

**CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR
COMPUESTOS ORGÁNICOS**

INFORME FINAL

*CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE
DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA*

Enero 2003

El presente Resumen Informe da cumplimiento a tres acuerdos específicos entre la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y las Universidades de Sevilla, Granada y Huelva para tratar de definir:

I.- La forma y comportamiento de los compuestos orgánicos en el suelo.

Acuerdo firmado con la Universidad de Sevilla y encargado al Prof. Dr. Emilio Galán Huertos, Catedrático de Cristalografía y Mineralogía.

II.- Propuesta de criterios y estándares

Acuerdo firmado con la Universidad de Granada y encargado al Prof. Dr. José Aguilar Ruiz, Catedrático de Edafología

III.- Metodologías y técnica de toma de muestras y análisis para su estudio

Acuerdo firmado con la Universidad de Huelva y encargado al Prof. Dr. José Luis Gómez Ariza, Catedrático de Química Analítica

Los trabajos correspondientes han sido elaborados por los siguientes equipos:

- Ø Grupo de Trabajo “Mineralogía Aplicada” (RNM 135). Responsable: Prof. Dr. Emilio Galán Huertos. Universidad de Sevilla
- Ø Grupo de Trabajo “Análisis Medioambiental” (FQM 141). Responsable: Prof. José Luis Gómez Ariza. Universidad de Huelva
- Ø Grupo de Trabajo “Edafología y Ordenación del Territorio” (RNM 101). Responsable: Prof. José Aguilar Ruiz. Universidad de Granada

Informe redactado por:

Dr. Emilio Galán Huertos (Universidad de Sevilla)

Dr. José Luis Gómez Ariza (Universidad de Huelva)

Dr. Nicolás Bellinfante Crocci (Universidad de Sevilla)

Dra. Patricia Aparicio Fernández (Universidad de Sevilla)

INDICE GENERAL

0. INTRODUCCIÓN	1
0.1. ASPECTOS GENERALES DE LA CONTAMINACIÓN POR COMPUESTOS ORGÁNICOS	3
0.2. EFECTOS ADVERSOS DE LOS COMPUESTOS ORGANICOS	4
0.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS EN EL MEDIO AMBIENTE	7
0.4 NIVELES BASALES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS EN SUELOS	19
1. CONTAMINACIÓN DE SUELOS A PARTIR DE RESIDUOS PELIGROSOS	21
1.1 ASPECTOS GENERALES	23
1.2 CONTAMINACIÓN DE SUELOS A PARTIR DE VERTEDEROS URBANOS	25
1.3 CONTAMINACIÓN A PARTIR DE DEPÓSITOS SUBTERRÁNEOS	35
1.3.1 Hidrocarburos totales del petróleo (TPH)	35
1.3.2 Fracción Aromática EC₅-EC₉: Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)	38
1.3.3 Fracciones aromáticas combinadas EC_{>9}-EC₁₆	39
1.3.4 Fracciones aromáticas combinadas EC_{>16}-EC₃₅: PAH	40
1.3.5 Fracciones alifáticas combinadas EC₅-EC₈	40
1.3.6 Fracciones alifáticas combinadas EC_{>8}-EC₁₆	41
1.3.7 Fracciones alifáticas combinadas EC_{>16}-EC₂₅	41
1.3.8 Productos comerciales del petróleo de alto consumo	41
1.4 CONTAMINACIÓN A PARTIR DE OTRAS FUENTES	45
1.4.1 Fitosanitarios	45
1.4.2 Bifenilos policlorados (PCB) y otros productos clorados	52
1.4.3 Otros contaminantes.	55
1.5 ATENUACION NATURAL DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS	60
2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS Y NIVELES GENERICOS DE REFERENCIA	63
2.1 INTRODUCCIÓN	65
2.2 CRITERIO PARA LA CONSIDERACIÓN DE UN SUELO COMO NO CONTAMINADO POR COMPUESTOS ORGÁNICOS	66
2.3 NIVELES GENÉRICOS DE REFERENCIA (NGR)	66
2.4 NIVELES GENÉRICOS DE REFERENCIA EN ESPAÑA Y OTROS PAISES	72

2.5	CRITERIOS PARA EL DESARROLLO DE NGR PARA PROTECCIÓN DE LA SALUD HUMANA	76
2.5.1	Usos del suelo	76
2.5.2	Rutas de exposición	77
2.5.3	Cálculo de las concentraciones de exposición para cada uno de los Usos	79
2.5.4	Ejemplos de cálculo de concentraciones de exposición para algunos compuestos seleccionados	80
3.	TOMA DE MUESTRAS Y CONSERVACIÓN	83
3.1	CONSIDERACIONES GENERALES: OBJETIVOS	85
3.2	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES: PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO	87
3.2.1	Procedimientos basados en modelos	89
3.2.2	Procedimientos basados en diseños aleatorios	89
3.2.2.1	<i>Procedimientos de muestreo horizontal basados en diseños aleatorios</i>	89
J	· <u>Muestreo aleatorio simple</u>	89
J	· <u>Muestreo aleatorio estratificado</u>	91
J	· <u>Muestreo aleatorio sistemático</u>	92
J	· <u>Muestreo aleatorio compuesto</u>	94
3.2.2.2	<i>Procedimientos de muestreo en profundidad</i>	95
J	· <u>Generalidades</u>	95
J	· <u>Suelos no alterados</u>	95
J	· <u>Suelos alterados</u>	96
J	· <u>Muestreo aleatorio simple en profundidad</u>	96
J	· <u>Muestreo aleatorio estratificado en profundidad</u>	97
J	· <u>Muestreo discreto en profundidad</u>	97
3.3	RECIPIENTES DE MUESTREO Y CONSERVACIÓN DE LA MUESTRA	98
3.4	TAMAÑO MUESTRAL	101
4.	MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS	103
4.1.	DETERMINACIÓN DE SUSTANCIAS ORGÁNICAS PROCEDENTES DE VERTEDEROS	105
4.1.1.	Método para conocer la lixiviación potencial de sustancias	105
4.1.2.	Contaminación a partir de lixiviados de vertederos urbanos. Vigilancia de las aguas subterráneas	108
4.2	DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS DE DEPÓSITOS SUBTERRÁNEOS	112
4.2.1.	Determinación de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) por IR	113
4.2.2.	Análisis de BTEX y compuestos orgánicos en las gasolinas (GRO) por cromatografía de gases (GC)	115
4.2.3.	Análisis de compuestos orgánicos en diesel (DRO) por cromatografía de gases	115

