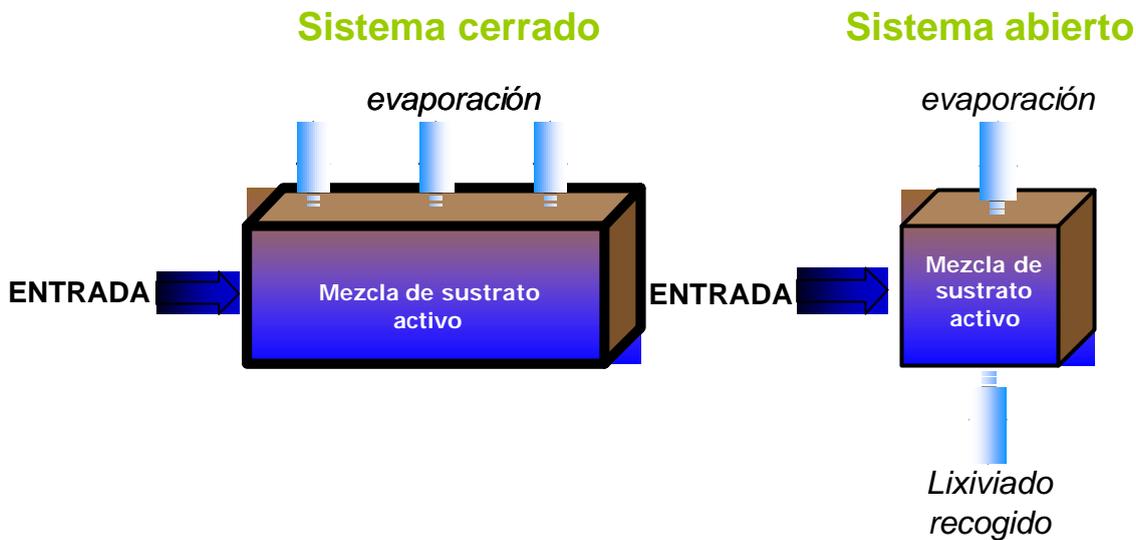


Fig. 20: Representación esquemática de un sistema cerrado y un sistema abierto.

#### d) Incorporación del líquido contaminado en el sistema de bio purificación

El líquido contaminado debe ser distribuido de forma uniforme en toda la superficie del sistema de purificación. Existen para ello diferentes alternativas o métodos. En la figura 21 se muestra la colocación de una superficie metálica plana que genera un abanico para la distribución del líquido en toda la superficie de un *biofilter*. Otra alternativa es la colocación de una tubería perforada (figura 22) en la parte superior del *biofilter*, siendo este sistema mucho más fácil de controlar que el anterior. Además de las boquillas de pulverización, que pueden utilizarse en sistemas grandes y pequeños, la utilización de tuberías perforadas (figura 24) o sistemas de riego por goteo (Basford *et al.*, 2004), son también una forma simple para conseguir una distribución uniforme. El procedimiento de carga regular del *biofilter* requiere la colocación de un depósito auxiliar para el almacenamiento de las aguas contaminadas.

#### e) Revestimiento e impermeabilización de los bio purificadores

Tanto el *biobed* como el *biofilter* deben estar contruidos con materiales impermeables. Normalmente las paredes del *biobed* se construyen con hormigón, aunque también existe la posibilidad de utilizar materiales plásticos (figuras 25 y 26). Por su parte los *biofilter* están contruidos normalmente a base de depósitos de polietileno de 1 m<sup>3</sup> de capacidad. En ambos casos la vida útil de los materiales plásticos es inferior a la del hormigón. La exposición a la luz del polietileno hace que su vida útil sea como máximo de 10 años.



*Fig. 21 y 22: Distribución uniforme del líquido contaminante en la superficie del biofilter utilizando una plancha metálica (izquierda, fuente CRAw) o una manguera agujereada (derecha, fuente pcfruit).*



*Fig. 23 y 24: Distribución uniforme del líquido contaminante en la superficie del biofilter o biobed utilizando boquillas de pulverización (izquierda, fuente POVLT) o tuberías perforadas (derecha, fuente Bayer CropScience).*



*Fig. 25 y 26: La utilización de plásticos es una alternativa al hormigón para garantizar la impermeabilidad del biobed (izquierda, fuente ADAS). El PE es ampliamente utilizado en la construcción de biofilters (derecha, fuente Mybatec).*

#### f) Cubiertas para la lluvia y/o circuitos separados para el agua contaminada y el agua de lluvia

Los sistemas de bio purificación deben aislarse de la lluvia especialmente cuando se utilizan zonas separadas de llenado y limpieza. Únicamente en el caso de que el sistema utilice cubierta vegetal, la cubierta puede no instalarse o si se hace debe ser de material transparente para asegurar la suficiente luz al cultivo. Ejemplos de sistemas de bio purificación cubiertos aparecen en las figuras 3, 4, 24, 26, 32, 33 y 37. Estos sistemas cubiertos separan las aguas contaminadas del agua de lluvia, evitando en cualquier caso problemas de sobresaturación.

#### g) Drenaje de los sistemas de bio purificación

Los sistemas abiertos, como los *biofilter*, necesitan siempre un sistema de drenaje en la parte inferior de cada unidad que permita la extracción de los lixiviados hacia la siguiente unidad o hacia el depósito de almacenamiento. La forma más práctica es utilizar una tubería de drenaje, tal como se muestra en la figura 27. Con este sistema no solo se garantiza el drenaje completo sino que también se evitan colmataciones y obturaciones de la salida. Este sistema puede utilizarse también en el caso de *biobeds*. Como se muestra en la figura 10, la utilización de grava y arcilla es también una posibilidad, aunque el efecto de la arcilla reducirá la velocidad de drenaje considerablemente y podrá dar lugar, en algunos casos, a la formación de tapones que impedirán el vaciado completo.



Fig 27: Tubería de drenaje en un biofilter.

#### h) Utilización de la cubierta de vegetación

La utilización de una cubierta de vegetación tiene numerosas ventajas. La capa superficial de hierba en la zona de carga del *biobed* mantiene un óptimo balance de humedad ya que permite la evaporación del agua, a la vez que evita las condiciones de excesiva sequía (figuras 2, 10, 11 y 28). Además el sistema radicular permite optimizar las condiciones del suelo para los microorganismos responsables de la degradación de las materias activas. La incorporación directa de los líquidos contaminados en el *biobed* puede provocar en algunos casos problemas de

fitotoxicidad de la cubierta vegetal, si aquellos no están lo suficientemente diluidos. Por su parte los *biofilter* pueden complementarse con unidades adicionales provistas de cubierta vegetal cuando la concentración de materia activa (especialmente herbicidas) es lo suficientemente reducida como para garantizar la supervivencia de vegetación específica (figura 29). Algunos trabajos ponen de manifiesto que determinadas especies (*Carex* spp.) son muy resistentes a los herbicidas, mientras que otras especies arbustivas o leñosas (*Salix* spp.) presentan mayor capacidad de evaporación (Debaer *et al.*, 2007). *Carex* spp. concretamente incrementó la evaporación del sistema en más de 500 litros por m<sup>2</sup> plantado y por año, mientras que *Salix* spp incrementó la evaporación en más de 1000 litros por año. Cuando se utilizan superficies vegetales suficientes, es posible eliminar el problema de lixiviados, incluso en sistemas abiertos.



