

**EFFECTO DE LA MATERIA ORGANICA SOBRE LA MOVILIDAD DEL ÁCIDO  
2,4-DICLOROFENOXIACÉTICO (2,4-D) EN EL SUELO DEL MUNICIPIO DE  
TIMBÍO (CAUCA)**



**JESÚS DAVID HURTADO VALENCIA  
CLAUDIA LILIANA QUIROZ VELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
POPAYAN  
2015**

**EFFECTO DE LA MATERIA ORGANICA SOBRE LA MOVILIDAD DEL ÁCIDO 2,4-DICLOROFENOXIACÉTICO (2,4-D) EN EL SUELO DEL MUNICIPIO DE TIMBÍO (CAUCA)**



**PRESENTADO POR:**  
JESUS DAVID HURTADO VALENCIA  
CLAUDIA LILIANA QUIROZ VELA

**TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE INVESTIGACION PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO(A) AMBIENTAL**

**DIRECTOR:**  
Ph.D. JUAN CARLOS CASAS ZAPATA  
UNIVERSIDAD DEL CAUCA

**CODIRECTORES:**  
M.Sc. MAURICIO CORREA  
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Ph.D. TOMAS ALEJANDRE FLORVILLE ANDRADE  
UNIVERSIDAD CENTRAL - BOGOTA

**ASESORES:**  
Ph.D. EDIER HUMBERTO PEREZ  
UNIVERSIDAD DEL CAUCA

M. Sc. ISABEL BRAVO REALPE  
UNIVERSIDAD DEL CAUCA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
POPAYAN  
2015**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Director:** \_\_\_\_\_

**Ph.D. Juan Carlos Casas Zapata**

**Jurado:** \_\_\_\_\_

**M.Sc. Rene Zúñiga Rengifo**

**Jurado:** \_\_\_\_\_

**M.Sc. Luis Jorge Gonzáles**

Popayán, 27 de Abril de 2015

A Dios por ser guía en este camino  
A mis padres Isabel y Bayardo por el apoyo  
incondicional en todo momento.  
A mis hermanos Andrés y Geovanny por su constante  
colaboración durante estos años  
A mis sobrinos por ser mi motivación para salir  
adelante  
Gracias a ellos culmino uno de mis sueños más  
importantes de mi vida: Ser Profesional

**Claudia Liliana**

A Dios por estar siempre conmigo en cada paso que  
doy, porque más que pedirle, tengo que agradecerle.

A mis padres, Melba y Jesús que con fe infinita me  
apoyaron en este proceso.

A mi tío y hermanos, Olver por su constante apoyo;  
Santiago y Diana la mejor herencia que me pueden  
dejar mis padres.

A ellos por su constante motivación que me ha  
permitido tener fuerza para cumplir mis metas, pero  
más que nada, por su amor (G&J)...

**Jesús David**

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos...

...Al Ingeniero Juan Carlos Casas por habernos acogido, orientado y apoyado en éste proceso. Por hacernos parte del grupo de investigación GCISA y a través del mismo obtener beneficios que nos forman personal y profesionalmente.

A nuestros asesores, a la profesora Isabel Bravo y al profesor Edier Pérez, por ser nuestros guías, por su dedicación de tiempo y por ayudarnos a buscar soluciones frente a los problemas presentados.

Al Grupo de Agroquímica de la universidad del Cauca, especialmente a la profesora Isabel, Adriana, Janeth, Alejandra, Raúl y Jhon quienes nos acogieron en su laboratorio amablemente, gracias por su colaboración desinteresada y el apoyo para la realización del montaje experimental y las pruebas de caracterización del suelo.

Al Laboratorio de Suelos de la Universidad del Cauca, a Don Gabriel, a Don Mario y a la Ingeniera Victoria por brindarnos un espacio en el laboratorio, por mostrarnos siempre buena actitud y paciencia e igualmente a la Ingeniera Julia Ruiz por compartimos su conocimiento.

Al Centro de Investigaciones Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, especialmente al profesor Mauricio Correa por su colaboración en la realización de los análisis cromatográficos.

A los profesores Luis Jorge Gonzales y Rene Zúñiga por la revisión oportuna, aportando comentarios positivos y constructivos a nuestro trabajo.

A todos y cada uno de los profesores, compañeros y amigos que de una u otra forma hicieron parte de nuestro proceso de formación...

...Muchas Gracias

## ABREVIATURAS

<b>MO</b>	Materia orgánica
<b>2,4-D</b>	Acido 2,4-diclorofenoxiacetico
<b>CIC</b>	Capacidad de intercambio catiónico
<b>FAO</b>	Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura
<b>OMS</b>	Organización mundial de la salud
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>DCP</b>	2,4-Diclorofeno (Metabolito principal de 2,4-D)
<b>GUS</b>	Groundwater Ubiquity Score
<b>USEPA</b>	United States Environmental Protection Agency
<b>CDFA</b>	California Department of Food and Agriculture
<b>CI</b>	Conductividad hidráulica
<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo

## CONTENIDO

	Pag.
<b>INTRODUCCION</b> .....	13
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	14
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	15
1.1. Objetivo General.....	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	16
<b>3. MARCO TEORICO</b> .....	17
3.1. EL SUELO .....	17
3.2. EL COLOR DEL SUELO.....	17
3.3. LOS SUELOS DE COLOMBIA .....	17
3.4. CONSTITUYENTES Y ESTRUCTURA DEL SUELO .....	18
3.5. CICLO DE NUTRIENTES.....	18
3.6. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (M.O.).....	18
3.6.1. El Humus .....	20
• Ácidos húmicos .....	20
• Ácidos fúlvicos .....	20
• Huminas .....	20
3.7. PLAGUICIDAS.....	21
3.7.1. Herbicida 2,4 Diclorofenoxiacético .....	21
• Propiedades Físicoquímica del 2,4 – Diclorofenoxiacético .....	22
• Comercialización .....	22
• Herbicida Comercial: PROFIAMINA .....	23
3.7.1.1. Clasificación de Toxicidad .....	23
3.7.1.2. Comportamiento Medioambiental del 2,4- D .....	24
3.7.2. DINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO.....	26
• LIXIVIACION .....	27
• ADSORCION – DESORCION .....	28
• DEGRADACION .....	28

3.8.	PARÁMETROS DE MEDIDA DEL SUELO .....	30
•	Textura .....	30
•	Densidad del suelo .....	30
•	Capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	30
•	Retención de humedad .....	30
•	Carbono orgánico .....	31
•	Nitrógeno .....	31
•	Conductividad hidráulica .....	31
•	Porosidad .....	31
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
4.1.	UBICACIÓN DE LA ZONA DE TOMA DE MUESTRAS .....	32
4.2.	MUESTREO .....	32
4.2.1.	PRIMER MUESTREO .....	32
4.2.1.1.	MANEJO DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO.....	33
4.2.1.2.	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO .....	34
a)	PARAMETROS FISICOS .....	34
•	Determinación de humedad .....	34
•	Densidad por el método del cilindro .....	34
•	Determinación de textura .....	35
•	Determinación de conductividad hidráulica .....	35
b)	PARAMETROS QUIMICOS .....	35
•	Determinación de pH .....	35
•	Determinación de Materia Orgánica .....	36
•	Determinación de Nitrógeno .....	36
•	Determinación de la capacidad de intercambio catiónico .....	37
4.2.2.	SEGUNDO MUESTREO .....	37
4.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA MOVILIDAD DEL 2,4- D EN LABORATORIO .....	38
4.3.1	Montaje de Laboratorio .....	38
4.4.	ANALISIS DE EFLUENTES .....	40
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>41</b>
5.1.	CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL SUELO .....	41

5.2.	EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN DE 2,4-D EN LOS SUELOS Y LA INCIDENCIA DEL TIEMPO .....	44
5.3.	COMPARACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE LOS TRES SUELOS CON LA MUESTRA CONTROL .....	48
5.4.	EVALUACION DE LA RETENCIÓN DE 2,4-D EN LOS SUELOS Y LA INCIDENCIA DEL TIEMPO .....	50
5.5.	LA INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LA MOVILIDAD.....	53
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>57</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>58</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>59</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>65</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del Ácido 2,4-D .....	22
Tabla 2 Ubicación geográfica de las fincas muestreadas .....	33
Tabla 3. Porcentaje de materia orgánica en los suelos de las fincas muestreadas .....	37
Tabla 4. Análisis físicos y químicos del suelo .....	41
Tabla 5. Análisis físicos y químicos de la arena.....	44
Tabla 6. Lixiviación de 2,4-D en las tres fincas .....	47
Tabla 7. Porcentajes de retención del 2,4-D .....	51
Tabla 8. Porcentaje de lixiviación y retención en cada suelo .....	53
Tabla 9. Correlación De Pearson (movilidad vs Variable).....	53

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
<b>Figura 1.</b> Tipos de Materia Orgánica del suelo .....	19
<b>Figura 2.</b> Estructura Química del 2,4-D.....	21
<b>Figura 3.</b> Evolución de ventas en Colombia de 2,4 -D años 2003-2011 .....	22
<b>Figura 4.</b> Imagen del herbicida comercial PROFIAMINA 720SL.....	23
<b>Figura 5.</b> Interrelación entre los procesos que determinan la dinámica de los contaminantes orgánicos y sus metabolitos en el suelo .....	26
<b>Figura 6.</b> Ruta metabólica del 2,4 D.....	29
<b>Figura 7.</b> Zona de estudio .....	32
<b>Figura 8.</b> Imagen de toma de muestras para análisis de suelos .....	33
<b>Figura 9.</b> Imagen de toma de muestras de suelo sin disturbar .....	38
<b>Figura 10.</b> Esquema de montaje de columnas de PVC.....	39
<b>Figura 11.</b> Imagen del montaje de laboratorio.....	40
<b>Figura 12.</b> Relación entre la reacción del suelo y los procesos que influyen en la disponibilidad de nutrientes .....	55

## LISTA DE GRAFICOS

	Pag.
<b>Grafico 1.</b> Conductividad hidráulica en los suelos .....	42
<b>Grafico 2.</b> Porcentajes de materia orgánica en los tres suelos.....	43
<b>Grafico 3.</b> Movilidad del 2,4-D en los suelos y el control .....	45
<b>Grafico 4.</b> Comparación de porcentajes de lixiviación en los tres suelos estudiados .....	48
<b>Grafico 5.</b> Lixiviación acumulada del 2,4-D .....	48

## LISTA DE ANEXOS

Pag.

<b>ANEXO A.</b> HOJA DE SEGURIDAD 2,4-D .....	65
<b>ANEXO B.</b> ÍNDICES DE POTENCIAL CONTAMINANTE DE PLAGUICIDAS .	69
<b>ANEXO C.</b> PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE MANERA INDIRECTA.....	72
<b>ANEXO D.</b> MÉTODO ESTANDARIZADO PARA ANÁLISIS DE 2,4-D EN AGUA .....	75
<b>ANEXO E.</b> PARÁMETROS DE COMPARACIÓN PARA CADA PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO. ....	76
<b>ANEXO F.</b> CLASIFICACIÓN DE LA SOLUBILIDAD EN EL AGUA Y DE LA MOVILIDAD DE LOS PLAGUICIDAS SEGÚN SU COEFICIENTE DE ADSORCIÓN. ....	79
<b>ANEXO G.</b> PRUEBAS ESTADÍSTICAS: ANOVA DE UN FACTOR. PRUEBA DE TUKEY PARA CADA PARÁMETRO FÍSICO Y QUÍMICO DE LOS SUELOS. ....	80
<b>ANEXO H.</b> PRUEBAS ESTADÍSTICAS: CORRELACIONES DE PEARSON. PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS. ....	86
<b>ANEXO I.</b> PRUEBAS ESTADÍSTICAS. CORRELACIONES DE PEARSON Y SPEARMAN: MOVILIDAD, SUELO Y TIEMPO. ....	87
<b>ANEXO J.</b> PRUEBAS ESTADÍSTICAS. ANOVA DE UN FACTOR, PRUEBA DE DIFERENCIA SIGNIFICATIVA HONESTA (DSH) DE TUKEY EN CADA SUELO ESTUDIADO. ....	88
<b>ANEXO K:</b> PRUEBAS ESTADÍSTICAS. CORRELACIONES DE PEARSON. MOVILIDAD VS PARÁMETROS DEL SUELO. ....	90

## INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario representa un renglón importante en la economía del país, y en él, la utilización de plaguicidas es necesario para el control de plagas, sin embargo la aplicación de estos xenobióticos ha generado polémica en el mundo debido a su carácter tóxico, pues provoca una alteración considerable de los recursos naturales, susceptibles a agentes y factores contaminantes (Jiménez y Santos, 2008).

Los xenobióticos (herbicidas, insecticidas, fungicidas y policlorobifenilos, entre otras) pueden acumularse en el ambiente y, adicionalmente, pueden ser transportados por lixiviación a través del suelo llegando a contaminar aguas subterráneas, lo que genera un alto riesgo al ambiente y a la salud del ser humano, todo esto debido a la exposición a trazas de estas sustancias a través de los alimentos y el agua potable (Nemeth *et al.*, 2002).

Uno de los plaguicidas ampliamente empleados es el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D); es un herbicida no selectivo que se aplica principalmente contra los arvenses de hoja ancha en cereales y otros cultivos, aunque también se utiliza como regulador del crecimiento vegetal (Lipthay *et al.*, 2007). EL 2,4 D es considerado como el primer herbicida "fenoxi" introducido, se encuentra disponible en formulaciones de sal amina, éster y granulado. Los herbicidas de ácido fenoxialcanoicos tienen una alta solubilidad en agua y una adsorción relativamente baja en el suelo (Labrada y Caseley, 2000) por lo que los hace susceptibles a la lixiviación a los acuíferos y su contaminación.

Surge entonces la necesidad de estudiar la movilidad 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) en suelos con altos contenidos de materia orgánica que pueden contribuir a la adsorción del plaguicida, reduciendo la contaminación del recurso hídrico subterráneo (Eweis *et al.*, 1999).

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación de aguas subterráneas por nitratos, metales pesados, pesticidas y otros contaminantes del medio ambiente es un problema de salud pública en todo el mundo (Fenoll *et al.*, 2011). El aumento en el uso de los plaguicidas en la agricultura, ha generado una preocupación creciente por su destino ambiental, en Colombia el número de litros de plaguicidas químicos vendidos aumentó de 90 millones en 2003, a 130 millones en 2007 (ICA, 2008). Los efectos ambientales causados por los plaguicidas no son alentadores, debido a que según Brady y Weil, cuando un plaguicida es aplicado a un cultivo, solamente alcanza a eliminar con un 1% de su concentración el organismo intruso, mientras que el 25% es retenido en el follaje, 30% llega al suelo y 44% es exportado a la atmósfera y a los sistemas acuíferos a través de escorrentía y lixiviación (Brady y Weil, 1996).

Las propiedades del suelo, contenido de carbono orgánico total, pH, textura, mineralogía y estructura, el uso del suelo y la gestión (aplicación de plaguicidas tasa y el tiempo, la labranza), el clima, el subsuelo y las propiedades pesticidas juegan un papel decisivo en el potencial de lixiviación de los herbicidas (Gilliom *et al.*, 2007). La materia orgánica y las arcillas por ejemplo pueden aumentar la capacidad de retención de plaguicidas y ampliar el tiempo de contacto para que los procesos encargados de su degradación permitan la reducción de la contaminación del recurso hídrico.

La investigación aquí propuesta busca aportar información sobre el comportamiento del ácido 2,4 diclorofenoxiacético, en algunos suelos provenientes del municipio de Timbío, Cauca; se estudió el efecto de las propiedades físicas y químicas, especialmente la cantidad de materia orgánica sobre la movilidad del ácido 2,4 diclorofenoxiacético, con un montaje experimental en columnas de suelo no alterado con el fin de determinar el la movilidad del agroquímico en estos suelos.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto del contenido de materia orgánica en muestras de suelo del Municipio de Timbío (Cauca) sobre la movilidad del ácido 2, 4-diclorofenoxiacético (2,4-D).

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer las propiedades químicas y físicas de tres suelos del municipio de Timbio (Cauca)
- Evaluar la movilidad del ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y la incidencia del tiempo en muestras de suelo, del Municipio de Timbío (Cauca), en estado natural, sin disturbar.
- Determinar la influencia de las características físicas y químicas de los suelos en la movilidad del 2,4-diclorofenoxiacético.

## 2. ANTECEDENTES

La lixiviación de los plaguicidas en las aguas subterráneas es una de las prácticas agrícolas que está recibiendo una atención creciente en los países europeos, ya que el agua subterránea representa alrededor del 98% del agua dulce disponible de nuestro planeta. Por lo tanto, la Directiva 98/83/CE relativa Europea establece las concentraciones máximas para los plaguicidas y sus productos en las aguas potables para proteger a las personas contra los efectos nocivos. En estos países el movimiento de los pesticidas a través del suelo al agua subterránea es un motivo de preocupación debido a que la contaminación por diferentes compuestos (Grath y Scherdleder, 2010).

En Roorkee, India se realizó un estudio para determinar la persistencia y movilidad de ácido 2,4 - diclorofenoxiacético (2,4- D) en la zona no saturada del suelo en condiciones de campo reales para la cosecha de trigo. Se eligieron tres parcelas experimentales en el propio campo de la agricultura para representar las condiciones reales de campo en el área de estudio y el movimiento del potencial y la persistencia del herbicida 2,4 -D, se investigó bajo tres tratamientos de riego diferentes. Como resultado se obtuvo que la masa mayor de herbicida se mantuvo confinada a los primeros 15 cm del suelo. Casi el 90% de 2,4- D fue degradado dentro de los 40 días en la parcela 1 , mientras que el 70 % y el 60 % en la parcela 2 y parcela 3 , respectivamente, lo que indica su degradación rápida en el perfil del suelo bajo condiciones de riego (Gupta *et al.*, 2012). Otro análisis de lixiviación en condiciones aerobias como el realizado por Morillo *et al* en 2001, corrobora que con la adición de materia orgánica se favorece aún más la degradación de 2,4-D en suelo disminuyendo el porcentaje de lixiviado de 83% a menos del 70%

En otra investigación realizada por Ismail B. S. *et al.*, en 2009 en suelos de Malasia se encuentra una disminución del potencial de lixiviación con el aumento del contenido de arcillas para el 2,4-D, los autores demostraron el aumento en la adsorción por un mayor contenido de arcillas en el suelo.

En Colombia (Cali, Valle del Cauca) se estudió la movilidad de los plaguicidas carbofuran e imidacloprid en un suelo tipo Typic Humitropept de la serie Meléndez, usando columnas empaquetadas con un diámetro interno de 5,4 cm y 30 cm de altura, que se encontraban en capacidad de campo, que es el contenido de agua que es capaz de retener el suelo luego de saturación, y que fueron expuestas a una precipitación simulada de 300 mm/48 horas; El estudio de lixiviación en columnas de suelo mostró que el carbofuran posee un Coeficiente de Retardo de 4,29 y el imidacloprid de 6,05 y que por tanto, el carbofuran se transporta más rápidamente en el suelo. (Gutiérrez *et al.*, 2007).

En el departamento del Cauca se realizó el estudio de los plaguicidas organofosforados clorpirifos y diazinón en suelos con características ándicas del humedal de Calvache (Municipio de Totoró), para predecir su comportamiento y

dinámica de estos compuestos en la zona no saturada del suelo y por escorrentía superficial, encontró que el clorpirifos se desplaza hasta los 15 cm con 3 eventos de lluvia simulada y alcanza los 25 cm de profundidad con la aplicación de 5 eventos de lluvia. Ambos plaguicidas y sobre todo el clorpirifos, se adsorben fuertemente en los primeros 10 cm del suelo, por lo que no lixivian en grandes cantidades a mayores profundidades. Se determinó también una relación directa con las variables porosidad, pH, arcilla, densidad aparente, CO y humedad del suelo con la movilidad en las columnas, corroborando la fuerte influencia de estas variables tanto físicas como químicas del suelo en la lixiviación de plaguicidas (Pérez, 2010).

### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1. EL SUELO**

El suelo es el sitio donde viven y crecen las plantas y animales, los cuales son altamente importantes para la vida humana. Desde el punto de vista pedológico el suelo es el producto natural proveniente de la desintegración de rocas por la acción del clima y los microorganismos (Casanova, 2005).

#### **3.2. EI COLOR DEL SUELO**

Es una de las propiedades físicas más significativas y fácil de apreciar, presentando el perfil de gama de colores que van desde el negro, pardo, pasando por ocres o ferruginosos, determinando la presencia de materiales orgánicos (oscuros) hasta ferruginosos o mangánicos (ocres).

#### **3.3. LOS SUELOS DE COLOMBIA**

La distribución geográfica de los suelos de Colombia, en el contexto de las grandes Regiones Naturales del país, sintetiza la incesante interacción del material parental, el relieve, el clima, la topografía y los organismos en la pródiga geografía colombiana.