4.3. ANÁLISIS DE COMPUESTOS VOLÁTILES	118
4.3.1. Métodos de muestreo y extracción de los analitos	118
4.3.2. Análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles no halogenados.	119
4.3.3. Determinación de compuestos volátiles clorados y aromáticos.	120
4.3.4. Determinación de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) mediante GC/MS con columna capilar.	121
4.4. ANÁLISIS DE COMPUESTOS SEMIVOLÁTILES	125
4.4.1. Técnicas de extracción	125
<i>Extracción líquido-líquido discontinua (EPA 3510C)</i>	125
<i>Extracción líquido-líquido en continuo (EPA 3520C)</i>	125
<i>Extracción soxhlet para sólidos</i>	126
<i>Extracción mediante sonicación (EPA 3550B)</i>	126
<i>Extracción con fluidos supercríticos (EPA 3560)</i>	126
4.4.2. Técnicas de purificación	127
<i>Columna de alúmina para la purificación de ésteres de ftalatos, nitrosaminas y derivados del petróleo (EPA 3610B y 3611B)</i>	127
<i>Columna de Florisil para la purificación de residuos de plaguicidas (EPA3620B)</i>	127
<i>Columna de sílica gel para purificar sustancias no polares (hidrocarburos del petróleo, PCB, PAH). EPA 3630C</i>	128
<i>Columna de gel permeación (GPC). Método EPA 3640A</i>	129
<i>Purificación por reparto ácido-base (EPA 3650B)</i>	129
<i>Purificación para eliminar el azufre (EPA 3660B)</i>	129
<i>Purificación mediante mezcla ácido sulfúrico/permanganato (EPA 3665A)</i>	130
4.4.3. Técnicas de determinación	130
<i>Determinación de acrilamida por derivatización y GC-ECD (EPA 8032A)</i>	130
<i>Determinación de fenoles por GC-FID sin derivatización y por GC-ECD por formación de derivados con bromuro de pentafluorobencilo (EPA 8041)</i>	131
<i>Determinación de ésteres de ftalatos (EPA 8061)</i>	133
<i>Determinación de plaguicidas clorados por GC-ECD o GC-ELCD con columna capilar (EPA 8081A)</i>	134
<i>Determinación de bifenilos policlorados (PCB) por cromatografía capilar (GC-ECD o ELCD (EPA 8082)</i>	136
<i>Hidrocarburos clorados mediante cromatografía de gases capilar y detector ECD (EPA 8121)</i>	141
<i>Compuestos organofosforados por cromatografía de gases (EPA 8141 A)</i>	142
<i>Determinación de herbicidas clorados mediante GC con columna capilar y detección ECD (EPA 8151 A)</i>	143
<i>Compuestos orgánicos semivolátiles mediante cromatografía de gases con columna capilar y detector de masas (GC/MS, EPA 8270 C)</i>	144
<i>Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) por HPLC con detección UV y fluorescente (EPA 8310)</i>	152
<i>Formaldehído y acetaldehído mediante HPLC con detección UV (EPA 8315 A)</i>	152

<i>Acrilamida, acrilonitrilo y acroleina por HPLC (EPA 8316)</i>	153
<i>N-Metil carbamatos por HPLC (EPA 8318)</i>	153
5. PROPUESTA METODOLÓGICA	157
6. REFERENCIAS	167
ANEXOS	
ANEXO I: Ecuaciones necesarias para el cálculo de los niveles géricos de referencia (NGR) en distintos escenarios de exposición	i
ANEXO II: Información toxicológica de compuestos orgánicos	xxi
ANEXO III: Datos fisicoquímicos de compuestos orgánicos volátiles	xxxv

INDICE DE TABLAS

Tabla 0.1.1. Instalaciones industriales con efecto contaminante potencial sobre el medio ambiente	4
Tabla 0.2.1. Efectos de algunos herbicidas e insecticidas sobre plantas en suelos y aguas. Madhun & Freed 1990.	6
Tabla 0.2.2. Fuentes de compuestos orgánicos con potencial contaminante para suelos y aguas subterráneas (Office of Technology Assessment, 1984)	7
Tabla 0.3.1. Movilización y distribución de compuestos orgánicos en el medio ambiente, con particular referencia a los plaguicidas (Marathon Agricultural and Environmental Consulting, 1992)	11
Tabla 0.3.2. Resistencia a la hidrólisis de compuestos orgánicos	15
Tabla 0.3.3. Ejemplos de compuestos orgánicos y su volatilidad potencial a partir del agua (Thomas, 1982)	16
Tabla 0.3.4. Valores de vida media de algunos compuestos orgánicos que sufren procesos de fotólisis directos (Harris, 1982b)	17
Tabla 1.2.1. Nivel mínimo de riegos (MRL) para compuestos característicos en vertederos	26
Tabla 1.3.1. Fracciones de los <i>TPH</i> y compuestos representativos.	36
Tabla 1.3.2. MRL y clasificación carcinogénica para componentes de los TPH	37
Tabla 1.3.3. Criterios de toxicidad para las fracciones de los TPH (TPHCWG, 1999b)	38
Tabla 1.4.1. MRL para fitosanitarios	45
Tabla 1.4.2. MRL para los derivados clorados.	53
Tabla 1.4.3. MRL para otros compuestos.	55
Tabla 1.5.1. Tendencia de los parámetros analíticos de los hidrocarburos del petróleo en el curso de su atenuación natural	62
Tabla 1.5.2. Tendencia de los parámetros analíticos de los disolventes clorados en el curso de su atenuación natural	62
Tabla 2.3.1. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para algunos compuestos característicos más frecuentes en vertederos urbanos	68
Tabla 2.3.2. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para derivados de petróleo separados por los compuestos que componen las distintas fracciones.	69
Tabla 2.3.3. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para fitosanitarios	70
Tabla 2.3.4. Niveles genéricos de referencia (NGR) para derivados clorados	70
Tabla 2.3.5. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para otros compuestos seleccionados por sus características toxicológicas y no englobados en los grupos anteriores	71
Tabla 2.4.1. Niveles genéricos de referencia para compuestos orgánicos característicos de vertederos urbanos según otras normativas.	72
Tabla 2.4.2. Niveles genéricos de referencia para compuestos orgánicos característicos de derivados del petróleo según otras normativas.	73
Tabla 2.4.3. Niveles genéricos de referencia para compuestos orgánicos fitosanitarios según otras normativas.	74
Tabla 2.4.4. Niveles genéricos de referencia para compuestos orgánicos clorados según otras normativas.	75
Tabla 2.4.5. Niveles genéricos de referencia para compuestos orgánicos	75

	contaminantes no incluidos anteriormente, según otras normativas.	
Tabla 2.5.1.	Rutas de exposición recomendadas para la determinación de valores umbrales en distintos escenarios	78
Tabla 3.3.1.	Recipientes, técnicas de preservación, cantidad de muestra y tiempo de conservación de compuestos orgánicos característicos de las muestras ambientales AFCEE, 1993)	100
Tabla 4.1.1.	Sustancias con características tóxicas según el TCLP	105
Tabla 4.1.2.	Métodos analíticos requeridos para el ensayo de toxicidad TCLP (EPA 1311)	107
Tabla 4.1.3.	Compuestos estudiados en la vigilancia de los lixiviados de vertederos municipales (Método EPA 8260)	108
Tabla 4.1.4.	Grupos de analitos que completan la vigilancia de lixiviados de los vertederos municipales	109
Tabla 4.1.5.	Compuestos orgánicos volátiles que se analizan con el método EPA 8260B	109
Tabla 4.1.6.	Compuestos orgánicos semivolátiles que se analizan con el método EPA 8270	110
Tabla 4.1.7.	Plaguicidas organoclorados que se analizan por los métodos EPA 8081A y 8082	111
Tabla 4.1.8.	Herbicidas clorados ácidos que se analizan con el método EPA 8151	111
Tabla 4.2.1.	Métodos analíticos para la determinación de productos del petróleo en entornos de depósitos subterráneos	113
Tabla 4.2.2.	Punto de ebullición de hidrocarburos estándar comunes	117
Tabla 4.3.1.	Analitos estudiados por el método EPA 8015B (Límites de detección)	119
Tabla 4.3.2.	Compuestos orgánicos volátiles que se analizan con los métodos EPA 5035 y EPA 8260B. Tiempos de elución ¹ y valores de límites prácticos de cuantificación	122
Tabla 4.4.1.	Fenoles y MDLs que se estudian por el método EPA 8041	132
Tabla 4.4.2.	Ftalatos y MDLS que se estudian con el Método EPA 8061	134
Tabla 4.4.3.	Plaguicidas clorados en orden de elución que se analizan con el Método EPA 8081A con dos columnas	136
Tabla 4.4.4.	Mezclas de PCBs que se analizan con el método EPA 8082	137
Tabla 4.4.5.	Hidrocarburos clorados, con sus MDL, por el método EPA 8121	141
Tabla 4.4.6.	Compuestos organofosforados, con tiempos de retención y PQLs, que se analizan por el método EPA 8141 ^a	143
Tabla 4.4.7.	Herbicidas clorados que se analizan por el método EPA 8151 A, incluyendo los valores de PQL	146
Tabla 4.4.8.	Ajuste del detector MS basado en DFTPP* para el método EPA 8270C	147
Tabla 4.4.9.	SPCC para el método EPA 8270 C	148
Tabla 4.4.10.	Compuestos de comprobación de la calibración (CCC) para el método EPA 8270 C	148
Tabla 4.4.11.	Patrones internos y patrones de sustitución para el método EPA 8270 C	148
Tabla 4.4.12.	Compuestos utilizados para comprobar las recuperaciones de las matrices (spikes) en el método 8270 C	148
Tabla 4.4.13.	Analitos, tiempos de retención y EQLs que se analizan por el método EPA 8270C	149
Tabla 4.4.14.	Analitos analizados por el método EPA 8318	150

