

Evaluación de la movilidad del ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ándicos del departamento del Cauca, Colombia

Mobility assessment of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in andic soils of the department of Cauca, Colombia

Juan C. Casas¹ ; Edier H. Pérez² ; Jesús D. Hurtado¹ ; Claudia L. Quiroz¹ ; Mauricio Correa³ ; Edna Cabrera^{1*}

¹Universidad del Cauca, Departamento de Ingeniería Ambiental. Popayán - Cauca, Colombia; e-mail: jccasas@unicauca.edu.co; davidh@unicauca.edu.co; claudiaquiroz@unicauca.edu.co; ecabrera@unicauca.edu.co

²Universidad del Cauca, Departamento de Química. Popayán - Cauca, Colombia; e-mail: ehper@unicauca.edu.co

³Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Sanitaria, Escuela Ambiental. Medellín – Antioquia, Colombia; e-mail: mandres.correa@udea.edu.co

*autor de correspondencia: ecabrera@unicauca.edu.co

Cómo citar: Casas, J.C.; Pérez, E.H.; Hurtado, J.D.; Quiroz, C.L.; Correa, M.; Cabrera, E. 2022. Evaluación de la movilidad del ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ándicos del departamento del Cauca, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1772. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1772>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: noviembre 23 de 2020

Aceptado: septiembre 21 de 2022

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El herbicida ácido 2,4–diclorofenoxiacético (2,4-D) es un ácido selectivo y sistémico que, desde 1940, es ampliamente utilizado en suelo agrícolas, de todo el mundo. Su uso radica a su selectividad entre la vegetación de hoja ancha y cultivos de gramíneas y como regulador del crecimiento vegetal; sin embargo, este herbicida se puede acumular en el ambiente y, adicionalmente, puede ser transportado por lixiviación, a través del suelo, llegando a contaminar aguas subterráneas, lo que genera un alto riesgo para el ambiente y la salud del ser humano. El estudio de la movilidad del 2,4-D en suelos con alto contenido de materia orgánica permitió conocer, que no solo la materia orgánica se correlaciona indirectamente con la movilidad de este compuesto, sino que, también, influye la humedad, al reducir la lixiviación y el potencial de contaminación del recurso hídrico subterráneo, mientras que la conductividad hidráulica se relaciona, de manera directa, con la lixiviación de este herbicida.

Palabras clave: Materia orgánica; Humedad; Conductividad hidráulica; Herbicida selectivo; Contaminantes del suelo.

ABSTRACT

The herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) is a selective and systemic acid that has been widely used in agricultural soils since 1940. Its use lies in its selectivity between broadleaf vegetation and grass crops, and as a regulator of plant growth. However, this herbicide can accumulate in the environment, and additionally, it can be transported by leaching through the soil, contaminating groundwater, which generates a high risk for the environment and human health. In this study, the mobility of 2,4-D in organic-matter-rich soils was assessed. The results revealed that not only the organic material is indirectly correlated with the mobility of this compound but also influences humidity and reduces leaching and potential pollution of groundwater resources, whereas hydraulic conductivity is directly related to herbicide leaching.

Keywords: Organic matter; Humidity; Hydraulic conductivity; Selective herbicide; Soil pollutants.

INTRODUCCIÓN

El 2,4-D es considerado como el primer herbicida “fenoxi” que fue introducido en Colombia y se le puede encontrar disponible en formulaciones de sal 2,4-DMA, de ácido puro y de éster 2,4-D EHE (Bukowska, 2006). Los herbicidas de ácido fenoxialcanoicos son altamente solubles en agua, pero presentan una adsorción en el suelo relativamente baja (Labrada *et al.* 2000), por esta razón, son susceptibles a contaminar aguas subterráneas por lixiviación. Este hecho recibe bastante atención, ya que el agua subterránea representa alrededor del 98 % del agua dulce disponible de nuestro planeta. Es así, como la Directiva 98/83/CE de la Unión Europea (DOUE, 1998) establece las concentraciones máximas permitidas para los plaguicidas y sus productos en las aguas potables, con el fin de proteger a las personas, contra los efectos nocivos.

En un estudio realizado en Roorkee, India, se evaluó la persistencia y la movilidad de ácido 2,4-D, en la zona no saturada del suelo en condiciones de campo, para la cosecha de trigo (Gupta *et al.* 2012). Se eligieron tres parcelas experimentales para representar el movimiento potencial y la persistencia del herbicida 2,4-D, bajo tres tratamientos de riego. Como resultado, se reportó que la mayor cantidad de herbicida fue retenido en los primeros 15 cm del suelo y su porcentaje de degradación osciló del 60 al 90 %, en 40 días después de aplicado, dependiendo de la parcela.

