

4. MOVIMIENTO DE LOS PLAGUICIDAS HACIA LAS AGUAS SUBTERRANEAS

4.1. Características del suelo que afectan al transporte

- 4.1.1. *Contenido en arcillas*
- 4.1.2. *Contenido en materia orgánica*
- 4.1.3. *Textura, estructura y porosidad*
- 4.1.4. *Vegetación, temperatura, humedad*
- 4.1.5. *pH*

4.2. Características del plaguicida que afectan al transporte

- 4.2.1. *Solubilidad en el agua*
- 4.2.2. *Sorción en el suelo y subsuelo*

4.3. Otros factores que afectan al transporte

- 4.3.1. *Condiciones climatológicas y ambientales*
- 4.3.2. *Métodos y condiciones de aplicación*
- 4.3.3. *Topografía*
- 4.3.4. *Condiciones del sistema acuífero*

4. MOVIMIENTO DE LOS PLAGUICIDAS HACIA LAS AGUAS SUBTERRANEAS

El movimiento de los plaguicidas hacia las aguas subterráneas viene condicionado por las características intrínsecas de los productos y está estrechamente ligado con las propiedades del medio en que se encuentren.

En general y debido a que los plaguicidas se aplican comúnmente de una manera difusa, su paso a las aguas se realiza con una dilución importante, dando concentraciones finales bajas, salvo en el caso de vertidos accidentales, aplicaciones directas del plaguicida sobre el agua, y en algunos casos, por efectos acumulativos de la concentración de los productos (ciertos plaguicidas o excesos en su uso) o gran vulnerabilidad de los acuíferos.

La inactivación de un plaguicida puede ser rápida o lenta, dependiendo de los siguientes factores:

- * Naturaleza del plaguicida.
- * Naturaleza del suelo.
- * Climatología.
- * Labores agrícolas.

Un plaguicida se vuelve inactivo cuando los productos resultantes de las transformaciones que puede sufrir, según el entorno en que se encuentre, son inocuos desde el punto de vista medioambiental y para la salud humana.

4.1. CARACTERISTICAS DEL SUELO QUE AFECTAN AL TRANSPORTE

4.1.1. Contenido en arcillas

La presencia en el suelo de minerales arcillosos afecta al transporte de los plaguicidas, dada la alta capacidad de adsorción que estos presentan.

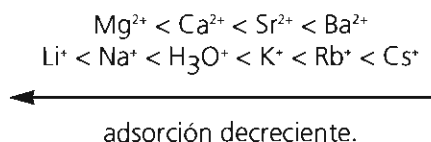
La estructura de las arcillas consiste en una alternancia de capas tetraédricas (T), formadas por anillos hexagonales de tetraedros de SiO_4 y capas octaédricas (O), constituidas por láminas de cationes unidas a grupos OH.

La sustitución en esas capas de Si^{4+} por Al^{3+} y de Al^{3+} por Mg^{2+} produce una deficiencia en cargas positivas. Esta tiende a ser compensada por adsorción de cationes (capacidad de intercambio iónico), mayor o menor según las sustituciones realizadas.

Así, en la montmorillonita se producen pocas sustituciones de Si^{4+} por Al^{3+} en las capas tetraédricas, pero son numerosas las de Al^{3+} por Mg^{2+} en las capas octaédricas, lo que le proporciona una capacidad de intercambio iónico alta (80 a 140 meq/100 gr). En la caolinita la sustitución de SiO_4 por Al^{3+} es pequeña, por lo que su capacidad de intercambio iónico es baja (1 a 10 meq/100 gr), mientras que la illita se encuentra en una situación intermedia entre ambas.

La adsorción depende del radio y de la carga de los iones a adsorber; es mayor en los iones trivalentes (Al^{3+} , Fe^{3+} , ...) que en los divalentes y en éstos que en los monovalentes.

A su vez este fenómeno no es semejante en iones de igual carga



Además cabe señalar que esta capacidad de intercambio iónico puede aumentar al incrementarse el pH.

Hasta ahora se ha analizado solamente la adsorción química, que es la más fuerte e importante, pero además el contenido de arcillas favorece también la adsorción física, dada la gran superficie de las mismas. Esta última es especialmente importante en el caso de la montmorillonita, que posee una superficie específica muy elevada y se caracteriza por un bajo calor de adsorción y débil enlace.

En la tabla 4.1. se muestran algunos valores, en tanto por ciento de adsorción, de plaguicidas organofosforados para diferentes arcillas en solución acuosa.

TABLA 4.1.- ADSORCION DE PLAGUICIDAS ORGANOFOSFORADOS

| Insecticida | Concentración de la solución en equilibrio ppm | Tipos de Arcilla | | |
|-----------------|--|-------------------------|--------------------------------------|------------|
| | | Montmorillonita cálcica | (Adsorción en%) Caolinita cálcica | Atapulgita |
| Paratión | 6,5 | 73 | 14 | 87 |
| Metil Pirimifós | 16,0 | 94 | 30 | nd |
| Etil Pirimifós | 16,0 | 92 | 75 | nd |

nd: no determinado

Fuente: Yaron, 1.978.

El efecto catalítico y/o el de descomposición de los plaguicidas por las arcillas presenta una gran importancia para analizar el comportamiento de los mismos en el subsuelo. En la figura 4.1. se muestra la persistencia del Paration en una serie de medios como el agua, sobre una superficie de cristal y sobre diferentes arcillas, durante un período de incubación de 30 días a temperatura ambiente de laboratorio.

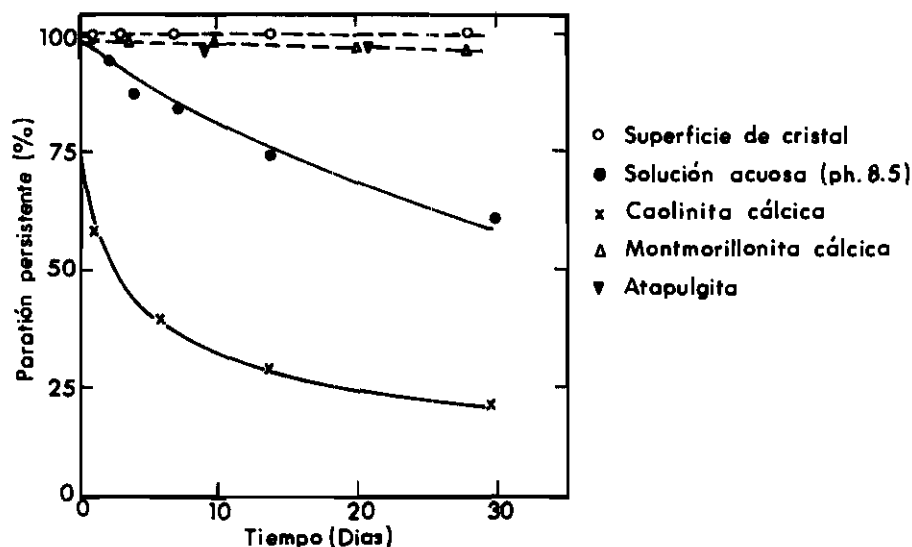


Figura 4.1.- Persistencia del Paratión en diferentes condiciones.
(Fuente: Gerstl y Yaron, 1.978).

En dicha figura pueden observarse las curvas para la caolinita cálcica (Saltzman et al., 1.974), para la montmorillonita sobresecada a 40°C (Saltzman, 1.977), y para la atapulgita sobresecada a 40°C (Gerstl y Yaron, 1.978).

En el caso del paration y la caolinita, la cinética de degradación ocurre en dos fases, una primera muy rápida y otra segunda más lenta y continua, como se aprecia en la figura 4.2.; en ésta se representa la concentración del paration en la caolinita (p) frente al tiempo (días). Puede observarse como la degradación ocurre en dos fases de cinética de primer orden, que son los dos tramos de recta.

En la figura 4.3. se observa la dependencia que existe entre la actividad catalítica de las superficies caoliniticas con el contenido en humedad y los cationes presentes durante un período de incubación de 15 días.

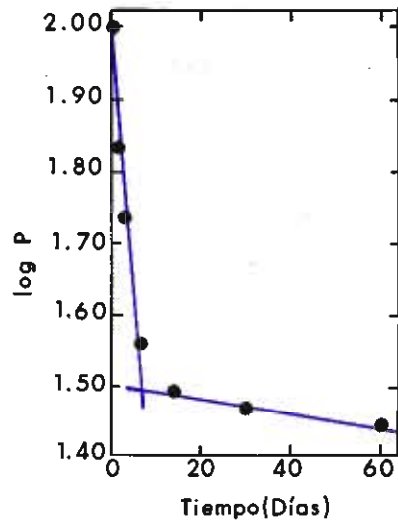


Figura 4.2.- Cinética de degradación del Paratión en la Caolinita.
(Fuente: Saltzman et al., 1974).