Tabla 4.5.1. Métodos analíticos EPA para la determinación de derivados del petróleo	154
Tabla 4.5.2. Métodos analíticos EPA para la determinación de fitosanitarios	155
Tabla 4.5.3. Métodos analíticos EPA para la determinación de derivados clorados	155
Tabla 4.5.4. Métodos analíticos EPA para la determinación de otros compuestos seleccionados por sus características toxicológicas y no englobados en los grupos anteriores	155
Tabla 5.1. Métodos analíticos para la determinación de productos del petróleo en entornos de depósitos subterráneos	160
Tabla 5.2. Análisis de compuestos volátiles	160
Tabla 5.3. Análisis de compuestos semivolátiles	161
Tabla 5.4. Extracción de compuestos semivolátiles de matrices ambientales	161
Tabla 5.5. Técnicas recomendadas de purificación de compuestos semivolátiles antes de su determinación analítica	162
Tabla 5.6. Procedimientos EPA basados en HPLC	162
Tabla 5.7. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para algunos de los compuestos característicos más frecuentes de vertederos	163
Tabla 5.8. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para derivados del petróleo: a) agrupados por fracciones y b) separados por los compuestos que componen las distintas fracciones	164
Tabla 5.9. Niveles genéricos de referencia (NGR) determinados para fitosanitarios	165
Tabla 5.10. Niveles genéricos de referencia (NGR) para derivados clorados	165

LISTADO DE ACRÓNIMOS

ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BTEX	Benceno total, tolueno, etilbenceno, xileno
CDD	Dioxinas policloradas
DCE	Dicloroetenos
DEHP	Di(2-etilhexil)ftalato
DHHS	Departement of Health and Human Services
DO	Oxígeno disuelto
DRO	Compuestos orgánicos de diesel
EC	Índice equivalente de número de carbonos
ELCD	Conductivilidad eléctrica
EPA	Environmental Protection Agency
ETBE	Etil tert-butil eter
GC	Cromatografía de gases
GRO	Compuestos orgánicos de gasolinas
IR	Espectrometría infrarroja
MDL	Límite de detección
MRL	Mínimo nivel de riesgo
MTBE	Metil tert-butil eter
ORP	Potencial de óxido-reducción
PCE	Percloroetano
PID	Fotoionización
PONA	Parafinas, olefinas, naftaleno, aromáticos
TAME	Metil tert-amil eter
TCE	Tricloroetano
TCLP	Toxic characteristics leaching procedure
TMB	Trimetilbenceno
TPH	Hidrocarburos del petróleo totales
TPHCWG	Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
ZHE	Zero headspace extractor

0. INTRODUCCIÓN

0.1 ASPECTOS GENERALES DE LA CONTAMINACIÓN POR COMPUESTOS ORGÁNICOS

La producción de compuestos orgánicos sintéticos se incrementó drásticamente desde los inicios del siglo XX, debido al crecimiento de la industria productora de nuevos materiales que han modificado de forma radical nuestra forma de vivir. Sin embargo, este aspecto positivo del progreso ha originado también aspectos negativos, así el incremento en la producción y uso de compuestos orgánicos sintéticos (como plaguicidas, lubricantes, disolventes, gasolinas, etc) ha multiplicado también el número de incidentes en los que estas sustancias orgánicas han llegado a la atmósfera, hidrosfera, suelos y sedimentos, provocando episodios contaminantes.

Los productos del petróleo constituyen una de las fuentes más importantes de contaminación de hidrocarburos que se difunden en el aire, las aguas superficiales y subterráneas, y los suelos. Otras fuentes de contaminantes orgánicos son las prácticas agrícolas, el control de plagas en bosques y praderas, las actividades industriales, comerciales y pesqueras, así como el turismo.

Diversos estudios han revelado la presencia de más de 175 compuestos orgánicos en las aguas subterráneas (Office of Technology Assessment, 1984), entre ellos 67 plaguicidas diferentes (Parsons and Witt, 1988). En la Tabla 0.1.1 pueden verse diversos tipos de industrias, posibles fuentes de contaminación potencial de los suelos y, a partir de ellos, de las aguas superficiales y subterráneas, además hay que considerar también la aplicación distintos tipos de residuos de los suelos agrícolas. Por tanto, la mayoría de los procesos de contaminación por compuestos orgánicos es generalmente una consecuencia de la manipulación inadecuada de estas sustancias por el hombre.

Tabla 0.1.1.- Instalaciones industriales con efecto contaminante potencial sobre el medio ambiente

Asbestos	Productos farmacéuticos, perfumes, cosméticos
Productos químicos y derivados	Polímeros y recubrimientos
Explosivos y municiones	Raíles de tren
Fábricas y almacenamientos de gas	Astilleros
Metalurgias	Fundiciones
Minería e industrias extractivas	Tratamiento de residuos sólidos
Producción y almacenamiento de aceites	Industrias de curtidos
Pinturas	Vertederos industriales
Manufactura de plaguicidas	Preservación de maderas

0.2 EFECTOS ADVERSOS DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS

Los posibles efectos negativos sobre el medio ambiente que origina un uso inadecuado o un accidente en los que participen compuestos químicos de naturaleza orgánica, son muy significativos, debido a la dificultad de aplicar un procedimiento de limpieza adecuado y las importantes consecuencias, directas o indirectas, ocasionadas por estos aportes sobre los ecosistemas. Por ello hay que tomar importantes medidas de seguridad en la producción, almacenamiento, transporte y manejo de estos compuestos orgánicos.

En la literatura científica se muestran numerosos ejemplos representativos de los efectos adversos del uso inadecuado de plaguicidas y otros contaminantes orgánicos. Muchos de estos estudios insisten en la sobrecarga de niveles residuales de plaguicidas que se produce en los suelos y sistemas acuáticos como consecuencia de la elevada toxicidad de los plaguicidas para las plantas y peces. Otro aspecto importante a considerar es el de los posibles procesos de bioacumulación que pueden producirse en los organismos a lo largo del tiempo, a pesar de que los niveles de exposición sean muy reducidos, llegándose a alcanzar niveles tóxicos para el propio organismo, sus descendientes, o los organismos

situados en niveles superiores de la cadena trófica. Un grave problema unido al uso de sustancias orgánicas, y en particular de los plaguicidas, es su falta de acción específica para los organismos, de manera que a niveles suficientemente elevados pueden llegar a ser tóxicos hasta para los seres humanos, especialmente si se degradan con lentitud.