La fracción mineral del suelo está compuesta por la fracción gruesa (arena) y la fracción fina (arcilla). La fracción arenosa constituye una reserva potencial de nutrientes y la fracción arcillosa determina el comportamiento fisicoquímico del suelo, dado por su actividad físico-química. La proporción, composición y estructura de las diferentes fracciones granulométricas, arena, limo y arcilla, que integran la parte inorgánica de los suelos, determinan en gran parte sus características químicas y físicas y su fertilidad (Silva, 2013).

La mayoría de suelos colombianos son de naturaleza mineral ya que se han derivado de una gama compleja y variada de materiales geológicos entre los

cuales sobresalen, por su importancia, las cenizas volcánicas, sólo enclaves poco extensos de algunos altiplanos en los que hay o hubo lagunas, como en Fúquene y Sibundoy o en áreas cenagosas de la llanura Caribe, hay suelos orgánicos de gran potencial para la agricultura y la ganadería. En algunas regiones de clima seco los suelos son fértiles e, inclusive, tienen sales en exceso, mientras que en territorios amplios del oriente del país y de otras regiones húmedas el contenido de nutrientes no es tan alto y el aluminio y la acidez son las marcas predominantes. (Cortéz, 2004).

### **3.4. CONSTITUYENTES Y ESTRUCTURA DEL SUELO**

El suelo es un sistema biogeoquímico que mantiene con la biosfera, la atmósfera y la hidrosfera un intercambio de materia y energía. En el suelo el 50% del volumen es materia sólida tradicionalmente dividida en un 45% de fracción inorgánica o mineral (especies iónicas, carbonatos, sulfatos, óxidos e hidróxidos y los minerales de arcilla como caolinitas, vermiculitas, etc.) y el 5% de fracción orgánica (sustancias húmicas y no húmicas como proteínas, hidratos de carbono, grasa, sales metálicas de ácidos orgánicos, etc.). El 20 o 30% del volumen restante, lo constituyen cada una de las fases líquida y gaseosa, ocupando los espacios porosos existentes entre partículas sólidas. (Fundación MAPFRE, 1994)

### **3.5. CICLO DE NUTRIENTES**

El ciclo de los nutrientes en un ecosistema consta de la entrada de nutrientes por meteorización de la roca madre, fijación biológica de nutrientes, aportes atmosféricos, transferencias por biota, absorción radicular y foliar, retranslocación, pluviolavado, pérdidas por herbivoría, desfronde y descomposición entre las plantas y el suelo. Y de las salidas de nutrientes del ecosistema como lixiviación, escorrentía, emisión de gases y aerosoles, transferencias por biota y explotación de recursos. Cada proceso es un precursor del anterior y el flujo de nutrientes sigue una serie de pasos interconectados. Las entradas y salidas del ecosistema constituyen el ciclo externo de nutrientes y los flujos entre las plantas y el suelo el ciclo interno. También se conoce al ciclo externo como ciclo geoquímico, a la retranslocación como ciclo bioquímico y al resto de los flujos internos como ciclo biogeoquímico (Bosco *et al*, 2004).

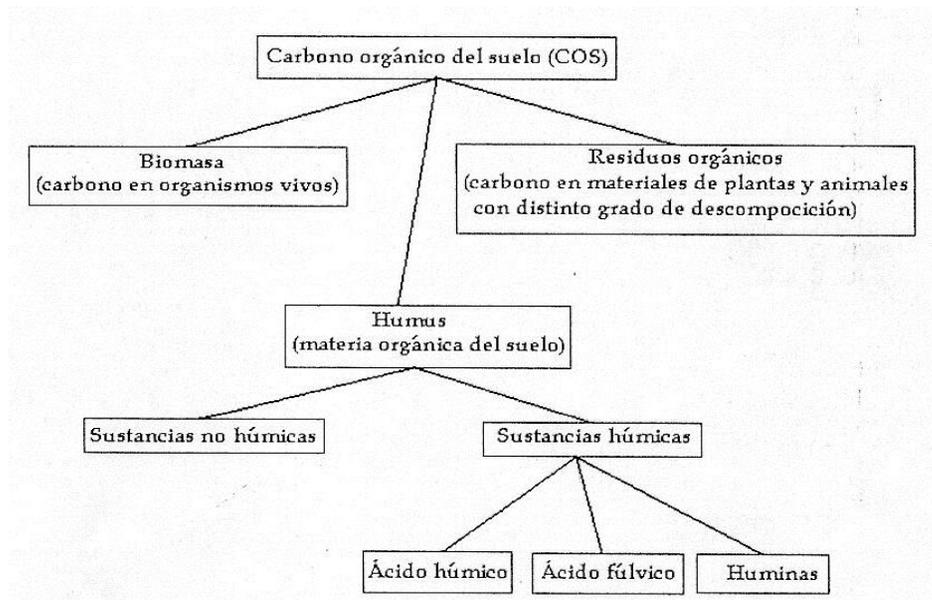
### **3.6. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (M.O.)**

Se define como “la fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo” (Fassebender y Bomernisza, 1987). Esta definición es tan amplia, que las formas y clasificación de la M.O. del suelo ha sido descrita por muchos autores.

De esta manera, el contenido de M.O. del suelo depende del aporte de materiales orgánicos que se haga a dicho suelo, así como de la velocidad a la cual estos se descomponen ; la cantidad de materia orgánica que se aporta al suelo es variable y depende sensiblemente del tipo de cobertura vegetal (Silva, 2013).

Para propósitos prácticos la MO del suelo puede ser dividida en dos grandes grupos en función de su ubicación en el suelo: superficial y no superficial. La superficial comprende básicamente de residuos de plantas y animales. Mientras que la no superficial consiste de microorganismos y microflora, así como también de residuos de plantas, animales y sustancias Húmicas (Figura 1).

**Figura 1.** Tipos de materia orgánica del suelo.



**Fuente:** Ciencia del Suelo, Principios Básicos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo.

La cantidad total de MO en el suelo está influenciada directamente por sus propiedades y por el tipo de ecosistema dado la velocidad de su descomposición y acumulación es determinada por propiedades del suelo tales como textura, pH, temperatura, humedad, aireación, porosidad y actividad biológica básicamente. Así mismo la MO influye o modifica muchas de estas mismas propiedades del suelo (Otiniano-Julca, *et al*, 2006)

La materia orgánica es importante en el desarrollo y en las transformaciones que realizan los organismos del suelo (Guerrero, 1996) y favorece el control biológico de plagas y enfermedades. Además de sus efectos sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la materia orgánica es un material fertilizante y da origen a ciclos biológicos de nutrientes en el suelo (Honorato, 1993).

### 3.6.1. El Humus

Materia orgánica descompuesta, amorfa y de color marrón oscuro de los suelos, que ha perdido todo indicio de la estructura y la composición de la materia vegetal animal a partir de la que se originó, parte de sus componentes llegan a mineralizarse bajo la acción del agua, oxígeno y principalmente de los microorganismos del suelo. Por tanto, el término humus se refiere a cualquier materia orgánica que ha alcanzado la estabilidad y que se utiliza en la agricultura para enmendar el suelo (Bollo, 1999)

El humus ha sido clasificado en tres agrupamientos químicos basados en solubilidad:

- **Ácidos húmicos:** soluble en una solución alcalina, pero precipita cuando se acidifica el extracto. Es de color café oscuro, de alto peso molecular (5.000-300.000 dalton), altamente polimerizado, íntimamente ligado a arcillas y resistente a la degradación. Contiene alrededor de 50-62 % de carbono (Florenza y Martínez, 1991; Bollo, 1999)
- **Ácidos fúlvicos:** es la fracción húmica que permanece en la solución acuosa acidificada; soluble en ácidos y bases. Es de color pardo –amarillento, de menor peso molecular (900 - 5.000 dalton) y posee cerca de 43 – 52 % de carbono (Florenza y Martínez, 1991; Bollo, 1999)
- **Huminas:** constituyen la parte no soluble, y por lo tanto no extraíble de las sustancias húmicas. Esta fracción del humus, es la de mayor peso molecular (mas polimerizada) (Bollo, 1999; Rice, 2001; Hayes y Clapp, 2001).

El humus tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, los autores mencionan que aumenta la capacidad de cambio del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad tampón del suelo favorece la acción de los abonos minerales y facilita su absorción a través de la membrana celular de las raíces. Y en cuanto al efecto sobre las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal, sirve alimento a una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado (FAO, 2005).

### 3.7. PLAGUICIDAS

Cualquier sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir, destruir, repeler o mitigar cualquier plaga o maleza es un plaguicida. Los plaguicidas pueden ser clasificados de acuerdo a su objetivo, su modo o período de acción, o de su composición química. Más de 500 diferentes formulaciones de plaguicidas están siendo utilizados en nuestro entorno, principalmente en la agricultura (Azevedo, 1998). Cuando la acción específica de un plaguicida es eliminar plantas indeseadas se habla de un herbicida. Un herbicida es una sustancia química que mata o destruye las plantas. Estas sustancias pueden ser:

- herbicida total: elimina cualquier tipo de planta
- herbicida selectivo: elimina solo las "malas hierbas"

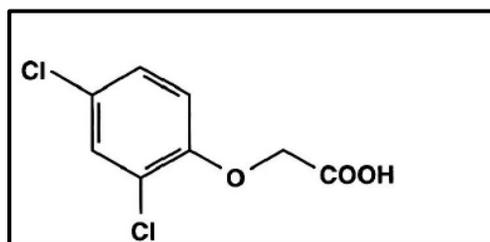
Esta distinción, selectivo o total, depende de la concentración o dosis de uso, ya que un herbicida total puede convertirse en selectivo a bajas concentraciones y uno selectivo a dosis elevadas puede eliminar cualquier tipo de planta.

Los herbicidas puede actuar de dos formas, bien por contacto o bien, por traslocación. Los primeros, los herbicidas de contacto, actúan sobre las partes de la planta donde se aplican. Los segundos, los de traslocación o de acción interna, son absorbidos y actúan desde el interior de la planta afectando a diferentes partes de la misma.

#### 3.7.1. Herbicida 2,4 Diclorofenoxiacético

El herbicida 2,4 - diclorofenoxiacético ácido selectivo y sistémico (Figura 2) se utiliza para controlar las malas hierbas de hoja ancha. Aunque el 2,4- D es uno de los herbicidas químicos más antiguos del mundo ( creado a principios de 1940 ) , que sigue siendo ampliamente utilizado en los campos agrícolas , debido a su excelente selectividad entre las malezas de hoja ancha y cultivos de gramíneas y su costo razonable (Hiradate, 2007).

**Figura 2.** Estructura química del 2,4 D



**Fuente:** Hoja De Seguridad De Los Productos: Profiamina 720 SL

- **Propiedades Físicoquímicas del 2,4 Diclorofenoxiacético (Gervais,2008)**

En la tabla 1, se registran las propiedades fisicoquímicas de este plaguicida.

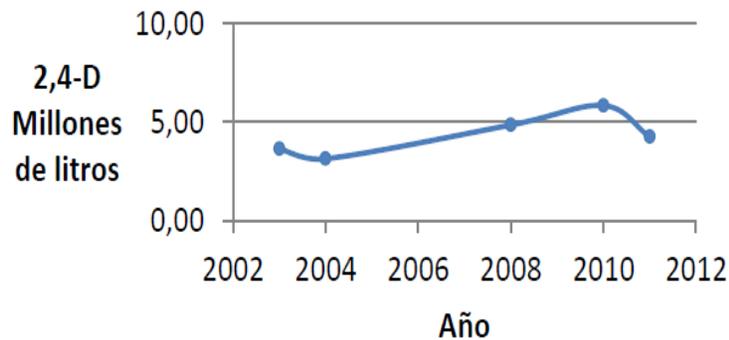
**Tabla 1.** Propiedades físicoquímicas del ácido 2,4 D

Forma	Blanco a marrón sólido cristalino
Presión de Vapor	1.9 x 10 <sup>-5</sup> Pa 1.4 x 10 <sup>-7</sup> mmHg
Constante de Henry	8.6 x 10 <sup>-6</sup> atm·m <sup>3</sup> /mol
Peso molecular	221,04
Solubilidad en agua (mg/L)	900
Constante de acidez Pka	2,85
Koc	36- 79 mL/g

- **Comercialización**

La figura 3, muestra las cifras de ventas en Colombia del ácido 2,4 diclorofenóxiacético, y muestra una clara tendencia al aumento desde el año 2003 según cifras del ICA

**Figura 3.** Evolución de ventas en Colombia de 2,4 -D años 2003-2011



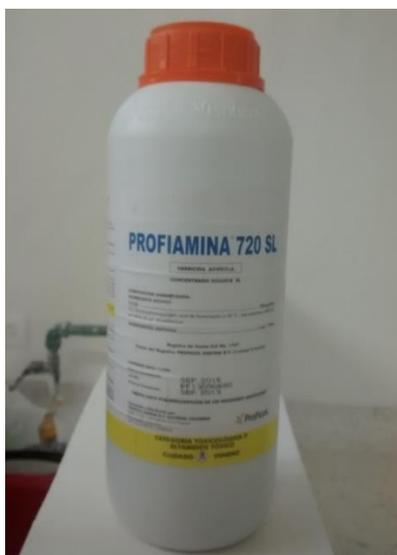
Fuente: ICA, 2008

- **Herbicida Comercial: PROFIAMINA**

Para desarrollo de este proyecto y con el fin de simular en gran medida las condiciones reales de campo se usó el herbicida comercial PROFIAMINA (Figura 4), es un herbicida concentrado soluble, su ingrediente activo es el 2,4-D a una concentración de 720 g/L (Anexo A).

Su contenido típico corresponde a Acido 2,4 D del ácido Diclorofenoxiacético de formulación a 20 °C, equivalente a 867 g/L en forma de sal dimetilamina.

**Figura 4.** Imagen del herbicida comercial PROFIAMINA 720 SL



### **3.7.1.1. Clasificación de toxicidad**

En la clasificación recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) el 2,4-D se ubica en la clase II: “moderadamente peligroso”; esto lo coloca en la misma clase que el endosulfán, el lindano, el paraquat y el toxafeno. En Estados Unidos está considerado como un “plaguicida de uso restringido”, que sólo puede ser comprado y utilizado por aplicadores certificados (June Russell, 2001).

En la clasificación de toxicidad de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ocupa un rango que va desde la Clase I hasta la Clase III (en una escala de I a IV, en la que I corresponde a la mayor toxicidad). La sal dietilamina es la más tóxica de todas las formas del 2,4-D. El 2,4-D se considera ligeramente tóxico en forma oral (toxicidad clase III), y altamente tóxico en el caso de exposición de los ojos (toxicidad clase I). Aunque la LD50 del 2,4-D sugiere que sólo es moderadamente tóxico, está etiquetado como altamente tóxico debido a incidentes relacionados con grave irritación de la piel y de los ojos entre

trabajadores agrícolas. (June Russell, 2001) El producto lleva la palabra PELIGRO en la etiqueta, para indicar que es altamente tóxico. La EPA lo considera un contaminante marino.

La Agencia Internacional de la Investigación sobre el Cáncer (que forma parte de la OMS) coloca a todos los herbicidas clorofenoxi, incluido el 2,4-D, dentro del Grupo 2B: posiblemente carcinogénico para los seres humanos.

### **3.7.1.2. Comportamiento Medioambiental del 2,4-D**

Una vez que el plaguicida es incorporado al suelo, bien sea por aplicación directa, traspaso o accidente, su comportamiento medioambiental se ve influenciado por diversos procesos. Tanto el tipo de suelo y la vegetación presente como las propiedades físico-químicas del plaguicida, las condiciones medioambientales, el sistema de cultivo y las técnicas empleadas en el tratamiento fitosanitario influyen en cada uno de los procesos, los cuales pueden tener consecuencias positivas (eliminación de plagas nocivas) y negativas (efectos perjudiciales sobre organismos beneficiosos) (Navarro *et al*, 2007).

El suelo y los cuerpos de agua son sus medios receptores directos, pero se dispersa en todos los compartimentos del ambiente. En el aire persiste por horas y puede ser eliminado por precipitación junto con la lluvia. Su movilidad en suelo varía de baja a moderada, por ello puede lixiviarse hasta las aguas subterráneas. La biodegradación de este compuesto generalmente dura varios meses dependiendo de las condiciones físicas, químicas y de la aplicación previa de plaguicidas. Su bioconcentración en los organismos es baja. Puede ser absorbido por las plantas a través de hojas, tallos y raíces y posteriormente es transformado por distintas rutas metabólicas (Sata, Guía para la protección y nutrición vegetal, 2009).

Distintas cantidades de productos a base de 2,4-D aplicados en un área establecida como blanco pueden distribuirse en el medio ambiente general en el curso de unas pocas horas o días, debido a los movimientos del aire, el agua o la tierra, especialmente en épocas de lluvia, vientos fuertes o alta temperatura. El 2,4-D y sus derivados se descomponen por hidrólisis, fotólisis y por acción biológica. En ocasiones puede producirse persistencia o acumulación de los residuos de 2,4-D correspondientes a un uso normal, especialmente en condiciones de sequedad o de frío, cuando existe poca actividad biológica (Astolfil, *et al*, 1984).

El 2,4-D tiene la posibilidad de desplazarse más allá del lugar designado como blanco, puede producirse un desplazamiento localizado inmediato y también nubes de 2,4-D volatilizado (Tu, *et al*. 2001). El desplazamiento de los vapores del herbicida puede causar contaminación del aire (Astolfil, *et al*, 1984).

En el suelo, el 2,4-D tiene una vida media que varía de una a seis semanas y tiende a permanecer inmóvil. En el suelo se produce tanto la hidrólisis como la degradación microbiana de los herbicidas fenoxi (Astolfil, *et al*, 1984). El 2,4-D se degrada rápidamente en el suelo, especialmente por la acción de los microorganismos del suelo. Los metabolitos principales que se forman en el suelo son el 2,4-diclorofeno (DCP) y el 4-clorofeno, y finalmente, formas inocuas.

La materia orgánica, el pH del suelo y el aluminio intercambiable son los determinantes principales del porcentaje de 2,4-D adsorbido. Es probable que el 2,4-D se una más fuertemente a suelos con un alto contenido de materia orgánica que a aquellos con un contenido bajo. En suelos con elevada acidez o en suelos de regiones frías o áridas, la degradación del 2,4-D es aparentemente lenta (Astolfil, *et al*, 1984). La mineralización del 2,4-D en suelos arcillosos fue más alta que en suelo de textura franca arcillosa, bajo condiciones anaeróbicas (Zayed, *et al*. 2002). Se ha observado que la degradación avanza con mayor lentitud en el suelo que se encuentra bajo los árboles (Gan J, *et al*. 2003).

En ambientes acuáticos los microorganismos y la fotólisis son las causas principales de la degradación del 2,4-D (Astolfil, *et al*, 1984). Los residuos de 2,4-D se disipan rápidamente en aguas en movimiento, pero los residuos pueden detectarse hasta seis meses más tarde en aguas tranquilas (Astolfil, *et al*, 1984).

El 2,4-D tiene el potencial de contaminar las aguas subterráneas. En el agua se descompone para formar DCP (2,4-diclorofenol), que puede causar problemas a los mamíferos (June Russell, 2001). El uso de 2,4-D para controlar las malezas acuáticas contamina las fuentes de riego y de agua potable. También contamina las aguas marinas y las aguas subterráneas. Pueden aparecer residuos de 2,4-D en los sistemas acuáticos debido a la sedimentación del producto que escapa de las fumigaciones aéreas, debido a los restos de 2,4-D contenidos en el vapor o en las gotas que se forman en la atmósfera durante la lluvia, debido a los escurrimientos que se producen desde los campos tratados con el producto, o luego de la aplicación de 2,4-D al agua para controlar las malezas acuáticas. Las descargas industriales, ya sea por derrames accidentales o a través de los sistemas de alcantarillado, pueden contribuir a la contaminación del agua (Astolfil, *et al*, 1984).

Existe la posibilidad de utilizar los denominados índices o indicadores de transporte ambiental que, si bien simplifican mucho la realidad, pueden ser útiles para exámenes aproximativos. Para el caso de los pesticidas y su relación con las aguas subterráneas, se utilizan una serie de índices para determinar su potencial de lixiviación a través del suelo y, por consiguiente, el potencial de contaminación de los acuíferos (Anexo B). Uno de ellos es el propuesto por Gustafson D. I. en 1989 llamado coeficiente GUS (Groundwater Ubiquity Score). En él se toman los valores calculados el tiempo de vida media (DT50) y la constante de

adsorción normalizada con el contenido orgánico. Y así varios métodos que involucran variables del compuesto para determinar su grado de contaminación.

