

10 CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN A ESCALA PILOTO

En este apartado se indican las consideraciones a tener en cuenta en la implantación del tratamiento estudiado a escala piloto, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los tests de tratabilidad de laboratorio y cálculos teóricos.

10.1 Consideraciones a partir de los resultados de los tests de tratabilidad

Las condiciones óptimas para la operación del proceso de bioremediación de suelos contaminados obtenidas de los tests de tratabilidad se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Condiciones óptimas para la bioremediación de suelos contaminados

Parámetro	Valor óptimo
Porosidad	> 70 %
Humedad	≈ 40 % de la capacidad de campo
Aporte de estructura y nutrientes*	Compost grado de maduración 3 de Jorba II Compost grado de maduración 2 de Jorba III
Condiciones	Aeróbicas (> 50 % de saturación)
Utilización de inóculo	No
Tiempo de tratamiento	≥ 4 meses

*La proporción máxima de agente estructurante se estudia en los apartados 10.2 y 10.3.

Tabla 25. Parámetros de seguimiento de los experimentos a escala piloto

Parámetro	Inicialmente	A lo largo del tratamiento	Al final
Porosidad	✓	✓	✓
Humedad	✓	✓	✓
Nutrientes	✓	Con baja frecuencia	✓
Microorganismos degradadores de HC	✓	✓	✓
TPHs (por IR u otro método)	✓	✓	✓
Caracterización de la contaminación según legislación de vertederos	✓		✓
Contenido en arcillas/limos/arenas	✓		

A nivel de estudios a escala piloto se deberían realizar experimentos que considerasen los puntos siguientes:

- Biodegradación de varios tipos de suelos contaminados.
- Ensayo con los dos subproductos de compostaje considerados en comparación con agente estructurante inerte y nutrientes químicos.
- Determinación del tiempo de biodegradación en función de la cantidad y el tipo de contaminación.

- Efecto de la temperatura en la biodegradación.

Se deberían medir los parámetros que se muestran en la Tabla 25.

10.2 Fracción de compost necesaria en función de la relación C:N:P:K

Existen varias fuentes que citan una relación de nutrientes (N, P, K) aconsejable para el correcto desarrollo de la biodegradación de la contaminación por hidrocarburos en biopilas. La relación de nutrientes es especialmente útil cuando el suelo a tratar contiene una limitación por alguno de estos nutrientes, y es necesario añadirlo de forma externa. En estos casos, la cantidad de nutriente/s a añadir se calcula a partir de la relación C:N:P:K aconsejada.

A partir de las diferentes relaciones C:N:P:K encontradas en la bibliografía y conociendo las concentraciones de N, P, K en los diferentes tipos de compost utilizados se ha calculado, para cada nutriente y tipo de compost, la fracción en peso seco compost mínima necesaria para un buen desarrollo de la biodegradación del suelo contaminado.

10.2.1 Consideraciones y datos de partida

Las consideraciones o suposiciones de partida para los cálculos realizados son:

- En la relación C:N:P:K no se considera el COT contenido en el agente estructurante, sólo se tiene en cuenta el COT del suelo contaminado. El COT se ha calculado a partir del valor experimental de TPHs con un factor de conversión de COT/TPH de 0.8 (NFESC, 1996).
- No se ha considerado la concentración de N, P y K en el suelo contaminado ya que es menoscupable comparado con la existente en el agente estructurante.
- Se ha realizado el cálculo del compost mínimo en función de cada uno de los nutrientes, para cada relación C:N:P:K encontrada y para cada tipo de compost estudiado en el laboratorio (Llot 1.1 a Llot 1.3).

Los datos de partida se muestran en la Tabla 26. Son datos extraídos de las Tablas 2 y 3. Para el fósforo se ha considerado el dato de fósforo total en el caso que se dispusiera de él y si no se ha utilizado el dato de fósforo asimilable. Se ha realizado de esta forma porque, como son valores muy diferentes, las conclusiones a las que se llega, con los diferentes valores, también son muy diferentes.

Una de las relaciones C:N:P:K más utilizadas es la proporcionada por el Manual de diseño y construcción de biopilas del NFESC (NFESC, 1996) que es de 100:15:1:1. Por otro lado, en el documento de la USEPA (USEPA, 1995) se indica que la relación C:N:P debería estar entre 100:1:0.5 y 100:10:1

Tabla 26. Datos de concentración de nutrientes en las muestras de compost y de concentración de COT en el suelo contaminado.

	N	P	K
Compost	g/kg m.s.		
Llot 1.1	32	6.331 ⁽¹⁾	1.00
Llot 1.2	26	0.578 ⁽²⁾	2.45
Llot 1.3	28	21.5 ⁽¹⁾	2.25
Suelo	COT: 13.4 g/kg m.s.		