Modo de acción biológica de los compuestos orgánicos

La acción de los compuestos orgánicos está relacionada con la forma en que pueden interactuar con los organismos vivos. Este aspecto es especialmente importante cuando la sustancia química se utiliza como agente biocida, como es el caso de los plaguicidas, cuya forma de acción también determina su posible uso o abuso, pero es extrapolable al resto de compuestos orgánicos que, aun utilizados para otros fines lleguen a presentar una acción letal o subletal para los organismos vivos. El modo de acción de los compuestos orgánicos puede clasificarse como de *contacto* o *sistémico*. Los compuestos que ejercen su acción mediante contacto atacan a los organismos por debilitamiento o disrupción de las membranas celulares, lo que, a su vez, origina una pérdida de los constituyentes celulares. Si el contaminante actúa por vía de contacto mediante una reacción aguda, la muerte del organismo puede ser extremadamente rápida. Los compuestos con acción sistémica pueden ser absorbidos o ingeridos por el organismo con que interactúa y puede interferir con los procesos fisiológicos (la división celular, la formación de clorofila, el desarrollo de tejidos, etc) o metabólicos (respiración, actividad enzimática, fotosíntesis) del mismo. Los compuestos de acción sistémica son lentos en su acción y requieren días, semanas, o períodos superiores de tiempo antes de que los resultados se hagan evidentes.

Impacto sobre los microorganismos

Los compuestos orgánicos que se introducen en el medio ambiente pueden tener un efecto devastador sobre ciertos organismos. Los ecosistemas relacionados con el suelo o con las aguas contienen una multitud de microorganismos, muchos de los cuales son beneficiosos. La contaminación de estos ecosistemas por compuestos orgánicos, como el empleo de elevadas concentraciones de plaguicidas o el arrastre de elevadas cantidades de estas sustancias por escorrentías superficiales, puede originar una reducción de la actividad microbiana, aunque a veces puede producirse el efecto contrario.

Impacto sobre las plantas

Las plantas que son sensibles a los plaguicidas pueden mostrar signos rápidos de crecimiento irregular, pérdida de biomasa, o muerte. Las plantas pueden desarrollar cierta resistencia a ciertos plaguicidas. En la Tabla 0.2.1. se recogen los efectos que determinados herbicidas e insecticidas pueden tener sobre plantas que crecen en suelos o aguas.

Acción sobre la salud humana

Los plaguicidas permiten el control por el hombre de enfermedades como la malaria y el tifus, la infección de semillas que reduce la productividad de las cosechas, y las plagas de insectos. Sin embargo, la elevada concentración de algunos plaguicidas u otros compuestos orgánicos puede ser perjudicial para los humanos. Determinadas experiencias de laboratorio han demostrado que ciertas dosis de orgánicos pueden causar cáncer, mutagénesis, neuropatías, e incluso muerte. Las concentraciones de plaguicidas en estas experiencias están, generalmente, muy por encima de los niveles recomendados por los fabricantes. Aunque la exposición de los humanos a los compuestos orgánicos es relativamente baja hay que tener precauciones con el impacto potencial de los mismos, debiendo aplicarse todas las directivas establecidas para la protección de las personas y el medio ambiente ante posibles episodios de contaminación.

Tabla 0.2.1.- Efectos de algunos herbicidas e insecticidas sobre plantas en suelos y aguas (Madhun & Freed 1990).

Tipo de pesticidas	Localización	Efecto
<u>Herbicidas</u>		
Ácidos aromáticos	Suelos	Una sobrecarga de residuos afecta a las cosechas posteriores
	Aguas	Mata o inhibe la acción de algunas plantas acuáticas
Aminas, anilinas, nitrilos, ésteres, carbamatos	Suelos	Su persistencia puede afectar cosechas posteriores
	Aguas	La erosión superficial puede transportar herbicidas a los sistemas acuáticos
<u>Insecticidas</u>		
Organoclorados	Suelos	Los residuos afectan las cosechas posteriores, el transporte por las aguas superficiales afecta a las plantas acuáticas
	Aguas	Las aguas contaminadas pueden afectar las plantas si se usan para irrigación
Organofosforados, Carbamatos, piretroides	Suelos	Tienen corta vida media, por lo su efectos sobre las plantas es escaso
	Aguas	Tóxicos para ciertas algas

Contaminación de aguas subterráneas

Las aguas subterráneas se emplean con diversos fines, en especial consumo humano, en áreas rurales, y usos agrícolas. La calidad de las aguas subterráneas ha sido objeto de numerosos debates. La evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas es difícil de realizar a menos que se identifiquen las fuentes, la Office of Technology Assessment ha identificado 33 fuentes principales de contaminación de estas aguas, que pueden agruparse en seis categorías (Tabla 0.2.2), considerando la naturaleza de la actividad contaminante.

Tabla 0.2.2.- Fuentes de compuestos orgánicos con potencial contaminante para suelos y aguas subterráneas (Office of Technology Assessment, 1984)

Categoría	Fuentes	Descripción
I	Descarga intencionada	Fosas sépticas y pozos negros Aplicación a suelos (lodos, residuos acuáticos)
II	Zonas delimitadas	Escombreras Áreas de residuos Zonas de enterramiento de animales Tanques subterráneos Contenedores
III	Transporte	Oleoductos y conducciones Trenes y camiones
IV	Descarga de actividades planificadas	Aplicaciones de plaguicidas Operaciones de alimentación del ganado Descargas urbanas Contaminantes atmosféricos
V	Flujos inducidos	Pozos de producción (petróleo y gas) Construcciones y excavaciones
VI	Natural	Interacciones aguas superficiales aguas subterráneas Humedales Depósitos subterráneos (carbón, petróleo, gas)

0.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS EN EL MEDIO AMBIENTE

La predicción del desplazamiento y distribución de los compuestos orgánicos en el medio ambiente (Fig. 0.3.1) es importante para determinar su impacto. Para plaguicidas, se precisa un conocimiento de estos factores, así como la seguridad de uso frente al hombre, calidad ambiental, y eficacia de estos compuestos. Los ecosistemas pueden sufrir el impacto de los plaguicidas si se producen condiciones que originen su dispersión, lixiviado o arrastre.

El movimiento potencial o transferencia de los compuestos orgánicos, y su degradación después de alcanzar los suelos, viene determinado por procesos químicos, físicos y biológicos. Cada compuesto químico tiene su propia estructura molecular, lo que determina, al menos parcialmente, el grado de interacción con el medio ambiente. Algunos compuestos orgánicos contienen grupos funcionales cargados que aumentan su posibilidad de adsorción por los suelos; los compuestos orgánicos positivamente cargados son adsorbidos en las superficies cargadas negativamente de los minerales de la arcilla del suelo. Otros compuestos orgánicos pueden ser muy persistentes en los suelos durante largos períodos de tiempo (compuestos orgánicos persistentes) residiendo en estas matrices durante largos períodos de tiempo, especialmente cuando las posibles transformaciones químicas o microbianas no se producen.

La movilidad y distribución de los compuestos orgánicos está controlada por los procesos de transferencia y degradación (Tabla 0.3.1). El desplazamiento físico de estas sustancias suele producirse durante su período de aplicación, pero también en momentos de fuertes vientos o durante las tormentas que provocan un fuerte lixiviado de las sustancias presentes en la vegetación. Las gotitas pequeñas pueden ser transportadas más fácilmente por el viento que las de mayor tamaño. Otros procesos están relacionados, generalmente, con la evolución de los compuestos orgánicos una vez que se introducen en los suelos.