Fig. 28 y 29: Superficies de vegetación en la zona de carga del biobed (izquierda, fuente Visavi) y *Carex* spp en una unidad adicional en un biofilter (derecha, pcfuit)

Se recomienda seleccionar especies no invasoras para impedir o evitar la invasión de toda la zona cercana al sistema de bio purificación. Por otra parte si no se prevé la utilización de herbicida se recomienda seleccionar especies dicotiledóneas que incrementan su capacidad de evaporación. Para las situación en las que se utilicen herbicidas de amplio espectro, las especies mencionadas anteriormente, *Carex* y *Salix* son recomendables.

i) Ejemplos

I. Biobed impermeabilizado

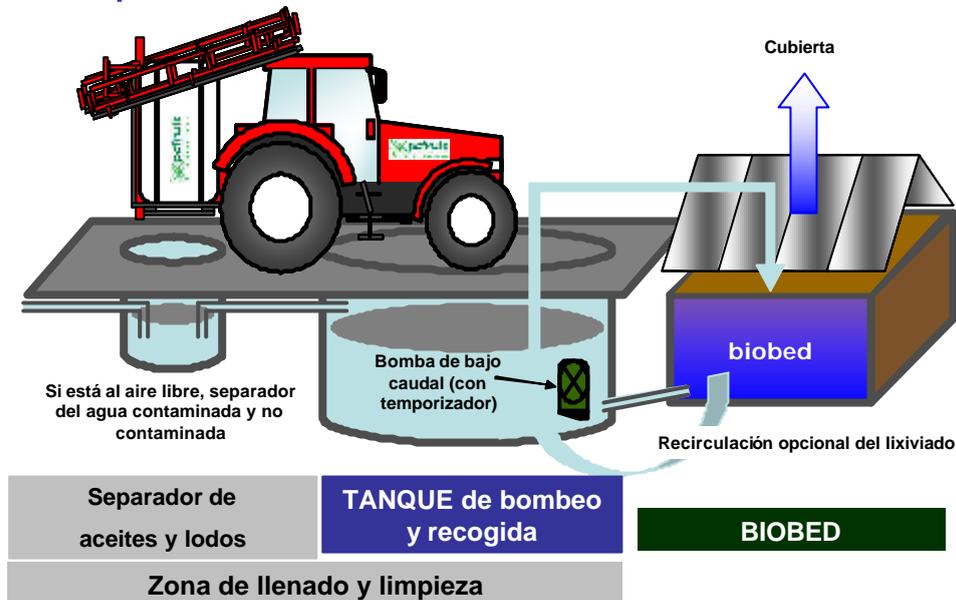


Fig. 30: Esquema de construcción de un biobed impermeabilizado. Los líquidos contaminados se separan del agua de lluvia. El depósito colector permite distribuir de forma regular todo el líquido contaminado proveniente de las zonas de llenado y limpieza. Las posibles saturaciones se pueden evitar cubriendo el biobed y protegiéndolo de la lluvia, así como con un adecuado sistema de drenaje de los lixiviados (fuente pcfruit)

II. Ejemplos de diferentes sistemas de biofilter

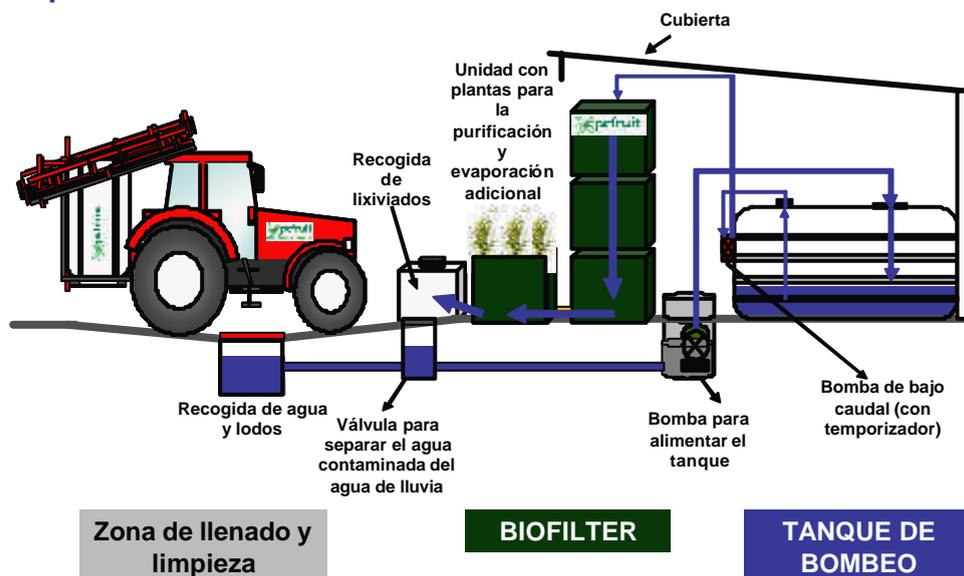


Fig. 31: Área de llenado y limpieza (zona abierta) equipada con un sistema de biofilter de 3 + 1 unidades (fuente pcfruit). La separación de los líquidos contaminados y el agua de lluvia se llevan a cabo gracias a un sistema de válvulas individuales. Los líquidos contaminados son bombeados a un depósito de 4000 litros. Desde este depósito se bombean a su vez 25 litros diarios a la parte superior del biofilter. Este sistema ha gestionado 6300 litros el año 2007, de los que 4000 litros se recogieron como lixiviados y 2300 se evaporaron (Debaer et al., 2007).

