

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PLAGUICIDAS Y SU TRANSPORTE EN EL AMBIENTE

INTRODUCCIÓN

Para entender como se comporta un plaguicida en el ambiente se necesita conocer cierta información sobre las propiedades físico-químicas de la molécula y su mecanismo de transporte, así como las características medio ambientales y la geografía del lugar en el que se le encuentra.

Con la gran complejidad y cantidad de datos requeridos, los científicos no siempre pueden predecir exactamente lo que ocurrirá con una partícula de plaguicida cuando ésta ha entrado en el ambiente. A este problema, se suma el hecho de que los datos de las investigaciones son obtenidos bajo condiciones controladas de laboratorio y con cantidades conocidas de plaguicida, lo cual no ocurre en la naturaleza.

A pesar de lo complejo del problema, los científicos han logrado determinar ciertas características físico-químicas cuantificables para los plaguicidas, como es la solubilidad, presión de vapor, Constante de la Ley de Henry, el Coeficiente de Carbono orgánico (Koc) y el Coeficiente de Partición Octanol-Agua (Kow). Con esta información pueden predecir el lugar donde pudiera encontrarse un plaguicida en altas concentraciones.

Por otra parte, la molécula de plaguicida no permanece intacta por tiempo indefinido en el medio ambiente, ya que con el tiempo sufre una degradación influenciada por microorganismos, actividad química, pH, clima, y contenido de materia orgánica del suelo, entre otros.

1.- CARACTERÍSTICAS MEDIO AMBIENTALES

Son los lugares en que puede estar presente el plaguicida como: materiales o sustancias de desecho, agua subterránea o superficial, aire, suelo, subsuelo, sedimento y biota (1).

2.- MECANISMOS DE TRANSPORTE AMBIENTAL DE LOS PLAGUICIDAS

Es la forma en que se mueven los plaguicidas en el medio ambiente, desde la fuente emisora del plaguicida hasta los puntos donde existe exposición para el ser humano o biota (1).

El transporte ambiental involucra los movimientos de gases, líquidos y partículas sólidas dentro de un medio determinado y a través de las interfaces entre el aire, el agua, sedimento, suelo, plantas y animales.