Asimilación por las plantas

Los compuestos orgánicos, como los herbicidas, son absorbidos por las plantas a través de las raíces o el follaje. La asimilación es independiente del compuesto orgánico y la especie de la planta. Las semillas son también capaces de absorber compuestos orgánicos que pueden estar presentes incluso antes de la germinación de las semillas. La adsorción de estos compuestos en la superficie externa de las semillas aumenta la posibilidad de absorción, que puede tener lugar por procesos no metabólicos cuando las semillas están embebidas en agua o mediante procesos de difusión. Los factores que influyen en la asimilación de compuestos orgánicos por las semillas están relacionados con las propiedades de dichas sustancias (concentración, estructura, solubilidad, y velocidad de difusión), las características del suelo (temperatura y pH), y de la semilla (tamaño, características, y permeabilidad de la cubierta).

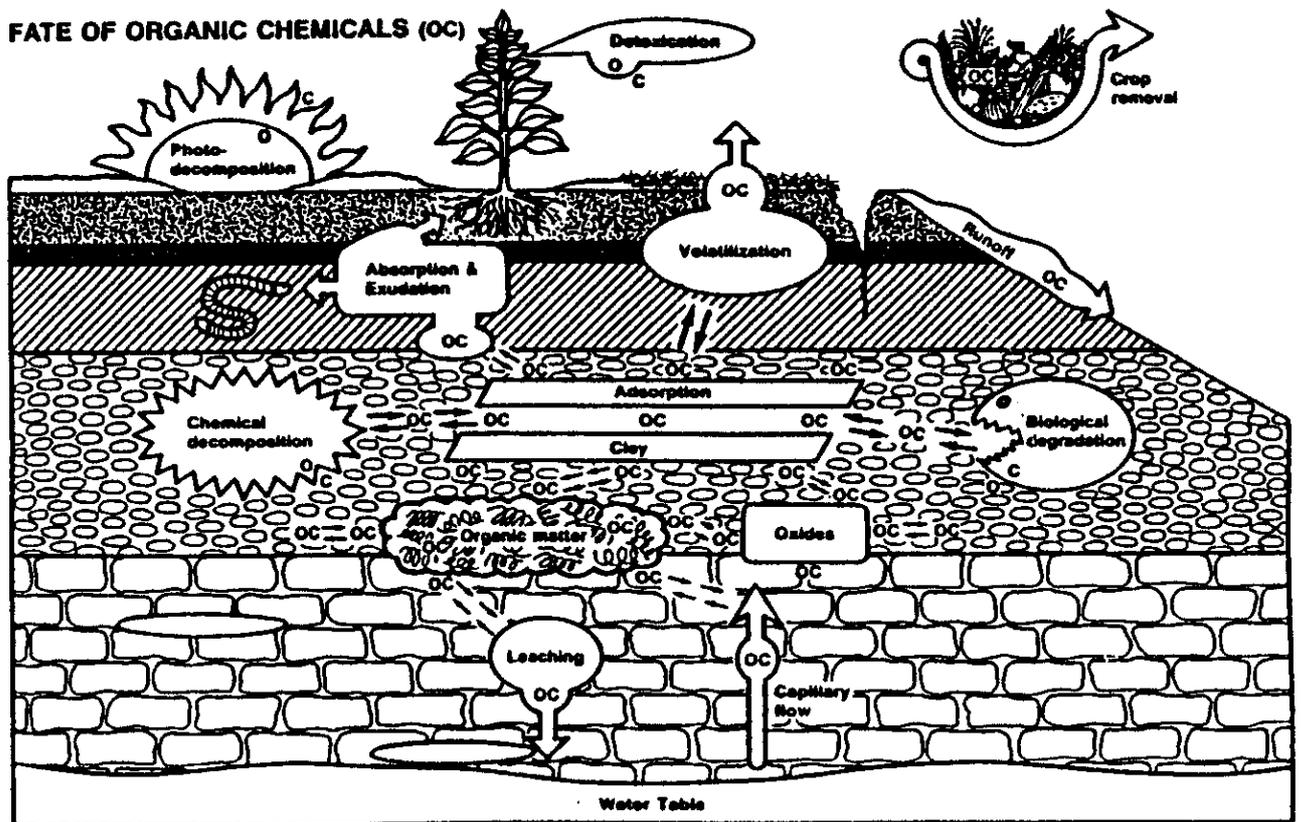


Fig. 0.3.1.- Procesos que experimentan los compuestos orgánicos (OC) en el medio ambiente. En los procesos de transferencia los compuestos orgánicos no sufren transformación, mientras que en los procesos de degradación los OC están separados (O/C). (Weber & Miller, 1989)

Las plantas son capaces de absorber compuestos orgánicos a través de sus partes aéreas, como tallos, brotes y hojas. Las plantas carnosas y las leñosas de hojas perennes se caracterizan por la asimilación de herbicidas a través de los tallos. Los brotes son el objetivo primario de contacto de los herbicidas ya que su entrada a través de los mismos garantiza, generalmente, la aniquilación de la planta. Las hojas absorben los compuestos orgánicos tanto por la superficie superior como inferior; sin embargo, la absorción es con frecuencia más rápida a través de las superficies inferiores ya que estas poseen una cutícula más fina. Los compuestos orgánicos no polares llegan a las hojas más fácilmente que los polares, así como otros muchos constituyentes inorgánicos. Los mecanismos de entrada de disoluciones acuosas y oleosas se supone que siguen vías diferentes.

Muchos compuestos orgánicos pueden ser fácilmente asimilados por las raíces y el follaje y son transportados en la planta por dos sistemas: tejidos vivos y tejidos muertos. Los compuestos orgánicos que alcanzan los

tejidos vivos están sometidos a la acción de muchos enzimas que interaccionan con los compuestos orgánicos. Sin embargo, estos tejidos vivos están recubiertos por tejidos muertos que evitan el contacto directo con dichos compuestos. No obstante, es a través de estos vasos leñosos por los que los compuestos orgánicos se desplazan a lo largo de la planta.

Una vez que los compuestos orgánicos son absorbidos por la planta, se pueden producir varias reacciones que provocan su transformación. Así algunos herbicidas pueden transformarse o metabolizarse hasta niveles no fitotóxicos por alguna o varias de las reacciones siguientes: *óxido-reducción*, *hidrólisis*, *hidroxilación*, *dehalogenación*, *dealquilación*, *conjugación* o *η -oxidación*. Cada una de estas reacciones altera al plaguicida estructuralmente. Las plantas son similares a los microorganismos, insectos, y mamíferos en su capacidad para metabolizar compuestos orgánicos, aunque las velocidades de estos procesos suelen ser más lentas.

Tabla 0.3.1.- Movilización y distribución de compuestos orgánicos en el medio ambiente, con particular referencia a los plaguicidas (Marathon-Agricultural and Environmental Consulting, 1992)

Procesos	Consecuencias	Factores
<u>Transferencia</u> (procesos que reubican los compuestos orgánicos sin alterar su estructura)		
Movilización física	Movimiento de compuestos orgánicos debido a la acción del viento	Velocidad del viento, tamaño de las gotas, distancia al objeto físico
Adsorción	Eliminación de los compuestos orgánicos debido a su interacción con plantas, suelos, y sedimentos	Contenido de arcilla y materia orgánica, tipo de arcilla, humedad
Volatilización	Pérdida de compuestos orgánicos debido a la evaporación del suelo, planta o ecosistema acuático	Presión de vapor, velocidad del viento, temperatura
Lixiviación	Movilización de los compuestos orgánicos a través de los suelos: superficialmente o en profundidad	Contenido de agua, macroporos, textura del suelo, arcilla, contenido de compuestos orgánicos.
Erosión	Movimiento de compuestos orgánicos ocasionada por el agua o la acción del viento	Escorrentías, velocidad del viento, tamaño de las partículas de arcilla y de la propia materia con compuestos orgánicos adsorbidos en ella
<u>Degradación</u> (procesos que alteran la estructura química)		
Fotoquímica	Rotura de los compuestos orgánicos debido a la absorción de la luz solar	Estructura de los compuestos orgánicos, intensidad y duración de la exposición solar
Microbiana	Degradación de compuestos orgánicos ocasionada por microorganismos	Factores medioambientales (pH, humedad del suelo, temperatura), presencia de nutrientes, contenido de materia orgánica
Química	Alteración de los compuestos orgánicos por procesos químicos como hidrólisis y reacciones redox	pH alto o bajo, factores que influyen en la degradación microbiana
Metabolismo	Transformaciones químicas de los compuestos orgánicos después de ser absorbidos por plantas o animales	Capacidad de absorción del organismo, metabolismo del mismo, interacciones dentro del organismo