(1) Fósforo total (resultado del análisis externo)

(2) Fósforo asimilable (resultado del análisis en CTM)

10.2.2 Fracciones mínimas de compost necesarias

Se han calculado los valores mínimos de porcentaje en peso a añadir en el suelo contaminado. Los resultados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Porcentaje mínimo en peso seco de cada tipo de compost para conseguir diferentes relaciones C:N:P:K en la mezcla de compost y suelo contaminado.

C:N:P:K	100:15:1:1 (NFESC, 1996)			100:10:1 (USEPA, 1995)		100:1:0.5 (USEPA, 1995)	
(%)	Según			Según		Según	
Compost	N	P	K	N	P	N	P
Llot 1.1	5.9	2.1	11.8	4.0	2.1	0.4	1.0
Llot 1.2	7.2	18.8 ^(*)	5.2	4.9	18.8 ^(*)	0.5	10.4 ^(*)
Llot 1.3	6.7	0.6	5.6	4.6	0.6	0.5	0.3

(*) Fósforo asimilable

En la Tabla 27 se observa que el rango de los resultados obtenidos es muy grande ya que las relaciones C:N:P encontradas en la bibliografía son muy diferentes. En primer lugar y por lo que respecta a los resultados teniendo en cuenta el fósforo, el valor mínimo de compost necesario puede ser muy elevado si se considera sólo el fósforo asimilable o puede ser muy bajo si se considera el fósforo total. Seguramente no todo el fósforo analizado como fósforo total puede llegar a ser asimilable para los microorganismos pero tampoco se puede afirmar que durante el proceso de biodegradación no haya una aparición de fósforo asimilable a partir de la degradación de compuestos orgánicos o solubilización de fósforo inorgánico. Por este motivo, es lógico pensar que debería utilizarse un valor entremedio para este cálculo. Un argumento similar se podría utilizar para el nitrógeno ya que normalmente se utiliza el nitrógeno total para este cálculo y puede ser que no todo este nitrógeno acabe estando disponible para los microorganismos.

En segundo lugar, se debe tener en cuenta que en los cálculos realizados no se ha considerado la materia orgánica del compost, la cual puede sufrir una degradación aeróbica en la que también se consumirán nutrientes. Por el otro lado, algunos autores

(Juteau i col., 2003) afirman que las relaciones bibliográficas propuestas de C:N (100:10 o 100:15) están sobredimensionando la necesidad de nutrientes ya que se calcula para la degradación completa del contaminante cuando nunca se llega a este grado de descontaminación debido a la fracción no biodegradable. En Juteau et al. (2003) se comprobó que el paso de una relación C:N 100:2 a 100:3 supuso una estimulación considerable de la capacidad de degradación de hidrocarburos (policíclicos aromáticos y alcanos), en cambio al aumentar la relación a 100:13 no se obtuvo una mejora apreciable. Por este motivo sugieren que el uso del COT no es una buena forma para el cálculo de los nutrientes necesarios y que se debería determinar la relación óptima para cada caso específico a partir de ensayos a nivel de laboratorio.

Finalmente, considerando los puntos discutidos y los datos obtenidos, se puede concluir, de forma muy general que la fracción mínima de compost necesaria para el suficiente aporte de nutrientes al proceso de bioremediación debería estar entre el **1 % y el 10 %** en peso seco sea cual sea el tipo de compost utilizado. Una fracción superior no sería necesaria para el aporte de nutrientes.

10.3 Cálculo de la fracción de compost máxima en función de la legislación de vertederos (legislación catalana)

El hecho de plantearse la utilización de compost como agente estructurante, portador de nutrientes y de microorganismos hace necesario plantearse que al mismo tiempo se está añadiendo materia orgánica y, en función del tipo de compost, también metales pesados. Por este motivo se debe comprobar que el residuo final una vez tratado podrá cumplir con los criterios de admisión a depósito controlado de residuos clase I o residuos inertes, que es el objetivo que se persigue en el tratamiento del suelo contaminado.

Para tener una idea de los valores que se pueden obtener, se ha calculado de forma teórica cuál es la cantidad máxima de compost que se puede añadir a partir de los datos disponibles hasta el momento y a partir de unas suposiciones que se detallan a continuación. Debido al cambio de la legislación catalana sobre límites de vertido en depósitos controlados durante la realización del proyecto, se han realizado los cálculos con los límites de la legislación vigente hasta el mayo del 2009 (Decret 1/1997, de 7 de gener) y con la legislación vigente a partir de mayo del 2009 (Decret 69/2009, de 28 d'abril).

Se debe tener en cuenta que los cálculos presentados aquí sólo son válidos para la legislación catalana.