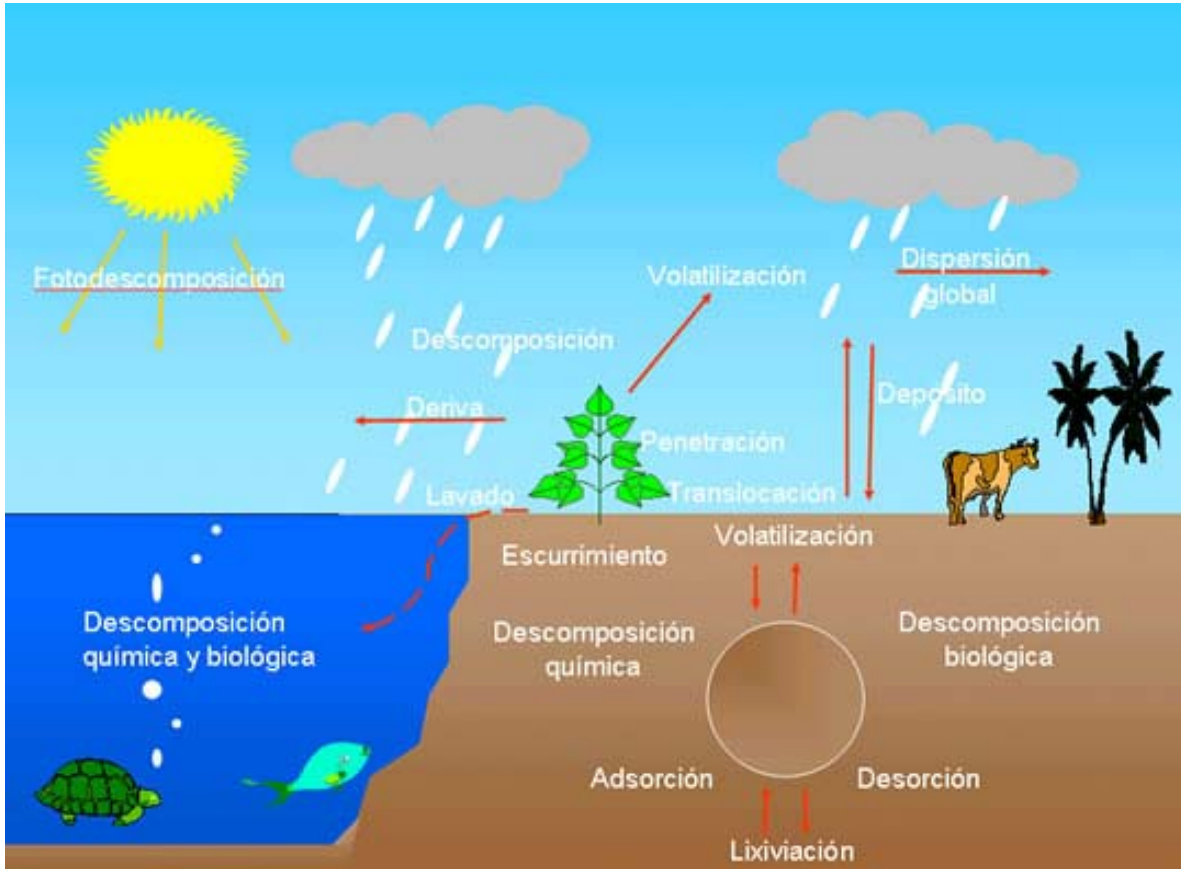


Ilustración 1. Posibles mecanismos de transporte y transformación de plaguicidas en el ambiente.

2.1. Difusión

Es el movimiento de moléculas debido a un gradiente de concentración. Este movimiento es al azar pero trae como consecuencia el flujo de materiales desde las zonas más concentradas a las menos concentradas. Para medir la difusión de un compuesto en el suelo hay que considerar la interacción conjunta de parámetros tales como la porosidad, los procesos de adsorción, la naturaleza del compuesto, etc. (5)

- **Lixiviación.** Es el parámetro más importante de evaluación del movimiento de una sustancia en el suelo. Está ligado a la dinámica del agua, a la estructura del suelo y a factores propios del plaguicida. Los compuestos aplicados al suelo tienden a desplazarse con el agua y lixiviar a través del perfil, alcanzando las capas más profundas y el acuífero, que en consecuencia resulta contaminado.

- **Evaporación.** La tasa de pérdida de un plaguicida por volatilización depende de su presión de vapor, de la temperatura, de su volatilidad intrínseca y de la velocidad de difusión hacia la superficie de evaporación (5).