Solubilidad

La solubilidad de un compuesto orgánico es importante en su distribución y movilidad, ya que los compuestos muy solubles tienden a distribuirse rápidamente en el suelo y la hidrosfera. La *solubilidad acuosa* de un compuesto orgánico viene determinada por la cantidad total que se disuelve en agua pura en condiciones específicas de temperatura. Cuando la solubilidad acuosa de los compuestos orgánicos se excede, se formará una segunda fase además de la acuosa. Las solubilidades comunes de los compuestos orgánicos se encuentran en el rango de 1 a 100.000 mg/kg (peso de compuesto orgánico por peso de agua pura); aunque numerosas sustancias pueden tener solubilidades superiores. La diferencia entre el compuesto más soluble y el menos es aproximadamente del orden de los mil millones (Fig. 0.3.2)

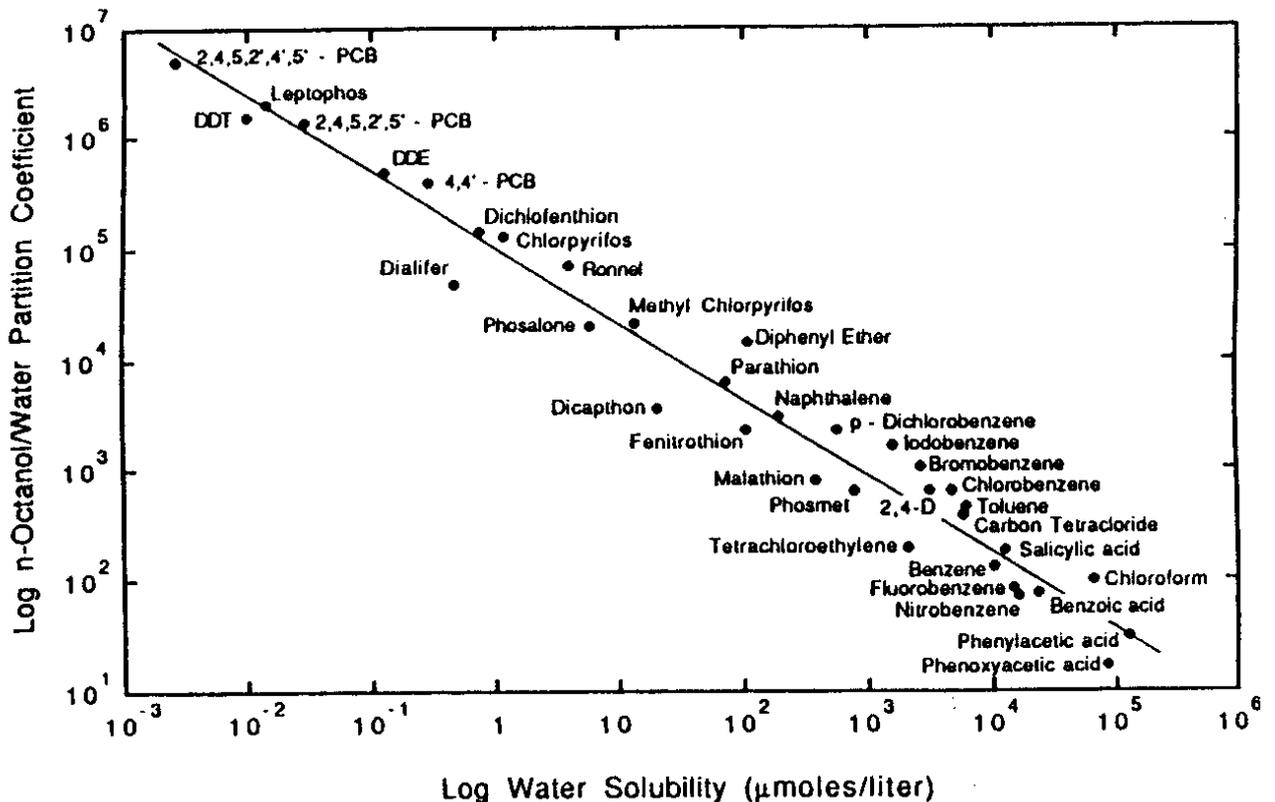


Fig. 0.3.2.- Coeficientes de partición agua-octanol (K_{ow}) y solubilidad de diversos compuestos orgánicos (Chiou et al, 1977)

La solubilidad de los compuestos orgánicos en agua es función de la temperatura, pH, fuerza iónica, y presencia de otros compuestos orgánicos disueltos (DOC). La mayoría de los compuestos orgánicos suelen ser más solubles al incrementarse la temperatura, aunque también puede darse el proceso contrario. La solubilidad de ciertos tipos de compuestos orgánicos,

como los ácidos orgánicos, suele aumentar al hacerlo el pH, mientras que las bases orgánicas suelen comportarse de forma inversa. Las sales solubles suelen reducir la solubilidad de estos compuestos, lo que explica que en las aguas marinas las sustancias orgánicas sean menos solubles que en las aguas dulces. Varios estudios han mostrado también que la presencia de determinadas sustancias orgánicas disueltas en los medios acuosos incrementa la solubilidad aparente de los compuestos orgánicos, debido a procesos de interacción.

Se han utilizado varios métodos para la estimación de la solubilidad de los compuestos orgánicos, de los cuales pueden destacarse dos: (1) el basado en la estructura química, y (2) el coeficiente de reparto octanol/agua. El primer método permite estimar la solubilidad de grupos particulares de compuestos, por ejemplo, hidrocarburos alifáticos y aromáticos. También se dispone de numerosos datos del coeficiente de reparto entre una fase acuosa y una orgánica no miscible (octanol). Este coeficiente se determinan con la siguiente ecuación:

$$K_{ow} = \frac{\text{Conc. de compuestos orgánicos en octanol (mg)}}{\text{Conc. de compuestos orgánicos en agua (mg)}}$$

Existe relación inversa entre la solubilidad en agua y el K_{ow} (Fig. 0.3.2).

Vida media de existencia de los compuestos orgánicos

La *vida media* ($t_{1/2}$) de una reacción se refiere al tiempo necesario para que la mitad de reactante se convierta en producto o cuando la concentración de reactante es la mitad de su nivel inicial. Para compuestos orgánicos, las vidas medias pueden calcularse para distintos tipos de reacciones como volatilización, fotólisis (descomposición por la luz solar), lixiviación potencial (características de adsorción-desorción), y degradación (química o microbiana). Los valores de vida media son importantes para comprender el impacto medioambiental potencial de un compuesto orgánico concreto. Por ejemplo, si un contaminante muy tóxico se vierte accidentalmente en un lago y la velocidad de fotólisis es muy pronunciada ($t_{1/2}$ pequeña), las consecuencias pueden ser mínimas si los productos de la fotólisis no poseen propiedades tóxicas. Sin embargo, si un contaminante moderadamente tóxico se dispersa y su velocidad de fotólisis es lenta, el impacto medioambiental puede ser importante. Este mismo planteamiento puede aplicarse a procesos de volatilización, lixiviación y degradación de los compuestos orgánicos.