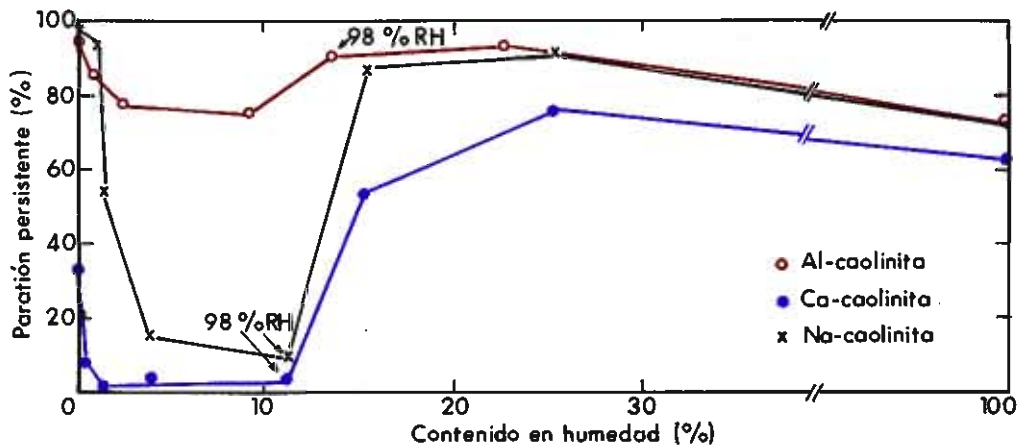


Figura 4.3.- Relación entre la actividad catalítica de la Caolinita, la humedad y los iones presentes.
(Fuente: Saltzman et al., 1976).

Hasta ahora se han indicado los factores que influyen en el proceso de adsorción, pero también tiene una gran importancia, para predecir el transporte de plaguicidas en el subsuelo, el efecto de desorción (también conocido como efecto liberador) de un plaguicida adsorbido superficialmente por la arcilla. Este no puede explicarse por la saturación o el reemplazamiento catiónico de las arcillas (Mingelgrin et al., 1977), pero sí por las propiedades del plaguicida y el tipo de arcillas.

En la figura 4.4. se muestra un ejemplo de la cinética de liberación del parathion desde la superficie de la atapulgita hasta la fase acuosa. El primer tramo es una línea recta ascendente que indica que el proceso de desorción (y por tanto difusión) ocurre hasta un tiempo en que se hace horizontal, que es cuando termina el proceso de liberación.

En la tabla 4.2. se muestran los porcentajes de varios plaguicidas organofosforados liberados del estado de adsorción, en un flujo continuo de agua, durante un período de 24 horas, en condiciones dinámicas.

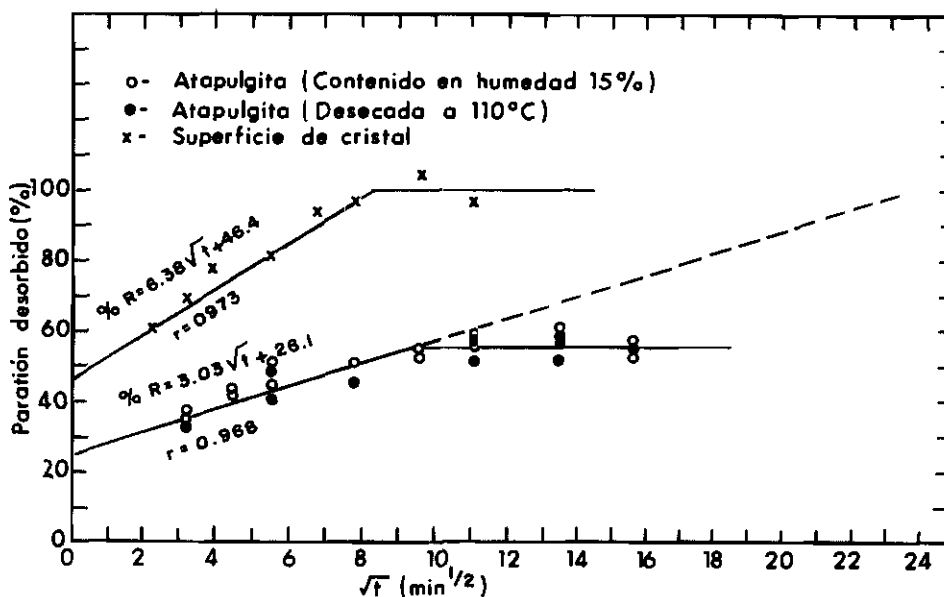


Figura 4.4.- Cinética de liberación del Paratión de la Atapulgita.
(Fuente: Gerstl y Yaron, 1.977).

TABLA 4.2.- LIBERACION DE PLAGUICIDAS ORGANOFOSFORADOS DE LAS ARCILLAS

| Arcilla | Cationes Saturadores | % liberado después de 24 h | | |
|-----------------|----------------------|----------------------------|----------|------|
| | | Paratión | Diacinón | DDVP |
| Montmorillonita | Na | 4,3 | 2,1 | 12,0 |
| | Ca | 9,5 | | 38,0 |
| Caolinita | Na | 6,3 | 22,5 | 95,0 |
| | Ca | 5,8 | 31,0 | 75,0 |

Fuente: Mingelgrin et al., 1.977.

4.1.2. Contenido en materia orgánica

El contenido en materia orgánica del suelo influye en dos sentidos en la cantidad de plaguicidas que alcanzan las aguas subterráneas. Por un lado la materia orgánica es una fuente de energía para los microorganismos y éstos son uno de los principales responsables de la degradación de plaguicidas, por lo que al incrementarse aquella aumenta la bioactividad y, consecuentemente, la degradación de los mismos.

Por otra parte la adsorción de los plaguicidas se incrementa con el contenido de materia orgánica.

En la figura 4.5. se refleja este efecto para el caso de la Atracina.

Asumiendo que: Densidad = 0,8 g/cm³
Permeabilidad = 1 cm/día

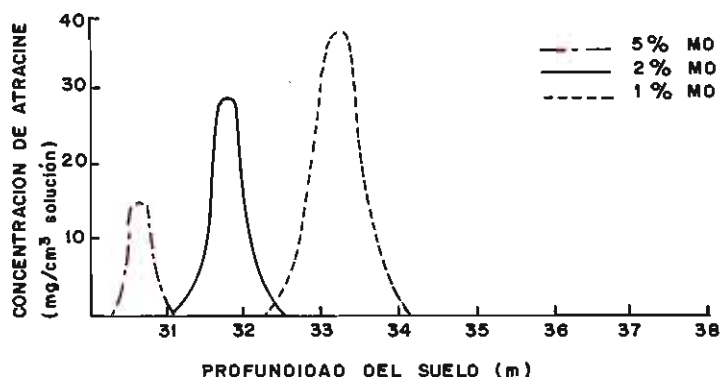


Figura 4.5.- Influencia de la materia orgánica en la concentración de Atracina.
(Fuente: Helling, Ch. S. y Gish, T.J., 1.986).

Esta capacidad de adsorción es aproximadamente de 300 m.equiv/100 gr con los ácidos fúlvicos y de 600 m.equiv/100 gr en los ácidos húmicos.

No obstante debe señalarse que en algunos grupos de plaguicidas al disminuir el pH del medio ambiente disminuye la adsorción de los mismos a la materia orgánica del suelo.

Dada la importancia que adquiere el contenido de materia orgánica en el suelo es necesario analizar su distribución. En los suelos no agrícolas esta concentrada en los niveles más superficiales puesto que procede de la descomposición de las partes muertas de las plantas que allí se acumulan. Por el contrario en los suelos agrícolas la materia orgánica esta uniformemente distribuida en todo el espesor del suelo. Además aquellos plaguicidas que son altamente adsorbidos por la materia orgánica en estos suelos cultivados generalmente son también repuestos por los agricultores con mayor rapidez para compensar la porción adsorbida.

Como contraposición a esta capacidad de adsorción debe indicarse que existen evidencias de que algunos residuos de plaguicidas adsorbidos en suelos muy orgánicos pueden volver a ser transportados por las aguas subterráneas cuando se produce la degradación microbiana del humus.

4.1.3. Textura, estructura y porosidad

La textura de un sedimento refleja el tamaño de los clastos que lo componen. Suele cuantificarse en función del tanto por ciento de arena, limo y arcilla que contiene.

La percolación de los plaguicidas está fuertemente influenciada por el tamaño de los clastos, aumentando con este, por lo que será mayor en las arenas que en los limos y arcillas.

La estructura es la forma en que se agrupan los clastos que componen el suelo para formar unidades más o menos complejas denominadas agregados.

Tiene gran importancia analizar el tipo de estructura existente, puesto que influye en la aireación del suelo y en su permeabilidad.

Pueden considerarse diversos tipos de estructura:

A. Estructura grumosa

Son agregados elementales agrupados en unidades mayores.

Este tipo de estructura produce un lavado poco intenso del suelo y se conservará el agua en la arcilla del suelo.

B. Estructura particular

Son agregados elementales dispersos. Puede producirse en suelos pobres en elementos finos en cuyo caso tendrán una permeabilidad media a alta y un lavado intenso o en suelos ricos en finos en los que la permeabilidad es débil y existe un lavado reducido pues los finos se hinchan al humedecerse.

Si la textura es gruesa se dificulta el desarrollo de una buena estructura, al igual que sucede con texturas muy finas.

Según la forma que presenten pueden clasificarse las estructuras en laminares, prismáticas, columnares, en bloque angulares, granulares y migajosas.

La porosidad es la relación existente entre el volumen de huecos respecto al volumen total del sedimento. Es función de la textura y estructura previamente descritas.

El grado de interconexión entre esos huecos queda reflejado mediante la porosidad eficaz (cantidad de poros interconectados a través de los cuales puede pasar un fluido). Esta tiene una gran importancia al ser un factor determinante en el transporte de plaguicidas ya que éste es más rápido a través de suelos con porosidad eficaz elevada.

Estrechamente ligado a la porosidad eficaz está la permeabilidad del terreno que indica el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero. Es este el factor de las características del suelo que más influye en el transporte de los plaguicidas.

En la figura 4.6. se observa como al aumentar la permeabilidad, la máxima concentración de Atracina se desplaza en profundidad en el suelo.