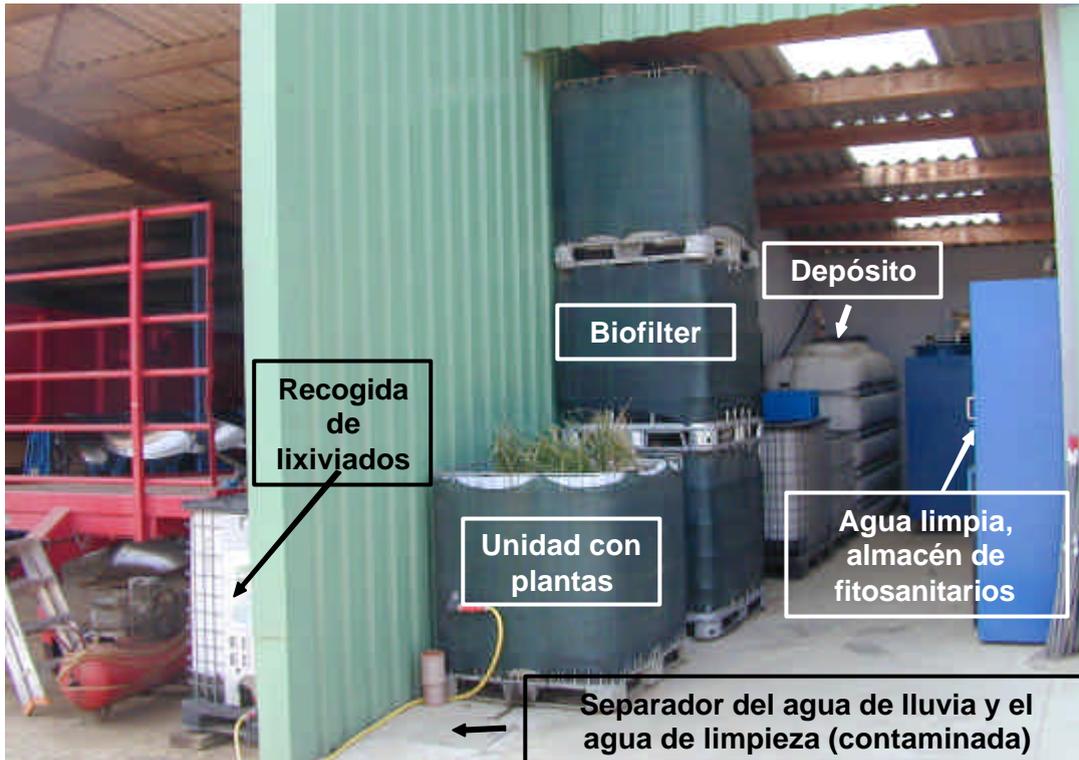


Fig. 32: Sistema integral de llenado y limpieza con un biofilter modificado de 3 + 1 unidades, similar al de la figura 31 (fuente pcfruit). El drenaje de la unidad adicional con cubierta vegetal se sitúa justo al final del sistema radicular. Todos los lixiviados son recogidos.

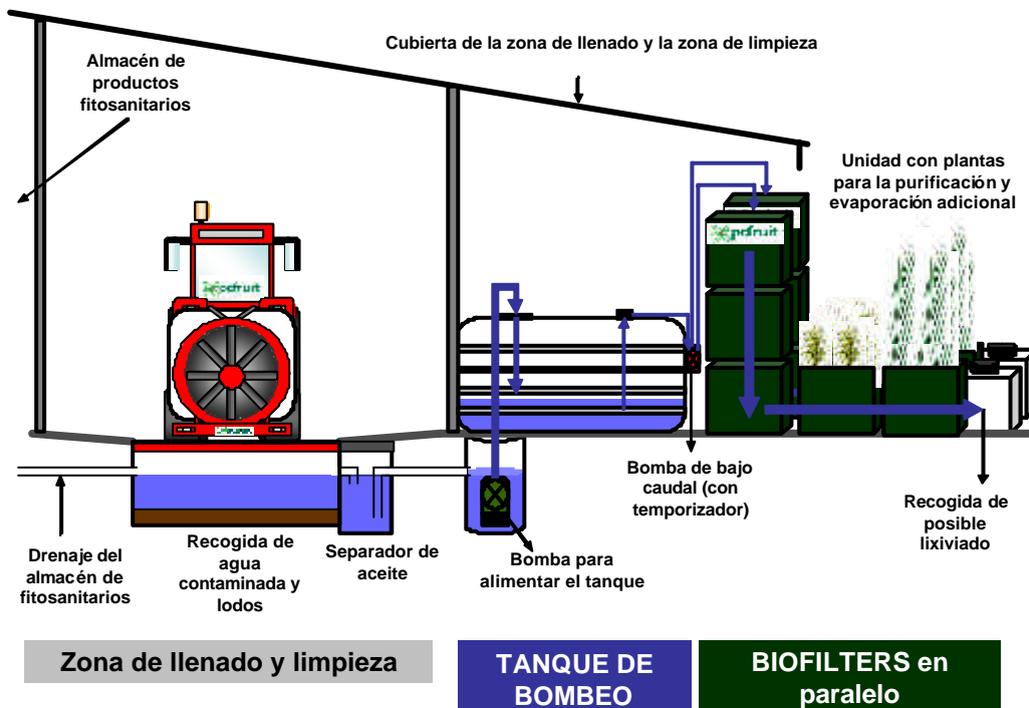


Fig. 33: Sistema integrado de llenado y limpieza equipado con 2 biofilter en paralelo provistos de 3 + 2 unidades cada uno (fuente pcfruit). Todas las zonas (llenado, limpieza y bio purificación) están cubiertas por una estructura que evita la entrada del agua de lluvia.

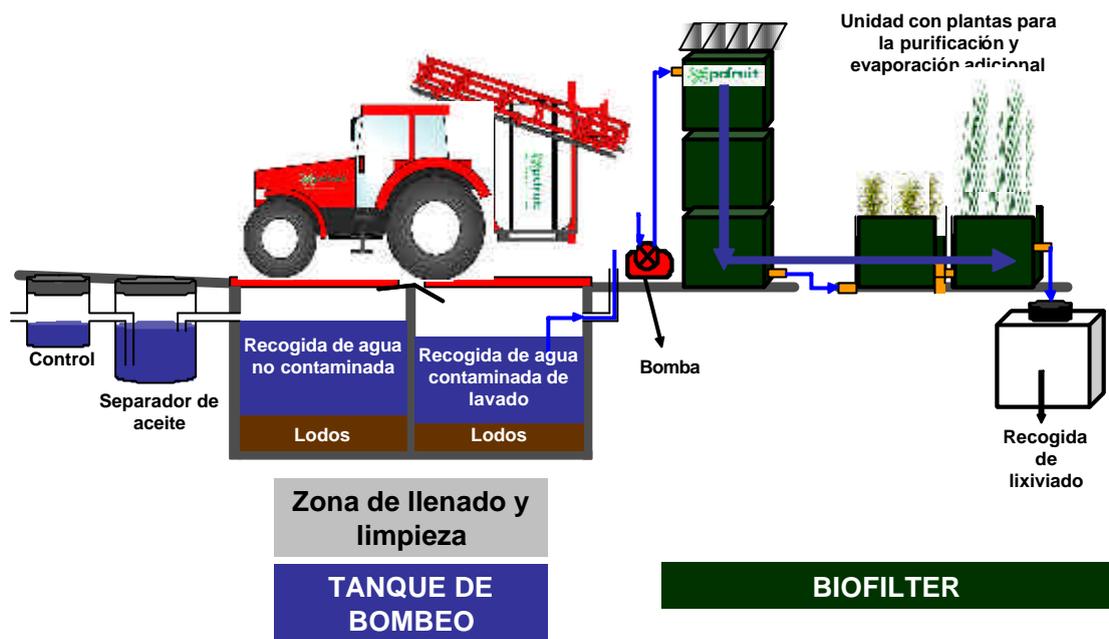


Fig. 34: Zona de llenado y limpieza equipadas con un sistema de biofilter modificado de 3 + 2 unidades (fuente pcfuit). El agua de lluvia y el agua de lavado se gestionan por separado en dos depósitos independientes situados debajo de la zona de llenado y limpieza. Los líquidos contaminados se bombean hasta la parte superior del biofilter con una bomba programada.