Los rangos de vida media para la hidrólisis de diversos grupos de compuestos orgánicos se muestran en la Fig. 0.3.3. Las reacciones de hidrólisis implican una interacción entre un compuesto orgánico y el agua, produciéndose la rotura de un enlace y la formación de un nuevo enlace carbono oxígeno (p. ej., $C-X + H_2O \rightleftharpoons C-OH + H^+ + X^-$). La hidrólisis se considera como una de las reacciones más importantes que determina la distribución de los compuestos orgánicos en los sistemas acuáticos. No todos los compuestos orgánicos pueden experimentar hidrólisis, ya que muchos no poseen los grupos funcionales susceptibles de experimentar dicha reacción (Tabla 0.3.2.). Las reacciones de hidrólisis dependen generalmente del pH.

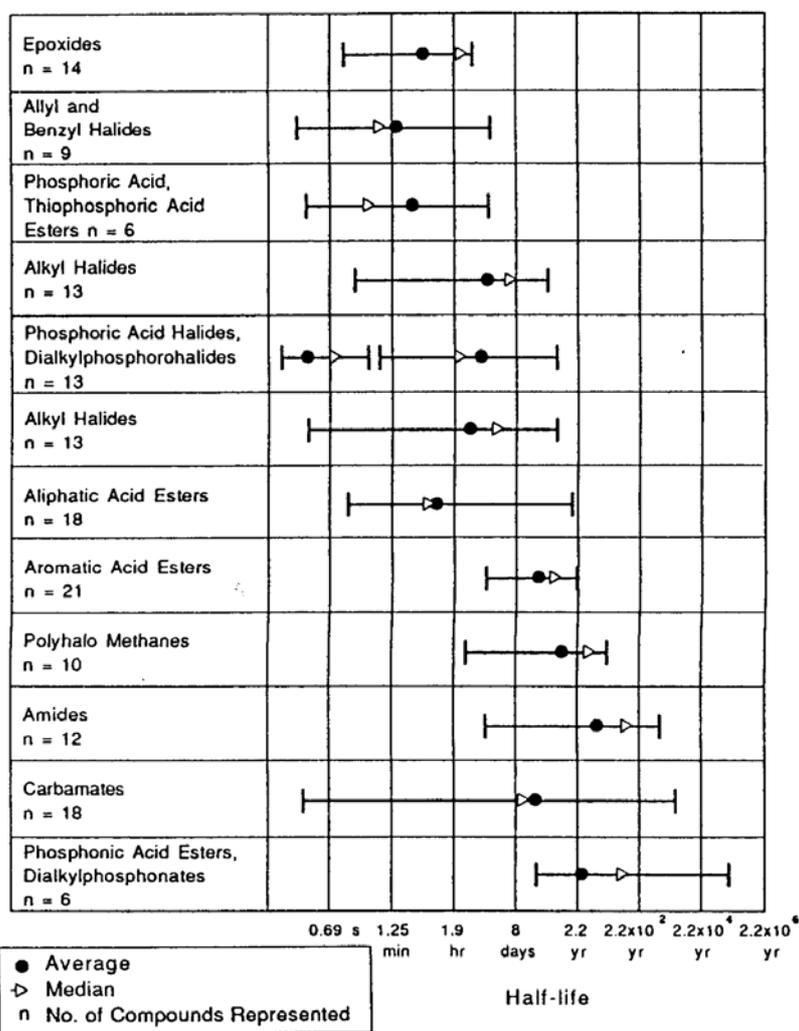


Fig. 0.3.3.- Vidas medias de hidrólisis ($t_{1/2}$) de diferentes grupos de compuestos orgánicos (Harris, 1982a)

Tabla 0.3.2.- Resistencia a la hidrólisis de los compuestos orgánicos

Resistentes a la hidrólisis	Susceptibles de experimentar hidrólisis
Alcanos, alquenos, alquinos	Haluros de alquilo
Benceno/bifenilos	Amidas
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	Aminas
Compuestos aromáticos halogenados/PCBs	Carbamatos
Dieldrin/aldrin y plaguicidas halogenados relacionados	Ésteres de ácidos carboxílicos
Aminas aromáticas	Nitrilos
Alcoholes	Ésteres de ácido fosfónico
Fenoles	Ésteres de ácido fosfórico
Glicoles	Ésteres de ácido sulfónico
Éteres	Ésteres de ácido sulfúrico
Aldehidos	Epóxidos
Cetonas	
Ácidos carboxílicos	

Volatilización

La volatilización de los compuestos orgánicos naturales o sintéticos determina su transferencia de las aguas y suelos a la atmósfera. La información sobre la velocidad de volatilización de los compuestos orgánicos es importante para comprender su persistencia en el medio ambiente.

Los factores que afectan la volatilización de los contaminantes desde el agua dependen de las propiedades químicas y físicas de los mismos (p.ej., solubilidad y presión de vapor), interacciones con materiales en suspensión y sedimentos, propiedades físicas de la columna de agua (profundidad, velocidad, y turbulencia), y propiedades de la interfase agua-atmósfera. Las velocidades de volatilización, expresadas como vida media, pueden variar de horas a años. Las vidas medias de volatilización del tricloroetileno (TCE) y el plaguicida dieldrin en el agua se ha estimado en 3-5 h en un año, respectivamente. La Tabla 0.3.3. reúne algunos compuestos orgánicos y su volatilización potencial a partir del agua.

Los factores que afectan la volatilidad de los compuestos orgánicos de los suelos son las propiedades fisicoquímicas intrínsecas (presión de vapor, solubilidad, estructura, naturaleza de los grupos funcionales, y características de adsorción-desorción), la concentración, las propiedades del suelo (humedad, porosidad, densidad, y contenido de materia orgánica y arcilla), y los factores medioambientales (temperatura, humedad, y velocidad del viento). El paso inicial en la volatilización de los compuestos orgánicos de los suelos es su evaporación, lo que representa un cambio del estado sólido o líquido a vapor. Después de la evaporación el vapor se

desplaza a través del suelo y se dispersa en la atmósfera por difusión o turbulencia.

Tabla 0.3.3.- Ejemplos de compuestos orgánicos y su volatilidad potencial a partir del agua (Thomas, 1982)

Volatilidad potencial	Compuesto orgánico	Vida media ($t_{1/2}$)
Baja	Dieldrín	327 d
	3-bromo-1-propanol	390 d
Media	Fenantreno	31 h
	Pentaclorofenol	17 d
	DDT	45 h
	Aldrín	68 h
	Lindano	115 d
Alta	Benceno	2.7 h
	Tolueno	2.9 h
	O-xileno	3.2 h
	Tetracloruro de carbono	3.7 h
	Bifenilo	4.3 h
	Tricloroetileno	3.4 h

Fotolisis

Las reacciones fotoquímicas en las que participan la luz del sol son muy importantes para determinar el reparto de los contaminantes en el medio ambiente acuático, y puede también desempeñar un papel significativo en la degradación de los compuestos químicos en la superficie del suelo. En los sistemas acuáticos, la fotolisis puede originar procesos directos e indirectos. En la fotolisis directa, la luz del sol es absorbida directamente por los compuestos orgánicos produciendo transformaciones químicas. La proporción en que se produce la fotolisis directa depende de la intensidad de la luz del sol y el solapamiento de las características espectrales de la radiación solar y las correspondientes a los compuestos orgánicos. Con la fotolisis indirecta, otras sustancias como los minerales de la arcilla o las especies inorgánicas elementales absorben la luz del sol y bien inician una serie de reacciones que finalmente transforman los compuestos orgánicos o transfieren la energía de excitación a dichos compuestos orgánicos.