Asumiendo que: Materia orgánica = 2%
Densidad = 0,8 g/cm³

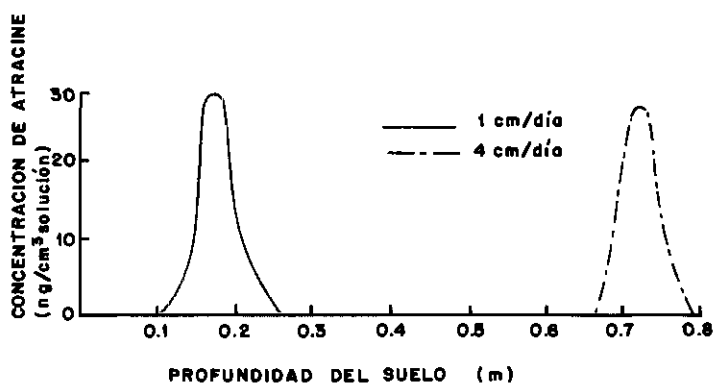


Figura 4.6. – Influencia de la permeabilidad en la concentración de Atracina.
(Fuente: Helling, Ch.S. y Gish, T.J., 1.986).

Los cambios en la densidad natural del suelo afectan al movimiento de los plaguicidas a su través.

En la figura 4.7. se muestra el efecto del incremento de la densidad del suelo en la concentración de Atracina. Se observa que al incrementarse la densidad del suelo la concentración máxima del plaguicida en la fase líquida decrece y se produce más cerca de la superficie.

La densidad de 0,8 gr/cm³ allí indicada corresponde a un suelo ligero, o a un suelo que ha sido recientemente arado, la de 1,45 gr/cm³ es característica de suelos que tienen una densidad natural alta o que han sido compactados.

Como la densidad se incrementa con la profundidad en la mayor parte de los suelos agrícolas el movimiento del plaguicida se irá retardando al atravesar el perfil.

Asumiendo que: Materia orgánica = 2%
Permeabilidad = 1 cm/día

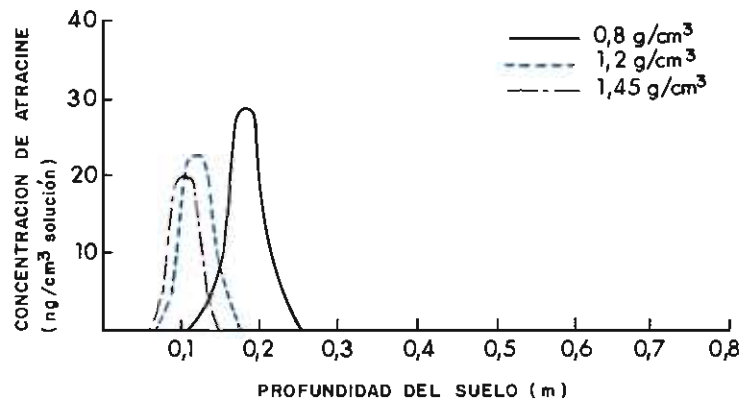


Figura 4.7 – Influencia de la densidad del suelo en la concentración de Atracina (Fuente: Helling, Ch.S. y Gish, T.J., 1986).

Debe destacarse que la existencia de heterogeneidades en el subsuelo, es decir, capas con diferentes características de textura, porosidad, permeabilidad, puede producir movimientos laterales de los plaguicidas que deben ser considerados para analizar el área que podrían alcanzar estos, como se indica en la figura 4.8.

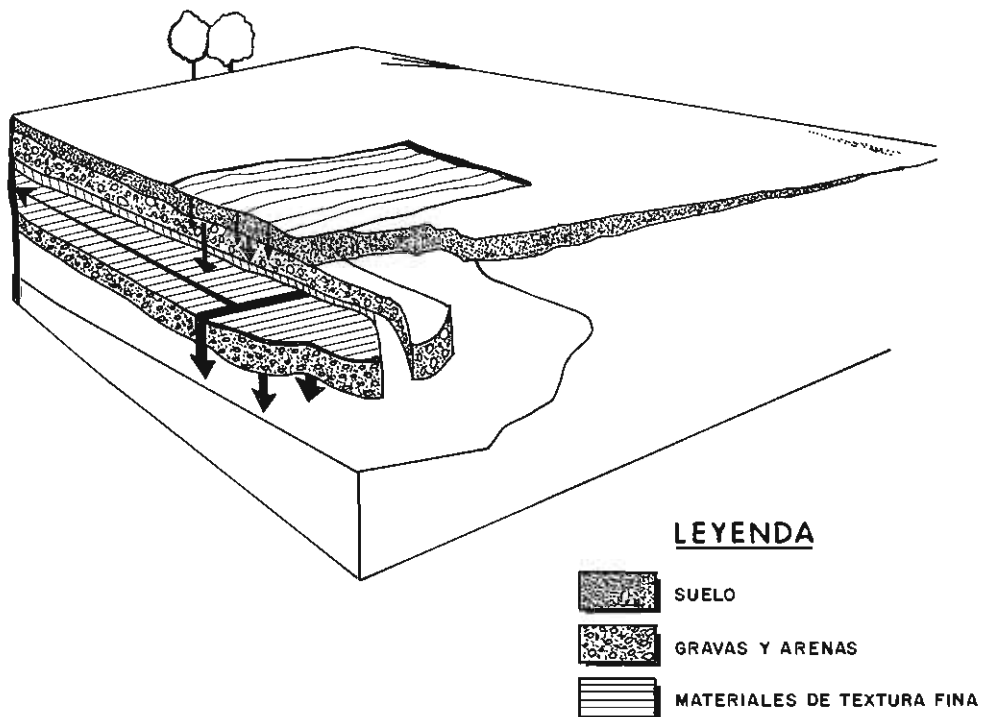


Figura 4.8.– Influencia de las heterogeneidades en el movimiento lateral de los fluidos. (Fuente: Helling, Ch.S. y Gish, T.J., 1.986).

4.1.4. Vegetación, temperatura, humedad

La existencia de una cubierta vegetal produce una disminución de la energía luminosa en la superficie del suelo, al incrementar la cantidad de luz que es reflejada.

Este hecho influye en la degradación de los plaguicidas debido a que el proceso de fotólisis se produce bien mediante la absorción directa de la luz solar por el compuesto o indirectamente al reaccionar con otras especies químicas que hayan sido activadas por la radiación.

La cubierta vegetal también actúa como un aislante, reduciendo la conducción de calor hacia y desde el suelo, lo que provoca un proceso de difusión de vapor más lento y que los suelos con cubierta vegetal sean entre 2 y 10°C más fríos que los que no la tienen.

Estas características influyen en la volatilidad de los plaguicidas (es decir en su propensión a dispersarse en el aire). Por otra parte no debe olvidarse que la disminución de la temperatura influye negativamente en la degradación de los plaguicidas, pues esta es mayor con temperaturas elevadas.

Todos estos factores se reflejan en un incremento de la humedad del suelo, al disminuir la pérdida de agua que se produce, con la importancia que este factor posee como se verá posteriormente.

La humedad se refiere a la presencia de agua en el suelo.

Tiene gran importancia al incidir en diversos procesos que afectan al transporte de los plaguicidas:

– Adsorción

Cuando la humedad es muy pequeña los compuestos cristalizan y la adsorción es reducida.

Por el contrario, al aumentar la humedad ésta se incrementa, puesto que la mayoría de los plaguicidas son adsorbidos en fase líquida, hasta que supera el 30%, pues en esa situación la adsorción decrece rápidamente y predominan entonces los fenómenos de difusión.

Una excepción la constituyen los herbicidas catiónicos que son fuertemente adsorbidos a cualquier valor de humedad del suelo.

– Actividad microbiana

Las condiciones óptimas en las que se desarrolla la actividad microbiana (que es uno de los principales procesos de degradación de los plaguicidas) se producen cuando existe en el suelo un 60% de agua respecto al contenido total de los mismos que el suelo puede almacenar

– Procesos de degradación química

Si el suelo se satura en agua, el medio se transforma a condiciones anaerobias (esto se produce especialmente en climas húmedos). En ellas la concentración de oxígeno es nula, lo que tiene una gran importancia, pues la mayoría de los compuestos se degradan mucho mejor en presencia de oxígeno.

No obstante hay algunos plaguicidas como el DDT que se degradan mejor o únicamente en condiciones anaerobias.

4.1.5. pH

La influencia que el pH del suelo tiene en la adsorción de los plaguicidas depende de la naturaleza de los compuestos y del tipo de enlaces involucrados en el proceso de adsorción. Así, los enlaces hidrófobos dependen fuertemente del pH, el enlace por puente de hidrógeno está limitado al medio ácido, etc.

Las prácticas agrícolas, como por ejemplo el uso de fertilizantes, modifican el pH natural del suelo, especialmente en su superficie. Así la adición de nitrógeno amoniacal como fertilizante produce una pérdida de calcio y magnesio de la

superficie del suelo y un incremento en la cantidad de estos cationes intercambiable, lo que produce una importante disminución en el pH del mismo.

En la figura 4.9. se indica un ejemplo de como las diferencias de pH del suelo pueden afectar al movimiento de los plaguicidas.