Por su parte, Morillo *et al.* (2001) corroboraron que con la adición de β -ciclodextrina, como una fase orgánica, se retuvo el 2,4-D en suelo, lo que favoreció la degradación del herbicida, el cual, fue después liberado, lo que disminuyó su lixiviación del 83 al 70 %. En experimentos con suelos de Malasia, Ismail *et al.* (2009), luego de cuatro procesos de desorción realizados a suelos franco arcilloso y arcilloso, encontraron porcentajes totales de desorción de 18,31 y 28,33 %, respectivamente, indicando que no hubo lixiviación completa del compuesto, mientras que se observó un aumento en la adsorción del 2,4-D, con el incremento del contenido de arcillas y la presencia de materia orgánica.

En un estudio llevado a cabo con suelos ándicos del departamento del Cauca en Colombia, por Pérez & Páez (2010), se determinó que la pérdida de los plaguicidas organofosforados clorpirifos y diazinón ocurrió por escorrentía superficial y movilidad en el perfil del suelo, lo que permitió predecir el comportamiento y la dinámica de estos compuestos en la zona no saturada del suelo. Se concluyó, que puede existir una dependencia entre la relación carbono orgánico/arcilla y la adsorción de los plaguicidas al suelo. Además, se reportó que el clorpirifos, se desplazó 15 cm en el perfil del suelo, con 3 eventos de lluvia simulada y a 25 cm de profundidad, con la aplicación de 5 eventos de lluvia. Ambos plaguicidas y sobre todo el clorpirifos, se adsorbieron fuertemente en los primeros 10 cm del suelo, por lo que no lixivian en grandes cantidades a mayores profundidades.

Las propiedades del suelo, como el contenido de carbono orgánico, el pH, la textura, la composición mineralógica y la estructura, así como el uso y la gestión del suelo (aplicación de plaguicidas, tiempo y labranza), el clima de la zona, el subsuelo y las propiedades del

plaguicida, tienen un papel decisivo en el potencial de lixiviación de los herbicidas (Islam *et al.* 2018; Meftaul *et al.* 2020); por ejemplo, la materia orgánica y las arcillas pueden incrementar la capacidad de retención de plaguicidas y extender el tiempo de contacto, para que los procesos, que llevan a la degradación de los contaminantes, permitan la reducción de la contaminación del recurso hídrico (Góngora-Echeverría *et al.* 2019; Gurson *et al.* 2019; Ozbay *et al.* 2017; Ismail *et al.* 2009).

El propósito de esta investigación fue aportar información sobre el comportamiento del herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ándicos de montaña y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo en la movilidad del herbicida, en un montaje experimental de columnas de suelo no alterado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características de la zona de estudio. Se tomaron muestras de suelo provenientes del municipio de Timbío, en el departamento del Cauca (Colombia), ubicado en las coordenadas 2°21'10"N y 76°40'55"O, a una altitud 1.850 m s.n.m.

El relieve de la región es de ondulado a fuertemente ondulado, presenta disecciones poco profundas, con pendientes cortas y medias. Algunos sectores tienen relieve suavemente ondulado y otros llegan a ser fuertemente quebrados. El clima de la zona es moderadamente frío, con temperaturas que varían entre 12 y 20 °C y la precipitación oscila entre 1.200 y 1.800 mm anuales. El material parental del sector, donde se tomaron las muestras de suelo, es ceniza volcánica.

Muestreo. Se realizaron muestreos en tres fincas agrícolas del municipio de Timbío, para la toma de muestras disturbadas y sin disturbar. Las muestras disturbadas, se tomaron con el propósito de caracterizar el suelo y aquellas sin disturbar, se emplearon en la determinación de la movilidad del 2,4-D, mediante un montaje de columnas en el laboratorio.

El área muestreada de cada finca fue seleccionada en campo, delimitando una cuadrícula de 625 m², en la cual, se tomaron 25 submuestras de suelo de 1 kg, a 20 cm de profundidad, separadas 5 m entre sí, con el fin de obtener una muestra compuesta que, entonces, fue trasladada al laboratorio, en una bolsa debidamente marcada, para su posterior secado y tamizado.

Las muestras de suelo disturbado, se secaron al aire y posteriormente fueron tamizadas a 2 mm y almacenadas a temperatura ambiente. Las propiedades físicas y químicas, se determinaron de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC ISO/IEC 17025:2005 (ICONTEC, 2005) y siguiendo la metodología descrita por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006). Las propiedades físicas medidas fueron: humedad gravimétrica en porcentaje (%); densidad aparente (DA – g/cm³), por el método del cilindro; textura, por el método Bouyucos; conductividad hidráulica, por consolidación de suelo (cm/s) y gravedad específica. Las propiedades químicas determinadas fueron: pH, por el método

potenciómetro (Relación 1:1); carbono orgánico (%), por Walkley y Black; nitrógeno, por el método de Kjeldahl (%); capacidad de intercambio catiónico, por NH_4OAc 1 M pH 7 (meq/100 g suelo).