El ozono atmosférico absorbe la radiación solar para longitudes de onda inferiores a 290 nm. Por tanto, la fotolisis directa causada por la luz solar no se producirá si el compuesto orgánico no absorbe a longitudes de onda por encima de 290 nm. La intensidad de la luz del sol que alcanza la superficie de la Tierra viene determinada por el espesor de la atmósfera y el ángulo de incidencia de la radiación, la cual depende de la latitud, estación, y momento del día. La intensidad de la luz del sol es mayor en verano que en invierno.

Las vidas medias de los compuestos orgánicos que experimentan fotólisis en medios acuáticos están en el rango de horas a meses (Tabla 0.3.4). A diferencia de los sistemas acuáticos, las reacciones de fotólisis en los suelos son difíciles de determinar debido a la naturaleza heterogénea de los mismos y a la pérdida de penetración que experimenta la radiación. La fotólisis es en primer lugar un fenómeno de superficie que se evita si el compuesto se incorpora a la masa del el suelo.

Tabla 0.3.4.- Valores de vida media de algunos compuestos orgánicos que sufren procesos de fotólisis directos (Harris, 1982b)

Tipo de compuesto	Compuesto orgánico	Vida media ($t_{1/2}$)
Pesticidas	Trifluralin	31 h
	Malathion	15 h
	Carbaril	50 h
	Sevin	11 d
	Metoxiclor	29 d
	2,4-D, metil ester	62 d
	Mirex	1 a
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Pireno	0.7 h
	Benz(a)antraceno	3.3 h
	Fenantreno	8.4 h
	Fluoranteno	21h
	Naftaleno	70 h
Miscelánea	Benz(f)quinolina	1 h
	Quinolina	5-21 d
	p-cresol	35 d

Procesos de ad(b)sorción-desorción

Los fenómenos sorcitivos que experimentan los compuestos orgánicos constituyen los procesos más importantes en los que participan estos contaminantes. Si se conocen las interacciones que se producen entre los suelos o sedimentos y un contaminante orgánico cuando este se incorpora a los suelos y medios acuáticos, se puede predecir el comportamiento del contaminante, y por tanto, su movimiento y reparto en el medio ambiente. El modelo para predecir el reparto y transporte de los contaminantes precisa de una información adecuada de sus propiedades sorcitivas bajo condiciones variables. En la sorción de los compuestos orgánicos por las arcillas y la materia orgánica participan las siguientes interacciones: fuerzas de van der Waals, puentes de hidrógeno, interacciones dipolo-dipolo, intercambio iónico, protonación, intercambio de ligandos y/o reparto hidrofóbico.

La sorción de numerosos contaminantes por suelos y sedimentos ha sido señalado como una forma eficiente de reducir su movilidad. La sorción puede también afectar la bioactividad, persistencia,

biodegradabilidad, lixiviación, y volatilidad de los compuestos orgánicos. El tipo y naturaleza de los grupos funcionales de la sustancia determina en gran manera su capacidad para ser adsorbida. En los suelos la superficie de las arcillas y los óxidos metálicos, así como la materia orgánica son los responsables de la adsorción de los compuestos orgánicos. La superficie de la arcilla puede actuar como adsorbente de un contaminante, que a su vez puede afectar la adsorción de otros.

Transformaciones (a)bióticas

Tanto las reacciones abióticas como bióticas, solas o combinadas, son responsables de las transformaciones de los compuestos orgánicos en los suelos y medio ambiente acuático. Bajo ciertas condiciones las reacciones abióticas pueden dominar, mientras que bajo otras son las reacciones bióticas las que prevalecen. La degradación de los compuestos orgánicos suele presentarse en los procesos bióticos; sin embargo, otras reacciones abióticas pueden presentarse simultáneamente. Muchas transformaciones de compuestos orgánicos son originadas por los microorganismos, pero constituyendo en el fondo un proceso abiótico.

Las reacciones abióticas más importantes que se producen en los sistemas acuáticos incorporan procesos de *hidrólisis*, *óxido-reducción* (redox), y *fotólisis*; en los sedimentos las reacciones dominantes son las de hidrólisis y redox. Las reacciones de oxidación que tienen lugar en los medios acuáticos pueden estar mediadas por reacciones directas o indirectas de fotólisis, que a su vez dependen de los compuestos orgánicos y sustratos presentes. La oxidación no fotolítica puede producirse directamente por la acción del ozono, o por las propiedades catalíticas de ciertos metales. La reducción abiótica de compuestos químicos también puede ser catalizada por ciertas especies metálicas, entre las que destacan las de Fe y Mn. Las reacciones redox que se producen en los sedimentos pueden seguir una ruta similar a las observadas en los suelos.

En los suelos, las transformaciones abióticas se producen en la fase líquida y en la interfase sólido-líquido. En la fase acuosa del suelo, las reacciones de hidrólisis y redox son las transformaciones abióticas más usuales, aunque también pueden presentarse otras reacciones. Las arcillas, materia orgánica, y óxidos metálicos son capaces de catalizar las reacciones abióticas que se presentan en los suelos. Los cationes intercambiables pueden también afectar las transformaciones de los compuestos orgánicos. Las reacciones de hidrólisis y redox son de nuevo las fundamentales en el control de las transformaciones abióticas que se presentan en los suelos.

Las transformaciones microbianas de los compuestos orgánicos se clasifican en (1) biodegradación (el contaminante es usado como sustrato para el crecimiento de los microorganismos, esto es, su metabolismo), (2) cometabolismo (el contaminante es transformado por reacciones metabólicas sin emplearse como fuente de energía), (3) acumulación (el contaminante es incorporado al microorganismo), (4) polimerización o conjugación (el contaminante se une a otro compuesto orgánico), (5) efectos secundarios de la actividad microbiana (el contaminante se transforma como consecuencia de los efectos indirectos sobre los microorganismos, por ejemplo, pH, redox) (Bollag & Liu, 1990). Aunque estas transformaciones se consideran como desarrolladas por los microorganismos, también participan transformaciones abióticas, en especial en las relacionadas con las categorías (4) y (5).

La biodegradación es considerada como un mecanismo primario en el cual los compuestos químicos se transforman en productos inorgánicos como CO₂, H₂O, y sales minerales. El metabolismo de compuestos orgánicos en los suelos bajo la acción de las bacterias suele ser superior al ocasionado por otros microorganismos. En los ecosistemas naturales, la biodegradación de los compuestos orgánicos se produce especialmente bajo la acción de las bacterias heterotróficas y actinomicetos, algunas bacterias autótrofas, hongos, incluidos los basidiomicetos y levaduras, y protozoos específicos, pudiendo originarse bajo condiciones anaeróbicas y aeróbicas.

0.4 NIVELES BASALES DE COMPUESTOS ORGANICOS EN LOS SUELOS

En contraste con los metales pesados que se encuentran en la Naturaleza como constituyentes de la corteza, la mayoría de los compuestos orgánicos no tienen un origen natural en cantidades relevantes (Naumann, 1994). Por tanto, no se puede hablar de valores de fondo geoquímico o basal en el contexto de estos compuestos orgánicos.

Los valores basales son concentraciones de sustancias medidas en suelos no específicamente contaminados. En el contexto de las sustancias químicas orgánicas, estos valores basales indican el impacto antropogénico general. Debido a las considerables variaciones espaciales, suele ser necesario establecer diferenciaciones regionales. La concentración y distribución de contaminantes orgánicos en los diversos horizontes del suelo están, además, considerablemente influenciadas por el tipo de suelo y su uso, lo que puede hacer necesario el establecimiento de diferencias de acuerdo con el uso del suelo o la consideración de sus horizontes específicos.