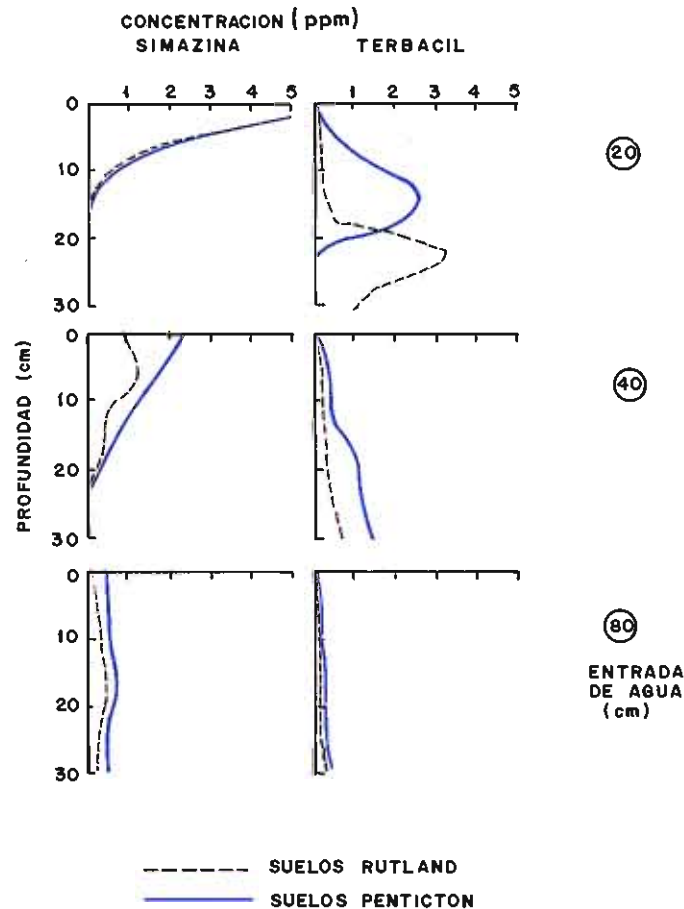


Figura 4.9.- Movilidad del Simacina y Terbacil para diferentes suelos y entradas de agua. (Fuente: Helling, Ch.S. y Gish, T.J., 1.986).

En ella se refleja la evolución de la concentración de los herbicidas Simacina y Terbacil según la profundidad y diferentes entradas de agua para dos tipos de suelo (Rutland y Pentictón).

Los suelos Rutland están constituidos por arenas con muy poca arcilla y materia orgánica, siendo su pH de 4,6.

Los suelos Pentictón poseen un contenido de arcillas y materia orgánica mayor, mientras que su pH es de 7,5.

Como puede observarse el Terbacil es relativamente móvil y la Simacina mucho menos. La movilidad del Terbacil es mayor en lo suelos Rutland que en los suelos Pentictón.

Por lo que respecta a la Simacina, se comporta de un modo similar para ambos tipos de suelos cuando debería esperarse que la movilidad fuese menor en los Pentictón (ya que su contenido de arcilla y materia orgánica es mayor) que en los Rutland.

Helling, C.S. y Gish, T.J., 1.986, sugieren que la movilidad en los Rutland es menor de la esperada, pues en este suelo, que tiene un pH de 4,6, la mayoría de la Simacina está protonada y por tanto más fuertemente adsorbida que en el suelo Pentictón, en el cual el pH es de 7,5.

En la figura 4.9. también se observa que la influencia del pH disminuye al aumentar las entradas de agua.

Por otra parte la variación del pH influye en la población y tipo de microorganismos activos con su consiguiente influencia en la degradación de los plaguicidas.

Las características del suelo y los procesos que afectan al transporte de plaguicidas, analizados detalladamente en este capítulo, aparecen esquematizados en la figura 4.10.

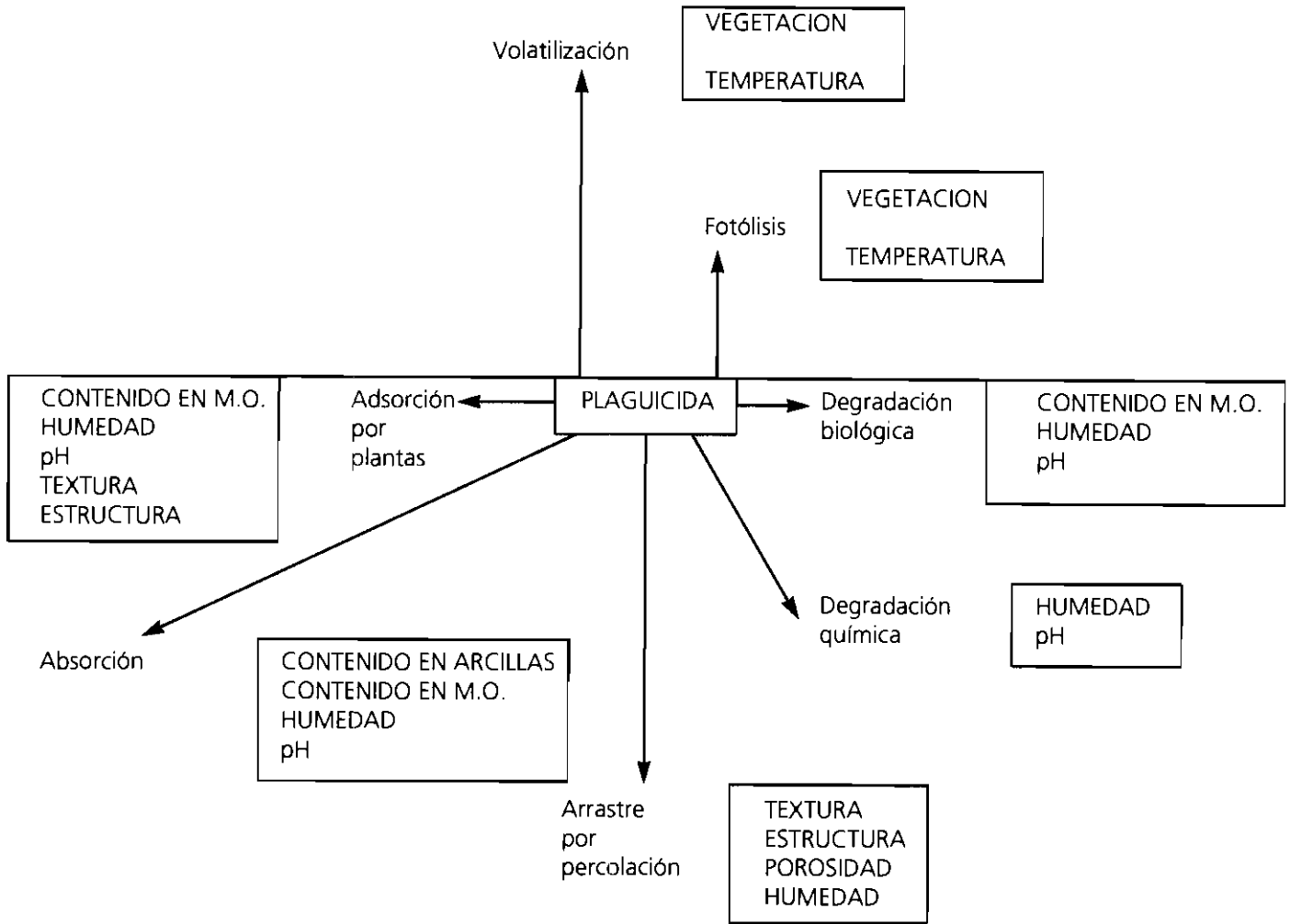


Figura 4.10.– Procesos que afectan al transporte de plaguicidas.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL PLAGUICIDA QUE AFECTAN AL TRANSPORTE

Entre las propiedades de los plaguicidas que influyen en su movimiento hacia las aguas subterráneas destacan: solubilidad, volatilidad, persistencia y sorción en los materiales del suelo y las plantas.

4.2.1. Solubilidad en agua

Es la capacidad del plaguicida para disolverse en el agua; normalmente se expresa como la concentración de la solución saturada que está en equilibrio con un exceso de soluto. Este equilibrio depende del balance entre las fuerzas de unión entre las moléculas en el sólido y la capacidad de solvatación de cada disolvente. Cuanto mayor es la solubilidad en agua de un plaguicida, mayor es la cantidad del mismo que puede ser transportado en disolución. En general, se admite que cuando la solubilidad es mayor de 30 ppm, existe un riesgo potencial de que el plaguicida alcance el agua subterránea. Para determinados productos la solubilidad en agua está íntimamente relacionada con la movilidad del compuesto, de forma que cuanto mayor es la solubilidad, mayor es también la movilidad.

La solubilidad de un compuesto está regulada principalmente por su tendencia a degradarse.

En particular se cumplen las siguientes reglas:

- 1) Si un plaguicida está presente en concentraciones mayores que su nivel de saturación, se acumulará en la interfase aire-agua y se evaporará más o menos rápidamente a la atmósfera en función de las características del pesticida.
- 2) Si el plaguicida está presente en concentraciones menores que su nivel de saturación, entonces permanece en el agua.
- 3) La presencia de otras sustancias puede afectar la solubilidad de los plaguicidas en agua, manteniéndolos en solución incluso a concentraciones elevadas.

Los insecticidas organoclorados (con una solubilidad en agua muy baja, debido a su carácter apolar), son los plaguicidas menos móviles, seguidos de los compuestos organofosforados. Los herbicidas ácidos, que son solubles en agua, son los más móviles. La mayoría de los plaguicidas, incluyendo triazinas fenilureas y carbamatos, poseen grados de movilidad intermedios.