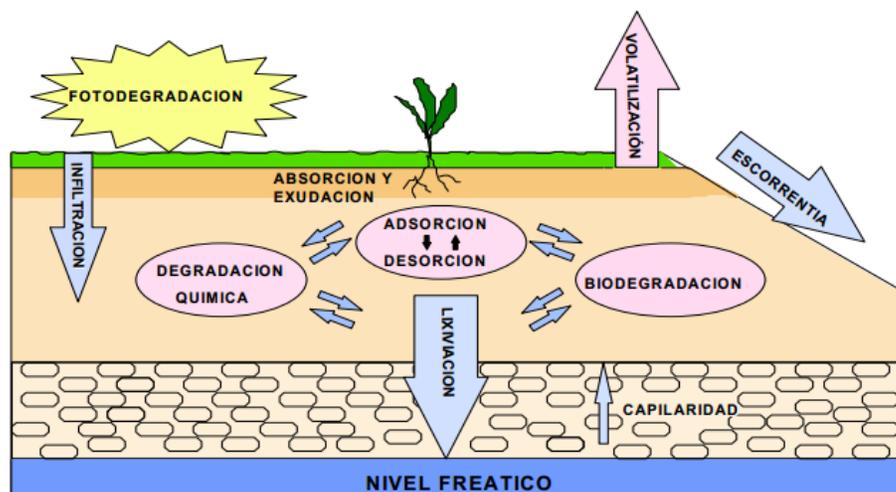
### 3.7.2. DINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO

Una vez en el suelo, los plaguicidas se ven afectados por distintos procesos que determinan su dinámica y destino final en el suelo. Estos procesos pueden ser de tipo físico, químico y biológico, se pueden dividir en dos grupos:

- Procesos de transferencia o transporte: son aquellos en los que el compuesto se desplaza de un medio a otro o dentro de un mismo medio sin experimentar cambio en su estructura y, por tanto, sigue siendo potencialmente contaminante. Entre ellos destacamos: adsorción-desorción, volatilización, lixiviación, escorrentía, absorción y difusión.
- Procesos de transformación: son aquellos por los que el compuesto se transforma o degrada dando nuevos compuestos que pueden ser de igual, menor o mayor toxicidad. Entre ellos cabe destacar: degradación química, biodegradación y fotodegradación.

Estos procesos están relacionados entre sí (Figura 5), dándose conjuntamente y siendo el resultado la suma de todos ellos. Uno de los procesos más importantes es la adsorción, que va a determinar la cantidad de contaminante que queda en la disolución del suelo y sobre la que se darán el resto de procesos (Real, M. 2010).

**Figura 5.** Interrelación entre los procesos que determinan la dinámica de los contaminantes orgánicos y sus metabolitos en el suelo.



Fuente: Real M, 2010.

El movimiento de los plaguicidas se produce por lixiviación, volatilización, o escorrentía. La retención y la movilidad de un plaguicida en el suelo se determina

por el alcance y la fuerza de las reacciones de adsorción, que se rigen por las propiedades químicas y físicas de los suelos y pesticidas involucrados (Spark y Swift, 2002).

La dinámica y comportamiento del 2,4-D se ve afectado principalmente por los fenómenos de adsorción, degradación y lixiviación en el suelo. La volatilización no se destaca por la baja presión de vapor del 2,4-D lo cual reduce la posibilidad de volatilizarse.

- **LIXIVIACIÓN**

El movimiento vertical de moléculas orgánicas disueltas, a lo largo del perfil del suelo es llamado lixiviación. La capa bajo la superficie del suelo es muy variable o heterogénea, tanto en estructura como en textura; el movimiento de un fluido en el perfil, se ve afectado por la presencia de zonas caracterizadas por su diferente permeabilidad (resistencia al flujo). Por lo tanto, a medida que los compuestos orgánicos se transportan a través del perfil, casi la totalidad del agua pasaría a través de la arena fina y muy poca a través de los limos o materiales más finos (baja conductividad). Sin embargo, se sabe que los contaminantes se acumulan en los materiales finos. Los mecanismos por los cuales se produce esta acumulación no se comprenden en profundidad, debido a que los líquidos en fase no acuosa, por lo general son hidrófobos y tienden a permanecer apartados de aquellas regiones con gran actividad superficial, tales como los poros en arcillas. Una explicación podría ser la adsorción por parte de los materiales húmicos presentes en el suelo, aunque propiedades del transporte observadas no apoyan totalmente la adsorción como explicación. El resultado final de la heterogeneidad, es que el movimiento de contaminantes por lo general es muy diferente del movimiento del agua (Ginn *et al.*, 1995)

El movimiento, el contenido y la disponibilidad del agua están determinados principalmente por las propiedades físicas del suelo, particularmente textura, porosidad, profundidad y contenido de materia orgánica. La dinámica del agua se establece sobre un sistema complejo: el sistema suelo-planta-atmósfera, y por tanto el agua en el suelo es solo una parte de esa dinámica.

En estudios realizados por Huertas (2014), Gupta., *et al.* (2012) e Ismail., *et al.* (2009) de movilidad de 2,4-D en suelo, se ha encontrado que está relacionada con otros fenómenos de destino ambiental como lixiviación, escorrentía superficial, adsorción – desorción y degradación.

Se han realizado muchos estudios de lixiviación de 2,4-D en condiciones no saturadas del suelo y se ha encontrado que vienen relacionadas con otros fenómenos de destino ambiental. Respecto a los indicadores de transporte ambiental, solo se reportan el valor del coeficiente de GUS, calculado en condiciones óptimas de degradación de los microorganismos.

- **ADSORCION-DESORCION**

La adsorción puede definirse como el paso de un compuesto desde la fase acuosa del suelo (o en casos de extrema aridez desde la fase gaseosa) a la superficie de las partículas sólidas sin producir cambio en la composición de estas últimas, siendo la desorción el proceso inverso (Osgerby, 1970). El adsorbato es el compuesto que se une a la fase sólida, mientras el adsorbente es la fase sólida en sí. En el caso del suelo la adsorción se suele dar en la interfase líquido-sólido, donde el adsorbente sería el propio suelo y las moléculas orgánicas actuarían como adsorbato. Este es el proceso que controla el transporte, la transformación química y los procesos biológicos que se van a dar sobre los compuestos, mientras, la desorción es uno de los procesos más importantes de todos los que se pueden dar en el suelo porque va a determinar la cantidad de sustancias que queda libre y sobre la que van a actuar los demás procesos.

De esta manera, la adsorción y la desorción son procesos dinámicos y se dan continuamente y a la vez, es decir, las moléculas orgánicas se están adsorbiendo y desorbiendo constantemente siendo el resultado final la suma de ambos procesos (Real, 2010).

Los procesos de adsorción/desorción y degradación son claves para entender la difusión de los plaguicidas hacia los recursos hidrológicos. Estos fenómenos se ven afectados por las propiedades fisicoquímicas del suelo y las propiedades intrínsecas del plaguicida. Son muchos los autores que han estudiado estos fenómenos para el 2,4-D, concluyendo en la mayoría de los casos que la adsorción se potencia con el alto contenido de materia orgánica.

- **DEGRADACION**

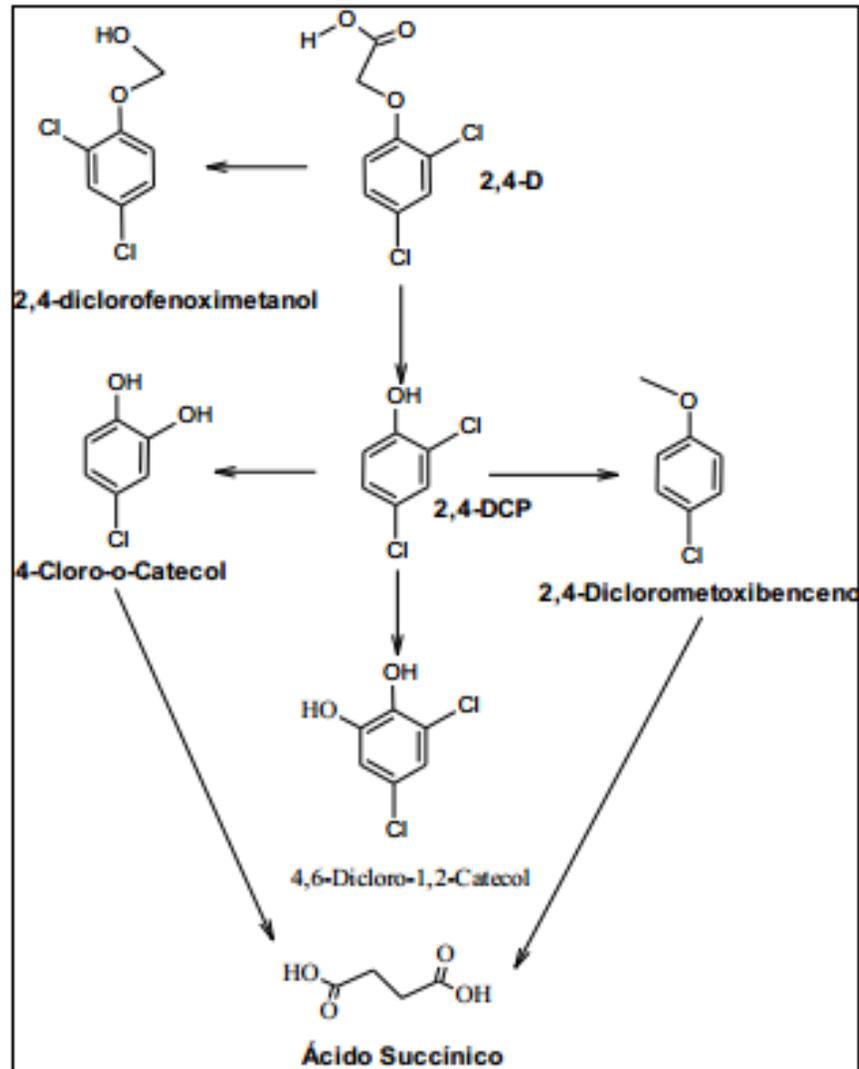
La degradación de un compuesto en el suelo se define como la transformación que se produce en su estructura al interactuar con los componentes bióticos y abióticos presentes en el suelo, capaces de modificar profundamente sus características físico-químicas y su acción biológica. Este fenómeno da lugar a la aparición de nuevos compuestos que no necesariamente han de ser menos tóxicos que las sustancias originales. Cuando el producto de degradación es menos tóxico que la sustancia original se trata de una inactivación. Por el contrario, si el producto resulta más tóxico que la sustancia original, se ha producido una activación. Los productos de degradación pueden ser más polares y solubles en agua que los compuestos de partida y, por ello, suelen tener mayor capacidad de lixiviar y llegar a contaminar aguas subterráneas (Real, M., 2010)

La degradación del 2,4-D puede ser química o biológica, en función de las condiciones ambientales. Se desprecia la degradación fotoquímica por su alta presión de vapor, ya que no tiende a estar en la atmósfera donde la exposición a

la luz solar sería mayor (Tomlin, 2000). La figura 6, muestra una ruta propuesta de degradación para el 2,4-D.

El principal metabolito de degradación biológica del 2,4-D es el 2,4 diclorofenol (2,4-DCP), el cual se considera más tóxico (medio ambiente y seres humanos) y persistente que el mismo herbicida (Aizawa, H. 2001).

**Figura 6.** Ruta metabólica del 2,4 D



Fuente: Vencill W.K., 2002

Por otro lado, con respecto a las relaciones de este fenómeno con algunas condiciones del suelo, autores como Kah, *et al.*, (2007), Fu, *et al.* (2009) y Crespín (2001) han demostrado que la vida media del 2,4-D disminuye con altas cantidades de materia orgánica. Este hecho se explica por el aumento de las

poblaciones microbianas que favorecen la biodegradación de este herbicida cuando aumenta el contenido de materia orgánica.

### 3.8. PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO

Los factores que afectan al flujo de plaguicidas en el suelo son el contenido en arcillas, materia orgánica, textura, estructura y porosidad, grado de humedad, así como la temperatura, pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Algunos de estos parámetros se describen a continuación:

- **Textura:** La textura del suelo es un parámetro determinante en la movilidad de los líquidos (hidrodinámica), pues de la textura dependen condiciones de impermeabilidad o permeabilidad, de acuerdo a su contenido de arcilla, limo o arena. Así mismo, la textura influye en el lixiviado o percolación del plaguicida hacia el agua subterránea. A mayor tamaño de grano, mayor facilidad para el lixiviado o percolación de plaguicidas disueltos en agua (Grupo de Investigación de recursos Hídricos, 2007)
- **Densidad del suelo:** La densidad es la relación entre la masa y el volumen del suelo, y puede referirse a la densidad de las partículas (densidad real) o a la densidad total del suelo (Densidad aparente) (Silva, 2013). La **Densidad aparente (Da)**, incluye el volumen que ocupan las partículas la fase sólida del suelo, más el volumen de ocupado por aire (Jaramillo, 2002).
- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** Se entiende por capacidad de intercambio catiónico los procesos reversibles por medio de los cuales las partes solidas coloidales del suelo adsorben cationes de la fase acuosa (solución del suelo), desadsorben al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes y establecen un equilibrio entre ambas fases. La materia orgánica, las arcillas y los hidróxidos funcionan como “cambiadores” (Silva, 2013). Su valor se incrementa en el suelo al aumentar el contenido de materia orgánica, debido a que la humificación incrementa el número de grupos carboxilo (-COOH) y fenólicos (-OH) que pueden disociarse, adquiriendo cargas negativas. Al incrementarse la CIC del suelo, se reducen y hasta evitan las pérdidas por lixiviación (Jaramillo, 2002). Los principales cationes cambiables del suelo son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{H}^+$ .
- **Retención de humedad:** La cantidad de agua que posea el suelo es una de sus características más específicas y está determinada, fundamentalmente, por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte que se le haga natural (lluvia) o artificialmente (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración (Jaramillo, 2002).

- **Carbono orgánico:** El contenido de carbono orgánico de un suelo es un indicativo del porcentaje de su materia orgánica (Bravo y Martínez, 2014), se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental. En condiciones naturales, el C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, erosión y lixiviación (Swift, 2001).
- **Nitrógeno** Es el elemento que las plantas absorben en mayor cantidad, es indispensable para el vigor del follaje, lo que se manifiesta en el color verde oscuro de las hojas y tallos, debido a la formación de clorofila. El nitrógeno es el factor principal que determina el rendimiento y la base de la fertilización. Se absorbe generalmente del suelo pero también es asimilado del aire; este elemento produce un mayor número de granos y frutos.
- **Conductividad hidráulica (CI):** Es la habilidad del suelo saturado de permitir el paso del agua. La conductividad hidráulica es una propiedad muy importante de los medios porosos, que indica la movilidad del agua dentro del suelo y depende del grado de saturación y la naturaleza del mismo, por este motivo la CI es un parámetro hidrogeológico fundamental para el estudio de la movilidad del agua subterránea. (Donado y Colmenares, 2004).

**Medida de la conductividad hidráulica** La medida de la CI tiene interés en diversas funciones del suelo (Villar y Ferrer, 2005).

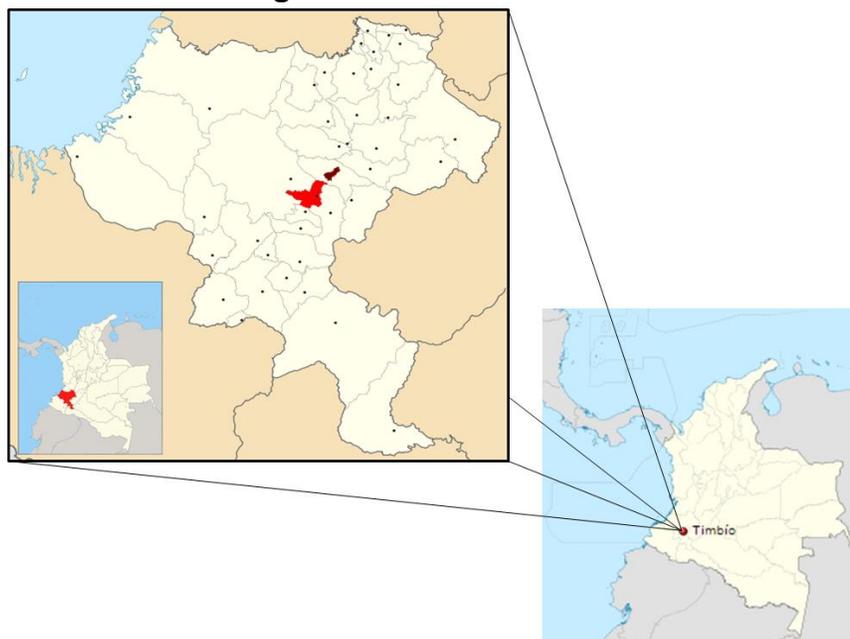
- Movimiento de agroquímicos y vertidos de líquidos al suelo
  - Estudios de infiltración y escorrentía
  - Lavado de nutrientes
  - Proyecto de fosas sépticas
  - Diseño de sistema de riego y drenaje
  - Diseño de obras de conservación del suelo
  - Diseño de canales y embalses
- **Porosidad** La porosidad del suelo viene representada por el porcentaje de poros existentes en el mismo con relación al volumen total. La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los espacios entre ellos. Un factor importante que tiende a desarrollar la porosidad es la actividad biológica del suelo, especialmente la microfauna. (Silva, 2013).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE TOMA DE MUESTRAS

Las muestras de suelo provienen del municipio de Timbio, departamento del Cauca (Colombia), ubicado en las coordenadas 2°21'10"N 76°40'55"O, con una altitud 1.850 msnm y a una distancia 131 km de la capital del departamento (Popayán), Figura 7.

**Figura 7. Zona de estudio.**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Timb%C3%ADo>.

### 4.2. MUESTREO

Se realizaron dos muestreos en campo; el primero, para caracterizar el suelo y el segundo, en el que se tomaron las muestras de suelo sin disturbar para determinar la movilidad del 2,4-D en el montaje de las columnas en laboratorio.

#### 4.2.1. PRIMER MUESTREO

La unidad de muestreo (parcela) se seleccionó en campo según la metodología propuesta por Bravo y Martínez, 2014. En las guías de Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca. El área muestreada fue delimitada por una cuadrícula de 625 m<sup>2</sup>, donde se tomaron a 20 centímetros de profundidad 25 submuestras de suelo de 1 kilogramo aproximadamente, separadas 5 metros entre sí, para formar la correspondiente muestra compuesta, que se colocó en

una bolsa debidamente marcada para su posterior secado y tamizado en el laboratorio (Figura 8).

**Figura 8.** Imagen de toma de muestras para análisis de suelos.



Las fincas muestreadas están ubicadas en la vereda Santa María del municipio de Timbio, las cuales fueron georeferenciadas mediante el uso de un sistema de geoposicionamiento global (GPS) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Ubicación geográfica de las fincas muestreadas.

FINCA	COORDENADAS	
<b>San Lorenzo</b>	2° 19' 15.8122" N	76° 42' 14.9472" W
<b>San Luis (Arriba)</b>	2° 19' 52.6184" N	76° 42' 7.5003" W
<b>San Luis (Abajo)</b>	2° 19' 47.3925" N	76° 41' 56.7065" W
<b>La Despenza</b>	2° 19' 44.7925" N	76° 42' 31.0277" W
<b>El Carmen</b>	2° 19' 33.6323" N	76° 41' 42.7260" W

#### 4.2.1.1. MANEJO DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO (Bravo y Martínez, 2014)

Antes de secar las muestras del suelo se midió la humedad de campo de las muestras inmediatamente después de recogidas. Las muestras se secaron al aire libre, extendiéndose en una mesa sobre papel limpio, la temperatura del aire no debe exceder los 40°C.

Una vez seca la muestra, los agregados del suelo se rompieron con un mortero de cemento sobre una mesa. Si se aprecia compactación, se disgregan los terrones suavemente en el mortero, para pasar la muestra de suelo por un tamiz de 2 mm de orificio (malla No 10), se tira la grava y piedra que queda en el tamiz que generalmente es menor del 1 % de la capa arable. En caso de que haya una

cantidad considerable, se pesan y se calculan en proporción para hacer la corrección correspondiente en los cálculos finales en los que deben indicarse el porcentaje de grava.

El mezclado de la muestra se hizo colocándola sobre un lienzo fuerte, el cual se agarra en diagonal por sus dos esquinas. Se acercó una esquina sobre la otra haciendo los movimientos despacio para que el suelo se enrolle. Se repite varias veces esta operación hasta tener una mezcla homogénea, para pesarla en una balanza. Se pesaron dos muestras idénticas para efectuar los análisis por duplicado.

**Selección de porción a analizar:** se utilizó el método de cuarteo.

- Se colocó la muestra tamizada sobre papel Kraft. Formando con ella un círculo
- Se hizo una cruz sobre dicho círculo con una espátula dividiendo la muestra en cuatro porciones, enumerándolas de 1 a 4
- Se desecharon las porciones transversales 1 y 3.
- Se formó con las dos porciones restantes 2 y 4 nuevamente un círculo
- Se repitió el procedimiento desechando ahora las porciones transversales 2 y 4
- Y así se realizó el procedimiento hasta obtener el tamaño de muestra que se necesitaba para el análisis

#### **4.2.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO**

Los datos de la caracterización del suelo y de la arena fueron suministrados por el grupo de Agroquímica de la Universidad del Cauca, se determinaron las propiedades físicas y químicas de las muestras, de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC ISO/IEC 17025:2005 y siguiendo la metodología descrita por el IGAC (2006).