Las muestras de suelo sin disturbar, se tomaron enterrando, con ayuda de un mazo, las columnas de PVC de 5 cm de diámetro y 30 cm de largo, dejando el extremo superior por fuera del suelo, unos cuantos centímetros. Estas columnas, se taparon por ambos costados, indicándose la dirección natural del suelo. Cada muestra se tomó por triplicado, para un total de 9.

Diseño experimental. El diseño experimental fue factorial, completo de dos vías (tiempo y cantidad de materia orgánica), con 18 tratamientos, resultado de combinar 6 niveles de tiempo (cada 10 días, durante 2 meses), con tres contenidos de materia orgánica (9,84, 10,94 y 12,42 %) y constituyeron un factor fijo; los niveles de tiempo son un factor aleatorio. El muestreo fue estratificado, con tres réplicas para cada nivel de materia orgánica, seis medidas en el tiempo y un control, por triplicado. La unidad experimental estuvo constituida por la muestra empacada en una columna de suelo. La variable de respuesta fue la concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) en el lixiviado.

Montaje. En el extremo inferior de cada columna con suelo sin disturbar, se instaló una frita de vidrio y se selló con una tapa de PVC, con orificio de 1 cm de diámetro, para permitir la salida y la recolección del lixiviado. La superficie superior de cada columna, se cubrió con una frita de vidrio de 1 mm de espesor, para distribuir el flujo de la lluvia en forma homogénea. Después, las columnas fueron llevadas a saturación por capilaridad, con una solución 0,01 M de CaCl_2 , desde el fondo hasta la superficie, asegurando desplazar el aire de los poros de suelo por agua. Se equilibraron durante 12 horas y el exceso de agua, se drenó por gravedad.

Se aplicó directamente sobre la superficie de las columnas una concentración de 361,51 mg de 2,4-D/kg de suelo en metanol. Las columnas empacadas se pesaron al inicio y al final del montaje de laboratorio. La humedad del suelo en las columnas se mantuvo a capacidad de campo y a 15 °C en la oscuridad, durante todo el experimento. Una vez preparadas, las columnas se dispusieron verticalmente y se inició la lluvia artificial, con 250 mL de una solución de cloruro de calcio 0,01 mol/dm³, por 48 horas, a un flujo de 0.1 mL por minuto (OECD, 2000).

Un total de 12 columnas fueron preparadas para llevar a cabo todos los ensayos. Estos, se realizaron por triplicado para un suelo, con tres concentraciones de materia orgánica diferentes, con un evento de lluvia cada 10 días. Además, se hizo una columna de control con arena, también por triplicado, para un evento de lluvia, cuyo material recibió tratamiento para eliminación del contenido de materia orgánica. Este control permitió corregir los datos que se pudieran alterar por la interacción de los materiales usados, con cualquier contaminante. El lixiviado fue recogido en fracciones por 50 días, durante los cuales, se registraron sus volúmenes. La concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) fue cuantificada en cada fracción.

Las muestras de lixiviado, se filtraron por milipore de 0,45 μm y se inyectaron al Cromatógrafo de líquidos de alta resolución, acoplado al detector selectivo de masas (HPLC-SM), HEWELETT PACKARD 1100, ChemStation Versión B.03.01 SR 1.1, Columna C18 VYDAC de 250 mm de longitud 4,6 mm y de 5,0 μm de tamaño de partícula a 25 °C, volumen de inyección 20 μL y detector UV-Visible a 280 nm de longitud, la fase móvil acetonitrilo - ácido acético (40:60), en modo isocrático, para un tiempo de 10 minutos y un flujo de 1,0 mL/min, en el Centro de Investigaciones Ambientales, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Para la curva de calibración, se usó un estándar certificado de 2,4-D: marca CHEMSERVICE, 99,0 % pureza, lote: 401-92-A, lográndose un límite de detección del método (LDM), de 0,024 mg/L.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica del suelo. Los datos obtenidos del análisis fisicoquímico realizado a las muestras de suelo de las tres fincas, se resumen en la tabla 1. La interpretación de resultados, se llevó a cabo, utilizando, como referencia, los datos reportados por Silva Mojica (2000) y que se encuentran en la tabla 2.

De los resultados del análisis de textura mostrado en la tabla 1, se observa que los suelos estudiados presentan un contenido de arena alto y el análisis de Tukey indica una diferencia significativa entre ellos (indicada por las letras a, b y c). Además, el contenido de arcilla es apropiado, excepto para el suelo en San Luis parte baja, donde supera el rango considerado adecuado (10-25 %). Dados estos contenidos de arcilla y arena, estos suelos presentan una clase textural franco arenosa.