Fig. 35 y 36: Para conseguir un adecuado contenido de humedad en las dos unidades superiores de este biofilter modificado, se mantiene en la parte baja de cada unidad una zona saturada de humedad de forma que permita al agua ascender por capilaridad. Esto puede conseguirse conectando a la salida de la unidad una tubería que se dobla hacia arriba. La altura de la zona saturada viene determinada por la altura a la que llega el agua en la tubería dispuesta en posición ascendente. Diferentes alturas pueden habilitarse (izquierda). Conectar a su vez el final de la tubería con la siguiente unidad de biofilter (figuras 21-24).

## 5. Dimensionamiento de los sistemas de bio purificación

El modo de calcular la cantidad total de sustrato necesario para tratar un determinado volumen de líquido contaminado en sistemas abiertos o cerrados ha sido ya explicado con anterioridad (capítulo 4, sección IV). Para el caso de sistemas cerrados las consideraciones se basan en la posible evaporación para evitar la saturación del sustrato. En el caso de sistemas abiertos es fundamental la eficiencia de filtrado (Pussemier *et al.*, 2004; Pigeon *et al.*, 2005; Debaer *et al.*, en preparación). Existe sin embargo un error al considerar que los *biobeds* (sistemas cerrados) son capaces de tratar mayor cantidad de líquido contaminado que los *biofilter* (sistemas abiertos). Esto puede deberse al hecho de que el *biobed* esta pensado como un sistema de grandes dimensiones, y utiliza mayores cantidades de sustrato activo que los pequeños *biofilter*. De hecho el mismo volumen de sustrato activo en un sistema abierto puede tratar mayores cantidades de líquidos contaminados si los líquidos lixiviados son recogidos y nuevamente reciclados. Los sistemas abiertos que utilizan vegetación pueden, además, si las dimensiones son las adecuadas, eliminar por completo los lixiviados.

Es evidente en cualquier caso que tanto la cantidad de materias activas a degradar como la de líquidos contaminados deben ser reducidos a la más mínima expresión. Por tanto, desde el punto de vista de productos contaminados generados por estos sistemas de purificación, tanto los líquidos como los sólidos generados deberán minimizarse mediante un adecuado dimensionamiento basado en las características particulares de cada caso.

El principio fundamental de la bio purificación es la rotura de las moléculas de las materias activas, y no solo una reducción de la concentración de las mismas. En este sentido, una adecuada planificación de un sistema de bio purificación lleva implícito un preciso balance entre entradas y salidas. Esto puede explicarse mejor con un ejemplo de un sistema cerrado (*biobed*), un sistema abierto (*biofilter*) y un sistema abierto modificado (*biobed*) sin lixiviados, que se muestran todos en la figura 37.

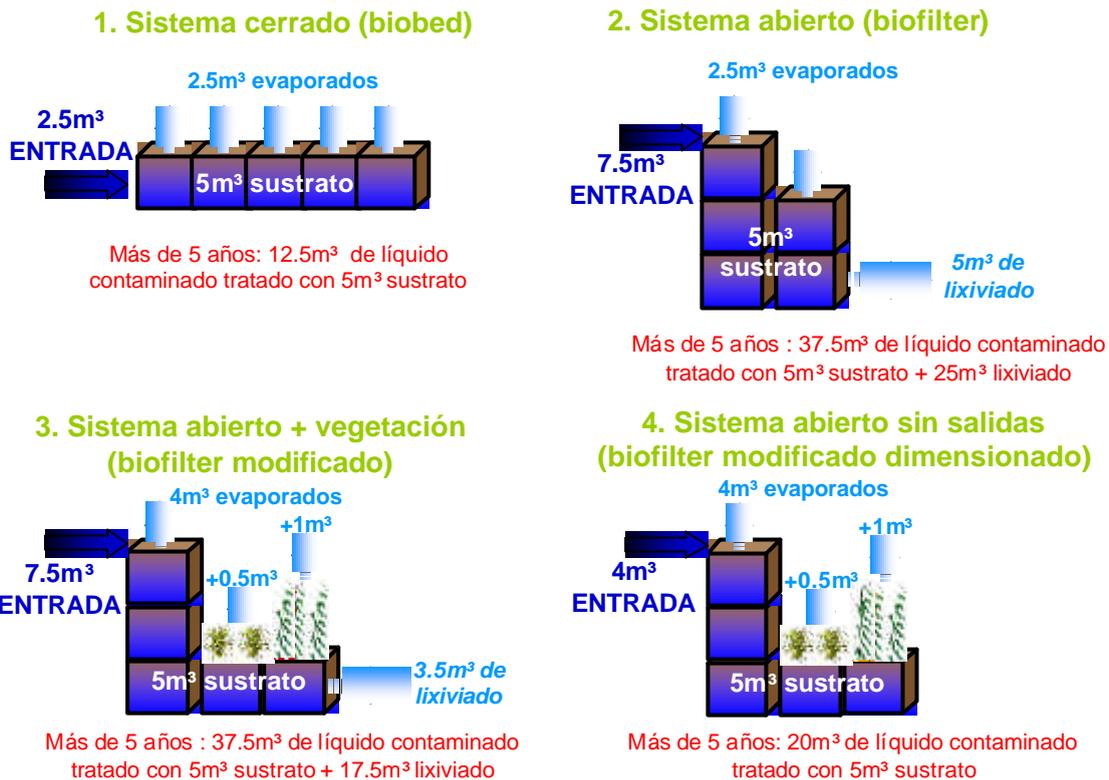


Fig. 37: Ejemplos de dimensionamiento de sistemas de bio purificación. 1: representa un típico biobed, con un gran volumen de sustrato activo; 2: biofilter con un elevado volumen de líquido lixiviado que debe ser reutilizado en el campo o reciclado en el propio sistema; 3: ejemplo del efecto de la vegetación en el incremento de evaporación del exceso de agua, lo que es únicamente posible en sistemas de flujo abierto ( $2,5+0,5+1 = 4m^3$ ). De acuerdo con la experiencia en este específico ejemplo la purificación de las tres primeras unidades no es suficiente para la pervivencia de las plantas de la unidad 4 y 5 debido a la elevada concentración de los líquidos contaminados (no existe lavado previo en campo); 4: indica como un adecuado dimensionamiento de un sistema abierto utilizando vegetación puede eliminar completamente los lixiviados, presentando una gran capacidad y una elevada eficiencia en el tratamiento de líquidos contaminados. Sin embargo, para el tratamiento de grandes cantidades es preciso un diseño físico mucho más preciso (fuente pcfrit).

## 6. Mezcla de sustrato activo (diferentes sustratos y su función)

Originalmente la mezcla más habitual utilizada como sustrato en los sistemas de bio purificación consiste en aproximadamente 50% de paja, 25% de turba y un 25% de tierra (tierra fértil de la capa superficial). Varios estudios llevados a cabo ofrecen más información sobre el comportamiento y la composición de estas mezclas activas.