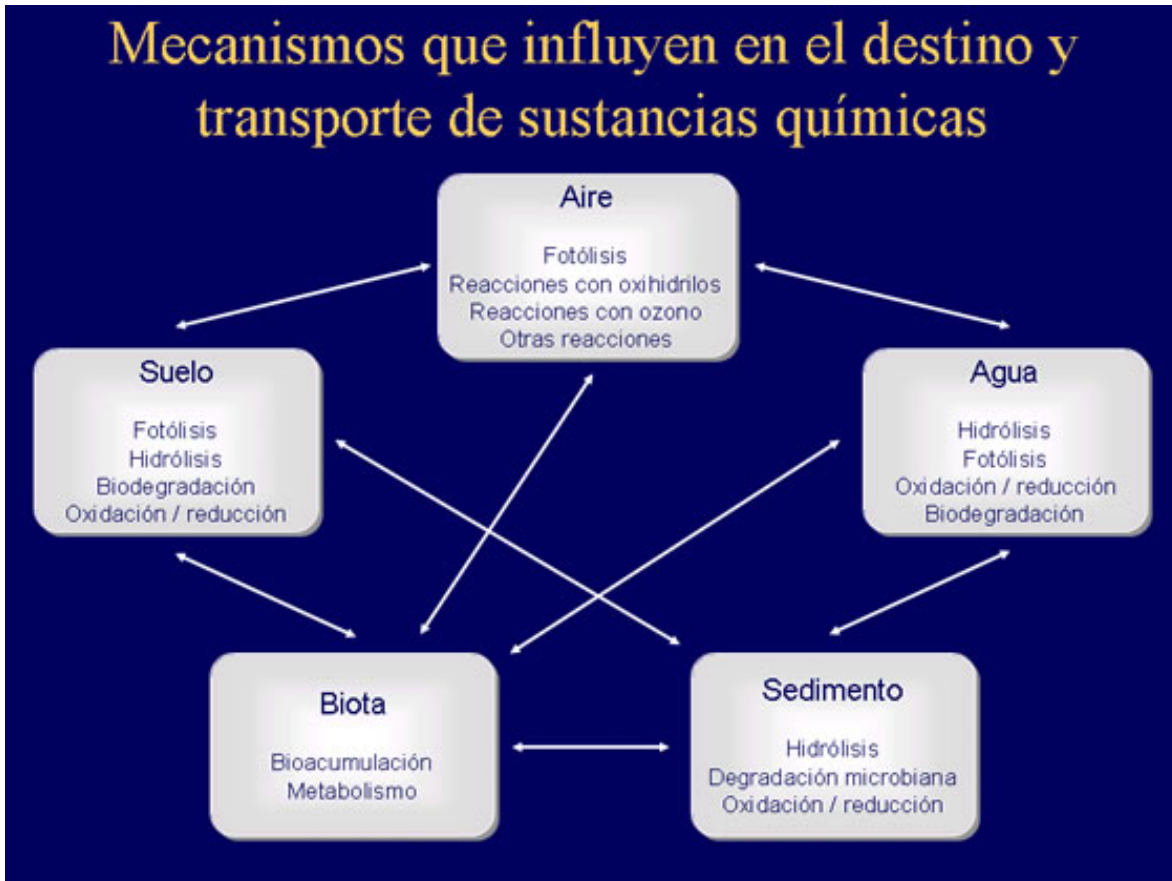


Ilustración 2. Tipos de procesos físico-químicos en el ambiente.

3.- INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SITIO EN EL TRANSPORTE DE PLAGUICIDAS

Las características físicas y las condiciones climáticas del sitio de estudio contribuyen al transporte de los contaminantes. Por consiguiente, es necesaria la información acerca de la topografía, tipos de suelo y ubicación, tipo de cubierta del suelo, precipitación anual, condiciones de temperatura, entre otros, para poder estimar hacia donde pudiera desplazarse el plaguicida aplicado (5).

4.- FACTORES FÍSICO-QUÍMICOS QUE INFLUYEN EN EL DESTINO DE LOS CONTAMINANTES Y EN EL TRANSPORTE AMBIENTAL

4.1. Volatilización

La volatilidad representa la tendencia del plaguicida a pasar a la fase gaseosa. Todas las sustancias orgánicas son volátiles en algún grado dependiendo de su presión de vapor, del estado físico en que se encuentren y de la temperatura ambiente. La volatilidad se mide a partir de la constante de Henry que depende de la presión de vapor en estado líquido y de la solubilidad en agua (5).

4.2. Presión de Vapor

Es una medida de volatilidad de una sustancia química (plaguicida) en estado puro y es un determinante importante de la velocidad de volatilización al aire desde suelos o cuerpos de agua superficiales contaminados. La presión de vapor varía; se incrementa la presión cuando se incrementa la temperatura y disminuye cuando disminuye la temperatura.

La presión de vapor se expresa usando una variedad de unidades, incluyendo los pascales (Pa), milímetros de mercurio (mm Hg equivalente a Torr), libras por pulgada cuadrada (lb/pulg²) y atmósferas (atm).

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2$$

$$1 \text{ Pa} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ mm Hg (Torr)}$$

$$1 \text{ kPa (kilopascal)} = 1000 \text{ Pa} = 7.5 \text{ mm Hg (Torr)}$$

$$1 \text{ mPa (milipascal)} = 0.001 \text{ Pa} = 7.5 \times 10^{-6} \text{ mm Hg (Torr)}$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa (kilopascal)}$$

$$1 \text{ atm} = 14.70 \text{ lb/pulg}^2$$

La unidad del sistema internacional de presión de vapor es en pascales (Newton/m²) o en milipascales (10⁻³ Pa)

Un plaguicida con presión de vapor mayor a 10.6 mm Hg puede fácilmente volatilizarse y tiende a alejarse del lugar donde se aplicó (6).