Se observa que los niveles de humedad higroscópica de las tres muestras de suelo son normales y se asocia, especialmente, al alto contenido de materia orgánica (MO), como se puede deducir de la correlación de Pearson positiva y altamente significativa (0,924).

De la tabla 1, se puede también observar que los tres suelos contienen bajo valor de densidad aparente y se atribuye a los altos contenidos de MO, pero, principalmente, a las arcillas, reflejado en la correlación de Pearson negativa (-0,921); esto puede indicar, que el incremento en ellas aumenta el volumen de espacios porosos y, por lo tanto, se reduce la densidad, lo cual, afecta la estabilidad y la capacidad de retención de agua; de esta forma, se puede producir una disminución en la lixiviación de contaminantes, a lo largo del perfil.

La tabla 1, también muestra las conductividades hidráulicas de los suelos de las tres fincas que, de acuerdo con la norma DIN 18130 (1998), son bajas, al estar en el rango comprendido entre 10^{-6} y 10^{-8} , indicando, entonces, que estos suelos tienen muy mal drenaje. De acuerdo con la misma norma, los valores de conductividad hidráulica, se encuentran en el rango característico de un suelo franco arenoso. Todo lo anterior explica la dificultad presentada en el paso del agua, a través del suelo contenido en las columnas de PVC empleadas en el laboratorio, con tiempos de lixiviado y drenaje de hasta 8 días.

Tabla 1. Resultados de los análisis de propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo de las tres fincas en estudio, del municipio de Timbío - Cauca, Colombia.

| Propiedades físicas del suelo | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|-----------|-----------------|-----------------------|--------------------------|--|---------------------------------|
| Finca | Textura | Arena (%) | Arcilla (%) | Limos (%) | Humedad Higroscópica (%) | Densidad aparente (g/cm ³) | Conductividad Hidráulica (cm/s) |
| 1 | Franco arenosa | 72 b | 25 ^b | 4 | 10,67 c | 0,66 c | 4,73 x 10 ⁻⁷ a |
| 2 | | 71 c | 26 ^a | 3 | 14,06 b | 0,68 b | 2,70 x 10 ⁻⁷ b |
| 3 | | 77 a | 19 c | 4 | 15,09 a | 0,75 a | 1,84 x 10 ⁻⁷ c |
| Propiedades químicas del suelo | | | | | | | |
| C (%) | MO (%) | pH | | CIC (meq/100 g suelo) | | N (%) | |
| 5,71 | 9,84 c | 5,08 b | | 59,83 | | 1,18 a | |
| 6,34 | 10,94 b | 5,07 b | | 59,78 | | 0,98 c | |
| 7,20 | 12,42 a | 5,10 a | | 54,46 | | 1,09 b | |

C: Carbono. MO: Materia orgánica. CIC: Capacidad de intercambio catiónico. N: nitrógeno.
a, b, c: Prueba de Tukey, a>b>c (p <0,05). Letras diferentes indican diferencia significativa. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

Tabla 2. Nivel de materia orgánica (MO) en un suelo de clima medio (Silva Mojica, 2000).

| Nivel | Bajo | Medio | Alto |
|-------|------|-------|------|
| % MO | <3 | 3-5 | >5 |

Se puede observar en la tabla 1, que el contenido de materia orgánica es alto en los tres suelos (Conklin, 2005). Esta característica hace que disminuya la susceptibilidad de estos a ser erosionados y los oscurece, facilitando su calentamiento, aspecto que es favorable para la germinación de semillas. También, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, mejora la capacidad buffer de los suelos, aunque disminuye el pH. Una característica poco deseable de la materia orgánica es la de retener compuestos y elementos tóxicos, como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o de metales pesados, que llegan al suelo, son adsorbidos y dificultan su eliminación (Jaramillo Jaramillo, 2002).

De acuerdo con los resultados, los tres suelos están clasificados como fuertemente ácidos, por estar en un valor inferior a 5,5. Esta acidez tiene un efecto en la actividad biológica del suelo, ya que condiciona su fertilidad o el crecimiento de las plantas y, además, disminuye la disponibilidad de algunos nutrientes, puesto que un pH ácido aumenta la solubilidad de los compuestos básicos, facilitando su lixiviación. Esta fuerte acidez puede provenir, probablemente, del alto contenido de MO y de los alófanos presentes en este tipo de suelos, que son de origen volcánico (Vázquez, 2005).

Respecto a la capacidad de intercambio catiónico de los tres suelos, se obtuvieron resultados superiores a 40 meq / 100g suelo. Se considera que estos valores son altos, lo cual, es benéfico para las

plantas, ya que esta CIC le permite retener elementos catiónicos, evitando su lavado. Los altos niveles de CIC, se atribuyen, principalmente, al alto contenido de materia orgánica, pero, en este caso, en especial, a las arcillas del suelo, como lo demuestra la correlación positiva y altamente significativa (0,975).