La tabla 4.3. muestra la solubilidad en agua de algunos plaguicidas, agrupados según su composición química. La tabla 4.4. muestra una clasificación de movilidades relativas de algunos productos en el suelo. Los plaguicidas se agrupan en 5 clases: de muy móviles (clase 5) a inmóviles (clase 1); dentro de cada clase se citan en orden de movilidad decreciente.

TABLA 4.3.– SOLUBILIDAD EN AGUA DE ALGUNOS PLAGUICIDAS

| PLAGUICIDAS | Solubilidad (p.p.m.) |
|------------------------------|----------------------|
| <u>Organoclorados</u> | |
| Atracina | 33 (25°C) |
| Simacina | 3,5-5 (20°C) |
| <u>Carbamatos</u> | |
| Butilato | 45 (25°C) |
| Cicloato | 100 (22°C) |
| Cloroprofam | 89 (25°C) |
| Dialato | 14 (25°C) |
| EPTC | 365 (20°C) |
| Molinato | 900 (21°C) |
| Tiobencarb | 30 (20°C) |
| Vernolato | 107 (25°C) |
| <u>Acidos Orgánicos</u> | |
| 2,4-D | 620 (160°C) |
| Dalapón | 50,2 (gr/ml) |
| 2,4-DB | 4.500 (25°C) |
| 2,4,5-T | 278 (25°C) |
| <u>Derivados de la Urea</u> | |
| Diurón | 42 (25°C) |
| Fluometurón | 90 (25°C) |
| Isoproturón | 70 (20°C) |
| Linurón | 75 (25°C) |
| Metabenzotiazurón | 59 (20°C) |
| Metoxurón | 678 (23°C) |
| <u>Derivados de la Amida</u> | |
| Alacloro | 240 (20°C) |
| Butacloro | 20 (25°C) |
| Metolacloro | 530 (25°C) |
| Propacloro | 700-580 (25°C) |
| Propanil | 225 (20°C) |
| <u>Otros</u> | |
| Aminotriazol | 280 (gr/l) (25°C) |
| Ioxinil | 50-130 (25°C) |
| TCA | 13 (gr/ml) (25°C) |
| Trifluralino | 1 (27°C) |

TABLA 4.4.- MOVILIDAD RELATIVA DE LOS PLAGUICIDAS EN EL SUELO

| 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|------------|-----------|-------------|--------------|----------------|
| TCA | Picloram | Propacloro | Siduron | Neburon |
| Dalapon | Fenac | Fenuron | Bensulida | Cloroxurón |
| 2,3,6,-TBA | Piricloro | Prometona | Prometrina | DCPA |
| Tricamba | MCPA | Naptalam | Terbutrín | Lindano |
| Dicamba | Amitrol | 2,4,5,-T | Propanil | Forato |
| Cloramben | 2,4-D | Terbacilo | Diuron | Paration |
| | Dinoseb | Profam | Linuron | Disulfotón |
| | Bromacilo | Fluometurón | Pirazon | Diquat |
| | | Norea | Molinato | Clorfenamidina |
| | | Difenamida | EPTC | Diclormato |
| | | Tionacina | Clortiamida | Etión |
| | | Endotal | Diclobenil | Zineb |
| | | Monuron | Vernolato | Nitralin |
| | | Atradona | Pebulato | C-6989 |
| | | WL 19805 | Cloroprofam | ACNQ |
| | | Atracina | Metilazinfós | Morestan |
| | | Simacina | Diacinón | Isodrin |
| | | Ipacina | | Benomil |
| | | Alacloro | | Dieldrín |
| | | Ametrina | | Cloroneb |
| | | Propacina | | Paraquat |
| | | Trietacina | | Trifluralin |
| | | | | Benefin |
| | | | | Heptacloro |
| | | | | Endrín |
| | | | | Aldrín |
| | | | | Clorodano |
| | | | | Toxafeno |
| | | | | DDT |

Fuente: Canter, L.W., 1.986

Para sustancias iónicas, la solubilidad en agua se puede calcular en base a la ley de acción de masas, teniendo en cuenta la presión, la temperatura y las especies iónicas competitivas.

La concentración de cualquier especie molecular en dos fases que están en equilibrio entre sí se pueden expresar según la ecuación:

$$K = C_2/C_1$$

donde: C_1 = concentración del compuesto en la fase acuosa.
 C_2 = concentración del compuesto en la fase no acuosa.
 K = coeficiente de partición

En los estudios sobre el transporte de plaguicidas a través del suelo, se utiliza el llamado coeficiente de partición octanol/agua (K_{Oa}).

A partir de relaciones empíricas entre la solubilidad en agua y el coeficiente de partición octanol/agua (K_{Oa}) se puede obtener la solubilidad de sustancias orgánicas apolares. La figura 4.11. muestra la relación entre K_{Oa} y la solubilidad en agua (S) de algunos compuestos orgánicos. El coeficiente K_{Oa} y la solubilidad (S) se correlacionan según la ecuación:

$$\log K_{oa} = 5 - 0,670 \log S$$

S en m mol/l.

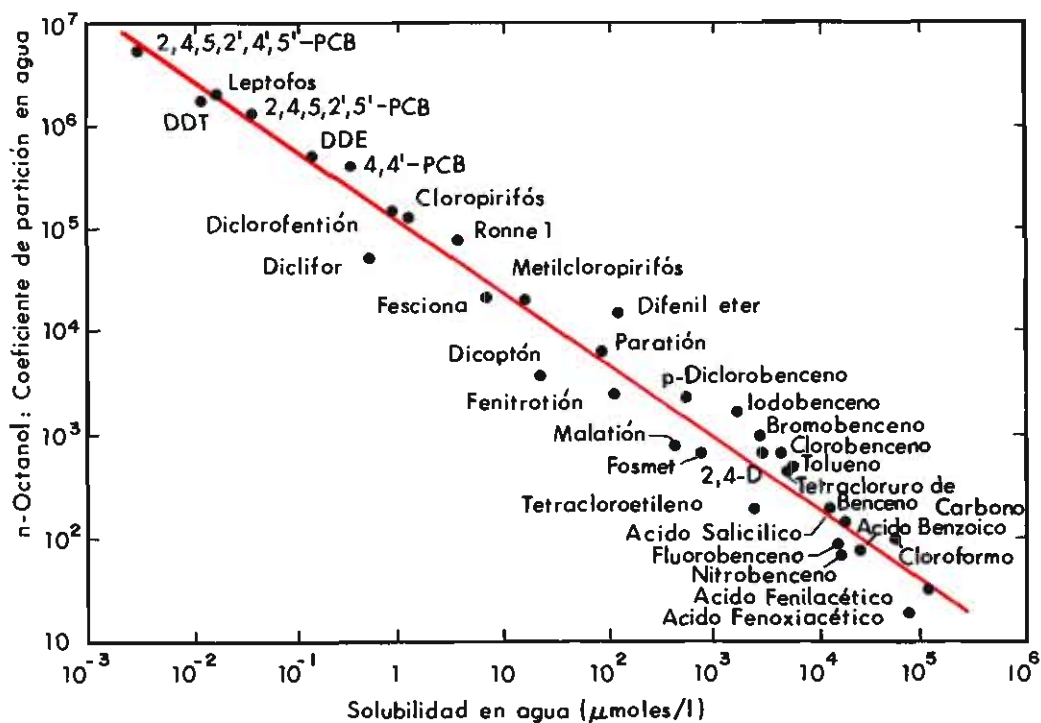


Figura 4.11.- Relación entre el coeficiente de partición Octanol/agua y la solubilidad en agua de compuestos orgánicos (Fuente: Canter, L.W. et al., 1.987).

4.2.2. Sorción en el suelo y subsuelo

La adsorción por el suelo es la tendencia de un plaguicida a adherirse a las partículas del suelo. Se define como la razón entre la concentración del plaguicida en el suelo (C_s) y la concentración del mismo en agua (C_a):

$$K_d = C_s/C_a$$

Los mecanismos de adsorción son muy diferentes según se trate de arcillas o materia orgánica.

La interacción de las moléculas orgánicas con los sólidos del suelo varía de acuerdo con la estructura química, contenido de arcilla (especialmente montmorillonita), materia orgánica, pH, concentración y naturaleza del plaguicida.

Los factores intrínsecos al plaguicida que afectan a los procesos de sorción son:

- Carácter de los grupos funcionales.
- Carácter y posición de los grupos sustituyentes.

– Presencia y magnitud de insaturaciones en la molécula.
Tanto la adsorción química como la física aumentan con el contenido del suelo de arcillas y en materia orgánica.

La adsorción en los suelos arcillosos se ve afectado por:

- Estructura molecular del plaguicida.
- Tipo de arcilla.
- Cationes saturadores.
- Estado de hidratación.
- Temperatura medioambiental.
- Composición del agua.

La adsorción de los plaguicidas a la fracción orgánica del suelo viene caracterizado por el coeficiente K_{CO} .

El contenido en materia orgánica influyen de forma predominante en la adsorción de carbotioatos, tiocarbamatos, acetamidas y fenilamidas; en concreto en estos últimos el proceso es irreversible.

La tabla 4.5. muestra los coeficientes de adsorción K_{CO} por algunos compuestos.

TABLA 4.5.– COEFICIENTES DE ADSORCION K_{CO} POR ALGUNOS PLAGUICIDAS

| PLAGUICIDA | K_{CO} |
|-------------|----------|
| 2,4-D | 32 |
| monurón | 83 |
| simazina | 135 |
| propatina | 152 |
| cloroprofán | 245 |
| diurón | 485 |
| prometrina | 513 |
| cloroxurón | 4.986 |
| DDT | 243.000 |

Fuente: Vrba, J. et al., 1.986.