Los plaguicidas con presión de vapor menor a 1.0×10^{-8} (1.0 E-08) tienen bajo potencial para volatilizarse (cuadro 1). Los plaguicidas con una presión de vapor mayor a 1.0×10^{-3} (1.0 E-03) tienen alto potencial para volatilizarse (8).

Cuadro 1.- Presión de vapor de un plaguicida

PRESIÓN DE VAPOR DEL PLAGUICIDA	AFINIDAD DEL PLAGUICIDA AL SUELO O AGUA	PLAGUICIDA
$< 1.0 \times 10^{-8}$	Alta	BAJO POTENCIAL PARA VOLATILIZARSE Se puede solubilizar en agua o ser retenido en suelo
$> 1.0 \times 10^{-3}$	Baja	ALTO POTENCIAL PARA VOLATILIZARSE

4.3. Constante de la Ley de Henry (H)

Describe la tendencia de un plaguicida a volatilizarse del agua o suelo húmedo. El valor se calcula usando la presión de vapor, solubilidad en agua y peso molecular de un plaguicida (6, 8).

Coeficiente de partición aire-agua (H_c)

$H_c = p/c$, donde:

p = presión de vapor del plaguicida (Pa)

c = solubilidad en agua (mol. m^{-3})

$$H_c = \text{Pa}/\text{moles. m}^{-3} = \text{Pa m}^3/\text{moles}$$

$$H_c = p' \times \text{PM} \times 10^{-3}/c'$$

$H_c = \text{mPa} \times \text{PM} \times 10^{-3}/\text{ppm}$ donde:

p' = presión de vapor del plaguicida (mPa)

PM = peso molecular del plaguicida

c' = solubilidad en agua (ppm)

Cuando el plaguicida tiene una alta solubilidad en agua con relación a su presión de vapor, el plaguicida se disolverá principalmente en agua (Cuadro 2).

Un valor alto de la Ley de Henry, indica que un plaguicida tiene un potencial elevado para volatilizarse del suelo húmedo (8); un valor bajo predice un mayor potencial de lixiviación del plaguicida (9).

Cuadro2.- Constante de la Ley de Henry.

VOLATILIDAD DEL PLAGUICIDA		RANGOS DEL VALOR (atm m ³ /mol)	
No volátil	El plaguicida puede disolverse en agua	Menor a 3×10^{-7}	Constante (H) BAJA <ul style="list-style-type: none"> • Presión de vapor baja • Alta solubilidad • Tiene potencial para lixiviarse
Baja volatilidad		3×10^{-7} a 1×10^{-5}	
Volatilidad moderada	El plaguicida puede evaporarse	1×10^{-5} a 1×10^{-3}	Constante (H) ALTA <ul style="list-style-type: none"> • Presión de vapor alta • Solubilidad baja • Tiene potencial alto para volatilizarse del suelo húmedo
Alta volatilidad		Mayor a 1×10^{-3}	

4.4. Persistencia

Se define como la capacidad de cualquier plaguicida para retener sus características físicas, químicas y funcionales en el medio en el cual es transportado o distribuido, durante un período limitado después de su emisión. Los plaguicidas que persisten más tiempo en el ambiente, tienen mayor probabilidad de interactuar con los diversos elementos que conforman los ecosistemas (ver cuadro 3).

Si su vida media y su persistencia es mayor a la frecuencia con la que se aplican, los plaguicidas tienden a acumularse tanto en los suelos como en la biota (2, 4) y con el tiempo, la mayoría de los plaguicidas sufren una degradación como resultado de reacciones químicas y microbiológicas en suelo o agua.