Lixiviación del 2,4-D. La figura 1 muestra los resultados de movilidad de los suelos estudiados. Esta gráfica permite ver que cada que ocurre un evento de lluvia, se induce a la lixiviación del 2,4-D, tanto en la columna de control o blanco como en las columnas con muestra de suelo. También, se puede ver que la movilidad del 2,4-D es superior en las columnas blanco. Al comparar los resultados de movilidad en los tres suelos, se infiere que esa movilidad disminuye al aumentar el contenido de MO, que se puede confirmar con la correlación de Spearman negativa y altamente significativa (-0,334). Esto es un indicativo de que la retención del plaguicida ocurre en las moléculas de la MO.

Igualmente, se observa en la figura 1, que la mayor parte del plaguicida es movilizado en el día 1, con el primer evento de lluvia; por ejemplo, en el suelo de la finca 1, la prueba de Tukey no muestra diferencia significativa entre las concentraciones del plaguicida en los primeros 30 días, pero la cantidad movilizada es significativamente inferior durante los 40 y 50 días.

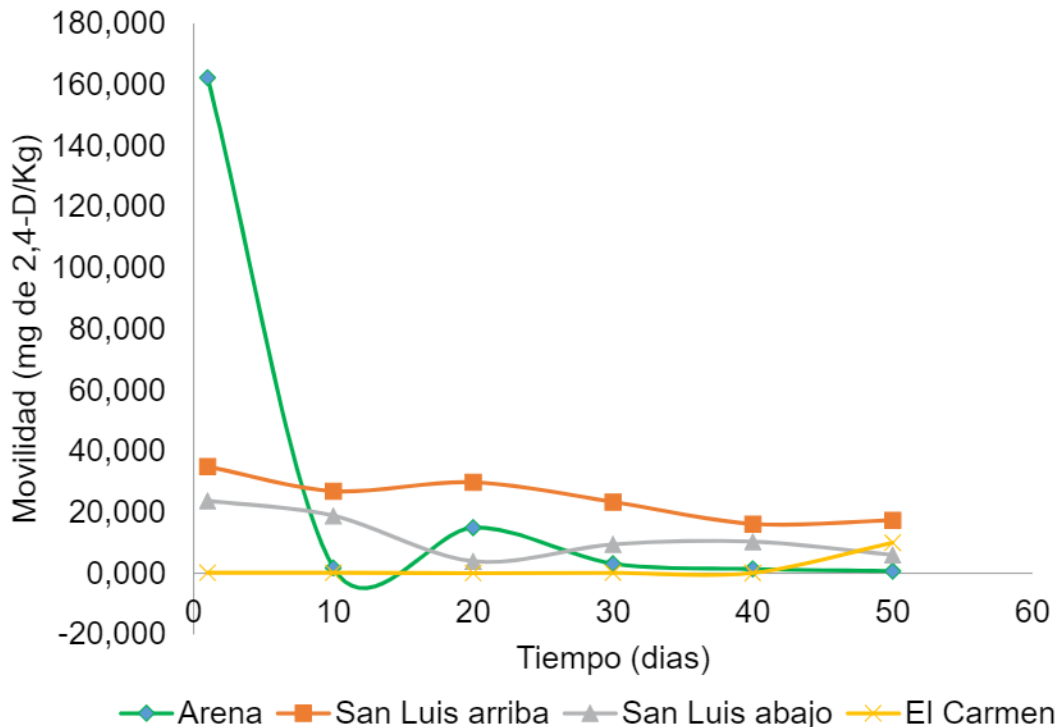


Figura 1. Movilidad del 2,4-D, en tres suelos del municipio de Timbío - Cauca, Colombia.

En la misma gráfica de la figura 1, se ve que, para el suelo de la finca 2, la prueba de Tukey no presenta diferencias significativas entre las concentraciones del 2,4-D en el lixiviado en los 50 días de muestreo y se observa una cantidad movilizada significativamente inferior en el evento de lluvia, ocurrido a los 20 días, debido, probablemente, a las líneas de flujo que se generan con el transporte de líquidos, a través de la columna de suelo.

Finalmente, en el suelo de la finca 3, la prueba de Tukey tampoco demuestra diferencias significativas entre las concentraciones del 2,4-D en los primeros 40 días, pero la cantidad movilizada es significativamente superior a los 50 días, en el sexto evento de lluvia.

El tiempo y los eventos de lluvia a lo largo de los 50 días afectaron la lixiviación del herbicida 2,4-D en los suelos estudiados, lo cual, se confirma con la correlación de Pearson negativa (-0,416), indicando que, a medida que el tiempo entre eventos de lluvia se incrementó, la movilidad disminuyó.