##### **a) PARAMETROS FISICOS:**

- **Determinación de humedad.** Se realizó mediante el método gravimétrico, pesando 10 g de suelo en una capsula de porcelana previamente tarada, y se lleva a horno por 24 horas a 105 °C. con la diferencia de pesos se determina la humedad de la muestra.
- **Densidad por el método del cilindro.** Se adicionó una cantidad de suelo fresco en un cilindro metálico previamente seco en la estufa y con dimensiones conocidas. Por la relación entre la masa del suelo y el volumen del cilindro se determina la densidad aparente.

- **Determinación de textura.** Se utilizó el método de Bouyoucos, el cual consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio de un hidrómetro, el cual varía la profundidad de su centro de flotación con la densidad de la suspensión y la textura del suelo. La lectura se visualiza sobre una escala que este contiene y el valor observado se convierte a densidad mediante una escala adecuada. La prueba se realizó sobre la muestra de agua, haciendo las lecturas a diferentes tiempos: la primera se tomó a los 40 segundos de preparación de la suspensión, tiempo en el cual han sedimentado las arenas, midiéndose la densidad de limos más arcillas. Luego se tomó otra lectura a las 2 horas, tiempo en el cual han sedimentado los limos, quedando en suspensión las arcillas, midiéndose la densidad de ellas.

Para determinar la textura de la muestra de suelo en estudio, se pesan 50 gramos de suelo en base seca y se colocan en un Erlenmeyer de 250 mL. Se adicionan 160 mL de agua destilada, se mezcla y se agregan 10 mL de solución dispersante (hexametáfosfato de sodio), se agita la solución de suelo durante dos horas, y se transfiere a un cilindro de bouyoucos, se completa con agua destilada hasta la primera línea del cilindro, se agita fuertemente por 30 segundos, se introduce el hidrómetro y a los 40 segundos se toma la primera lectura. La segunda lectura se realiza a las dos horas

- **Determinación de conductividad hidráulica** (Polanco, 2009) La prueba de conductividad hidráulica fue realizada en el laboratorio de Suelos de la Universidad del Cauca.

Para cada una de las tres fincas (San Luis arriba, San Luis Abajo y El Carmen), se determinó la conductividad hidráulica de manera indirecta al hacer el ensayo consolidación de suelos y de gravedad específica. Esto debido a que las conductividades hidráulicas eran bajas, lo que dificultaba hacer el ensayo de manera directa (por ejemplo el ensayo con permeámetro de cabeza variable). El cálculo de las conductividades hidráulicas se hizo por el método de Taylor. Ver procedimiento completo en el Anexo C.

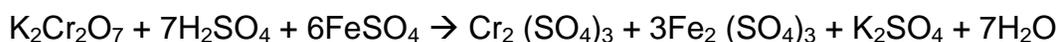
## b) **PARAMETROS QUIMICOS**

- **Determinación de pH.** El pH se determinó mediante el método potenciométrico, con un pH-metro, utilizando una suspensión de suelo: agua 1:1; (así se pesan 20,0 g de suelo y se le adicionan 20,0 mL de agua destilada). Se agita periódicamente durante 1 hora y luego se mide el valor del pH con el potenciómetro.

- **Determinación de Materia Orgánica.** Se realizó mediante el método de Walckley – Black, que consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo. El oxidante utilizado es dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$  1N) y  $H_2SO_4$  concentrado. La reacción generada es la siguiente:



Como subproducto de la reacción queda materia orgánica que no se oxida y  $K_2Cr_2O_7$  sin reaccionar entonces se valora volumétricamente el  $K_2Cr_2O_7$  con una solución de sulfato ferroso amónico. La reacción es la siguiente:



- **Determinación de Nitrógeno.** Se determinó mediante el método de Kjeldahl, en un equipo que consta de los siguientes accesorios: Unidad de digestión Buchi 426, Scrubber Buchi B-414 para atrapar gases generados en la unidad de digestión y unidad de destilación Buchi K-314 para recolectar el nitrógeno en forma de amoniaco.

El proceso para la determinación de nitrógeno por esta metodología consta de tres etapas:

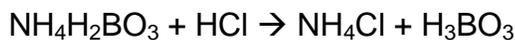
- La primera es la oxidación de la muestra, para lo cual esta se trata con ácido sulfúrico y catalizadores con el propósito de oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato acido de amonio según la siguiente reacción:



- La segunda es la descomposición del sulfato acido de amonio, por medio de un exceso de álcali para liberar el amoniaco que se recoge por destilación sobre ácido bórico, reaccionan así:



- La tercera etapa es la titulación del borato de amonio, con HCl o  $H_2SO_4$  usando como indicador de punto final una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno. La reacción correspondiente es:



- **Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.** El método que se utilizó se basa en desplazar todos los cationes presentes en el suelo y reemplazarlos por otro catión, en este caso el  $\text{NH}_4^+$ . El suelo seco, tamizado, se satura con acetato de amonio 1N a pH 7. El ion amonio se desplaza con  $\text{Na}^+$ , (NaCl al 10%), formándose  $\text{NH}_4\text{Cl}$  y se determina agregando formol neutralizado al 40% y titulando el HCl generado con NaOH 0,1 N en presencia de fenolftaleína, de acuerdo a la siguiente reacción:



#### 4.2.2. SEGUNDO MUESTREO

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización del suelo (Tabla 3), se escogieron 3 fincas cuyas muestras de suelo presentaron diferentes porcentajes de MO para hacer el estudio de movilidad del 2,4-D y se realizó un segundo muestreo para empaquetar las columnas de suelo sin disturbar.

**Tabla 3.** Porcentaje de Materia Orgánica en los suelos de las fincas muestreadas

FINCA	MO (%)
SAN LUIS Zona alta	9,84
SAN LUIS Zona Baja	10,94
EL CARMEN	12,42

Las columnas de PVC se introdujeron en el suelo con la ayuda de un mazo hasta alcanzar una profundidad de 30 cm. Con un palin se limpió alrededor del tubo para hacer la extracción del mismo sin alterar la muestra (Figura 9), se depositaron los tubos empaquetados en una bolsa y se transportaron al laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca. Cada muestra se tomó por triplicado y en total se tomaron 9 muestras.

**Figura 9.** Imagen de la toma de muestras de suelo sin disturbar



#### **4.3. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD DEL 2,4 - D EN LABORATORIO**

El diseño experimental es factorial completa 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 3 niveles de materia orgánica (9,84 %, 10,94 % y 12,42 % de M.O.); y constituyen un factor fijo. Los niveles de tiempo son un factor aleatorio. El diseño experimental es estratificado, con tres réplicas para cada nivel de materia orgánica, seis medidas en el tiempo y un control por triplicado. La unidad experimental estará constituida por la muestra empacada en una columna de suelo. La variable de respuesta será la concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) en el lixiviado.

##### **4.3.1. Montaje de laboratorio**

Las columnas de PVC, el filtro de lana de vidrio y los tapones se lavaron con agua y jabón neutro, se sumergieron durante una noche en ácido clorhídrico (1:2), se enjuagaron con agua destilada y durante otras 24 horas se sumergieron en ácido nítrico (1:2), finalmente se lavaron con abundante agua destilada y se secaron, esto con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación que pudiera afectar las muestras y con ello los resultados.

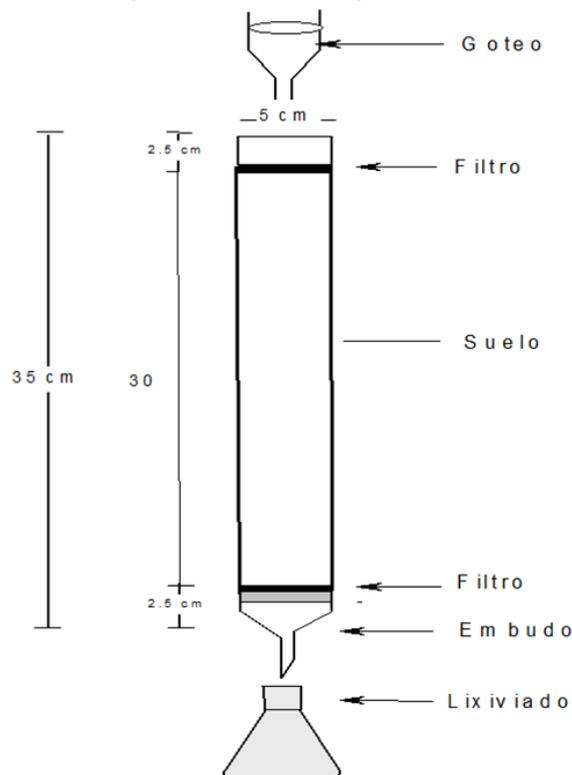
En campo, se empacaron tres columnas de PVC de 4,2 cm de diámetro, por triplicado, hasta alcanzar una altura de 30 cm para cada nivel de materia orgánica, según lo recomendado por la OECD 2000 para lixiviación en columnas de suelo. Además en laboratorio se empacó una columna con arena, también por triplicado, a la cual llamaremos control. El control es útil para corregir los datos que pueden ser alterados por la interacción de materiales con el contaminante.

El control también recibió un tratamiento con el fin de eliminar la materia orgánica presente. La arena se lavó varias veces con agua limpia hasta que el agua del lavado fuera lo más clara posible y se secó al horno durante 12 horas, al cabo de este tiempo se adicionó peróxido de hidrógeno, se agitó y se dejó en reposo

durante 6 horas aproximadamente, repitiendo el procedimiento dos veces. Finalmente, se lavó con agua destilada y se colocó al horno hasta que se secase.

En el laboratorio se realizó el siguiente procedimiento: en el extremo inferior de cada columna se colocó un tamiz de 1 mm de espesor (filtro de lana de vidrio) y como soporte del sistema se selló con una tapa de PVC con orificio de 1 cm de diámetro para permitir la salida y recolección del lixiviado. La superficie superior del suelo en cada columna se cubrirá también con un tamiz de 1 mm de espesor (filtro de lana de vidrio) para distribuir el flujo de la lluvia en forma homogénea (Figura 10). Después fueron humedecidas por capilaridad con una solución 0,01 M de  $\text{CaCl}_2$ , desde el fondo hasta la superficie, asegurando desplazar el aire de los poros de suelo por agua. Se les permitió equilibrarse durante la noche y el exceso de agua se drenó por gravedad.

**Figura 10.** Esquema de montaje de columnas de PVC.



Fuente: Pérez, 2010

Una solución de ácido 2,4-diclorofenoacético (2,4-D) preparada previamente en una solución de metanol, equivalente teóricamente a 783,08 ppm (361,51 mg de 2,4-D/kg de suelo) se aplicó directamente sobre la superficie de las columnas. Las columnas empacadas se pesaron al inicio y al final del montaje de laboratorio. Las columnas se mantuvieron a capacidad de campo y temperatura ambiente en la oscuridad. 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 M, por 48 horas aproximadamente, dirigida desde un embudo de separación, dosificando el flujo a 0.1 mL por minuto aproximadamente (OECD, 2000).

**Figura 11.** Imagen del montaje de laboratorio.



Todos los ensayos fueron realizados por triplicado, para un suelo con tres concentraciones de materia orgánica diferentes, con 1 evento de lluvia cada 10 días y una columna control por triplicado; en total se prepararon 12 columnas.

El lixiviado se recogió en fracciones durante 50 días y sus volúmenes se registraron. En cada fracción se cuantificó la concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).

#### **4.4. ANALISIS DE EFLUENTES**

El análisis de los efluentes fue realizado en el Centro de Investigaciones Ambientales, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Se analizaron por cromatografía líquida de alta resolución acoplada a detector de masas. Se utilizó un estándar de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) grado cromatográfico con pureza mayor a 99% para la preparación de soluciones patrón. Los detalles del método se muestran en el Anexo D.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL SUELO

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de los análisis físicos y químicos realizados a las muestras de suelo, los cuales fueron suministrados por el grupo de Agroquímica de la universidad del Cauca, a excepción de la conductividad hidráulica que fue realizada en el laboratorio de Geotecnia. Para la interpretación de los resultados se utilizó como patrón de referencia, los datos reportados por Silva en el 2009 (Anexo E, Tabla1).

**Tabla 4.** Análisis físicos y químicos de suelo

PROPIEDADES FISICAS							
FINCA	Textura	Arena (%)	Arcilla (%)	Limos (%)	Humedad Higroscópica (%)	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Conductividad Hidraulica (cm/s)
SAN LUIS Zona Alta	Franco arenosa	72 <sup>b</sup>	25 <sup>b</sup>	4	10,67 <sup>c</sup>	0,66 <sup>c</sup>	4,73E-07 <sup>a</sup>
SAN LUIS Zona Baja		71 <sup>c</sup>	26 <sup>a</sup>	3	14,06 <sup>b</sup>	0,68 <sup>b</sup>	2,70E-07 <sup>b</sup>
EL CARMEN		77 <sup>a</sup>	19 <sup>c</sup>	4	15,09 <sup>a</sup>	0,75 <sup>a</sup>	1,84E-07 <sup>c</sup>

PROPIEDADES QUIMICAS					
FINCA	Carbono (%)	MO (%)	pH	CIC (meq/100 g suelo)	Nitrogeno (%)
SAN LUIS Zona Alta	5,71	9,84 <sup>c</sup>	5,08 <sup>b</sup>	59,83	1,18 <sup>a</sup>
SAN LUIS Zona Baja	6,34	10,94 <sup>b</sup>	5,07 <sup>b</sup>	59,78	0,98 <sup>c</sup>
EL CARMEN	7,20	12,42 <sup>a</sup>	5,10 <sup>a</sup>	54,46	1,09 <sup>b</sup>

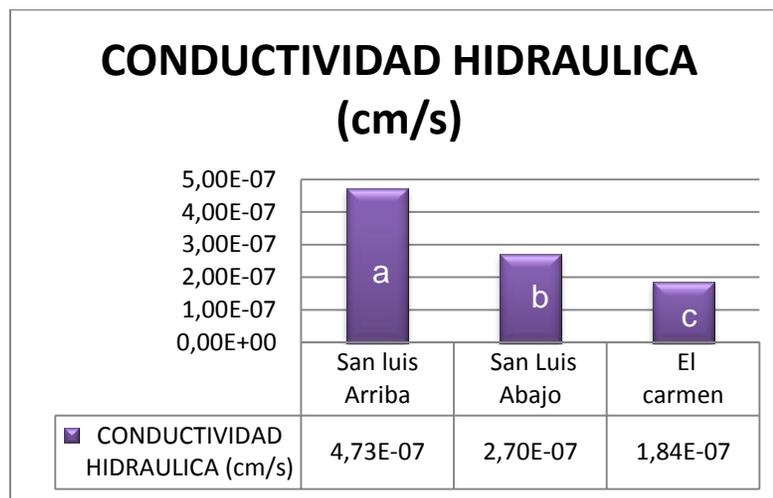
Prueba de Tukey a>b>c (p<0,05) (letras diferentes indican diferencia significativa. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa)

Considerando los resultados del análisis de texturas (tabla 4) se observa que los suelos presentan alto contenido de arenas existiendo diferencia significativa entre ellos, adecuado contenido de arcilla, excepto en San Luis parte baja donde el contenido de arcilla es alto superior al rango adecuado (10-25%) (Silva, 2009), lo que los clasifica como franco arenoso. Los niveles de humedad higroscópica de las tres muestras de suelos son normales y se asocian principalmente al alto contenido de MO como se demuestra por la correlación de Pearson positiva y altamente significativa (0,924\*\*) Anexo H. Los tres suelos presentan bajo valor de

densidad aparente, atribuida a los altos contenidos de MO pero principalmente a las arcillas de acuerdo a la correlación de Pearson (-0,921\*\*) indicando que el incremento en ellas produce aumento de volumen de espacios porosos y por tanto menor densidad, incidiendo en la estabilidad, y capacidad de retención de agua, lo cual reduce la lixiviación de de contaminantes a lo largo del perfil.

De acuerdo con el Anexo E, tabla 2. Las conductividades hidráulicas obtenidas para los suelos de las tres fincas son muy bajas, es decir, presentan un mal drenaje, características típicas de un suelo franco arenoso. La baja conductividad hidráulica en los tres suelos estudiados (Gráfico 1) dificulta el paso del agua a través de las columnas de PVC empleadas en el laboratorio, motivo por el cual en algunas columnas el agua tardan en drenar en un tiempo entre 1y 8 días.

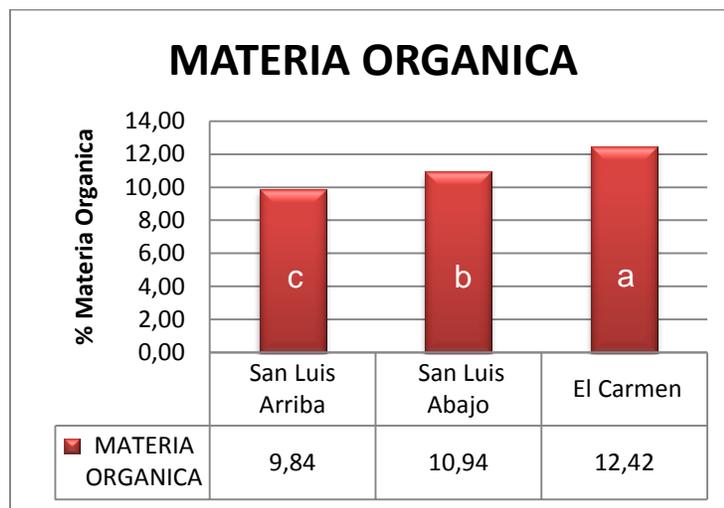
**Gráfico 1.** Conductividad hidráulica en los suelos



De acuerdo a Prueba de Tukey:  $a > b > c$  ( $p < 0.05$ )

De los resultados de los parámetros químicos (tabla 4) se puede observar que el contenido de materia orgánica es alto en los tres suelos, y de acuerdo a la prueba de Tukey, el del suelo de EL Carmen es significativamente superior, mientras que el de San Luis Alto es significativamente inferior (Gráfico 2).

**Gráfico 2.** Porcentajes de materia orgánica en los tres suelos



De acuerdo a Prueba de Tukey:  $a>b>c$  ( $p<0.05$ )

El alto contenido de materia orgánica en los tres suelos disminuye la susceptibilidad de los mismos a ser erosionados y los oscurece facilitando su calentamiento, con lo cual mejora la germinación de las semillas, el desarrollo radicular y la nutrición de las plantas. Aumenta la capacidad de intercambio catiónico, mejora la capacidad buffer de los suelos, pero disminuye el pH. Finalmente la materia orgánica retiene compuestos y/o elementos tóxicos como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o metales pesados, que llegan al suelo, dificultando su eliminación de este medio (Jaramillo, 2002), por ejemplo, la contaminación con 2,4-D, que es un plaguicida con características lixiviables y que fácilmente puede contaminar el suelo y las aguas subterráneas.

El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes, en la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes (Vásquez, 2005).

Según el Anexo E, tabla 3, los resultados de pH obtenidos para los tres suelos, los clasifica como suelos fuertemente ácidos por estar en un valor inferior a 5,5. Esta acidez afecta la actividad biológica del suelo condicionando su fertilidad o el crecimiento de las plantas y disminuye la disponibilidad de algunos nutrientes ya que un pH ácido aumenta la solubilidad de las bases y su posterior lixiviación. Además favorece el fenómeno de adsorción de nutrientes tomados por la planta en forma aniónica como fósforo, boro, azufre y molibdeno en la fase coloidal del por intercambio aniónico. La acidez fuerte proviene probablemente del alto contenido de MO, y de los alófanos presentes en este tipo de suelos, por ser de origen volcánico.

De acuerdo con el anexo E, tabla 4, la CIC de los tres suelos es muy alta (mayor a 40 meq/100g), lo cual es benéfico para las plantas ya que esta capacidad 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 principalmente a las arcillas del suelo como lo demuestra la correlación positiva y altamente significativa (0,975\*\*).

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de los análisis físicos y químicos realizados a las muestra de arena, los cuales fueron analizados en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca. Para la interpretación de los resultados se utilizó como patrón de referencia, los datos reportados por Silva en el 2009, (Anexo E).