Cuadro 3. Clasificación de los plaguicidas de acuerdo a su persistencia

PERSISTENCIA	TIEMPO
Ligeramente persistente	Menor de 4 semanas
Poco persistente	De 4 a 26 semanas
Moderadamente persistente	De 27 a 52 semanas
Altamente persistente	De 1 a 20 años
Permanentes	Mayor de 20 años

Fuente: Catálogo Oficial de Plaguicidas, CICOPLAFEST, 1998

De manera a facilitar la información contenida en esta base de datos se asignó un valor de 1 a los plaguicidas ligeramente persistentes; 2 a los poco persistentes; 3 a los moderadamente persistentes y 4 a los altamente persistentes.

4.4.1. Vida media

La vida media está definida como el tiempo (en días, semanas o años) requerido para que la mitad del plaguicida presente después de una aplicación se descomponga en productos de degradación. La descomposición depende de varios factores incluidos la temperatura, el pH del suelo, los microorganismos presentes en el suelo, clima, exposición del plaguicida a la luz, agua y oxígeno (3, 4).

Es importante señalar que muchas sustancias resultantes de la descomposición de un plaguicida pueden ser también tóxicas y tener vidas medias significativas. Existen diferentes tipos de clasificar a la vida media de un plaguicida, como son:

- **Vida media en suelo:** Es el tiempo requerido para que un plaguicida se degrade en el suelo. La vida media está determinada por el tipo de organismos presentes en el suelo, el tipo de suelo (arena, arcilla, limo), pH y temperatura, entre otros (3).
El Departamento de Regulación de Plaguicidas en California, E.U., determinó que un plaguicida que tiene una vida media mayor a 9 días en un suelo aeróbico puede tener potencial para contaminar aguas subterránea (3).
- **Vida media por Fotólisis:** Es el tiempo requerido para que la mitad de un plaguicida aplicado expuesto a la luz del sol se degrade.
- **Vida media por Hidrólisis:** Es el tiempo requerido para que la mitad de un plaguicida aplicado se degrade por la acción del agua.

El Departamento de Regulación de Plaguicidas en California, E.U., determinó que un plaguicida con una hidrólisis mayor de 14 días tiene potencial para contaminar agua subterránea (3).

4.5. Solubilidad en Agua

La solubilidad en agua de un plaguicida es una medida que determina la máxima concentración de un plaguicida a disolverse en un litro de agua y por lo general tiene un rango de 1 a 100,000 mg/L. Las unidades de concentración son: mg por litro (mg/L), que es aproximadamente igual a una parte por millón (ppm) o un microgramo por litro ($\mu\text{g/L}$), que es aproximadamente igual a una parte por billón (ppb) (3, 4, 7, 11).

ppm = parte por millón = 1 mg/L

ppb = parte por billón = 1 $\mu\text{g/L}$

Es importante mencionar que la mayoría de los valores reportados fueron determinados en experimentos de laboratorio a temperaturas de 20 a 25 °C (8).

Los plaguicidas muy solubles en agua se adsorben con baja afinidad a los suelos y por lo tanto, son fácilmente transportados del lugar de la aplicación por una fuerte lluvia, riego o escurrimiento, hasta los cuerpos de agua superficial y/o subterránea (cuadro 4).

El departamento de Regulación de Plaguicidas en California, E.U. determinó que los plaguicidas con una solubilidad mayor a 3 mg/L tiene potencial para contaminar agua subterránea. Sin embargo en E.U., plaguicidas con solubilidad en agua menor de 3 mg/L se han encontrado en agua subterránea, lo cual indica que el parámetro antes mencionado no es una garantía (3).

Cuadro 4.- Solubilidad de un plaguicida en agua

PLAGUICIDA	AGUA YSUELO
Baja solubilidad	<ul style="list-style-type: none"> • El plaguicida puede tener afinidad por el suelo y acumularse en éste • El plaguicida puede sedimentarse en el suelo en la base de los acuíferos
Alta solubilidad	<ul style="list-style-type: none"> • El plaguicida puede tener afinidad por el agua y puede solubilizarse • El plaguicida se puede transportar a mantos acuíferos • Puede facilitarse la biodegradación del plaguicida

4.6 Coeficiente de Adsorción de carbono orgánico (K_{oc}).

A este valor también se le conoce como Coeficiente de adsorción suelo/agua o el Coeficiente de adsorción. Es una medida de la tendencia de un compuesto orgánico a ser adsorbido (retenido) por los suelos o sedimentos (6).