Cuando el adsorbente es carbono orgánico $K_d = K_{CO}$.

De los plaguicidas encontrados en las aguas subterráneas, la mayoría tiene valores de K_d inferiores a 5 (normalmente inferiores a 1) y K_{CO} inferiores a 300.

Los mecanismos químico-físicos responsables de los procesos de adsorción son:

- Uniones de Van der Waals, especialmente en la adsorción de moléculas apolares (Pictoram, Carbonil, Paratión, ...).
- Enlaces hidrófobos de plaguicidas apolares que se adsorben a zonas hidrófobas de suelos con materia orgánica (DDT, fenilureas).
- Enlace por puente de hidrógeno es el mecanismo principal de adsorción de moléculas no iónicas polares a las arcillas y de las s-tiazinas en la materia orgánica.
- Transferencia de carga, es un mecanismo de formación de enlaces en el que se transfieren electrones desde centros dadores a centros aceptores.
- Intercambio iónico, se produce en los plaguicidas catiónicos y en los que están cargadas positivamente debido a una protonación (Paraquat, Diquat, etc.).
- Intercambio de ligando en el cual, uno o más ligandos son reemplazados por una molécula del adsorbente (s-tiazinas

adsorbidas por metales de transición en ácidos húmicos).

g) Interacciones ión-dipolo inducido y dipolo-dipolo inducido entre moléculas de agua, que afecta a los plaguicidas polares e iónicos.

TABLA 4.6.– FACTORES QUE AFECTAN A LA ABSORCIÓN DE GRUPOS SELECCIONADOS DE PLAGUICIDAS Y TRANSPORTE HACIA EL AGUA SUBTERRANEA

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---------------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------|
| Grupo Químico | Mecanismo de Adsorción | Adsorción a Materia Orgánica | Minerales Arcillosos | Unión a Materia Orgánica | Minerales Arcillosos | Efecto del pH del suelo | Efecto contenido agua suelo | Solubil. en agua a 20-25°C | Persistencia suelo (vida media)/días | Movilidad. |
| I. Pest. iónicos | | | | | | | | | | |
| 1. Pesticidas catiónicos | e/d/g | +d/ | +e/d | fuerte | muy fuerte | bajo | bajo positivo | alta | 4000-5000 | 1 |
| 2. Pesticidas ácidos | f/g | + | - | débil | muy débil | >pKa | considerable positivo | alta a pH alto | 10-140 | 4,5 |
| 3. Pesticidas básicos | c/d/e/f/g | +c/d/e/f | +d/e | débil | media | <pKb | medio positivo | alto a pH bajo | 25-400 | 2,3 |
| 4. Pesticidas iónicos mezclados | g/ | + | - | débil | casi nada | varios | considerable alto positivo | - | 170-350 | 4,5 |
| II. Pest. no iónicos | | | | | | | | | | |
| 5. Organo-clorados | a/b/d | +a/d | + | muy fuerte | débil | ninguno | bajo positivo | bajo | 460-1650 | 1 |
| 6. Organo-fosforados | a/b/c/d/e | +b/d | +c/ | muy fuerte | media | <7 bajo | considerable positivo | considerable | 0,9-60 | 1 |
| 7. Anilina sustituida | a/b/d | +b/d | + | fuerte | débil | ninguno | considerable negativo | bajo | 45-180 | 1 |
| 8. Fenilureas | a/b/c/d/f | +b/d | +c/f | media | débil | <7 bajo | considerable positivo | de bajo a medio | 120-400 | 2,3 |
| 9. Fenilcarbamatos y carbamatos | a/b/c/d | +b/d | -c | media | débil | <7 bajo | considerable positivo | considerable | 10-70 | 2,3 |
| 10. Amidas | a/b/d | +b/d | - | débil | muy débil | ninguno | positivo medio | medio | 30-70 | 3 |
| 11. Acetamidadas tiocarbamatos | a/b/d | +b/d | + | fuerte | media | ninguno | considerable positivo | medio | 30-220 | 2 |
| 12. Fenilamidas | a/b/d | +b/d | - | fuerte | débil | ninguno | positivo medio | medio | 300-400 | 2 |
| 13. Benzonitrilos | a/b/d | +b/d | + | fuerte | medio | ninguno | positivo medio | medio | 60-180 | 2 |

Columna 2: a/ atracciones de Van der Waals
 b/ uniones hidrófobas
 c/ uniones de hidrógeno
 d/ transferencia de carga
 e/ cambio iónico
 f/ cambio de ligando
 g/ interacciones ión-dipolo dipolo-dipolo directas e inducidas

Columnas 3,4: + existe adsorción
 - adsorción bajo o ninguna
 Columna 7: efecto del pH entendido en el sentido de crecimiento de la adsorción
 Columna 8: Contenido de agua del suelo entendido en el sentido de crecimiento de la adsorción

Columna 11: 1 = pesticidas inmóviles
 2 = pesticidas poco móviles
 3 = pesticidas móviles
 4 = pesticidas muy móviles
 5 = pesticidas extremadamente móviles

Fuente: Adaptado de Vrba, J. et al., 1.986.

La tabla 4.6. resume los factores que afectan a los mecanismos de absorción de los diversos tipos de plaguicidas.

VOLATILIDAD

Es la propensión de un producto a dispersarse en el aire. Depende fundamentalmente de la presión de vapor del

compuesto y está fuertemente influenciada por las condiciones ambientales (temperatura, velocidad del viento, etc.). La volatilización es el principal sistema de pérdidas de plaguicidas desde el suelo y las pérdidas son mayores en los suelos húmedos que en los secos.

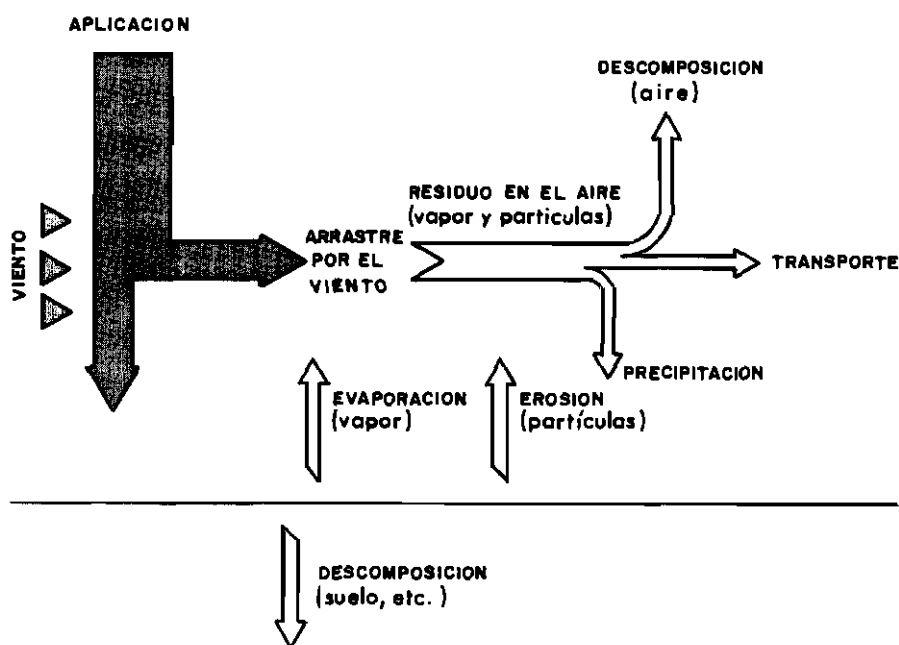


Figura 4.12. – Fuente y destino de los residuos debidos a la aplicación de plaguicidas. (Fuente: Seiber et al., 1.986).

La figura 4.12. muestra las fuentes y procesos de paso de los plaguicidas a la atmósfera.

El proceso de volatilización incluye dos etapas: en la primera se produce un movimiento hacia la superficie del suelo y en la segunda pasa a la atmósfera. La volatilización es función de la presión de vapor del plaguicida, su concentración, el contenido en agua del suelo y su poder de adsorción, de la velocidad de difusión, temperatura y del movimiento del aire.

Las mayores pérdidas por volatilización se producen en el período inmediatamente posterior a la aplicación del plaguicida. Sin embargo también pueden ser significativas las pérdidas lentas pero continuas en ambientes secos, como ocurre en países áridos.

Los plaguicidas con presiones de vapor altas no se consideran peligrosos para las aguas subterráneas, al volatilizarse rápidamente; su aparición en aguas subterráneas se atribuyen en general al modo de aplicación mediante inyección en el suelo.

La volatilidad acuosa de un compuesto viene definida por la constante de Henry, que se determina dividiendo la presión de vapor por la solubilidad del producto.

Según el valor de la constante de Henry, calculado (H_c) los compuestos se clasifican en tres clases:

| | |
|-------------------------|--|
| Volatilidad elevada: | $H_c > 1.300 \text{ atm/mol/m}^3$ |
| Volatilidad intermedia: | $13 < H_c < 1.300 \text{ atm/mol/m}^3$ |
| Volatilidad baja: | $H_c < 13 \text{ atm/mol/m}^3$ |

Una elevada solubilidad en agua puede hacer que los compuestos con altas presiones de vapor permanezcan en el suelo, especialmente cuando son aplicados antes del riego o de una lluvia, un ejemplo es el DBCP, un plaguicida organoclorado muy soluble en agua y con una presión de vapor muy alta, por lo que su volatilidad es pequeña.

En general los plaguicidas con valores de la constante de Henry inferior a 10^{-2} atm/m³/mol son susceptibles de contaminar las aguas subterráneas.