Las características del suelo condicionan el arrastre de los contaminantes; por ejemplo, los resultados obtenidos para el suelo de la finca 1 (Tabla 1), cuya concentración de materia orgánica de 9,84 %, muestran que después de 50 días de lixiviación y 6 eventos de lluvia permite lixiviar un 40 % de la concentración inicial de 2,4-D, porcentaje que se considerara alto, ya que está muy cercano al valor obtenido en el control (arena).

Por el contrario, en la columna de suelo de la finca 3, experimentalmente, se obtuvo una lixiviación total baja del 3,05 % de 2,4-D, asociada al contenido superior de materia orgánica

en los suelos estudiados; pero como se mencionó, anteriormente, el control de la lixiviación no solo se debe atribuir a la materia orgánica del suelo, sino a otras características fisicoquímicas del mismo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, que regulan el paso del agua y otros fluidos, a través del suelo y que interactúan con el contaminante, para realizar los procesos de transformación o degradación, dando origen a nuevos compuestos, que pueden tener mayor, menor o igual toxicidad.

Los datos mostrados en la tabla 1 permiten verificar, además, que el suelo con mayor porcentaje de materia orgánica es el que tiene una conductividad hidráulica menor, siendo, entonces, el que más control ejerce al flujo del agua y fluidos, a través de la columna de suelo y, asimismo, controla el tiempo de lixiviación.

Comparación de la lixiviación de los suelos con la muestra control

En la figura 1, se compararon los resultados de lixiviación de cada suelo estudiado con la muestra control (arena), haciendo la suposición de que este control tuvo un comportamiento diferente al de los suelos orgánicos, una conductividad hidráulica alta y porcentajes de retención de contaminantes casi nulos.

Este análisis, se hizo teniendo en cuenta que la retención que presenta la muestra control se debió a factores externos a los suelos, los cuales, no fueron considerados para la comparación; por ejemplo, la adsorción por el PVC y líneas de flujo preferencial.

En el caso de la muestra control (Columna de arena), la prueba de Tukey no mostró diferencias significativas en la concentración

del plaguicida a partir de los 20 días y se observó una cantidad movilizada significativamente superior en el día 1, con el primer evento de lluvia. Esto, se atribuyó a las características estructurales de la arena y a su alto valor de conductividad hidráulica, correspondiente a $4,63 \times 10^{-3}$ cm/s.

Después de pasados los primeros 10 días, la muestra control mostró valores de lixiviación inferiores a 20 %, debido al lavado y al arrastre del contaminante, ocurrido con el primer evento de lluvia. Esto, se ratificó con el test de Tukey, con el que no se encontraron diferencias significativas en las medias de los siguientes muestreos.

Al comparar cada suelo con la muestra control, se observó que la lixiviación aumentó en los tres suelos estudiados y que el comportamiento fue el mismo, si se tiene en cuenta que, a mayor concentración de materia orgánica, menor fue el porcentaje de lixiviación y que, a mayor tiempo, mayor la degradación del 2,4-D. Adicionalmente, se observa que al transcurrir el tiempo la lixiviación, después de cada evento de lluvia, fue más significativa comparada con la concentración inicial adicionada y se vio el efecto de los eventos de lluvia, pues con cada evento de lluvia la lixiviación se acumuló; después de 50 días, se obtuvo un 40,95 % de lixiviación total para la finca 1; 19,85 % de lixiviación total para la muestra de la finca 2 y un 3,05 % de lixiviación total para la muestra de la finca 3.

Tabla 3. Comparación de porcentajes de lixiviación de 2,4-D, en los suelos tres suelos estudiados del municipio de Timbío - Cauca, Colombia vs tiempo.

| | Tiempo (días) | | | | | |
|----------------|---------------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Suelo 1 | 9,64 | 7,41 | 8,22 | 6,44 | 4,45 | 4,79 |
| Suelo 2 | 6,51 | 5,17 | 1,08 | 2,6 | 2,83 | 1,64 |
| Suelo 3 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 2,86 |

Evaluación de la retención de 2,4-D en los suelos y la incidencia del tiempo. Al analizar el comportamiento de las columnas de suelo y comparar las concentraciones del 2,4 D en el lixiviado, con las que se retenían en el suelo después de cada evento de lluvia, se encontró que todas tienen un porcentaje de retención mayor al 90 %, después de cada muestreo, debido a que la concentración del 2,4-D varía con cada proceso de lixiviación, determinado por cada evento de lluvia.

La retención del 2,4-D es un proceso que no solo se debe a la circulación del agua, por el suelo, pues existen unas variables importantes que influyen en su retención o movimiento, a través del mismo. El proceso de adsorción/desorción es de gran importancia para entender la difusión de los plaguicidas hacia los recursos hidrológicos.