$K_{oc} = K_D \times 100 / \%oc$, donde:

%oc es el porcentaje de carbono orgánico en el suelo = % materia orgánica/ 1.72.

El K_{oc} es específico para cada plaguicida y es sumamente independiente de las propiedades del suelo. Los valores del K_{oc} van de 1 a 10,000,000 (10).

Un K_{oc} elevado indica que el plaguicida orgánico se fija con firmeza en la materia orgánica del suelo, por lo que poca cantidad del compuesto se mueve a las aguas superficiales o a los acuíferos (cuadro 5).

Cuadro 5.- Rangos del K_{oc} (ml/g carbono orgánico)

ADSORCIÓN DEL PLAGUICIDA AL SUELO		VALORES DEL COEFICIENTE	
Muy débil	El plaguicida puede ser volátil	Menor a 10	K_{oc} BAJO <ul style="list-style-type: none"> El plaguicida puede distribuirse en cuerpos de agua o aire El plaguicida puede no ser fijado a la materia orgánica del suelo La vía de exposición al plaguicida puede ser la inhalatoria
Débil		10 a 100	
Moderada		100 a 1000	
De moderada a fuerte	El plaguicida puede ser soluble en grasa	1000 a 10,000	K_{oc} ALTO <ul style="list-style-type: none"> El plaguicida se puede fijar en suelo, sedimento, biota y materia orgánica El plaguicida puede moverse en aguas superficiales La vía de exposición al plaguicida puede ser por la cadena alimenticia
Fuerte		10,000 a 100,000	
Muy fuerte		Mayores a 100,000	

4.7. Coeficiente de Partición Octanol/Agua (Kow)

El coeficiente de partición Octanol-agua, Kow, es una medida de cómo una sustancia química puede distribuirse entre dos solventes inmiscibles, agua (es un solvente polar) y octanol (es un solvente relativamente no polar, que representa a las grasas). El Kow proporciona un valor de la polaridad de un plaguicida, que es frecuentemente utilizado en modelos para determinar como un plaguicida puede distribuirse en tejido de grasa animal (3, 6).

$K_{ow} = C_{\text{octanol}} / C_{\text{agua}}$, donde:

C = la concentración molar

$pK_{ow} = -\log_{10} K_{ow}$

Los plaguicidas con una vida media y un K_{ow} altos pueden acumularse en tejido graso (4) y bioacumularse a lo largo de la cadena alimenticia (Cuadro 6).

Cuadro 6.- Rangos de Kow de un plaguicida.

ACUMULACIÓN DE PLAGUICIDA EN GRASA (Kow)	PLAGUICIDA
Alto	<ul style="list-style-type: none">• El plaguicida puede fijarse con firmeza a materia orgánica, sedimento y biota• El plaguicida puede bioacumularse en grasa corporal de animales• La vía de exposición al plaguicida puede ser por la cadena alimenticia
Bajo	<ul style="list-style-type: none">• El plaguicida puede no fijarse en materia orgánica• El plaguicida puede moverse en aguas superficiales, acuíferos y aire• La vía de exposición al plaguicida puede ser la inhalatoria

4.8. Potencial de contaminación de agua subterránea

Las propiedades anteriormente descritas son de gran utilidad para los investigadores ya que permiten estimar el potencial de afectación de los plaguicidas si entran en contacto con el agua. La Agencia de Protección Ambiental (EPA), de los Estados Unidos, realizó estudios de laboratorio durante 10 años, asociando ciertas propiedades de los plaguicidas con la lixiviación; en el cuadro 7 se muestran los valores de potencial de contaminación de agua subterránea (9).

Cuadro 7. Valores que indican el potencial de los plaguicidas para contaminar agua subterránea.