**Tabla 5.** Análisis físicos y químicos de la arena

PROPIEDADES FISICAS							
FINCA	TEXTURA	Arena (%)	Arcilla (%)	Limos (%)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD APARENT (g/cm <sup>3</sup> )	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/s)
ARENA	Arenoso	94	5	1	0,65	1,72	4,63E-03

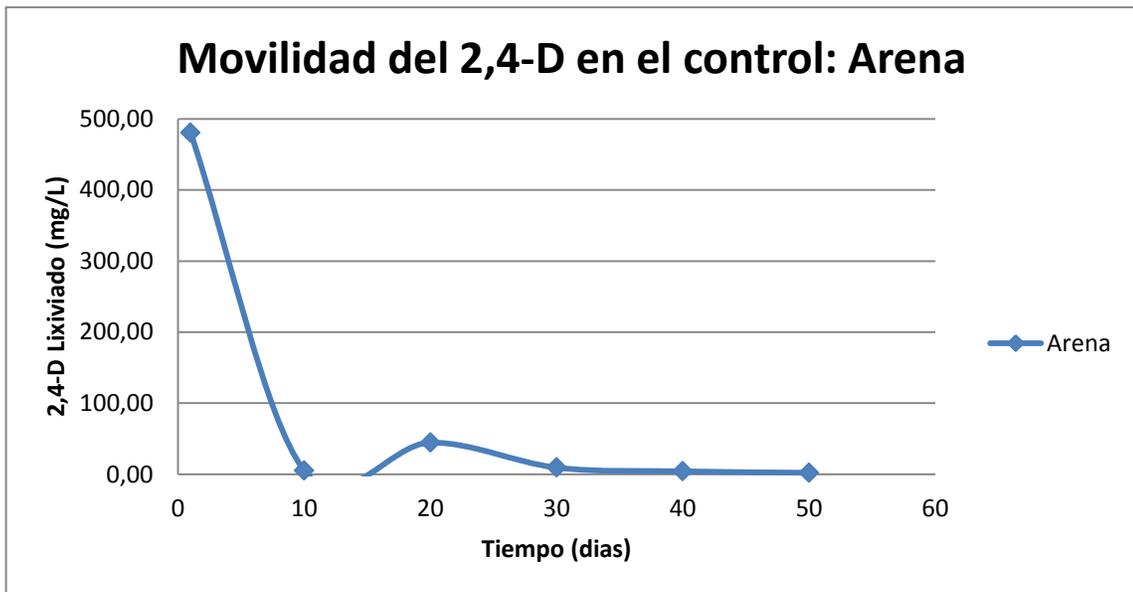
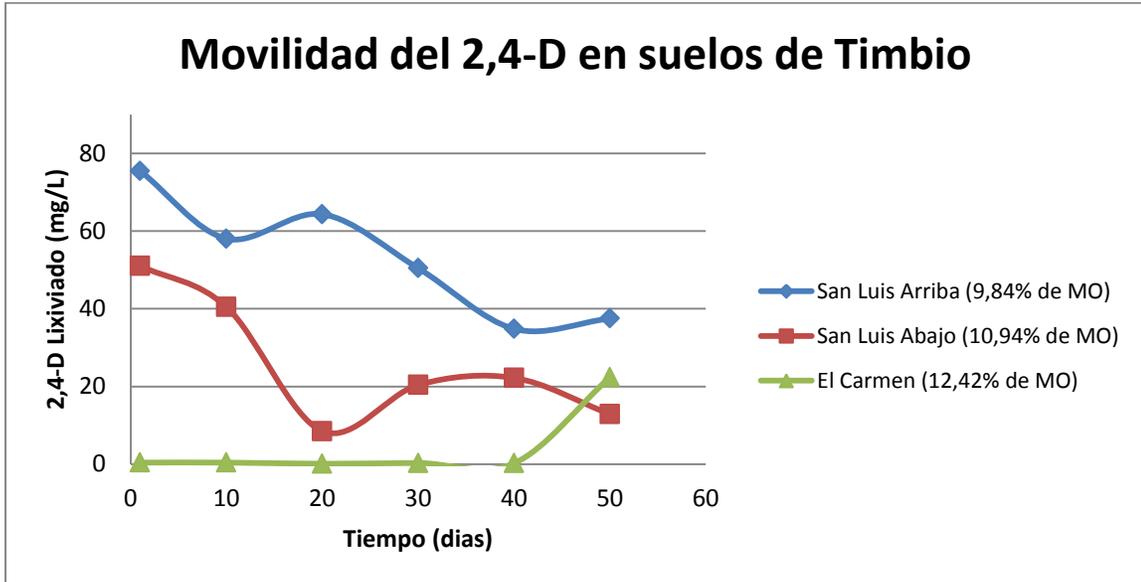
PROPIEDADES QUIMICAS					
MUESTRA	CARBONO (%)	MO (%)	pH	CIC (meq/100 g suelo)	NITROGENO (%)
ARENA	0,75	1,30	5,87	4,93	0,13

Aún cuando se hizo un tratamiento de oxidación fuerte a la arena, se encontró materia orgánica. El análisis granulométrico, muestra un porcentaje bajo de arcillas,y de limos, clasificándose como textura arenosa (Anexo E, Figura 1).

## 5.2. EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACION DE 2,4-D EN LOS SUELOS Y LA INCIDENCIA DEL TIEMPO

Inicialmente se aprecia que cada día que hay un evento de lluvia induce a la lixiviación del 2,4-D tanto en la arena como en los suelos (Grafico 3).

**Grafico 3.** Movilidad del 2,4-D en los suelos y el control



La movilidad del 2,4 D es significativamente superior en la arena, y comparando los tres suelos se deduce que la movilidad disminuye en función del contenido de MO, indicando que la retención del plaguicida ocurre en las moléculas de la MO. la correlación de Spearman negativa y altamente significativa (-0,334\*\*) confirma que a medida que incrementa el contenido de MO, disminuye la movilidad.

El gráfico 3 muestra además que la mayor parte del plaguicida se moviliza en el día 1, con el primer evento de lluvia, por ejemplo en el suelo de San Luis arriba, la prueba de Tukey no demuestra diferencia significativa entre las concentraciones del plaguicida en los primeros 30 días, siendo la cantidad movilizada significativamente inferior durante los 40 y 50 días. En los suelos con menor contenido de MO tampoco existe diferencia significativa, mientras que en el suelo de El Carmen la prueba de Tukey tampoco demuestra diferencias significativas entre las concentraciones del 2,4-D en los primeros 40 días, pero siendo la cantidad movilizada significativamente superior a los 50 días, en el sexto evento de lluvia.

En el suelo de San Luis Abajo, la prueba de Tukey no presenta diferencias significativas entre las concentraciones del 2,4-D en el lixiviado en los 50 días de muestreo, siendo la cantidad movilizada significativamente inferior en el evento de lluvia que ocurrió a los 20 días. Esto probablemente debido a líneas de flujo que se generan con el transporte de líquidos a través de la columna de suelo.

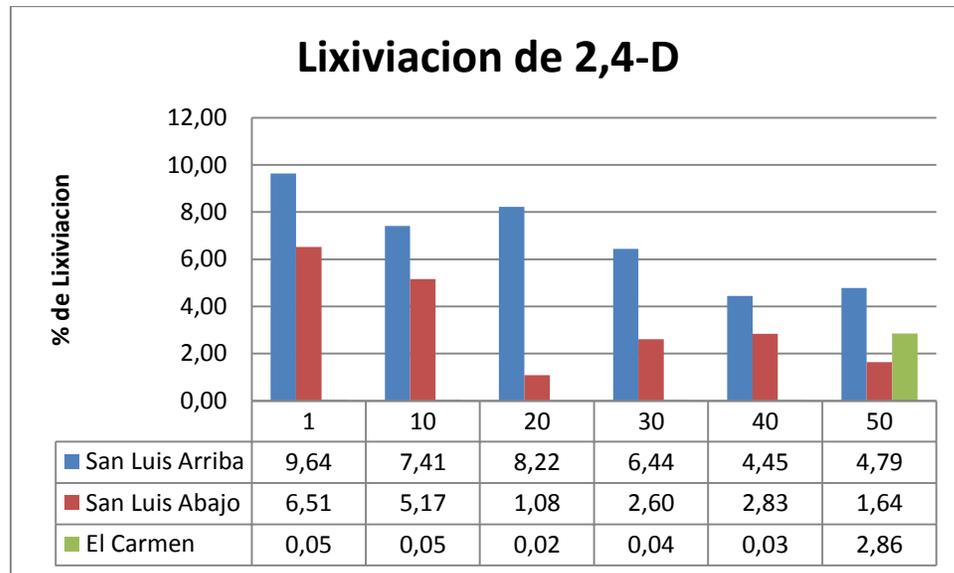
La lixiviación de 2,4-D en los suelos estudiados se ve afectada por el tiempo y los eventos de lluvia a lo largo de los 50 días, lo cual se confirma con la correlación de Pearson negativa y altamente significativa (-0,416\*\*), es decir que a medida que el tiempo va aumentando, la movilidad va disminuyendo. Los resultados del herbicida detectado en el lixiviado, se resumen en la Tabla 6.

Desde el punto de vista ambiental, lo deseable sería que el 2,4-D, fuera finalmente retenido por el suelo y allí ser degradado incluso hasta descomponerse totalmente (mineralización) hasta moléculas más pequeñas como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Los procesos de transformación y transferencia que determinan la dinámica de los plaguicidas actúan dependiendo de las características del suelo y el contaminante. Uno de los procesos de transferencia o transporte más importante es la lixiviación, que en este caso se ve favorecida por la alta solubilidad del 2,4-D y el exceso de agua en los suelos, sin embargo, las características del suelo condicionan el arrastre de los contaminantes, por ejemplo los resultados obtenidos en la finca San Luis Arriba que tiene una concentración de materia orgánica de 9,84%, después de 50 días de lixiviación y 6 eventos de lluvia permite lixiviar un 40% de la concentración inicial de 2,4-D, el cual se considerara alto, ya que está muy cercano al valor obtenido en el control (arena). Caso contrario se da en la columna de suelo de la finca El Carmen, ya que experimentalmente se obtuvo una lixiviación total baja del 3,05 % de 2,4-D, asociada al contenido superior de materia orgánica en los tres suelos estudiados, pero como se dijo anteriormente, no solo se debe atribuir el control de la lixiviación a la materia orgánica del suelo, sino a otras características fisicoquímicas del mismo como por ejemplo la porosidad y la conductividad hidráulica, que controlan 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 ser de igual, menor o mayor toxicidad.

**Tabla 6.** Lixiviación de 2,4-D en las tres fincas

<b>Eventos de lluvia</b>	<b>Tiempo (días)</b>	<b>Movilidad (mg/L)</b>	<b>Concentración de 2,4-D Retenida (mg/L)</b>	<b>2,4-D en lixiviado (%)</b>
<b>San Luis Arriba</b>				
	0		783,08	
<b>1</b>	1	75,46	707,62	9,64
<b>2</b>	10	58,04	649,58	7,41
<b>3</b>	20	64,33	585,25	8,22
<b>4</b>	30	50,43	534,82	6,44
<b>5</b>	40	34,83	499,99	4,45
<b>6</b>	50	37,50	462,49	4,79
<b>Lixiviación Total</b>				<b>40,94</b>
<b>San Luis Abajo</b>				
	0		783,08	
<b>1</b>	1	51,02	732,07	6,51
<b>2</b>	10	40,45	691,62	5,17
<b>3</b>	20	8,48	683,13	1,08
<b>4</b>	30	20,40	662,74	2,60
<b>5</b>	40	22,20	640,54	2,83
<b>6</b>	50	12,88	627,67	1,64
<b>Lixiviación Total</b>				<b>19,85</b>
<b>El Carmen</b>				
	0		783,08	
<b>1</b>	1	0,42	782,67	0,05
<b>2</b>	10	0,42	782,25	0,05
<b>3</b>	20	0,12	782,13	0,02
<b>4</b>	30	0,31	781,82	0,04
<b>5</b>	40	0,25	781,58	0,03
<b>6</b>	50	22,40	759,18	2,86
<b>Lixiviación Total</b>				<b>3,05</b>

**Gráfico 4.** Comparación de porcentajes de lixiviación en los tres suelos estudiados.



Si se comparan los porcentajes de lixiviación obtenidos en cada suelo (Gráfico 4), se observa que el que tiene mayor contenido de materia orgánica es el suelo que menos deja lixiviar el contaminante. Experimentalmente se encontró que el suelo que tiene mayor porcentaje de materia orgánica, tiene una conductividad hidráulica menor lo cual controla el flujo del agua a través de la columna de suelo, y así mismo controla el tiempo de lixiviación.

### **5.3. COMPARACION DE LA LIXIVIACIÓN DE LOS TRES SUELOS CON LA MUESTRA CONTROL**

Suponiendo que el control de arena tiene un comportamiento diferente de los suelos orgánicos, una conductividad hidráulica alta y porcentajes de retención de contaminantes casi nulos, se compararon los resultados de lixiviación de cada suelo estudiado con la muestra control (Gráfico 3)

Este análisis se hace teniendo en cuenta que la retención que presenta la muestra control es debido a factores externos a los suelos, que no se consideraran para la comparación (Por ejemplo: adsorción por parte del PVC de las columnas de suelo, líneas de flujo muy marcadas en la arena, entre otros).

Para la muestra control de arena, la prueba de Tukey tampoco demuestra diferencias significativas en la concentración del plaguicida a partir de los 20 días, siendo la cantidad movilizada significativamente superior en el día 1, con el primer

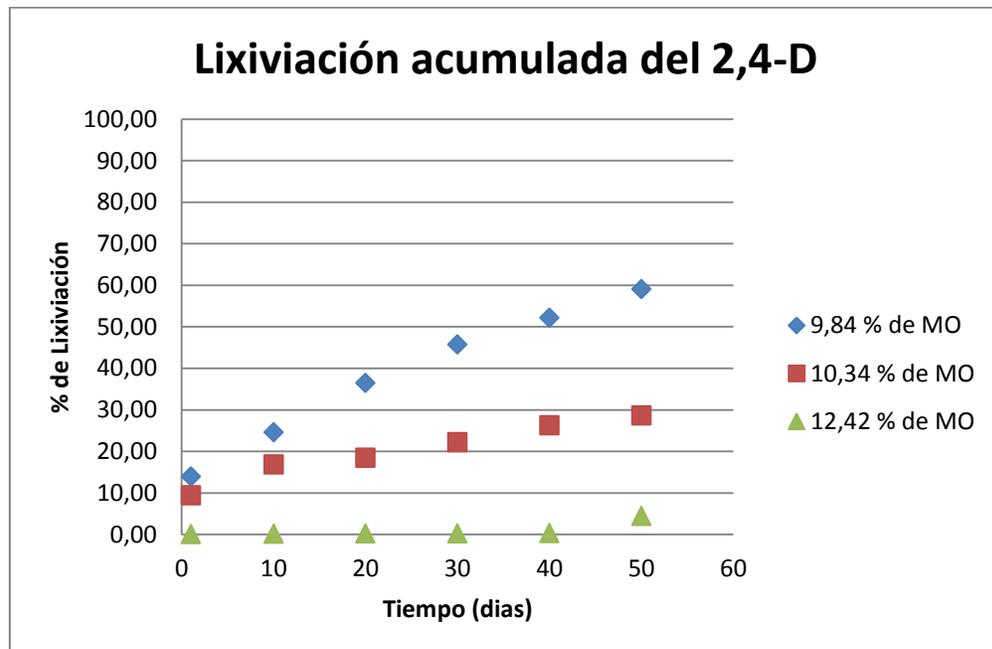
evento de lluvia, debido a las características estructurales de la arena y a su alto valor de conductividad hidráulica.

Después de los primeros 10 días, la lixiviación en la muestra control, tiene valores menores al 20% debido al lavado y arrastre del contaminante que se hizo con el primer evento de lluvia. Lo cual se ratifica con el test de Tukey, donde se no se encontraron diferencias significativas en las medias de los siguientes muestreos.

Cuando se hace la comparación de cada suelo con la muestra control, se observa que la lixiviación aumenta en los tres suelos estudiados y que el comportamiento es el mismo si se tiene en cuenta que a mayor concentración de materia orgánica, menor es el porcentaje de lixiviación y que a mayor tiempo, mayor degradación del 2,4-D.

En la gráfica 5 se muestra la lixiviación acumulada en cada uno de los suelos estudiados. Se observa que con el pasar del tiempo la lixiviación después de cada evento de lluvia es más significativa comparada con la concentración inicial adicionada, y se ve el efecto de los eventos de la lluvia, pues con cada evento de lluvia la lixiviación se acumula, después de 50 días se obtiene un 59,92% de lixiviación total para la finca San Luis Arriba con una concentración de materia orgánica de 9,84%, 28,61% de lixiviación total para la muestra de San Luis Abajo (10,34% de materia orgánica) y un 4,40% de lixiviación total para la muestra de El Carmen (12,42% de materia orgánica).

**Gráfico 5.** Lixiviación acumulada del 2,4-D



La lixiviación es un proceso que determina la dinámica del 2,4-D en los suelos estudiados y se ve influenciado por el tiempo y los eventos de lluvia que ocurran en un sitio contaminado. En este estudio se simularon seis eventos de lluvia cada 10 días, teniendo como referencia el tiempo de vida media máximo del contaminante que son 48 días, pero si la temporada invernal es fuerte en una zona donde se haya adicionado el herbicida, la movilidad va a ser mayor y el potencial de contaminar las aguas subterráneas va a ser más latente. Estudios realizados por Huertas en el 2014 en columnas de suelo con porcentaje de arcillas similares a las de esta investigación, pero con características y condiciones distintas, obtuvo un porcentaje de recuperación de 36,45% para 2,4-D, que comparado con los resultados obtenidos en este proyecto, se encuentra que dos de los tres suelos estudiados presentan menores porcentajes de lixiviación, lo cual es importante para la reducción del riesgo de la contaminación.

Al comparar los resultados obtenidos por Morillo et al, en el 2001, se encuentra que los tres suelos estudiados en este trabajo (San Luis en la zona de Arriba, San Luis en la zona de Abajo y El Carmen) tienen menores porcentajes de recuperación de 2,4-D en el lixiviado, pero se debe tener en cuenta que las características físicas y químicas que influyen en el procesos de lixiviación son diferentes a las características de los suelos estudiados en esta investigación. Por ejemplo Morillo estudio un suelo Franco-Limoso y la textura de los suelos nombrados anteriormente es Franco-Arenosa, y la presencia de arcillas y alto valor de materia orgánica ayuda a la retención del contaminante, entre otras variables significativas en el proceso de lixiviación.

Gupta *et al*, en el 2012, estudiaron la lixiviación de 2,4-D en suelos Indios, obteniendo un porcentaje de lixiviación del 25 – 76 %. En esta investigación, en la que se estudiaron suelos ándicos, se obtuvieron porcentajes de lixiviación total del 3 – 60 %, lo cual es favorable porque al tener menor porcentaje de lixiviación, el contaminante se puede ver afectado por otros procesos de degradación o transformación, 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 es significativamente mayor en el suelo de San Luis en la zona de arriba que en el de El Carmen, relacionado probablemente con los diferentes contenidos de materia orgánica.

#### **5.4. EVALUACION RETENCION DE 2,4-D EN LOS SUELOS Y LA INCIDENCIA DEL TIEMPO**

La retención del contaminante se midió teniendo en cuenta la concentración del 2,4-D en cada columna (mg de 2,4-D/kg de suelo), ya que dependiendo del peso de la muestra, la concentración varia. Se compararon las concentraciones en el lixiviado con las que se retenían en el suelo después de cada evento de lluvia y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.** Porcentajes de retención del 2,4-D

<b>Eventos de lluvia</b>	<b>Tiempo (días)</b>	<b>Movilidad (mg de 2,4-D/ Kg)</b>	<b>Concentración de 2,4-D Retenida (mg de 2,4-D/ Kg)</b>	<b>Retención después de cada evento de lluvia (%)</b>
<b>San Luis Arriba</b>				
	0		362,79	
<b>1</b>	1	34,95	327,85	90,37
<b>2</b>	10	26,89	300,95	91,80
<b>3</b>	20	29,82	271,14	90,09
<b>4</b>	30	23,38	247,75	91,38
<b>5</b>	40	16,14	231,61	93,48
<b>6</b>	50	17,38	214,23	92,50
<b>San Luis Abajo</b>				
	0		364,99	
<b>1</b>	1	23,75	341,24	93,49
<b>2</b>	10	18,87	322,37	94,47
<b>3</b>	20	3,95	318,43	98,78
<b>4</b>	30	9,47	308,96	97,03
<b>5</b>	40	10,39	298,57	96,64
<b>6</b>	50	6,02	292,55	97,98
<b>El Carmen</b>				
	0		349,46	
<b>1</b>	1	0,19	349,28	99,95
<b>2</b>	10	0,19	349,09	99,95
<b>3</b>	20	0,05	349,04	99,98
<b>4</b>	30	0,14	348,90	99,96
<b>5</b>	40	0,11	348,79	99,97
<b>6</b>	50	10,00	338,79	97,13

Al analizar el comportamiento de las columnas de suelo, se encontró que todas tienen un porcentaje de retención mayor al 90% después de cada muestreo, esto debido a que la concentración varía con cada proceso de lixiviación determinado por cada evento de lluvia. Cabe aclarar que los resultados que se muestran son de la detección del 2,4 D en su fórmula molecular, sin tener en cuenta el tiempo que tarda en desaparecer el 50% de la concentración aplicada (tiempo de vida media), si se restara la cantidad de herbicida que se va degradando con el tiempo los porcentajes de retención serían más bajos.