PERSISTENCIA

La persistencia de un plaguicida en el suelo se define como el tiempo que se requiere para que su concentración se reduzca a la mitad; a menudo se la denomina también "vida media en el suelo".

La resistencia de los plaguicidas a la degradación es función de la estructura molecular. En general, los más resistentes son los organoclorados, y entre ellos los fenolbencenos altamente sustituidos; los plaguicidas menos resistentes son los organofosforados. La Tabla 4.7. muestra la persistencia relativa, así como los procesos iniciales de degradación, de varios grupos de plaguicidas en el medio. Los plaguicidas organoclorados persisten varios años, mientras que otros plaguicidas se degradan en meses o incluso semanas.

TABLA 4.7.

| Clase | Acción | Persistencia | Proceso Inicial de Degradación |
|-------------------|--|--------------|------------------------------------|
| Organoclorados | Insecticidas | 2-5 años | Deshidrohalogenación o epoxidación |
| Ureas | Herbicidas | 4-10 meses | Desalquilación |
| Acidos Benzoicos | Herbicidas | 3-12 meses | Deshalogenación o descarboxilación |
| Amidas | Herbicidas | 2-10 meses | Desalquilación |
| Carbamatos | Herbicidas Fungicidas Insecticidas | 2-8 semanas | Hidrólisis de ésteres |
| Acidos alifáticos | Herbicidas | 3-10 semanas | Deshalogenación |
| Organofosforados | Insecticidas | 7-84 semanas | Hidrólisis de ésteres |

La estabilidad en el suelo o persistencia, depende de una serie de factores entre los que se encuentran el tipo de preparado, el modo de aplicación, las condiciones climáticas, evaporación, el tipo de plantas a las que se aplica el plaguicida y algunos procesos de descomposición que conducen a la degradación química, en particular la hidrólisis y la fotólisis, así como la transformación microbiana. La hidrólisis es la reacción de un compuesto con el agua, la fotólisis es la ruptura o degradación de un compuesto cuando se expone a la luz del sol, y la transformaciones microbianas resultan de las actividades metabólicas de los microorganismos presentes en el suelo. Cuando un plaguicida resiste estos procesos de descomposición y además no se evapora, será muy persistente, tendrá una vida media muy larga y un alto potencial para contaminar las aguas subterráneas. Esto es particularmente cierto si el mismo plaguicida es altamente soluble en agua y no se adsorbe a las partículas del suelo.

Los datos sobre persistencia y movilidad de los plaguicidas son importantes cuando se considera su posible impacto sobre las aguas subterráneas. Así por ejemplo, las s-triazinas son sólo moderadamente móviles pero debido a su elevada persistencia, pueden llegar a constituir una fuente importante de contaminación del agua subterránea.

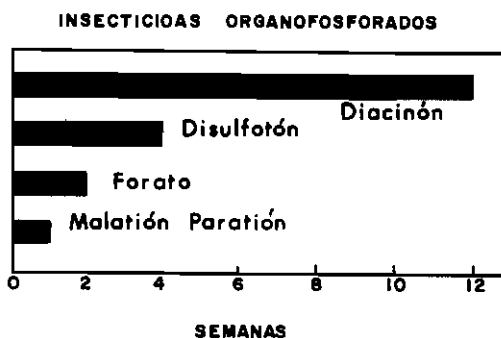
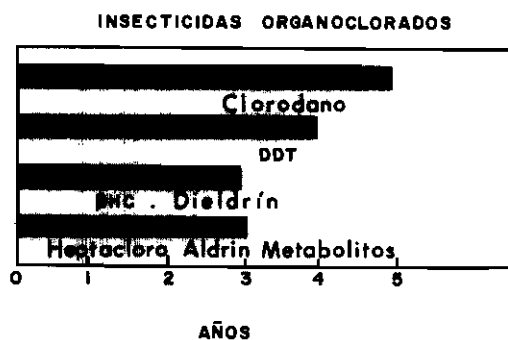
En general, los plaguicidas que tengan vidas medias superiores a 2 ó 3 semanas deben ser cuidadosamente evaluados de cara a la posibilidad de que contaminen las aguas subterráneas, antes de ser aplicados.

La figura 4.13. muestra gráficamente la comparación entre las persistencias de diversos plaguicidas.

La persistencia del plaguicida se puede cuantificar de forma aproximada. Su valor es indicativo de la importancia que tiene la degradación en la persistencia del producto.

Cuando un plaguicida se incorpora al suelo, la cantidad que queda al cabo de un año, supuesto que el compuesto es retenido por el suelo, puede expresarse de la siguiente forma:

INSECTICIDAS



HERBICIDAS

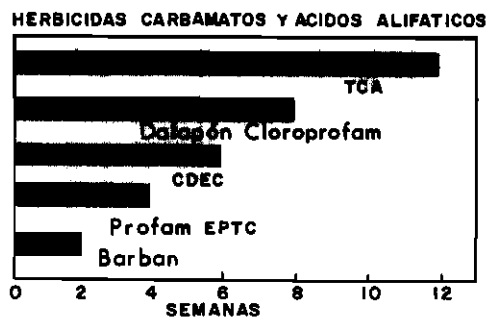
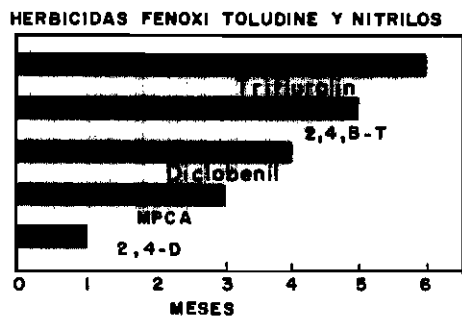
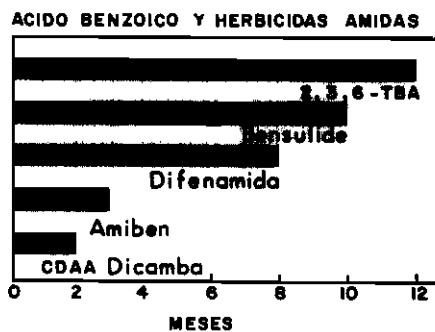
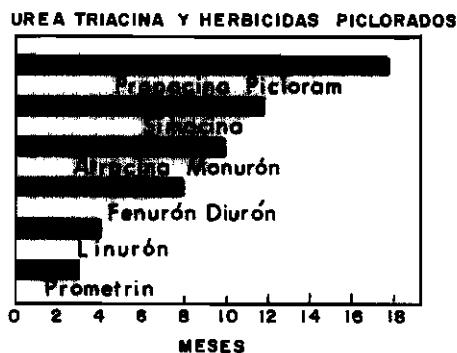


Figura 4.13.- Persistencia de plaguicidas.
(Fuente: Canter Low et al., 1.987)

$$R = D (1 - I) = D P$$

donde: R es la cantidad de plaguicida en el suelo kg/ha.
 D es la dosis inicial recibida por el suelo en kg/ha.
 I es el tanto por uno de inactivación.
 P es el tanto por uno de persistencia anual, en donde

$$P = 1 - I$$

Si no se efectúa ningún otro tratamiento al año siguiente, al cabo de dos años de la aplicación, la cantidad de plaguicida que permanece en el suelo será:

$$R = D I^2$$

Si el tratamiento se hace anualmente, la cantidad de plaguicida que se acumulará en el suelo al cabo de n años es:

$$R = \frac{D I (1 - I^n)}{(1 - I)}$$

A partir del cálculo de esta fórmula para una dosis constante se puede observar que:

- 1) Para porcentajes de inactivación inferiores al 50% la acumulación alcanza rápidamente altos niveles.
- 2) Para porcentajes de inactivación superiores al 50% la acumulación nunca alcanza el doble de la dosis anual y es prácticamente despreciable.

Un ejemplo de lo anterior es el 2,4 D, el cual persiste en el suelo según los casos de 2 a 3 semanas hasta 6 meses, con una media de 6 a 8 semanas. Si se admite que el porcentaje de persistencia "semestral" es del 25% (como suele suceder en los suelos áridos), se tiene un porcentaje "semestral" de inactivación del 75%. Los contenidos en el suelo al final del tercer semestre, para una dosis de aplicación de 1 kg/ha en tratamientos semestrales, serán de 0,33 kg/ha, y la acumulación al principio del cuarto semestre será de 1,73 kg/ha.

Debe tenerse en cuenta que no es posible deducir los porcentajes de inactivación correspondientes a un período de los de otro; es decir, el porcentaje de inactivación semestral no es la mitad del porcentaje de inactivación anual. Por otra parte la degradación será diferente según el tipo de suelo, es decir, si el plaguicida es adsorbido por arcillas o materia orgánica la persistencia aumentará al disminuir la inactivación.

4.3. OTROS FACTORES QUE AFECTAN AL TRANSPORTE

4.3.1. Condiciones climatológicas y ambientales

El grado y extensión en que un plaguicida puede infiltrarse a través del suelo hacia las aguas subterráneas, depende en gran parte de factores climáticos externos, como son: la temperatura ambiente, el régimen de lluvias y el régimen de vientos.

La lluvia puede actuar eliminando el plaguicida del lugar donde fue aplicado en base a fenómenos de escorrentía superficial. El transporte de plaguicidas debido a la escorrentía superficial es función del tiempo que puede transcurrir entre su aplicación y la precipitación en forma de lluvia.

También depende de la naturaleza y la persistencia del plaguicida, las características hidrológicas, tipo de suelo y vegetación de la zona, así como del método y forma de aplicación del compuesto.