PROPIEDADES QUÍMICAS O FÍSICAS DE LOS PLAGUICIDAS	VALORES DETERMINADOS
Solubilidad en agua	> 30 ppm
Constante de la Ley de Henry	< 10^{-2} atm m ⁻³ /mol
K _{oc}	< de 300 a 500
Vida media por Hidrólisis	> de 25 semanas
Vida media por Fotólisis	> de una semana

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, 1986, Pesticides in Groundwater: Background Document

5. CLASIFICACIÓN DE LA TOXICIDAD DE LOS PLAGUICIDAS

Por mucho tiempo se ha intentado desarrollar un sistema práctico para evaluar la toxicidad aguda y crónica de las sustancias químicas, incluyendo a los plaguicidas. El método más comúnmente empleado y avalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para medir la toxicidad es la Dosis Letal 50, DL₅₀, que se define como la cantidad mínima de una sustancia, generalmente expresada en mg/kg, que es capaz de matar al 50% de una población de animales de prueba. Los resultados de DL50 obtenidos para una sustancia dada se extrapolan a los humanos y sirven de base para los sistemas de clasificación de la toxicidad.

En el catálogo de plaguicidas de la CICOPRAFEST se adopta la clasificación de la toxicidad recomendada por la OMS, con base en la DL₅₀ obtenida en ratas cuando el plaguicida se administra por vía oral en forma aguda. La clasificación según estos criterios se anota en el siguiente cuadro.

Cuadro 8. Valores que indican la categoría toxicológica.

Categoría	Tipo toxicológico	DL ₅₀ en mg/kg de masa corporal
Extremadamente tóxico	I	< 5.0
Altamente tóxico	II	5.0-50.0
Moderadamente tóxico	III	50.0-500.0
Ligeramente tóxico	IV	> 500.0

Fuente: Catálogo Cicoprafest, 1998

CONCLUSIONES

Las propiedades de algunas sustancias químicas, tales como los plaguicidas, implican cierto nivel de riesgo tanto al medio ambiente como a la salud humana. Debido a esto, es necesario contar con un mejor conocimiento de los plaguicidas, con la finalidad de prevenir y minimizar los riesgos asociados a un uso indiscriminado de estos.

En México, debido a la gran diversidad de climas, suelos, orografía, biota y tipo de tecnología aplicada en la agricultura, se deben tomar los valores del cuadro 7 como una base o referencia, y no como una regla, debido a que son datos tomados en laboratorio bajo condiciones controladas, lo cual no ocurre en la naturaleza.

Sería importante realizar investigaciones a nivel de laboratorio y campo con las condiciones ambientales que prevalecen en México, a fin de entender los parámetros ambientales e identificar de forma más precisa el transporte y comportamiento de los plaguicidas en el ambiente a lo largo de su ciclo de vida. Esto proporcionaría la mínima información requerida para: prevenir el desarrollo de resistencia de las plagas, la intoxicación de insectos, animales y plantas benéficos para el hombre y evitar la bioacumulación a lo largo de las cadenas tróficas y la contaminación de suelo, aire y agua.

Bibliografía:

- 1) Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) Atlanta, Georgia, 1995
- 2) Catálogo Oficial de Plaguicidas, Cicoplafest, 1998
- 3) http://docs.pesticideinfo.org/documentation4/ref_waterair1.html
- 4) oda.state.or.us/nrd/water_quality/BMPs/Pesticides/Pesticides_Groundwater.pdf
- 5) <http://edafologia.ugr.es/conta/tema13/evol.htm>
- 6) <http://www.arsusda.gov/acsl/units.html>
- 7) www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/98603/lecciones/Mod3/T2_L1_3.htm
- 8) OSU Extension Pesticide Properties Database, J.J. Jenkins and P.A. Thomson, Oregon State University Extension Service, January 1999.
- 9) <http://pmep.cce.cornell.edu/facts-slides-self/facts/pest-gr-gud-grw89.html>
- 10) <http://hermes.ecn.purdue.edu:8001/cgi/convwqtest?er-18.nd.ascii>
- 11) http://www.biochem.northwestern.edu/holmgren/Glossary/Definitions/Def-P/parts_per_million.html