### a) Tierra fértil (superficial) – fuente de microorganismos

La tierra utilizada para la formación de la mezcla activa en los sistemas de bio purificación proviene de terrenos agrícolas en los que con anterioridad se han

realizado aplicaciones de productos fitosanitarios y contiene, por tanto, los microorganismos esenciales para su degradación cuando se mezcla con el resto de componentes del sustrato. Estos microorganismos pueden ser hongos o bacterias, y en ambos casos utilizan las materias activas como fuente de carbono para su alimentación. Es importante que esta fracción de tierra provenga de terrenos agrícolas ya que de este modo los microorganismos están ya adaptados al uso de materias activas y a su degradación. Este componente, a diferencia del resto que componen el sustrato activo, es el único que no puede sustituirse por ninguna otra alternativa. Sin embargo la proporción en la que se utilice puede reducirse sin pérdida de eficacia en la degradación. Esto puede ser una ventaja en el caso de que la posterior distribución en la parcela no esté permitida por la legislación.

### **b) Paja**

La paja actúa como una fuente adicional de alimento para los microorganismos. Es una fuente de lignina, esencial para que estos sean capaces de producir enzimas que degradan la lignina, que son además los encargados de degradar la mayor parte de las materias activas. La paja es además una importante fuente de nitrógeno, lo que redundará en un ratio adecuado de la relación C/N, muy interesante para las bacterias. La mezcla de sustrato activo mineraliza rápidamente la paja, produciéndose unas pérdidas anuales de alrededor de un 10%, por lo que es necesaria la incorporación de paja cada año.

### **c) Fibra de coco**

La fibra de coco triturada es una fuente interesante de carbón que puede actuar como sustituto de la paja, combinando además las buenas propiedades de mantenimiento del agua con la de producir una buena aireación. Las mezclas que contienen fibra de coco mineralizan mucho más lentamente que las que contienen paja, reduciendo de este modo las necesidades de incorporación en cada campaña. La sustitución total de la paja por la fibra de coco no afecta a la eficiencia de la degradación.

### **d) Turba**

La turba es una sustancia que incrementa la capacidad de absorción de las materias activas. Ayuda a mantener las condiciones aeróbicas y esto, combinado con un incremento de la humedad debido a su gran capacidad de almacenamiento de agua le confieren grandes propiedades purificantes. Sin embargo la turba no se considera un material sostenible y por tanto no se recomienda su utilización.

### **e) Sustrato agrícola orgánico**

Tiene las mismas funciones y características que la turba, y puede por tanto reemplazarla en la composición de los sustratos activos. El sustrato orgánico contiene normalmente turba blanca y turba negra, aunque en algunos casos la turba se sustituye parcialmente o se reemplaza por materiales provenientes del coco.

## f) Estiércol de vacuno

El estiércol es un elemento adicional que añadido al sustrato incrementa las fuentes de nitrógeno mediante la aportación de nitratos. Algunos investigadores (Genot *et al*, 2002) han demostrado que esta adición de estiércol puede incrementar la degradación de las materias activas, en especial por su potenciación de la degradación bacteriana. Experiencias donde la degradación fue producida fundamentalmente por hongos mostraron que un bajo nivel de nitrógeno potencia la degradación (Castillo *et al* 2008). Como objetivo se proponen valores de la relación C/N entre 10 y 20.

## 7. Mezclas de sustratos

Originalmente la mezcla de sustrato activo utilizada en un *biobed* consistía en un 50% de paja, un 25% de turba y un 25% de tierra fértil (agrícola). Sin embargo, recientes investigaciones han puesto de manifiesto que:

- La fracción de tierra fértil es especialmente útil para inocular el sistema, pero su proporción puede reducirse hasta niveles del 5% sin pérdida de la capacidad de degradación (Sniegowski *et al* en preparación). Esta reducción puede además incrementar la retención de las materias activas en el sistema y, en consecuencia, su biodegradación (De Wilde *et al.*, en preparación).
- Alternativas como la fibra de coco y sustrato orgánico mezclados en diferentes proporciones no afectan a la capacidad de retención (De Wilde *et al.*, en preparación).
- La incorporación de un 5 a un 10% de estiércol de vacuno puede incrementar la retención y la degradación de las materias activas (Genot *et al.*, 2002; De Wilde *et al.*, en preparación).

La figura 38 muestra diferentes posibilidades de mezclas de sustrato activo de acuerdo con los resultados de las investigaciones. La sustitución de la paja en el contenedor superior de un *biofilter* modificado por fibra de coco permite un mayor sellado del sistema. En los contenedores siguientes la fracción de suelo agrícola se reduce al 5-10%, y el sustrato orgánico se incrementa hasta un 40%, generando una mayor capacidad de retención e incrementando la biodegradación. La incorporación de un 5-10% de estiércol de vaca permite reducir el sustrato orgánico hasta un 30-35%. Los contenedores con cubierta vegetal conviene rellenarlos con una capa de drenaje formada por fibra de coco en la parte inferior (10%) y un 80-90% de sustrato en la parte superior, mezclada a su vez con un 0-10% de estiércol de vaca.

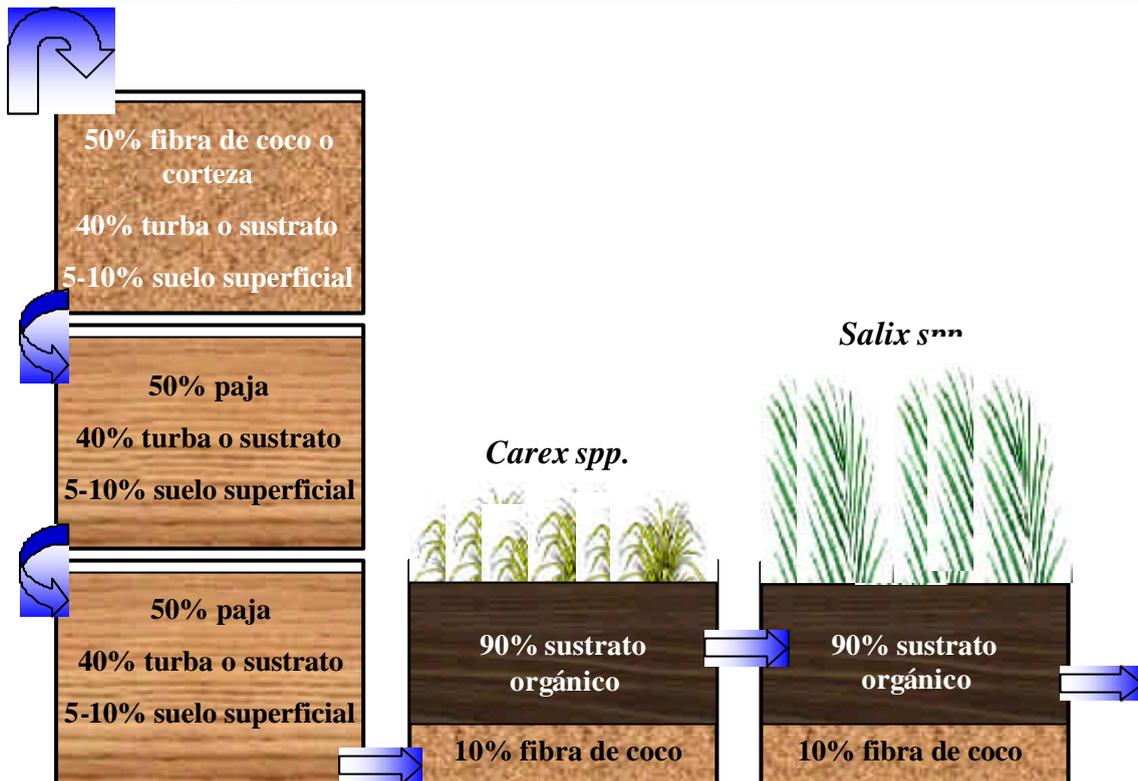


Fig. 38: Ejemplo de mezclas de sustratos activos en un biofilter modificado (fuente pcfruit).