Algunos autores han mostrado que salvo que se produzcan lluvias muy fuertes inmediatamente después de la aplicación del plaguicida, las pérdidas totales por escorrentía para la mayoría de estos compuestos no exceden del 0,5% del total aplicado, aunque determinadas pérdidas puntuales pueden exceder en mucho esa cifra.

El movimiento de los plaguicidas más allá del lugar donde se aplicaron viene dado por el movimiento del agua. Así, el agua se puede mover en superficie, provocando escorrentías superficiales, o verticalmente a través del perfil del suelo, transportando los plaguicidas que lleve disueltos hacia zonas profundas del suelo y, si el compuesto es suficientemente persistente, hacia el agua subterránea.

Que el plaguicida sea transportado por escorrentía superficial o que se infiltre a través del suelo depende de factores como la estructura química del compuesto, el tipo de suelo, y en el caso de suelos agrícolas, del tipo de cultivo. Estos factores influyen además en la cantidad de compuesto que puede ser transportado.

Hay varios factores que influyen en el hecho de que el plaguicida sea eliminado por escorrentía superficial o que se infiltre hacia el subsuelo. En primer lugar, no todo el compuesto está disponible para moverse, dependiendo esto fundamentalmente del modo de aplicación del plaguicida (polvo humedecible, solución acuosa, etc.) y de su solubilidad. En segundo lugar, procesos intermedios tales como la persistencia del compuesto (degradación) en el sistema suelo-agua, la interacción del compuesto con partículas minerales y orgánicas del suelo (sorción) y la asimilación por las plantas, influyen significativamente en la cantidad de plaguicida que queda disponible para el transporte.

En cuanto a la incorporación del plaguicida a la biomasa de las plantas, estas no sólo degradan los plaguicidas sino que también participan en su transporte. Si el plaguicida no se degrada una vez que ha sido incorporado a la biomasa de la planta, puede ascender a través de la cadena trófica cuando la planta es consumida o puede ser devuelto al suelo cuando la misma muere.

La temperatura elevada provoca una mayor tasa de volatilización de las sustancias, además, a temperaturas elevadas la actividad bacteriana se incrementa aumentando con ello la inactivación de plaguicidas.

Cuando se aplican productos fotolábiles (esta fue la causa de la ineficacia en campo de los primeros piretroides) el nivel de irradiación solar es clave para saber cuanta sustancia llega al suelo.

Al igual que la lluvia, el riego incrementa el grado de lixiviación disminuyendo la cantidad de plaguicida que se volatiliza desde el suelo, y un exceso de aquél puede inyectar los contaminantes directamente en el acuífero. El uso de zanjas (tubos) de drenaje también puede producir una entrada directa de plaguicidas en el agua subterránea, independientemente de su capacidad intrínseca para lixivarse.

La velocidad y el régimen de vientos actúan favoreciendo las pérdidas de plaguicida por volatilización, aumentando su dispersión en el medio ambiente.

4.3.2. Métodos y condiciones de aplicación

Se describen aquí aquellos factores relativos a los métodos y condiciones de aplicación de los plaguicidas que pueden influir en el grado en que estos afectan al agua subterránea.

La "Tasa de aplicación", indicativa de cuánto producto y con qué frecuencia es aplicado, determina de forma directa la cantidad de plaguicida que llega al acuífero.

Al aplicar el plaguicida se trata de extender una mínima cantidad de materia activa sobre una gran superficie, de forma homogénea, y afectando en la menor medida posible a las áreas limítrofes.

Para conseguir estos objetivos se han diseñado una gran variedad de formulaciones y formas de aplicación, se describirán en cuanto que afectan de forma diferente al agua subterránea.

Las presentaciones comúnmente utilizadas son:

- Polvos para espolvoreo (terrestre y aéreo),
- Polvos mojables.
- Gránulos.
- Cebos.
- Líquidos emulsionables.

- Líquidos solubles.
- Líquidos concentrados para aplicación a bajo y ultrabajo volumen.
- Aceites.
- Cremas.
- Suspensiones de polvo en agua.

Cada una de estas formas se aplica mediante uno o varios métodos cuyas ventajas e inconvenientes y en especial su influencia sobre la calidad del agua subterránea se indica a continuación:

a) Espolvoreo

Las ventajas de esta técnica son:

- Baja concentración de materia activa.
- Rapidez de ejecución y maquinaria sencilla para su aplicación.
- Bajo costo.
- Alto poder de penetración.

Como inconvenientes:

- Bajo porcentaje de depósito y bajo poder residual.
- Escasa adherencia y fácil arrastre por el viento.
- Distribución poco homogénea.
- Muy sensible a los agentes atmosféricos.

b) Aplicación como gránulos.

Ventajas e inconvenientes similares al espolvoreo, pero presenta más persistencia y no son arrastrados por el viento. Cuando se aplican de forma directa sobre el suelo pueden afectar al agua del acuífero con gran facilidad.

c) Pulverización.

Esta técnica se ve muy afectada por las condiciones climatológicas (T° , viento, humedad), estando relacionadas de forma directa la tasa de vaporización y de arrastre por el viento con el diámetro de la gota aplicada.

Se emplean vehículos acuosos o no con la materia activa como solución, suspensión o emulsión.

Cuando se aplican grandes volúmenes afectan más intensamente al agua subterránea.

Según el volumen de aplicación se diferencian:

- Aplicaciones a gran volumen (>400 l/ha).
- Aplicaciones a bajo volumen: (Avión 15-60 l/ha)
(Terrestre 80-200 l/ha)
- Aplicaciones a ultrabajo volumen (<5 l/ha).

En función del diámetro de la gota aplicada se puede diferenciar:

Gota gruesa (>250 μ): Buen depósito, poco arrastre fuera del objetivo, recubrimiento imperfecto.

Diámetro medio (150-250 μ): Es lo normal en avión, depósito y recubrimiento aceptables.

Diámetro medio (60-150 μ): Es el empleado para aplicaciones a ultrabajo volumen desde avión. Buena penetración foliar, la gota se volatiliza con cierta facilidad.

Diámetro medio (20-60µm): Es el adecuado para actuar por contacto sobre voladores. Deja muy poco depósito en obstáculos grandes.

Diámetro (<20µm): Sin apenas efecto residual, se emplea en espacios cerrados.

Es conveniente señalar que interesa un diámetro medio de gota uniforme, en especial la menor cantidad posible de gotas finas que se volatilizan o sean arrastradas con gran facilidad lejos del punto de aplicación.

d) La aplicación de plaguicida mediante riego, práctica denominada a menudo "quimigación", también puede ser una fuente importante de contaminación del agua. Así, fallos mecánicos o eléctricos en los equipos de riego y dosificación del plaguicida pueden provocar que se incorporen al suelo niveles muy altos.

Los vertidos puntuales de plaguicidas en el suelo pueden dar lugar a altas concentraciones de estos compuestos, debido al bloqueo de los procesos normales de descomposición y capacidad de adsorción del suelo, dando como resultado un elevado potencial de contaminación del agua subterránea. En particular, los derrames y vertidos son un problema bastante común en los lugares de carga y mezcla de plaguicidas. El manejo de contenedores de plaguicidas vacíos también puede significar un problema. El agua utilizada para limpiar los equipos de vaporización suele ser vertida directamente al suelo, con el consiguiente aumento de la cantidad de plaguicida.

En resumen, las prácticas de inyección e incorporación al suelo se consideran generalmente como las que tienen mayor probabilidad de producir problemas de contaminación del agua subterránea.

Cuando los plaguicidas se aplican mediante fumigación o espolvoreo es preciso valorar en que medida se degrada antes de llegar al suelo y cuantificar como afecta el método de aplicación a una mayor o menor tasa de degradación.

4.3.3. Topografía

Cuando los plaguicidas son incorporados a suelos que ocupan lugares llanos, la probabilidad de que se infiltren hacia capas profundas y lleguen a alcanzar el agua subterránea es mayor que cuando lo son en suelos en pendiente, ya que en este último caso se hacen más patentes los procesos de escorrentía superficial, con el consiguiente lavado de estos compuestos. Por otra parte, en lugares de fuerte pendiente se suelen presentar espesores de suelo menores debido a su arrastre por los procesos de erosión. Al no haber suelo presente, y por lo tanto disminuir los procesos de adsorción, es más probable que el plaguicida alcance fácilmente el agua subterránea.

4.3.4. Condiciones del sistema acuífero

Además de los factores comentados relativos a las características del suelo y de los plaguicidas que afectan a su movimiento y transporte hacia los acuíferos la evaluación de la contaminación potencial de las aguas subterráneas debe incluir aquellas características de los sistemas que influyan en los mecanismos químicos, físicos y biológicos que afectan a los contaminantes y, por lo tanto, a la degradación de dicho sistema acuífero.

Los factores de los sistemas acuíferos que juegan un papel más importante en la contaminación potencial de los mismos por plaguicidas son:

– Profundidad del nivel del agua subterránea. A mayor profundidad el plaguicida tarda más tiempo en alcanzarla y será más factible su degradación.

– Recarga neta que recibe el acuífero. Cuanto mayor sea la recarga, mayor será el arrastre de plaguicida hacia el acuífero. Este factor considera el agua de lluvia y la de riego.

– Conductividad hidráulica. Cuanto menor sea la conductividad, menor es la velocidad del flujo de agua y mayor el tiempo para que el plaguicida se degrade.

– Material del acuífero, principalmente el contenido de arcillas, por su influencia en la adsorción de plaguicida.