Se pudo verificar que los tres suelos tienen porcentajes de recuperación de 2,4-D en el lixiviado, inferiores a los reportados por Morillo *et al.* (2001); sin embargo, al comparar los resultados de ambos estudios, se debe tener en cuenta las características físicas y químicas que influyen en el proceso de lixiviación; por ejemplo, los tres suelos del presente reporte tienen una textura franco - arenosa, además presentan arcillas y alto valor de materia orgánica, lo cual, ayuda a la retención del contaminante, entre otras variables significativas en el proceso de lixiviación; estas características contrastan con el suelo del estudio de Morillo *et al.* (2001), cuya textura es franco - limosa.

El porcentaje de lixiviación total de los suelos ándicos estudiados en este proyecto fue de 3 - 60 %. Al comparar los anteriores resultados con los del estudio de la lixiviación de 2,4-D en suelos de la India, realizado por Gupta *et al.* (2012), se observa la diferencia en los porcentajes, ya que reportaron un porcentaje de lixiviación del 25 - 76 %. Se puede considerar que tener un menor porcentaje de lixiviación en los suelos del presente proyecto resulta favorable porque, de esta forma, el contaminante puede ser degradado o transformado, mediante procesos que son favorecidos por el porcentaje de materia orgánica, el pH del suelo, las arcillas, entre otras variables; por ejemplo, el riesgo de lixiviación de 2,4-D fue mayor en el suelo 1 que en el suelo 3; esto puede estar relacionado con los diferentes contenidos de materia orgánica (Tabla 3).

Otros factores que afectan la lixiviación del 2,4-D. Algunos autores, como Senesi *et al.* (2001), Ismail *et al.* (2009), Kumar *et al.* (2015) y Ozbay *et al.* (2017) encontraron que el contenido de materia orgánica está relacionado con el proceso de adsorción y de lixiviación de contaminantes, como plaguicidas, ya que cuando estos ingresan al suelo son retenidos por la materia orgánica. Hay, además, otros factores, como la textura y la conductividad hidráulica, que también son determinantes en la lixiviación o la retención y la descomposición de los contaminantes, que ingresan al suelo.

Como conclusión, el presente trabajo reporta una relación inversamente proporcional entre la materia orgánica y la movilidad del herbicida 2,4-D, debido a que proporciona sitios de adsorción por la presencia de los grupos funcionales, que forman complejos de asociación fuertes y, por consiguiente, mayor número de moléculas adsorbidas.

Otro factor que condiciona la movilidad del 2,4-D es la humedad, ya que, tanto las tasas de degradación química como microbiana, se incrementan con mayores niveles de temperatura y de humedad.

En el suelo de la finca 1, con una conductividad hidráulica más alta que la del suelo de la finca 3, la lixiviación del 2,4-D fue mayor; sin embargo, estadísticamente, la relación de movilidad con los valores de conductividades hidráulicas en los suelos orgánicos es muy baja (0,240), debido a que los valores encontrados en cada muestra son muy parecidos entre sí.

El riesgo de lixiviación del herbicida fue significativamente mayor en la finca 1 que en la finca 3, relacionado, probablemente, con el contenido de materia orgánica más bajo en la finca 1, en comparación con la finca 3; el alto contenido de esta termina siendo de gran importancia para la retención de contaminantes, mitigando la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas de estos suelos.

Al comparar cada uno de los suelos con el control, se evidenció una diferencia significativa, ya que la conductividad del blanco fue notablemente superior a la de los suelos. La conductividad hidráulica es un parámetro que incide en la movilidad; valores altos permiten que el agua atraviese rápidamente la columna del blanco. Es así, como en el primer muestreo, la mayor cantidad del herbicida fue arrastrada e incrementada por su alta solubilidad en agua, de manera que se produce un “lavado” y genera mayor concentración del mismo en el lixiviado.

Los resultados aquí registrados fueron realizados a nivel de laboratorio, pero las condiciones de campo, en la mayoría de los casos, pueden favorecer la movilidad del 2,4-D en el suelo, por la gran variabilidad de las condiciones climáticas del sitio en estudio (humedad, eventos de lluvia, temperatura, evapotranspiración) y por la naturaleza del herbicida. La lixiviación, por ejemplo, puede aumentar con el volumen de las precipitaciones, debido a la alta solubilidad del herbicida 2,4-D. De esta manera, el contenido de agua del suelo puede ser un factor importante para influir en el movimiento y la degradación del plaguicida.

Se puede inferir, de manera general, que la movilidad de los herbicidas depende de su afinidad por los constituyentes del suelo (adsorción), es decir, cuanto mayor sea su adsorción en suelo menor será su potencial de lixiviación.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad del Cauca y Universidad de Antioquia, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo. **Conflicto de intereses:** Los autores del presente trabajo, manifiestan que no existe conflicto de interés que pueda afectar la validez de los resultados aquí presentados.