10.3.1 Consideraciones y datos de partida

Las consideraciones o suposiciones de partida para los cálculos realizados son:

- En el tratamiento del residuo se obtiene una degradación de TPHs suficiente para cumplir con los límites legislados.
- No se considera la posible degradación del COT del compost que se añade al suelo contaminado.

Los datos de partida para el cálculo realizado se han escogido de las Tablas 2 y 3 en función del parámetro legislado en cada uno de los decretos considerados. Todos estos valores se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Datos de partida para el cálculo de la fracción máxima de compost y valores límite según legislación catalana.

	Pérdida 500 °C (% sobre m.s)	Cr en el residuo (g/kg m.s.)	COD en el lixiviado (mg/L)	COT en el residuo (g/kg m.s.)	COD en el lixiviado (g/kg m.s.)
Datos experimentales					
Llot 1.1	75,3	0,08	4600	280	46
Llot 1.2	62,6		1900	260	19
Llot 1.3	64,4	0,11	3400	290	34
Límites según legislación					
Decret 1/1997 (Clase 1)	5	3	40		
Decret 69/2009 (Residuos inertes)				30	0,5

10.3.2 Fracciones máximas de compost admisibles

Las fracciones que se muestran en la Tabla 29 se han calculado a partir del balance de materia de la mezcla del suelo contaminado con el compost. En realidad se ha calculado la fracción de cada uno de los tipos de compost que se puede añadir al suelo contaminado para no sobrepasar los límites establecidos en los decretos considerados a partir de la dilución de la materia orgánica contenido en el compost.

Tabla 29. Porcentaje máximo en peso seco de cada tipo de compost en la mezcla de compost y suelo contaminado calculado para la materia orgánica según legislación catalana de admisión de residuos en depósitos controlados inertes o de clase I.

Compost	Según Decret 1/1997 (Clase I)			Según Decret 69/2009 (Residuos inertes)	
	(%)	Pérdida 500 °C (% sobre m.s)	Cr en el residuo (g/kg m.s.)	COD en el lixiviado (mg/L)	COT en el residuo (g/kg m.s.)
Llot 1.1	6,6	-	0,9	10,7	1,1
Llot 1.2	8,0	-	2,1	11,5	2,6
Llot 1.3	7,8	-	1,2	10,3	1,5

En la Tabla 29 se puede observar en primer lugar, que el cromo (en el residuo) no debe suponer un factor limitante en la cantidad de compost a añadir al suelo contaminado ya que admitiría hasta un 25 % o 75 % en función del tipo de compost.

En segundo lugar, se observa que la materia orgánica que aporta el compost al residuo final es muy importante, especialmente para cumplir el límite de COD en el lixiviado. Teniendo en cuenta éste límite, tanto en el “Decret 1/1997” como en el “Decret 69/2009” se podría establecer un máximo de compost en la mezcla de alrededor del 1-2 %. Se debe recordar que se ha supuesto que la materia orgánica del compost no sufrirá alteración en el tratamiento cuando muy probablemente habrá biodegradación.

Si no se consideran los datos de lixiviado de COD, se puede dar un valor aproximado del **10-15 %** como la fracción máxima de compost, en peso seco, en la mezcla compost/suelo contaminado. De todas formas, al finalizar la etapa de pruebas a escala de piloto se debería realizar una analítica completa del residuo final para comprobar éstos límites para deposición en depósito controlado.

10.4 Fracción de compost óptima en la mezcla suelo-compost

En el apartado 10.2 se ha determinado que la fracción mínima de compost en la mezcla suelo-compost para el aporte de nutrientes debe ser entre un 1 y un 10 %. Además, en el apartado 10.3, se ha determinado que la fracción de compost no debería ser superior al 10-15 % para no tener problemas de caracterización del residuo final debido a la materia orgánica que contiene el compost.

A partir de estos resultados se decide definir la **fracción óptima de compost** para el aporte de nutrientes y estructura en un **5-10%** en peso seco para un suelo contaminado con 16.700 mg/kg TPHs considerando la legislación catalana vigente de vertederos.

11 BIBLIOGRAFIA

Juteau, P., Bisailon, J.G., Lepine, F., Ratheau, V., Beaudet, R., & Villemur, R. (2003). Improving the biotreatment of hydrocarbons-contaminated soils by addition of activated sludge taken from the wastewater treatment facilities of an oil refinery. *14* (1), 31-40.

NFESC (1996). Biopile design and construction manual. TM-2189-ENV. (Port Hueneme, California: Naval Facilities Engineering Service Center.

USEPA (1995). How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites. A guide for corrective action plan reviewers. EPA 510-B-95-007. (Washington D.C: U.S. Environmental Protection Agency.