La retención del 2,4-D es un proceso que no solo se debe a la circulación del agua a través del suelo, pues existen unas variables importantes que influyen en su retención o movimiento a través del mismo. Algunas de las propiedades determinantes en la retención de un plaguicida en el suelo, son el coeficiente de adsorción ( $K_{oc}$ ) y el tiempo de vida media. Según estudios realizados al 2,4-D, el valor del coeficiente de adsorción de carbono orgánico ( $K_{oc}$ ) se encuentra en el rango de 36 a 79 mL/g, lo que lo categoriza como una molécula móvil en el suelo y su vida media varía entre 8 y 48 días, dependiendo de las características físicas y químicas del suelo y de las condiciones climáticas del medio donde se aplique. El  $K_{oc}$  influyente en el cálculo de los índices de potencial contaminante de pesticidas, por ejemplo el índice de GUS clasifica al 2,4-D como un tipo de pesticida lixiviable y con un potencial contaminante de acuíferos alto ya que el valor calculado en condiciones óptimas de degradación (3,98) está por encima del valor umbral (2,8). El potencial de lixiviación (LP) y el Criterio USEPA/CDFR, también clasifican al 2,4-D como plaguicida lixiviable, pues el tiempo de vida medio según el rango nombrado anteriormente está por encima del valor umbral (11 días, según el Criterio USEPA/CDFR).

La capacidad de adsorción del 2,4-D también está afectada por el coeficiente de reparto octanol-agua ( $K_{ow}$ ), pues un valor bajo de  $K_{ow}$  indica la probable movilidad y transporte de ese material por su buena solubilidad, pero un valor intermedio ( $\log K_{ow} = 2,81$ ) para el 2,4-D condiciona su movilidad y por esta razón es que en cada evento de lluvia la desorción del mismo es mínima, obteniendo porcentajes altos de retención.

El proceso de adsorción/desorción es de gran importancia para entender la difusión de los plaguicidas hacia los recursos hidrológicos. Son muchos los autores que han estudiado este fenómeno, específicamente con las isotermas de adsorción, para el 2,4-D, concluyendo en muchos casos que la adsorción se ve afectada negativamente por el pH, y positivamente por el contenido de carbono orgánico, coincidiendo con los resultados de esta investigación.

Finalmente se compara los resultados de lixiviación y retención del 2,4-D en los tres suelos estudiados (tabla 8), teniendo en cuenta que en las dos formas de cálculo (mg/L para lixiviación) y (mg/Kg para retención) se obtuvieron porcentajes similares en los tres suelos.

**Tabla 8.** Porcentaje de lixiviación y retención en cada suelo

<b>SUELO</b>	<b>PORCENTAJE DE LIXIVIACION</b>	<b>PORCENTAJE DE RETENCION</b>
<b>San Luis Zona Alta</b>	40,95	59,05
<b>San Luis Zona Baja</b>	19,85	80,15
<b>El Carmen</b>	3,05	96,95

Las columnas empleadas experimentalmente representan los primeros 30 cm del perfil del suelo donde según la literatura hay mayor cantidad de materia orgánica y mayor actividad microbiana (Kramer, 2008), y debido a estas propiedades mayor retención del herbicida, por lo que se presume que a mayores profundidades será más fácil su lixiviación. Así la concentración de 2,4-D obtenida en el cada muestreo, en otras condiciones pudo haber avanzado a una mayor profundidad del suelo.

### **5.5. LA INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS EN LA MOVILIDAD**

Como se mencionó anteriormente la tasa y magnitud del transporte del 2,4-D a través del suelo está influenciada por múltiples factores, incluyendo las propiedades del herbicida así como también las propiedades del suelo (estructura, materia orgánica, contenido de arcilla, pH, etc.). En este apartado se relaciona estadísticamente la movilidad del 2,4-D con cada una de las propiedades físicas y químicas del suelo.

**Tabla 9.** Correlación De Pearson (movilidad vs Variable)

<b>VARIABLE</b>	<b>SIGNIFICANCIA</b>	<b>Coefficiente de Correlación de PEARSON</b>
<b>Tiempo</b>	0,001	-,375(**)
<b>Materia orgánica</b>	0,014	-,287(*)
<b>Humedad</b>	0,01	-,300(*)
<b>pH</b>	0,047	,234(*)
<b>Conductividad Hidráulica</b>	0,042	,240(*)

La fracción coloidal del suelo está constituida por una parte orgánica (materia orgánica) y una parte inorgánica (minerales de la arcilla). El primer parámetro a

analizar será la materia orgánica de los tres suelos seleccionados para el estudio, como ya se mencionó en la finca El Carmen se encuentra el mayor contenido de MO en el suelo con 12,43 % (Ver gráfico 5). Por tanto, se esperaba un comportamiento diferencial en las tres muestras con respecto a la adsorción del plaguicida.

Para la correlación de Pearson se consideró que los parámetros están relacionados cuando el nivel de significancia es menor que 0.05 ( $p < 0.05$ ). Tal como se muestra en la tabla 9, estos parámetros corresponden a la materia orgánica, la humedad, el pH y conductividad hidráulica. En la misma tabla se observa que en el caso de la MO el coeficiente de correlación fue (-0,287\*), lo que significa que existe correlación negativa y baja entre las variables, es decir, existe una relación inversa: a medida que aumenta la materia orgánica, la movilidad disminuye.

Como lo sugiere la literatura en otros estudios de movilidad, la materia orgánica juega un papel importante en la adsorción, la materia orgánica proporciona sitios de adsorción, esto por la presencia de los grupos funcionales que forman complejos de asociación fuertes y por consiguiente mayor número de moléculas adsorbidas. Además la materia orgánica es fuente de energía, lo cual hace que al aumentarse, los microorganismos generen una mayor actividad para degradarla, transformarla o acumularla y por ende, degradarían también, el plaguicida. El suelo de la muestra control (arena), por lo tanto que contenía menos bacterias, y / o al menos una o más especies microbianas a una densidad mucho más baja, tiene menos probabilidades de adsorber y degradar el herbicida.

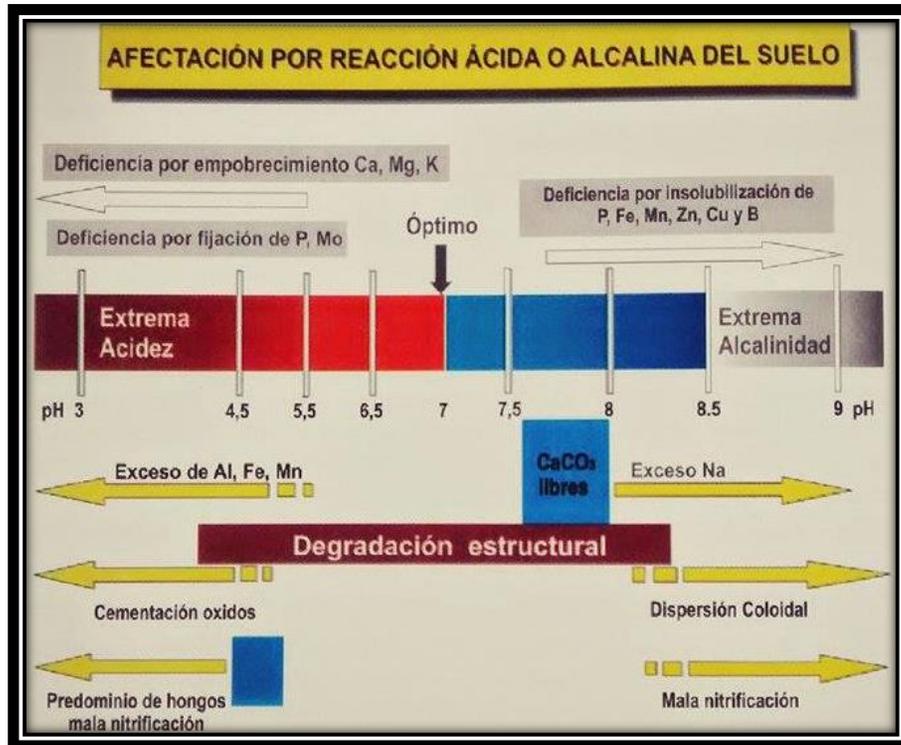
La humedad también se correlaciona negativamente con la movilidad, en el tipo de suelo como el de El Carmen donde la humedad es más alta (gráfico 6), la movilidad disminuye, debido a que tanto las tasas de degradación química como microbiana se incrementan con mayores niveles de temperatura y humedad.

Entre el pH y la movilidad hay una correlación positiva y muy baja con un valor de 0,234\* lo cual significa que cuando el pH es bajo puede haber una menor movilidad. El pH juega un papel importante en las propiedades de adsorción, éste comportamiento, se debe a las características de ácido débil del 2,4-D, que se encontrará protonado a valores bajos de pH, favoreciéndose la interacción del xenobiótico con los sitios activos del suelo cargados negativamente y a la posible formación de puentes de hidrógeno en los sitios del suelo de carácter neutro.

Resultados similares fueron encontrados por Kah M. et al en 2007. Ellos encontraron que la disminución del pH, disminuye significativamente los tiempos de vida media de la molécula, ya que a bajos valores de pH hay menos cantidad del herbicida disponible para la degradación (se encontrará preferiblemente adsorbido). Por consiguiente las enmiendas normalmente utilizadas para corregir el pH, como el encalamiento, puede implicar una mayor movilidad del 2,4 D.

Sin embargo se conoce que las plantas necesitan algunas condiciones específicas de pH en el suelo para que haya una óptima disponibilidad de nutrientes, como se observa en la figura 12.

**Figura 12.** Relación entre la reacción del suelo y los procesos que influyen en la disponibilidad de nutrientes (Gómez y Castro, 2009).



De esta manera valores altos de pH podrían disminuir el tiempo de retención del herbicida en el suelo y además limitar la absorción de nutrientes como el hierro, magnesio o el cobre y también que en condiciones extremas se inhiba la acción de los microorganismos, dificultándose por ejemplo la asimilación de nitrógeno. Un pH entre 5,5 y 7 favorece tanto a la disponibilidad de nutrientes como a una lixiviación de 2,4D más baja.

Con respecto a la conductividad hidráulica, ésta se correlacionó positivamente al igual que el pH lo que indica que existe una relación directa, pero muy baja, entre las dos variables, cuando la conductividad hidráulica aumenta, la movilidad aumenta.

En el suelo de San Luis en la zona de arriba, como se muestra en el grafico 7, la conductividad hidráulica fue más alta que en el Carmen, y en este suelo fue donde el herbicida lixivió más. Sin embargo, estadísticamente la relación de movilidad

con los valores de conductividades hidráulicas en los suelos orgánicos es muy baja (0,240\*), esto debido a que los valores encontrados en cada muestra son muy parecidos entre sí.

Si se compara cada uno de los suelos con el control, se muestra una diferencia significativa ya que la conductividad de la arena es 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 (tal como sucedió en la arena), tanto así que en el primer muestreo es arrastrada la mayor cantidad del herbicida y debido a que una de las propiedades del 2,4 D es su alta solubilidad en agua, se produce un “lavado” y genera mayor concentración del mismo en el lixiviado, lo cual representa una grave amenaza para la contaminación de los cuerpos de agua. La conductividad dependió del porcentaje de humedad, la textura, la porosidad de aireación, la estabilidad de agregados y del grado de compactación

Por otra parte no se relacionaron significativamente con la movilidad el contenido de arcillas, la densidad aparente, la CIC ni el nitrógeno. Para el contenido de arcilla a pesar de no haber relación significativa con la movilidad, se correlacionó negativamente (-0,171) favoreciéndose la adsorción del 2,4 D a medida que aumenta el contenido de arcillas y al comparar con la arena se observa que en los suelos orgánicos (que presentaban una textura fina) la adsorción fue mayor respecto de aquellos con textura gruesa.

De manera general la movilidad de los herbicidas depende de su afinidad por los constituyentes del suelo (adsorción), en general cuanto mayor sea su adsorción en suelo menor será su potencial de lixiviación. Cabe resaltar que los resultados obtenidos 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, etc.) y por la naturaleza del herbicida. La lixiviación por ejemplo, puede aumentar con el volumen de las precipitaciones debido la alta solubilidad del herbicida 2,4-D (Gupta, 2012). En este sentido, el tipo de cultivo también puede convertirse en un factor de mayor importancia para la movilidad, en un cultivo como el arroz donde las condiciones típicas de siembra son cultivos con riego o inundado es posible que se aumente el potencial de lixiviación. De esta manera el contenido de agua del suelo puede ser un factor importante para influir en el movimiento y la degradación del plaguicida y al bajar a mayores profundidades afectar fácilmente el recurso hídrico.

## 6. CONCLUSIONES

En general los suelos de las fincas muestreadas tienen propiedades físicas y químicas que favorecen el desarrollo y producción de los cultivos. Se caracterizan por ser bastantes fértiles con altos contenidos de materia orgánica, valores de pH adecuados, capacidad de intercambio catiónico alta y baja conductividad hidráulica.

El tiempo y las condiciones climáticas, específicamente el exceso de lluvias, son variables que influyen directamente en la movilidad de los contaminantes. Aunque estadísticamente el mayor porcentaje de 2,4-D lixivió en el primer evento de lluvia, se observó que después de cada evento aún había concentración del herbicida en el lixiviado, lo cual está determinado por el proceso de adsorción – desorción, y a su vez por propiedades del 2,4-D, como es su alta solubilidad.

Realizados los ensayos de movilidad en las columnas con muestras de suelo, se obtuvieron porcentajes de 2,4-D en lixiviado equivalente a 40,95% para la finca San Luis Arriba, 19,85 % para San Luis Abajo y 3,05 % para El Carmen. El riesgo de lixiviación del herbicida es significativamente mayor en San Luis Arriba que en El Carmen, relacionado probablemente con el diferente contenido de materia orgánica; el alto contenido de la misma termina siendo de gran importancia para la retención de contaminantes, mitigando la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas de estos suelos.

Estadísticamente se encontró que no sólo la materia orgánica correlaciona con la movilidad del contaminante, también influyen en este proceso variables como el pH, la humedad y la conductividad hidráulica.

El contenido de materia orgánica y la humedad se relacionaron inversamente con la movilidad del herbicida. Mientras que el pH y la conductividad hidráulica se relacionaron de manera directa, por lo tanto enmiendas aplicadas a los suelos como el encalamiento pueden influir negativamente en la lixiviación del 2,4-D a través del perfil del suelo.

## RECOMENDACIONES

- Aunque en este estudio solo correlacionaron significativamente algunas variables del suelo con la movilidad del contaminante, es de gran importancia tener en cuenta todas las variables tanto del suelo como del 2,4-D, y también las condiciones climáticas del sitio de estudio, ya que la interrelación del conjunto determinan su movilidad a través del suelo.
- Una revisión de la literatura se ha puesto de manifiesto que la mayoría de los estudios se limitan a los experimentos de columna (Chopra et al., 2010 y Pot et al., 2011), en el desarrollo de la fase experimental se pudo observar que en éstos experimentos por más cuidadosa que sea la toma de muestras las propiedades físicas tienden a modificarse. Por lo anterior se recomienda realizar el proyecto en Campo y además en fincas con rangos de valores de materia orgánica más amplios, igualmente diferentes valores de pH y CIC para poder comparar la retención del mismo herbicida en condiciones diferentes.
- Esta investigación sugiere que la enmienda orgánica puede ser una práctica de gestión eficaz para la fertilización de los suelos y el control de la lixiviación de plaguicidas.

## BIBLIOGRAFIA

Aizawa, H. 2001. 5 – Aryloxy Acids, in *Metabolic Maps: Pesticides, Environmentally Relevant Molecules and Biologically Active Molecules*. Academic Press: London. Pág. 59-66.

Astolfil, A., Dobrovolski, B. Grant, O. Hutzinger, R.N. Khanna, R.D. Kimbrough, D.G. Lindsay, P.J. Madati (1984) *Environmental Health Criteria 29, 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D)*, INCHEM, International Programme On Chemical Safety(IPCS-a joint venture of the United Nations Environment Programme, the International Labour Organisation, and the World Health Organization),WHO

Azevedo, A. 1998. Evaluación y simulación de atrazina por influencia de drenaje y riego. Una interfaz entre RZWQM y ArcView GIS. Tesis de Doctorado. Universidad del Estado de Iowa, Ames, Iowa.

Bollo, E. 1999. *Lombricultura, aun alternativa de reciclaje*. Ediciones Mundi – Prensa, Barcelona, España. 150 p.

Bosco, J., Imbert, Juan A. Blanco Y Federico J. Castillo. 2004. Capítulo 17: Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. Libro: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Páginas 479-506. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

BRAVO, I.; MARTINEZ, C. 2014. *Prácticas de Laboratorio de Agroquímica*. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Educación. Departamento de Química. Área Agroquímica. Universidad del Cauca. Popayán

Brady, N.C. & R.R. Weil. 1996. Soils and chemical pollution. Chapter 18 of book *The Nature and Properties of Soils*. Prentiss Hall Intnal.

CASANOVA, E. 2005. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Central Venezuela. Segunda edición.

Chopra, B. Kumari, S. Sharma. 2010. Evaluation of leaching behavior of pendimethalin in sandy loam soil .*Environmental Monitoring and Assessment*, p. 123–126

Cortéz, A. 2004. *Suelos Colombianos una mirada desde la academia*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá

Crespín, M.A., et al., 2001. Study of the Degradation of the Herbicides 2, 4-D and MCPA at Different Depths in Contaminated Agricultural Soil. *Environmental Science & Technology*. 35(21): p. 4265-4270.

DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.

DONADO, L., COLMENARES, 2004 J. Modelo de Conductividad Hidráulica en Suelos. Tesis de Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 148 p.

Eweis, J., S. Ergas, D. Chang y E. Schöeder. 1999. Principios de biorrecuperación. Mc Graw-Hill Interamericana, Madrid, 327 p.

FAO. 2005. The importance of soil organic matter, Key to drought-resistant soil and sustained food production, by Alexandra Bot and Jose Benites, FAO soils bulletin No. 80. Rome.

Fassebender, H. Bomernisza, E. 1987. Química de los suelos en énfasis en suelos de América Latina. Costa Rica. Pág. 7-11, 45-54, 121-124

Fenoll, J., Ruiz, E., Flores, P., Hellin, P., Navarro, S. 2011. Reduction of the movement and persistence of pesticides in soil through common agronomic practices, Chemosphere, Volume 85, Pages 1375-1382

Florenza, P. y Martinez, J. 1991. Horticultura y Materia Orgánica. Horticultura 66: 42 – 50.

Fu, F., et al., 2009. Study on the degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) and 2-methyl-4-chloro-phenoxyacetic sodium (MCPA sodium) in natural agriculture-soils of Fuzhou, China using capillary electrophoresis. Science of The Total Environment. 407(6): p. 1998-2003

Fundación MAPFRE 1994 España. Manual de contaminación ambiental. pág. 22

Gan J, Zhu Y, Wilen C, Pittenger D, Crowley D. 2003. Effect of planting covers on herbicide persistence in landscape soils. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California 92521, USA. jgan@mail.ucr.edu. Environ Sci Technol. 15;37(12):2775-9. PMID: 12854718 [PubMed - indexed for MEDLINE]

Gervais, J. A.; Luukinen, B.; Buhl, K.; Stone, D. 2008. 2,4-D Technical Fact Sheet; National Pesticide Information Center, Oregon State University Extension Services. <http://npic.orst.edu/factsheets/2,4-DTech.pdf>

Gilliom, R.J., Barbash, et al., 2007. Pesticides in streams and ground water of the United States. In: Del Re, A.A.M., XIII (Eds.), Symposium Pesticide Chemistry—

Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. La GoliardicaPaveses.r.l(). pp. 731–742

Ginn, T. R.; Simmons, C. S. and Wood, B. D. 1995. Stochastic-Convective transport with nonlinear reaction: 2 biodegradation and microbial growth. *Water Resources Research*. 31(11), 2689-2700.

Grath J., Scherdleder A.. 2010. Régimen de cumplimiento de masa de agua subterránea resumen la evaluación del estado de riesgo identificado para el estado químico del agua subterránea en la UE Actas de la Conferencia europea sobre aguas subterráneas. Madrid, España, pp 17-22

GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, Lección 22. Plaguicidas Hidrogeoquímica. Instituto universitario de plaguicidas y Aguas de la Universidad Jaime I de Castellón. España. 2007.

Guerrero, a. 1996. El Suelo, los Abonos y la Fertilización. *Horticultura* 66: 42-50.

Gupta, M. Garga, N., 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 and Environment* 146 60–72

Gutiérrez, H.M., L.E. Barba y H. Materno. 2007. Movilidad de los plaguicidas carbofuran e imidacloprid en un suelo tipo Typic Humitropept de la serie Meléndez. *Agronomía Colombiana* 25(1), 160-167

Hayes, M. y Clapp, C. E. 2001. Humic Substances: Considerations of Compositions, Aspects of Structure, and Environmental Influences. *Soil Science* 166 (11): 723 – 737

Hiradate, S. (2007). Adsorption of 2,4 -Dichlorophenoxyacetic Acid by Andosol. *Journal of environmental quality*.