Los porcentajes de cada uno de los componentes se expresan siempre en volumen. Para la consecución de mezclas homogéneas el tamaño máximo de las partículas en la mezcla no debe superar los 2-4 cm (por ejemplo la longitud de la paja debe ser como máximo de 4 cm). Para conseguir una mezcla homogénea se sugiere la utilización de una hormigonera convencional.

#### a. Llenado de los sistemas de bio purificación con el sustrato activo

El llenado de los sistemas de bio purificación impermeables es un proceso clave. Si la mezcla está muy comprimida, la retención será elevada debido a la lenta penetración y el prolongado tiempo de contacto entre el líquido contaminante y el sustrato. Sin embargo un exceso de compactación puede provocar una falta de aireación que dificultará la degradación aeróbica. Por otro lado, si la mezcla no está lo suficientemente compactada la retención será escasa, especialmente si el líquido contaminado no se distribuye de forma homogénea por toda la superficie, y los lixiviados aparecerán rápidamente. Mezclas con bajo contenido en suelo y elevado contenido en turba tienen una muy buena aireación, incluso en el caso de compactaciones elevadas.

## b. Mantenimiento del sustrato activo

Cuanto más intensa es la utilización del sistema de bio purificación mayor es la degradación del sustrato al disminuir la capacidad microbiológica y el contenido de carbono. La mineralización del sustrato activo depende de la composición y del tamaño de las partículas de los componentes. Una mezcla que contiene un 50% de paja picada mineralizara y se reducirá la cantidad total de sustrato aproximadamente 10 cm cada año. Para compensar estas pérdidas, debe añadirse material fresco y mezclarlo convenientemente con el ya presente. Esto debe hacerse cada año o cada dos años. Es necesario mantener, en cualquier caso, una altura de filtrado mínima de 60 cm. Transcurridos algunos años, las mezclas deben ser repuestas completamente debido a su extenuación o pérdida de su capacidad biodegradante. Torstensson (2000) puso de manifiesto que en el sur de Suecia las mezclas activas deben ser reemplazadas cada 5-6 años.

## 8. El proceso de absorción y biodegradación

Varios investigadores han demostrado que, en condiciones diversas y no óptimas, un sistema de bio purificación puede degradar hasta el 93% de las materias activas que recibe, recogándose un 4% en los lixiviados mientras que el 3% restante permanece retenido en el sustrato activo. En óptimas condiciones ese porcentaje alcanza valores del 99%, con algunas excepciones para el caso de materias activas “móviles”.

### a. Principio

El control y la optimización de los procesos de la bio purificación es un sistema complejo en el que intervienen muchos factores. Entre ellos se encuentra la existencia de poblaciones microbianas capaces de la degradación de las materias activas. Factores ambientales como el tipo de suelo, la temperatura, el pH, la presencia de oxígeno y otros aceptores de electrones, así como la disponibilidad de nutrientes influyen en la eficiencia de la degradación (Vidali, 2001). Uno de los aspectos más determinantes es la accesibilidad de los microorganismos a las materias activas a degradar (lo que se conoce como *bio disponibilidad* –Thompson, 2001). La bio degradación de un componente orgánico se consigue casi exclusivamente cuando sus componentes se disuelven en la humedad del suelo que rodea los microorganismos. En otras palabras, los microorganismos están situados en la estrecha lámina de agua que rodea la superficie de las partículas de sustrato. Por esta razón, un incremento de la superficie específica de un sustrato, sin pérdida de la bio disponibilidad debido a los microporos (arcillas), redundará en un mejor proceso de biodegradación por parte de los organismos (Fig. 39).

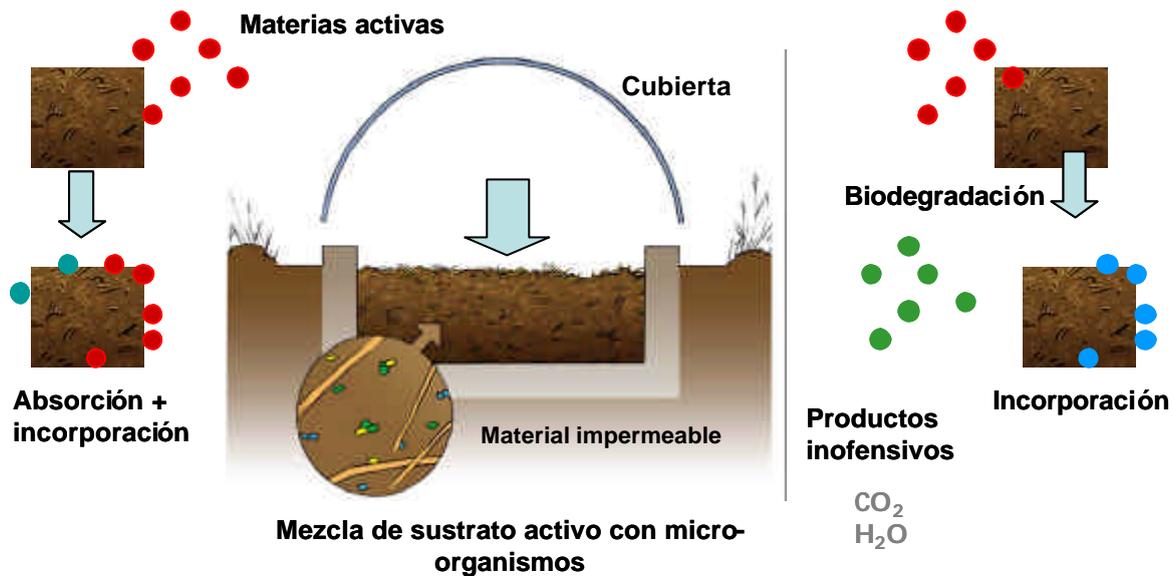


Fig. 39: Los dos procesos químicos que intervienen en la bio purificación. En la izquierda de la imagen se representa la absorción y la incorporación. A la derecha se ilustra la bio degradación, que tiene lugar después de la absorción de las materias activas por el sustrato, y posteriormente la degradación (fuente: Bayer CropScience y KULeuven).