REFERENCIAS

1. BUKOWSKA, B. 2006. Toxicity of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid— molecular mechanisms. *Polish Journal Environmental Studies*. 15(3):365-374.
2. CONKLIN, A.R. 2005. *Introduction to soil chemistry: Analysis and instrumentation*. 1 ed. Wiley. 240p.
3. DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V., DIN. 1998. Laboratory tests for determining the coefficient of permeability of soil. 24p.
4. DIARIO OFICIAL DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, DOUE. 1998. Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. 23p.
5. GÓNGORA-ECHEVERRÍA, V.R.; MARTIN-LAURENT, F.; QUINTAL-FRANCO, C.; LORENZO-FLORES, A.; GLÁCOMAN-VALLEJOS, G.; PONCE-CABALLERO, C. 2019. Dissipation and adsorption of 2, 4-D, atrazine, diazinon, and glyphosate in an agricultural soil from yucatan state, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*. 230:131. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4177-y>
6. GUPTA, M.; GARG, N.K.; JOSHI, H.; SHARMA, M.P. 2012. Persistence and mobility of 2,4-D in unsaturated soil zone under winter wheat crop in sub-tropical region of India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 146(1):60-72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.009>
7. GURSON, A.P.; OZBAY, I.; OZBAY, B.; AKYOL, G.; AKYOL, N.H. 2019. Mobility of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid, Glyphosate, and Metribuzine Herbicides in Terra Rossa-Amended soil: Multiple approaches with experimental and mathematical modeling studies. *Water, Air, & Soil Pollution*. 230:220. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4266-y>
8. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, ICONTEC. 2005. Norma tecnica colombiana-NTC-ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. ICONTEC (Bogotá D.C.). 49p.
9. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Suelo, agua, abono orgánico, tejido vegetal, material particulado*. Ed. 6. (Bogotá, D.C.). 647p.
10. ISLAM, F.; WANG, J.; FAROOQ, M.A.; KHAN, M.S.S.; XU, L.; ZHU, J.; ZHAO, M.; MUÑOZ, S.; LI, Q.X.; ZHOU, W. 2018. Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment International*. 111:332-351. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020>
11. ISMAIL, B.; SAMENI, M.; HALIMAH, M. 2009. Adsorption, desorption and mobility of 2 4-D in two Malaysian agricultural soils. *Asian Journal of Agricultural Research*. 3(3):67-77. <https://doi.org/10.3923/ajar.2009.67.77>

12. JARAMILLO JARAMILLO, D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional Colombia. 619p.
13. KUMAR, N.; MUKHERJEE, I.; VARGHESE, E. 2015. Adsorption-desorption of tricyclazole: effect of soil types and organic matter. *Environmental monitoring and assessment*. 187:61.
<https://doi.org/10.1007/s10661-015-4280-5>
14. LABRADA, L.; CASELEY, J.; PARKER, C. 2000. Manejo de Malezas para Países en Desarrollo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO (Roma). 378p.
15. MEFTAUL, I.M.; VENKATESWARLU, K.; DHARMARAJAN, R.; ANNAMALAI, P.; MEGHARAJ, M. 2020. Movement and fate of 2, 4-D in urban soils: a potential environmental health concern. *ACS omega*. 5(22):13287-13295.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01330>
16. MORILLO, E.; PÉREZ-MARTÍNEZ, J.; GINÉS, J.M. 2001. Leaching of 2,4-D from a soil in the presence of [beta]-cyclodextrin: laboratory columns experiments. *Chemosphere*. 44(5):1065-1069.
[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00346-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00346-5)
17. OECD. 2000. OECD guidelines for the testing of chemical. Leaching in soil columns. 15p.
18. OZBAY, B.; AKYOL, N.H.; AKYOL, G.; OZBAY, I. 2017. Sorption and desorption behaviours of 2, 4-D and glyphosate in calcareous soil from Antalya, Turkey. *Water and Environment Journal*. 32(1):141-148.
<https://doi.org/10.1111/wej.12311>
19. PÉREZ, H.; PAEZ, M.I. 2010. Movilidad Clorpirifos en columnas de suelo andico disturbado y no disturbado usando GC-ECD y CG-SM. *Revista de Investigaciones de la Universidad del Quindío*. 18:201-207.
20. SENESI, N.; LOFFREDO, E.; D'ORAZIO, V.; BRUNETTI, G.; MIANO, T.M.; LA CAVA, P. 2001. Adsorption of pesticides by humic acids from organic amendments and soils. En: Clapp, C.E.; Hayes, M.H.B.; Senesi, N.; Bloom, P.R.; Jardine, P.M. (eds.). *Humic substances and chemical contaminants*. Soil Science Society of America. p.129-153.
<https://doi.org/10.2136/2001.humicsubstances>
21. SILVA MOJICA, F. 2000. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Tercera edición. Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo (Santa fe de Bogotá). 323p.
22. VÁZQUEZ, M.E. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA (Buenos Aires, Argentina). p.161-188.