Honorato, R. 1993. Manual de Edafología. Editorial Universitaria S. A. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 193 p.

Hoja de seguridad de los productos profiamina 720 sl. Proficol. Disponible en :<[http://rebolledosioufi.com/hojaseguridad/hojaseg\\_amina720sl\\_proficol.pdf](http://rebolledosioufi.com/hojaseguridad/hojaseg_amina720sl_proficol.pdf)>

Huertas, J. 2014. Lixiviación En Columnas De Suelo De Los Herbicidas Metsulfuron Metilo Y 2,4-D En Suelos Arroceros Del Municipio Del Espinal (Tolima). Universidad Nacional De Colombia. Facultad De Ciencias. Departamento De Química. Pags: 136

ICA (Instituto Colombiano Agropecuario).2008. *Comercialización de plaguicidas*. Única edición ed. 2009, Bogotá D. C.: Grupo de regulación y control de plaguicidas químicos de uso agrícola-ICA.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos, agua, abono orgánico, tejido vegetal, material particulado. Suelo, Bogotá, D.C. 6:647.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y CALIBRACION. BOGOTA D.C:ICONTEC,2005. Pags:49 (NTC-ISO/IS17025:2005)

Ismail, B.S., M. Sameni, and M. Halimah. 2009. *Adsorption, desorption and mobility of 2,4-D in two Malaysian agricultural soils*. Asian Journal of Agricultural Research, p. 67-77.

Jaramillo, J.D.F. 2002.Introduccion a la ciencia del suelo. Facultad de ciencias exactas Universidad nacional Colombia

Jimenez, M., & Santos, J. (2008). Estudio de la movilidad del plaguicida clorpirifos y de impacto ambiental, en suelos de CORPOICA ubicados en Villavicencio a partir de un derrame simulado. *Tesis de pregrado*, 194. Universidad de la Salle.

June Russell (2001) June Russell's Health Facts. Pesticides – 2,4-D and Roundup <http://www.jrussellshealth.com/pests24d.html>

Kah, M., S. Beulke, and C.D. Brown, *Factors Influencing Degradation of Pesticides in Soil*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007. 55(11): p. 4487-4492.

Kramer C., Gerd G.2008. Soil organic matter in soil depth profiles: Distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation, Soil Biology and Biochemistry, Volume 40, Issue 2, February 2008, Pages 425-43

Labrada, L., & Caseley, J. (2000). *Manejo de Malezas para Países en Desarrollo*. (Estudio FAO Producción y Protección Vegetal - 120). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Lipthay, J., Sorensen, S., & Aamand, J. (2007). Effect of the concentration of the herbicide and amendment of organic and inorganic nutrients in the mineralization of mecoprop, 2,4-D and 2,4,5-T in samples of soils and aquifers. *Environmental Pollution*(Vol 148).

Morillo, E., J.I. Pérez-Martínez, and J.M. Ginés. 2001. *Leaching of 2, 4-D from a soil in the presence of [beta]-cyclodextrin: laboratory columns experiments*. *Chemosphere* 44(5): p. 1065-1069.

Miliarium Aureum, S.L. 2004. ÍNDICES DE POTENCIAL CONTAMINANTE DE PESTICIDAS. Disponible en <<http://www.miliarium.com/Prontuario/Indices/IndicesPesticidas.htm#FactorRetard>>

Nemeth, K., Morovjan, G., & Csokan, P. (2002). sorption behaviour of acetochor, atrazine, carbendazim, diazinon, imidacloprid and isoproturon on Hungarian agricultural soil. *Chesmosphere* 48 (5), p. 545-552.

Navarro, S., Vela, N., Navarro, G. 2007.Revision. Una visión general sobre el comportamiento medioambiental de los residuos de plaguicidas en los suelos. *Revista Española de Investigación Agrícola, América del Norte*, 5, sep.

OECD, 2000. Guidelines for the testing of chemical, proposal for a new guidelines leaching in soil columns.15p.

Osgerby, J. M., 1970. Sorption of un-ionized pesticides by soils. *Sorption and Tanspor Processes in Soils*. Sci. Monograph. 37.

Otiniano-Julca, A.; Meneses-Florian, L.; Blas-Sevillano, R. Bello-Ames, S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. Volumen 24, #1, paginas 49-64, IDESIA (Chile).

Pérez, E. 2010.Comportamiento y dinámica de los plaguicidas organofosforados clorpirifos y diazinón en suelos con características ándicas del humedal de Calvache, Cauca, Colombia. Predicción de posible contaminación. Tesis doctoral. Facultad De Ciencias Naturales Y Exactas, Universidad Del Valle, Santiago De Cali (Valle). 141 pags.

PPDB. 2012. Pesticide Properties DataBase, University of Hertfordshire. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/>. Accessed September 2013.

POLANCO, M.2009. Mecánica de Suelos. Universidad del cauca

Pot, P. Benoit, M.L. Menn, O.M. Eklo, T. Sveistrup, J. Kværner. 2011. Metribuzin transport in undisturbed soil cores under controlled water potential conditions: experiments and modelling to evaluate the risk of leaching in a sandy loam soil profile. *Pest Management Science*, 67 p. 10

REAL, M. 2010. Adsorción, persistencia y movilidad de compuestos orgánicos polares contaminantes de suelos. Universidad de Sevilla. España. pág. 15, 16,17, 62

Rice, J. A. 2001. Humín. *Soil Science* 166 (11): 848 – 857

Spark, K.M., Swift, R.S., 2002. Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption. *Science of the Total Environment* 298, 147–161.

Sata, *Guía para la protección y nutrición vegetal*. (2009). Recuperado el 7 de abril de 2014, de [http://www.laguiasata.com/joomla/index.php?option=com\\_content&view=article&id=294:24-d-&catid=45:principios-activos&Itemid=57](http://www.laguiasata.com/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=294:24-d-&catid=45:principios-activos&Itemid=57)

SILVA, F.; BURBANO, H. 2013 *Ciencia del Suelo, Principios Básicos*. SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. 2. Ed. Bogotá. 580 p.

SILVA, F. 2009. *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. Sociedad Colombiana De La Ciencia Del Suelo. Tercera edición. Santa fe de Bogotá.

Swift, R. S., 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.*, 166, 858-871.a (1)-7(a) 10. <http://tncweeds.com.ucdavis.edu/products/handbook>.

Tomlin C. D. S., 2000. *The Pesticide Manual*. Twelfth Edition ed. 2000, Farnham.: Editor. BCPC

Tu et al. (2001) *Weed Control Methods Handbook*, The Nature Conservancy; Pdf document; 7

Vásquez, M.E. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. *Fertilización de Suelos*.

Vencill, W.K., 2002. *Herbicide Handbook*. Eight Edition. ed, ed. Editor. WSSA Champaign, Illinois.

Villar, J. M. y Ferrer F. 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. *Agricultura y agua* Capítulo I. p 23-86. España.

Zayed SM, Farghaly M, Taha H.(2002) Mineralization of <sup>14</sup>C-ring labelled 2,4-D in Egyptian soils under aerobic and anaerobic conditions. *National Research Center, Dokki, Cairo, Egypt. Biomed Environ Sci.* 2002 Dec; 15(4):306-14. PMID: 12642987 [PubMed - indexed for MEDLINE]

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. HOJA DE SEGURIDAD 2,4-D**

## HOJA DE SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS PROFIAMINA 720 SL

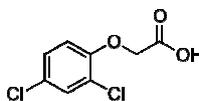
Proficol Andina B.V Sucursal Colombia  
Calle 1C N° 7-53  
Interior Zona Franca  
Barranquilla- Colombia (Sur América)  
Teléfonos: 3799772 / 3799773 / 3799774  
Teléfonos de Emergencia: CISPROQUIM 2886012 Bogotá (Colombia)  
01 8000 916 012 Línea gratuita nacional (Colombia)

Fecha: Julio/10  
Código: P-094  
Revisión: 1  
Reemplaza: Feb/09

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA

<b>Nombre del producto</b>	Profiamina 720 SL
<b>Fabricante</b>	Proficol Andina B.V. Sucursal Colombia Calle 1C # 7-53 Interior Zona Franca BARRANQUILLA- COLOMBIA Teléfonos: 3799772 / 3799773 / 3799774
<b>Distribuido por</b>	Proficol S.A. Carrera 11 No. 87-51 Piso 4 Tels: 6446730 Bogotá, Colombia www.proficol.com.co
<b>N° Teléfono de emergencia</b>	CISPROQUIM 2886012 Bogotá (Colombia) 01 8000 916 012 Línea gratuita Nacional (Colombia)

### 2. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

<b>2.1 Ingrediente activo</b>	
<b>Denominación según núm. CAS</b>	Ácido 2,4 – Diclorofenoxiacético
<b>Núm. CAS</b>	94-75-7
<b>Formula molecular</b>	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Formula estructural</b>	
<b>2.2 Contenido típico</b>	Acido 2.4 D 720gr/l Acido 2,4 D del ácido Diclorofenoxiacético de formulación a 20 °C, equivalente a 867 gr/l en forma de sal dimetilamina. Ingredientes aditivos c.p.s. 1 litro
<b>2.3 Uso del material</b>	Herbicida. Uso Agrícola
<b>2.4 Categoría toxicológica</b>	II Altamente tóxico

Ficha de Datos de Seguridad de Materiales de acuerdo con 91/155/CEB.93/112/CEE (enmendado) y OSHA, 29 CFR 1910.1200 (g) La información contenida en este documento se considera exacta y fiable, basada en las recomendaciones dadas por las buenas prácticas de manufactura y manipulación de estos productos, consignados en la literatura disponible. Pero corresponde al usuario bajo su exclusiva responsabilidad, decidir si esta información es apropiada y útil.

**3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS**

**3.1 Riesgos para la salud (agudos y crónicos)** R36/37/38 Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias.  
R 22 Nocivo por ingestión.  
Código NFPA: H 3; F 1; R 0

**3.2 Riesgos Medio ambientales** : Peligroso para el agua. Ver sección 12.

**4. PRIMEROS AUXILIOS**

**4.1. Procedimientos de urgencia y primeros auxilios** Síntomas de intoxicación pueden aparecer pasadas ya muchas horas, por lo tanto la vigilancia médica por lo menos durante 48 horas después del accidente.

Si el producto entra en contacto con los ojos enjuague con agua manteniendo los párpados abiertos, por lo menos 15 minutos.

Al contacto con la piel enjuagar inmediatamente con abundante agua y quitar la ropa y los zapatos contaminados. Solicitar asistencia médica inmediatamente.

Si el producto es inhalado lleve a la persona al aire fresco. Si presenta dificultad respiratoria administre oxígeno. Solicite asistencia médica.

Si el producto es ingerido. Solicite atención médica.

**4.2 Guía para el Médico** Lavar el estómago con carbón medicinal. No administrar leche ni alimentos a base de grasa. Si hay quemaduras tratar como quemadura térmica.

No hay antídoto específico suministre tratamiento sintomático.

---

**5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS**

**5.1 Medios y procedimientos de extinción** CO2, pólvora de extinción o chorro de agua chispeante. Combatir incendios mayores con chorro de agua chispeante o espuma resistente al alcohol.

- No requiere medidas especiales en cuanto a equipos de protección.

-Si fuera posible, impedir que el agua derramada entre en el alcantarillado.

**5.2 Descomposición o productos peligrosos derivados del fuego** No se conocen productos de descomposición peligrosos.

---

**6. MEDIDAS QUE DEBAN TOMARSE EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL**

**6.1 Protección personal**

**6.2 Medidas a tomar en caso de derrames** Eliminar el material contaminado como desecho según ítem 13. Asegurar ventilación suficiente.

<b>7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO</b>		
<b>7.1</b>	<b>Precauciones de manejo</b>	No requiere medidas especiales
<b>7.2</b>	<b>Precauciones de almacenamiento</b>	No requiere medidas especiales Mantenga el depósito cerrado de forma estanca.
<b>8. CONTROL DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN INDIVIDUAL</b>		
<b>8.1</b>	<b>Instalaciones</b>	Sin datos adicionales ver ítem 7. Las listas vigentes en el momento de la elaboración sirvieron de base.
	<b>Protección de la respiración</b>	Protección respiratoria con filtro al exponerse escasamente o poco tiempo. Utilizar protección respiratoria que dependa del aire ambiental, al exponerse con intensidad o mucho tiempo.
	<b>Protección de las manos</b>	Guantes protectores
	<b>Protección de los ojos</b>	Llevar gafas de seguridad, herméticas.
<b>8.2</b>	<b>Procedimientos de trabajo e higiene</b>	Mantener alejado de alimentos bebidas y forrajes. Quitarse inmediatamente ropa sucia o impregnada. Lavarse las manos antes de las pausas y al final del trabajo Evitar el contacto con la piel.
<b>9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS</b>		
<b>9.1</b>	<b>Estado físico</b>	Líquido
<b>9.2</b>	<b>Color</b>	Ámbar claro
<b>9.3</b>	<b>Olor</b>	Ligero olor a amoniaco
<b>9.4</b>	<b>Densidad</b>	1.23 g/cc a 20°C aprox.
<b>9.5</b>	<b>Punto de inflamación</b>	> 100 °C
<b>9.6</b>	<b>Límites de explosividad</b>	ND
<b>9.7</b>	<b>pH</b>	7 – 11.5
<b>10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD</b>		
<b>10.1</b>	<b>Descomposición térmica</b>	No se descompone con uso adecuado
<b>10.2</b>	<b>Descomposición peligrosa o productos secundarios</b>	No se conocen reacciones peligrosas No se conocen productos peligrosos de descomposición
<b>11. INFORMACIONES TOXICOLÓGICAS</b>		
<b>11.1</b>	<b>Peligros para la salud</b>	Véase 3.1.
<b>11.2</b>	<b>Ruta(s) de entrada</b> - Ingestión	DL <sub>50</sub> , oral, rata: 370 mg/kg
	- Piel	DL <sub>50</sub> , dermal, rata: 1.500 mg/Kg
<b>11.3</b>	<b>Irritación</b>	Irrita la piel y las mucosas Irrita los ojos
<b>11.4</b>	<b>Sensibilización</b>	No se conoce ningún efecto sensibilizador
<b>12. INFORMACIONES ECOLÓGICAS</b>		
		Instrucciones generales: Clase de peligro para el agua 2 (Auto clasificación): peligroso para el agua. No dejar infiltrarse en las aguas subterráneas, ni públicas, ni en el alcantarillado. Peligro para el agua potable al derramarse cantidades escasas al subterráneo.
<b>13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN</b>		
<b>13.1.</b>	<b>Gestión de residuos</b>	No debe eliminarse con la basura doméstica. No debe llegar al alcantarillado.

- 13.2. Tratamiento del envase** No contaminar aguas, alimentos o piensos al almacenar y depositar el producto.  
Después de haber vaciado completamente el contenido de éste envase, enjuáguelo colocando agua limpia hasta ocupar una cuarta parte del mismo; tápelo y agítelo fuertemente, luego vierta la solución al tanque de aspersión mientras es llenado, repita esta operación tres (3) veces. Finalmente inutilice el envase triturándolo o perforándolo y almacénelo en un lugar seguro hasta definir su disposición final.

---

**14. INFORMACIONES RELATIVAS AL TRANSPORTE**

<b>UN</b>	3348
<b>Nombre propio de transporte</b>	PLAGUICIDA LÍQUIDO, TÓXICO, A BASE DE DERIVADOS DEL ÁCIDO FENOXIACÉTICO
<b>Clase</b>	6.1
<b>Grupo de empaque</b>	III

---

**15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS****Simbolo****Frases R**

R36/37/38 Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias.  
R22 Nocivo por ingestión

**Frases S**

S36/37 Usen indumentaria y guantes  
S22 Nocivo por ingestión  
S13 Manténgase lejos de alimentos, bebidas y piensos.

**Clase de peligro para el agua:**

CPA2 Auto clasificación: Peligroso para el agua

**16. OTRAS INFORMACIONES**

Este material sólo debe ser usado por personas que estén informadas de las normas de seguridad requeridas y que conozcan las recomendaciones de esta hoja de seguridad.

Teléfonos de Emergencia: CISPROQUIM 2886012 Bogotá (Colombia)  
01 8000 916 012 Línea gratuita nacional (Colombia)

## **ANEXO B. ÍNDICES DE POTENCIAL CONTAMINANTE DE PLAGUICIDAS** (Miliarium Aureum, S.L. 2004)

Para la evaluación del transporte ambiental de un contaminante se utilizan modelos matemáticos complejos, que dan información detallada de lo que le va a pasar al compuesto una vez es liberado al medio ambiente, pero que en muchas ocasiones son difíciles de calcular o no se cuenta con datos suficientes.

Existe la posibilidad de utilizar los denominados índices o indicadores de transporte ambiental que, si bien simplifican mucho la realidad, pueden ser útiles para exámenes aproximativos.

Para el caso de los pesticidas y su relación con las aguas subterráneas, se utilizan una serie de índices para determinar su potencial de lixiviación a través del suelo y, por consiguiente, el potencial de contaminación de los acuíferos. Algunos de estos índices se describen a continuación:

### **GUS (Groundwater Ubiquity Score)**

Desarrollado por Gustafson (1989). El índice GUS se basa en la aplicación de una función obtenida a partir de valores de pesticidas detectados en aguas subterráneas y viene definido por la siguiente expresión:

$$\text{GUS} = \log t_{1/2} \cdot (4 - \log K_{oc})$$

En donde:

- $t_{1/2}$ : tiempo de vida medio (días).
- **K<sub>oc</sub>**: coeficiente de adsorción.

El tiempo de vida medio representa el tiempo necesario para que la concentración de pesticida se reduzca hasta la mitad y sirve para cuantificar su degradación. Se puede calculara mediante la ecuación:

$$t_{1/2} = 0,693/k_t$$

Siendo  $k_t$  el coeficiente de degradación propio de cada pesticida. Se considera que un pesticida puede contaminar las aguas subterráneas cuando su vida media es superior a las 2-3 semanas.

El  $K_{oc}$  o coeficiente de adsorción de carbono orgánico es una medida de la distribución del compuesto entre el suelo y la fase líquida. Representa la capacidad del pesticida para ser retenido por la materia orgánica y la arcilla del suelo.

Empíricamente se han determinado valores umbral del índice GUS para clasificar a los pesticidas según lo indicado en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Clasificación de Pesticidas Según el Índice Gus

Valor GUS	Tipo pesticida	Potencial contaminante de acuíferos
> 2,8	Lixiviable	Alto
1,8-2,8	De transición	Medio
< 1,8	No lixiviable	Bajo

### Potencial de lixiviación

Desarrollado por Laskowski et al. (1982). Estima el potencial de lixiviación del pesticida hasta el momento de su degradación. Su utilidad es muy similar a la del GUS y se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$LP = (S \cdot t_{1/2}) / (Pv \cdot Koc)$$

En donde:

- **LP:** potencial de lixiviación (adimensional).
- **S:** solubilidad en agua (mg/l).
- **t<sub>1/2</sub>:** vida media (días).
- **Pv:** presión de vapor (Pa).
- **Koc:** coeficiente de adsorción (l/kg).

### Criterio USEPA/CDFA

La United States Environmental Protection Agency (USEPA) y el California Department of Food and Agriculture (CDFA) utilizan un criterio de clasificación desarrollado por Wilkerson y Kim (1986). El criterio utilizado consistía en clasificar como lixiviables a aquellos pesticidas con Koc con valores comprendidos entre 300 y 500 ml/g y vida media entre 15 y 21 días. CDFA asignó Valores Numéricos

Específicos (SNV) para determinar la frontera entre lixiviables y no lixiviables, quedando la clasificación tal y como indica la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Criterio Usepa/Cdfa de Clasificación de Pesticidas

Valor Koc	Valor $t_{1/2}$	Tipo de pesticida
$\leq 512$ ml/g	$\geq 11$ días	Lixiviable
$> 512$ ml/g	$< 11$ días	No lixiviable

Estos tres índices (GUS, potencial de lixiviación y criterio USEPA/CDFA) de estimación del potencial de lixiviación de pesticidas están basados en las características fisicoquímicas de los mismos y toman valores únicos para cada uno.

Por el contrario, factor de retardo tiene en cuenta tanto las propiedades del pesticida como las características del medio por donde se va a infiltrar, por lo que su valor varía según la sea el terreno donde se apliquen.