## b. Factores que afectan a la absorción y a la biodegradación

Numerosos trabajos han analizado la influencia de diferentes factores en la degradación de las materias activas.

- Elevadas concentraciones de materias activas pueden limitar la biodegradación (Fogg *et al.*, 2003). Por ello, como se ha mencionado anteriormente es altamente recomendable lavar el pulverizador en el campo para garantizar una óptima eficiencia del sistema de bio purificación y que este tenga que tratar únicamente volúmenes diluidos.
- La degradación se puede inhibir en el suelo cuando se aplican mezclas de materias activas, pero no se inhibe si el sustrato está formado por una mezcla de componentes. Esto sugiere que los sistemas de bio purificación son capaces de degradar un amplio abanico de mezclas de materias activas (Fogg *et al.*, 2003).
- El contenido de humedad es esencial durante el proceso de bio purificación (el valor óptimo se cifra en un 95%). Sin embargo la saturación de humedad (100%) puede llevar a un exceso de lixiviados (Fogg *et al.*, 2004). Para evitar las pérdidas de materias activas móviles, la profundidad del sistema de bio purificación puede incrementarse o bien evitar la humedad excesiva.
- El uso continuado de unas determinadas materias activas durante varios años puede incluso acelerar y mejorar el proceso de bio purificación debido fundamentalmente a la adaptación de los microorganismos (Fournier *et al.*, 2004).

## 9. Lixiviados

Los lixiviados, líquidos generados en el fondo de los sistemas de bio purificación, deben ser recuperados siempre. **NO DRENAR NUNCA LOS LIXIVIADOS EN ZONAS CON PRESENCIA DE AGUA.** Dependiendo de la situación específica de cada explotación, y de los condicionantes legales en vigor, se sugiere adoptar las siguientes medidas:

- Recircular los lixiviados nuevamente al sistema de bio purificación. Esta práctica incrementará la evaporación.
- Reutilizar los lixiviados como herbicida no selectivo para aplicaciones en el campo.
- Repartir los lixiviados en el campo de forma uniforme, teniendo en cuenta la posible presencia de aguas superficiales y zonas de riesgo.
- Evaporar los lixiviados utilizando capa vegetal en la última fase del sistema de bio purificación
- Recoger y guardar los lixiviados en contenedores especiales y contactar con empresas gestoras de residuos para su eliminación.

## 10. Que hacer con el sustrato después de usarlo

La mezcla de sustrato activo deberá ser completamente reemplazada al finalizar su vida útil (6 a 8 años). En función de los condicionantes legales y de las particulares características de la explotación, se prevén las posibles acciones:

- Distribuir en campo el sustrato con un equipo de distribución de abono orgánico. De esta forma los posibles residuos de materias activas terminaran su degradación en la parcela.
- Transformar el sustrato en un “compost” utilizando para ello una cubierta impermeable evitando en todo caso la generación y la salida de lixiviados. Este proceso durara entre uno y dos años. Durante todo este tiempo realizar, dos veces al año, una mezcla homogénea de todo el compost manteniendo un elevado contenido de humedad que facilite la degradación de las posibles materias activas todavía presentes. Tras este periodo, el compost podrá ser distribuido en el campo sin ningún riesgo de contaminación.
- Guardar el sustrato retirado hasta su incineración por un gestor de residuos autorizado, si no existen disposiciones legales contrarias.

## 11. Consideraciones para la elección del sistema de bio purificación más adecuado

Las siguientes consideraciones están basadas en trabajos de investigación llevados a cabo en Bélgica. Por tanto será necesario aplicar las modificaciones oportunas para cada una de las condiciones y/o regulaciones locales.

**a. El sistema de bio purificación deberá procesar grandes volúmenes de líquidos contaminados y con elevada concentración de materias activas (no es posible la limpieza del pulverizador en el campo))**

Si en la explotación se prevén producir más de 10.000 litros de líquido contaminado, y no hay posibilidad de limpiar el pulverizador en campo, en esta situación la mejor opción es construir un *biobed* impermeabilizado, con un tamaño suficiente para manejar grandes volúmenes.

- Para cada 1000 litros de líquido contaminado se necesitan 2m<sup>3</sup> de sustrato activo.
- Asegurar una distribución uniforme en el tiempo y en el espacio, del líquido contaminado.
- Prevenir la entrada de agua de lluvia en el sistema. De esta manera se evitan problemas de lixiviados.

**b. Los líquidos contaminados se van a incorporar directamente en el sistema de bio purificación.**

Si no hay posibilidad de almacenar temporalmente los líquidos contaminados en un depósito intermedio, y por tanto la alimentación al sistema no será constante a lo largo de la campaña, la mejor opción es utilizar un **biobed impermeabilizado cuyas dimensiones permitan manejar** con garantía de éxito el volumen de contaminantes generado.

- Por cada 1000 litros de líquido contaminado se necesitan 2m<sup>3</sup> de sustrato activo.
- Asegurar una distribución uniforme del líquido en toda la superficie del *biobed*.
- La carga del sistema puede ser muy irregular. Será necesario por tanto la recirculación que garantizará además un contenido de humedad mínimo en las partes elevadas del *biobed*. Además las elevadas cargas del sistema pueden provocar lixiviados que será necesario recircular.
- Prevenir la entrada de agua de lluvia en el sistema.

**c. No se puede distribuir en campo el sustrato activo utilizado en los sistemas de bio purificación**

El *biobed* es el sistema que mayor cantidad de sustrato activo necesita. Si este sustrato no puede ser, por motivos legales, distribuido en el campo, la incineración puede ser una situación legal pero con un elevado coste económico. En estas situaciones la instalación de un **biofilter impermeabilizado** será preferencial.

**d. El sistema de bio purificación deberá gestionar pequeños volúmenes de líquido contaminado de baja concentración (se realiza la limpieza del equipo de aplicación en el campo)**

Se prevé una producción inferior a 10.000 litros anuales de líquido contaminado en la explotación, y/o el equipo utilizado para la realización de los tratamientos fitosanitarios puede lavarse en la misma parcela. Los posibles lixiviados pueden ser reciclados o aplicados directamente en el campo. En estos casos la mejor opción es la construcción de un **biofilter impermeabilizado**, cuyas dimensiones permitan el adecuado manejo de la cantidad total de residuos a gestionar.

- Se necesita 1m<sup>3</sup> de sustrato activo por cada 1500 litros de líquido contaminado. Con estos parámetros se prevé la generación de aproximadamente 1000 litros de lixiviados por año, si no se utilizan contenedores con cubierta vegetal. Es preciso pues la previsión del reciclado o la distribución en campo de los mismos.
- Evitar la entrada del agua de lluvia en el sistema. Ello evitará problemas de saturación y la formación de exceso de lixiviados. En el caso de utilizar cubierta vegetal, asegurar la recepción de la cantidad de luz solar necesaria.
- Asegurar un reparto uniforme del líquido contaminado en el *biofilter*. Almacenar los líquidos contaminados y los lixiviados en un depósito de almacenamiento. Utilizar una bomba de bajo caudal (bomba con dosificador) o una bomba con un regulador electrónico para cargar el sistema diariamente con pequeñas cantidades de líquido (aproximadamente 30 litros). Por ejemplo: 5000 litros cada año en un periodo de 200 días = 25 litros por día.
- Utilizar preferentemente contenedores negros de plástico impermeable para la construcción del *biofilter*. Ello redundará en una mayor capacidad de degradación de los microorganismos.
- Si la carga del *biofilter* es irregular (en el tiempo) se recomienda mantener una zona saturada de humedad en la mitad inferior del contenedor para garantizar la actividad microbiana.
- Utilizar si se puede cubiertas vegetales para reducir los lixiviados. En este caso no será necesaria la recirculación.

## Agradecimientos

Esta guía práctica de construcción y manejo de sistemas de bio purificación ha sido elaborada por Christof Debaer del *pcfruit npo* (Bélgica), basándose en resultados de experiencias propias y siguiendo las referencias de numerosos científicos de todo el mundo. Además para completar este documento se han tenido en cuenta comentarios y contribuciones de varios participantes en el proyecto TOPPS.

La adaptación de esta publicación al español ha sido realizada por los responsables del proyecto TOPPS en España, pertenecientes al Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología de la Universidad Politécnica de Cataluña.

## Referencias bibliográficas

**Balsari, P., Marucco, P., Oggero, G. (2006).** "External contamination of sprayers in vineyards." *Aspects of Applied Biology* **77**: 215-221.

**Basford, W. D., Rose, S.C., Carter, A.D. (2004).** "On-farm bioremediation (biobed) systems to limit point source pesticide pollution from sprayer mixing and washdown areas." *Aspects of Applied Biology*. **71**: 27-34.

**Castillo, M. d. P., von Wirén-Lehr, S., Scheunert, I., Torstensson, L. (2001).** "Degradation of isoproturon by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*." *Biol Fertil Soils* **33**: 521-528.

**Castillo, M.d.P., Torstensson L., Stenström, J. (2008)**  
Biobeds for Environmental Protection from Pesticide - Uses A Review ,  
Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008

**De Wilde, T., Spanoghe, P., Debaer, C., Ryckeboer, J., Springael, D., Jaeken, P. (2007).** "Overview of on-farm bioremediation systems to reduce the occurrence of point source contamination." *Pest Manag Sci* **63**: 111-128.

**De Wilde, T., Mertens, J., Simunek, J., Sniegowski, K., Ryckeboer, J., Jaeken, P., Springael, D. & Spanoghe, P. In preparation.** Characterizing pesticide sorption and degradation in macro scale biopurification systems using column displacement experiments.

**Debaer, C., Jaeken, J. (2006).** "Modified bio filters to clean up leftovers from spray loading and cleaning; experience from pilot installations." *Aspects of Applied Biology* **77**: 247-252.

**Debaer C., Springael D., Ryckeboer J., Spanoghe P. & Jaeken P. 2007.** The use of plants for optimization of a biofilter system used for bio purification of spray remnants. *Oral Communication on 2nd Biobed Workshop* 11-12 December 2007, Ghent.

**Debaer C., Springael D., Ryckeboer J., Spanoghe P., Balsari P., Taylor WA. & Jaeken P. 2008.** Volumes of residual of sprayers and their International Standards: impact on farm water treatment systems. *Aspect of Applied Biology* **84**: pp. 193 – 199. International Advances in Pesticide Application 2008, Robinson College, Cambridge, UK.

**Debaer C., Rutten N., Springael D., Ryckeboer J., Spanoghe P. & Jaeken P. In preparation.** Influence of different surface treatments, volumes of cleaning water and dry time on the removal of external copper contamination on PE surfaces of a sprayer.

**Debaer C., Rutten N., Springael D., Ryckeboer J., Spanoghe P. & Jaeken P. In preparation.** Modified biofilters used in practise: chemical and water load, retention efficiency and optimized evaporation of leachate by plants.

**Fogg, P., Boxall, A.B.A., Walker, A. (2003).** "Degradation of Pesticides in Biobeds: The Effect of Concentration and Pesticide Mixtures." *J. Agric. Food. Chem.* **51**(18): 5344-5349.

**Fogg, P., Boxall, A.B.A., Walker, A., Jukes, A. (2004).** "Leaching of Pesticides from Biobeds: Effect of Biobed Depth and Water Loading." *J. Agric. Food. Chem.* **52**(20): 6217-6227.

**Fournier, J. C. 2004.** A survey of INRA studies on biobeds. *European Biobed Workshop*, 28-29 September, Malmö, Sweden.

**Franssens, V., De Rocker, E. & Debaer C., In preparation.** Risk of point source contamination by PPP in the Demer catchment area: results of a questionnaire on spray equipment, operator behaviour and farm infrastructure.

**Genot, P., Van Huynh, N., Debongnie, Ph., & Pussemier, L. 2002.** Effects of addition of straw, chitin and manure to new or recycled biofilters on their pesticides retention and degradation properties. *Med Fac Landbouww Univ Gent* **67**: 117-128.

**Nilsson, E., Torstensson, L. (2003)**

Pesticide concentrations in collecting tanks connected to filling- and cleaningplaces. VII Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing, 25 – 27 June, Cuneo, Italy.

**Nilsson, E., Torstensson, L. (2005)**

Pesticidekoncentraties in collecting tanks connected to filling places. In Swedish. Report, Swedish Board of Agriculture.

**Pigeon, O., De Vleeschouwer, C., Cors, F., Weickmans, B., De Ryckel, B., Pussemier, L., Debongnie, Ph., Culot, M. (2005).** "Development of biofilters to treat the pesticides wastes from spraying applications." *Comm. Appl. Biol. Sci.* **70**(4): 1003-1012.

**Pussemier, L., De Vleeschouwer, C., Debongnie, Ph. (2004).** "Self-made biofilters for on-farm clean-up of pesticides wastes." *Outlooks on Pest Management* **April 2004**: 60-63.

**Sniegowski, K., Ryckeboer J., Spanoghe P, Jaeken P. and Springael D. (in preparation).** Pesticide-primed Soils as Supplement for On-farm Biofilters to improve Pesticide-Contaminated-Wastewater Treatment.

**Thompson, I. P., Singer, A.C., Bailey, M.J. (2001).** Improving the exploitation of microorganisms in environmental clean-up. *Pesticide Behaviour in Soils and Water*, BCPC Symposium Proceedings No. 78: 197-204.

**Torstensson, L., Castillo, M.dP. (1997).** "Use of biobeds in Sweden to minimize environmental spillages from agricultural spraying equipment." *Pesticide Outlook* **8**(3): 24-27.

**Torstensson, L. (2000).** "Experiences of biobeds in practical use in Sweden." *Pesticide Outlook* **11**(5): 206-211.

**Vidali, M. (2001).** "Bioremediation. An overview." *Pure Appl. Chem.* **73**: 1163-1172.

**Wehmann, H. J. (2006).** "Cleaning of sprayers; an emerging ISO standard that is critical to environmental interests." *Aspects of Applied Biology* **77**: 31-38.