## **ANEXO C. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE MANERA INDIRECTA**

### **1.1. PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN**

#### **Procedimiento**

- 1) Se determina el peso, el diámetro y la altura del anillo de consolidación, que se va a utilizar en el ensayo
- 2) Se talla la muestra en el anillo de consolidación, utilizando una de las técnicas apropiadas para ello y evitando los cambios de humedad.
- 3) Se determina el peso del anillo con la muestra de suelo con su humedad natural
- 4) Se ensambla la muestra en el consolidómetro, con una piedra porosa saturada encima de la muestra y otra debajo.
- 5) Una vez ensamblada la muestra en el consolidómetro, se coloca el deformímetro en ceros, se inunda la muestra y se procede a la aplicación de los incrementos de carga, lo cual se hace de manera que cada carga sea más o menos el doble de la anterior. para este caso se tomó una carga inicial de  $0,25 \text{ Kg/cm}^2$  y otra de  $0,5 \text{ Kg/cm}^2$
- 6) Cada incremento de carga se deja generalmente 24 horas y durante ese tiempo se hacen lecturas de deformación continuamente así, a los 0.15 minutos, 0.25, 0.50, 1.00, 2.25, 4.00, 6.25, 9.00, 12.25, 16.00, 20.25, 16.00, 20.25, 25, 36, 49, 64, 81, 100 minutos. Estos tiempos pueden variar de acuerdo a las necesidades de cada prueba.

### **1.2. PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECÍFICA**

La gravedad específica o peso específico del suelo se define como la relación entre una masa de suelo exenta de poros y la masa ocupada por el mismo volumen de agua destilada

#### **Procedimiento**

- 1) Se pesa con su humedad natural, o seco al aire, no se debe secar al horno antes de la prueba, se desbaratan todos los grumos en un mortero.
- 2) Se mezcla el suelo con un poco de agua hasta formar una pasta uniforme, se lleva esta mezcla al dispensador mecánico, agregando agua hasta formar 200 cc.de suspensión aproximadamente y se dispersa por lo menos de 10 a 15 minutos.

- 3) Se transfiere toda la suspensión al matraz calibrado usando agua destilada para pasar todo el materia y completar  $\frac{3}{4}$  partes de su capacidad.
- 4) El matraz se lleva a una bomba de vacío para extraer el aire no disuelto. El matraz puede agitarse suavemente para facilitar la expulsión de aire
- 5) Se agrega agua destilada hasta aproximadamente 2 cm por debajo de la marca de aforo, dejándola escurrir lentamente por el cuello, para no incluir aire luego se aplica nuevamente al vacío, si es necesario , sino se agrega agua hasta enrasar. Se seca el cuello con papel absorbente y se seca también la parte inferior del matraz.
- 6) Se pesa el conjunto matraz+ agua + suelo enrasados y se registra el valor como  $W_{mas}$ .
- 7) Inmediatamente después de pesar se mide la temperatura en el centro del bulbo. Con este valor en la curva de calibración correspondiente al matraz utilizado, se encuentra el peso del matraz lleno de agua hasta la mara de enrase y se registra el valor como  $W_{ma}$ .
- 8) se vierte todo el contenido del matraz en un recipiente sin dejar perder nada de suelo, se lleva al horno y después de 24 horas se determina el peso de los sólidos  $W_s$ .

Para el caso de la arena, el ensayo de conductividad hidráulica se determinó con el permeámetro de cabeza variable ya que se sabe que la arena tiene una conductividad hidráulica baja.

### **Procedimiento**

1. Se determinan los parámetros correspondientes al permeámetro como son el diámetro interno de la bureta, área de la bureta graduada ( $a$ ), el peso del recipiente que va a contener la muestra, su diámetro y su longitud, con el fin de posteriormente determinar el área de la muestra ( $A$ ) y el peso unitario de la misma ( $\gamma$ )
2. Se coloca la muestra en el recipiente de ensayo,
3. Se instala en la parte superior del permeámetro un recipiente con agua y se procede a saturar las muestras
4. Se parte de un nivel inicial de agua  $h_1$  y registra el tiempo necesario para que el agua descienda del nivel  $h_1$  a otro nivel  $h_2$
5. Se repite el procedimiento mínimo dos veces, con el fin de calcular la permeabilidad promedio del suelo.
6. Se calcula la conductividad hidráulica con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{L * a}{A * (t_2 - t_1)} * \log \frac{h_2}{h_1}$$

**EJEMPLO:**

<b>RESULTADOS DE LABORATORIO PERMEAMETRO DE CABEZA VARIABLE</b>	
Diámetro interno del permeámetro <b>D</b> (cm)	1
Longitud de la muestra <b>L</b> (cm)	7,15
Área de la muestra <b>A</b>	8,55
Volumen de la muestra <b>V</b> (cm <sup>2</sup> )	61,15
área de la bureta <b>a</b>	0,5
<b>Mediciones</b>	
Carga inicial (h1)	35
carga final (h2)	15
Tiempo	6,38
Conductividad hidráulica <b>K</b> (cm/s)	5,54 E -02

## ANEXO D. MÉTODO ESTANDARIZADO PARA ANÁLISIS DE 2,4-D EN AGUA

**Principio del método:** las muestras de agua filtradas por milipore de 0.45µm, se inyectaron directas y diluidas entre 10 y 20 veces, según cayeran dentro de la curva de calibración (rango de la curva del 2,4-D entre 0.0 y 12 mg/L). Luego se aforan a un volumen exacto con agua grado HPLC y se lee en el cromatógrafo líquido HPLC detector UV-VIS.

Estándar certificado 2,4D: marca CHEMSERVICE, 99.0% pureza, lote: 401-92-A

Límite de detección del Método **LDM** = 0.024mg/L de 2,4-D

**Tabla 6.** Condiciones de operación del cromatógrafo

Equipo	Cromatógrafo líquido HEWELETT PACKARD 1100			
Estación de Datos	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.			
Temperatura de columna	25° C			
Vol. de Inyección	20 µL.			
Detector	UV-Vis			
Longitud de onda del detector	280 nm			
Fase móvil	Acetonitrilo-Ácido acético 4%. (40%: 60%)			
Modo isocrático	Tiempo (min.)	Acetonitrilo	Ácido acético 4%.	Flujo (mL/min.)
	10.0	40 %	60 %	1.0

## ANEXO E. PARÁMETROS DE COMPARACIÓN PARA CADA PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO

**Tabla 1.** Nivel de MO en suelo de clima medio (Silva, 2009)

Nivel	Bajo	Medio	Alto
%MO	<3	3 – 5	>5

**Tabla 2.** Clasificación de la conductividad hidráulica del suelo en ( $\text{cm.h}^{-1}$ ). Fuente: Soil Survey División Staff (1993).

CLASE	RANGO DE VALORES
Muy alta	0,01
Alta	0,001 - 0,01
Moderadamente alta	0,0001 - 0,001
Moderadamente baja	0,00001 - 0,0001
Baja	0,000001 - 0,00001
Muy baja	< 0,000001

**Tabla3.** Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH

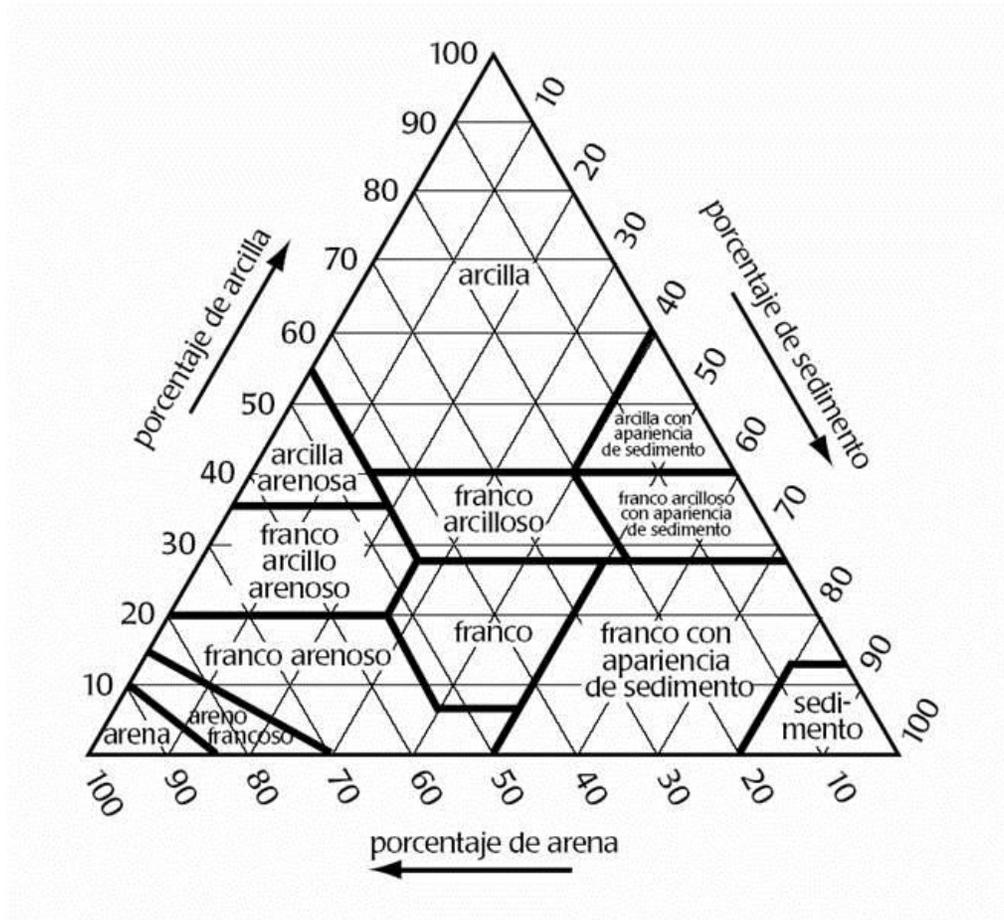
pH	Clasificación
4.0 – 4.5	Acidez extrema
4.5 – 5.0	Acidez muy fuerte
5.0 – 5.5	Acidez fuerte
5.5 – 6.0	Acidez media

6.0 – 6.5	Acidez suave
6.5 – 7.0	Acidez muy suave
7.0 – 8.0	Alcalinidad suave
8.0 – 8.5	Alcalinidad moderada
8.5 – 9.0	Alcalinidad moderada
9.0 – 9.5	Alcalinidad fuerte
9.5 – 10.0	Alcalinidad muy fuerte

**Tabla 4.** Interpretación de la CIC (Rioja, 2.002)

<b>Capacidad de intercambio Catiónico</b>	<b>Clasificación</b>
<6	Muy bajo
6-12	Bajo
12-25	Medio
25-40	Alto
>40	Muy alto

**Figura1.** Triángulo de textura de suelos por porcentajes cuantificados de componentes



**ANEXO F. CLASIFICACIÓN DE LA SOLUBILIDAD EN EL AGUA Y DE LA MOVILIDAD DE LOS PLAGUICIDAS SEGÚN SU COEFICIENTE DE ADSORCIÓN (FAO, 2000).**

**Tabla 4.** Clasificación de la solubilidad en el agua

<b>Solubilidad</b>	<b>Clasificación</b>
< 0,10	No es soluble
0,1–1	Ligeramente soluble
1–10	Moderadamente soluble
10–100	Fácilmente soluble
> 100	Sumamente soluble

**Tabla 5.** Clasificación de la movilidad

<b>Log K<sub>oc</sub></b>	<b>Clasificación</b>
< 1	Sumamente móvil
1–2	Móvil
2–3	Moderadamente móvil
3–4	Ligeramente móvil
4–5	Escasamente móvil
> 5	No es móvil

**ANEXO G. PRUEBAS ESTADISTICAS: ANOVA DE UN FACTOR. PRUEBA DE TUKEY PARA CADA PARAMETRO FISICO Y QUIMICO DE LOS SUELOS.**

**ANOVA**

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Arena	Inter-grupos	56,204	2	28,102	181303,052	,000
	Intra-grupos	,001	6	,000		
	Total	56,205	8			
Arcilla	Inter-grupos	80,484	2	40,242	307189,702	,000
	Intra-grupos	,001	6	,000		
	Total	80,484	8			
Limo	Inter-grupos	2,787	2	1,394	8990,716	,000
	Intra-grupos	,001	6	,000		
	Total	2,788	8			
Humedad	Inter-grupos	32,053	2	16,026	5594,692	,000
	Intra-grupos	,017	6	,003		
	Total	32,070	8			
DensAparente	Inter-grupos	,013	2	,006	425,526	,000
	Intra-grupos	,000	6	,000		
	Total	,013	8			
Carbono	Inter-grupos	3,374	2	1,687	588,151	,000
	Intra-grupos	,017	6	,003		
	Total	3,391	8			
Ph	Inter-grupos	,001	2	,001	28,000	,001
	Intra-grupos	,000	6	,000		
	Total	,002	8			
CIC	Inter-grupos	57,060	2	28,530	135,658	,000
	Intra-grupos	1,262	6	,210		
	Total	58,322	8			
Nitrogeno	Inter-grupos	,060	2	,030	91,372	,000
	Intra-grupos	,002	6	,000		
	Total	,062	8			
CondHidraulica	Inter-grupos	,000	2	,000	.	.
	Intra-grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			

**Pruebas post hoc**

**Comparaciones múltiples**

Variable dependiente	(I) Suelo	(J) Suelo	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	

Arena	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	1,309000(*)	,010165	,000	1,27781	1,34019
			El Carmen	-4,524000(*)	,010165	,000	-4,55519	-4,49281
		San Luis abajo	San Luis Arriba	-1,309000(*)	,010165	,000	-1,34019	-1,27781
			El Carmen	-5,833000(*)	,010165	,000	-5,86419	-5,80181
		El Carmen	San Luis Arriba	4,524000(*)	,010165	,000	4,49281	4,55519
		San Luis abajo	5,833000(*)	,010165	,000	5,80181	5,86419	
Arcilla	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	-1,175000(*)	,009345	,000	-1,20367	-1,14633
			El Carmen	5,674000(*)	,009345	,000	5,64533	5,70267
		San Luis abajo	San Luis Arriba	1,175000(*)	,009345	,000	1,14633	1,20367
			El Carmen	6,849000(*)	,009345	,000	6,82033	6,87767
		El Carmen	San Luis Arriba	-5,674000(*)	,009345	,000	-5,70267	-5,64533
		San Luis abajo	-6,849000(*)	,009345	,000	-6,87767	-6,82033	
Limo	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	1,295000(*)	,010165	,000	1,26381	1,32619
			El Carmen	,279000(*)	,010165	,000	,24781	,31019
		San Luis abajo	San Luis Arriba	-1,295000(*)	,010165	,000	-1,32619	-1,26381
			El Carmen	-1,016000(*)	,010165	,000	-1,04719	-,98481
		El Carmen	San Luis Arriba	-,279000(*)	,010165	,000	-,31019	-,24781
		San Luis abajo	1,016000(*)	,010165	,000	,98481	1,04719	
Humedad	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	-3,390667(*)	,043700	,000	-3,52475	-3,25658
			El Carmen	-4,416333(*)	,043700	,000	-4,55042	-4,28225
		San Luis abajo	San Luis Arriba	3,390667(*)	,043700	,000	3,25658	3,52475
			El Carmen	-1,025667(*)	,043700	,000	-1,15975	-,89158
		El Carmen	San Luis Arriba	4,416333(*)	,043700	,000	4,28225	4,55042
		San Luis abajo	1,025667(*)	,043700	,000	,89158	1,15975	
DensAparente	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	-,021333(*)	,003186	,001	-,03111	-,01156
			El Carmen	-,089000(*)	,003186	,000	-,09877	-,07923
		San Luis abajo	San Luis Arriba	,021333(*)	,003186	,001	,01156	,03111
			El Carmen	-,067667(*)	,003186	,000	-,07744	-,05789
		El Carmen	San Luis Arriba	,089000(*)	,003186	,000	,07923	,09877
		San Luis abajo	,067667(*)	,003186	,000	,05789	,07744	
Carbono	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	-,635133(*)	,043727	,000	-,76930	-,50097
			El Carmen	-1,494133(*)	,043727	,000	-1,62830	-1,35997
		San Luis abajo	San Luis Arriba	,635133(*)	,043727	,000	,50097	,76930
			El Carmen	-,859000(*)	,043727	,000	-,99317	-,72483
		El Carmen	San Luis Arriba	1,494133(*)	,043727	,000	1,35997	1,62830
		San Luis abajo	,859000(*)	,043727	,000	,72483	,99317	
pH	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	,010000	,004082	,109	-,00253	,02253
			El Carmen	-,020000(*)	,004082	,006	-,03253	-,00747
		San Luis abajo	San Luis Arriba	-,010000	,004082	,109	-,02253	,00253
			El Carmen	-,030000(*)	,004082	,001	-,04253	-,01747
		El Carmen	San Luis Arriba	,020000(*)	,004082	,006	,00747	,03253
		San Luis abajo	,030000(*)	,004082	,001	,01747	,04253	
CIC	HSD de Tukey	San Luis Arriba	San Luis abajo	,053667	,374441	,989	-1,09522	1,20256
			El Carmen	5,368000(*)	,374441	,000	4,21911	6,51689

Nitrogeno	HSD de Tukey	San Luis abajo	San Luis Arriba	-,053667	,374441	,989	-1,20256	1,09522
			El Carmen	5,314333(*)	,374441	,000	4,16544	6,46322
		El Carmen	San Luis Arriba	-5,368000(*)	,374441	,000	-6,51689	-4,21911
			San Luis abajo	-5,314333(*)	,374441	,000	-6,46322	-4,16544
		San Luis Arriba	San Luis abajo	,200333(*)	,014845	,000	,15479	,24588
			El Carmen	,090000(*)	,014845	,002	,04445	,13555
		San Luis abajo	San Luis Arriba	-,200333(*)	,014845	,000	-,24588	-,15479
			El Carmen	-,110333(*)	,014845	,001	-,15588	-,06479
		El Carmen	San Luis Arriba	-,090000(*)	,014845	,002	-,13555	-,04445
			San Luis abajo	,110333(*)	,014845	,001	,06479	,15588

\* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

## Subconjuntos homogéneos

### Arena

Suelo	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	1	
HSD de Tukey(a)	San Luis abajo	3	70,97000		
	San Luis Arriba	3		72,27900	
	El Carmen	3			76,80300
Sig.			1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	San Luis abajo	3	70,97000		
	San Luis Arriba	3		72,27900	
	El Carmen	3			76,80300
Sig.			1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

### Arcilla

Suelo	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	1	
HSD de Tukey(a)	El Carmen	3	19,20100		
	San Luis Arriba	3		24,87500	
	San Luis abajo	3			26,05000
Sig.			1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	El Carmen	3	19,20100		
	San Luis Arriba	3		24,87500	
	San Luis abajo	3			26,05000
Sig.			1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

### Limo

Suelo	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1

HSD Tukey(a)	de	San Luis abajo	3	2,98000			
		El Carmen	3		3,99600		
Duncan(a)		San Luis Arriba	3			4,27500	
		Sig.		1,000	1,000	1,000	
		San Luis abajo	3	2,98000			
		El Carmen	3		3,99600		
		San Luis Arriba	3			4,27500	
		Sig.		1,000	1,000	1,000	

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

#### Humedad

			N	Subconjunto para alfa = .05			
				2	3	1	
HSD Tukey(a)	de	San Luis Arriba	3	10,67200			
		San Luis abajo	3		14,06267		
Duncan(a)		El Carmen	3			15,08833	
		Sig.		1,000	1,000	1,000	
		San Luis Arriba	3	10,67200			
		San Luis abajo	3		14,06267		
		El Carmen	3			15,08833	
		Sig.		1,000	1,000	1,000	

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

#### DensAparente

			N	Subconjunto para alfa = .05			
				2	3	1	
HSD Tukey(a)	de	San Luis Arriba	3	,65667			
		San Luis abajo	3		,67800		
Duncan(a)		El Carmen	3			,74567	
		Sig.		1,000	1,000	1,000	
		San Luis Arriba	3	,65667			
		San Luis abajo	3		,67800		
		El Carmen	3			,74567	
		Sig.		1,000	1,000	1,000	

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

#### Carbono

			N	Subconjunto para alfa = .05		
				2	3	1
HSD Tukey(a)	de	San Luis Arriba	3	5,70927		
		San Luis abajo	3		6,34440	

Duncan(a)	El Carmen	3			7,20340
	Sig.		1,000	1,000	1,000
	San Luis Arriba	3	5,70927		
	San Luis abajo	3		6,34440	
	El Carmen	3			7,20340
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

#### pH

Suelo		N	Subconjunto para alfa = .05		
			2	3	1
HSD de Tukey(a)	San Luis abajo	3	5,06500		
	San Luis Arriba	3	5,07500		
	El Carmen	3		5,09500	
Duncan(a)	Sig.		,109	1,000	
	San Luis abajo	3	5,06500		
	San Luis Arriba	3		5,07500	
	El Carmen	3			5,09500
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

#### CIC

Suelo		N	Subconjunto para alfa = .05	
			2	1
HSD de Tukey(a)	El Carmen	3	54,46367	
	San Luis abajo	3		59,77800
	San Luis Arriba	3		59,83167
Duncan(a)	Sig.		1,000	,989
	El Carmen	3	54,46367	
	San Luis abajo	3		59,77800
	San Luis Arriba	3		59,83167
	Sig.		1,000	,891

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

#### Nitrogeno

Suelo		N	Subconjunto para alfa = .05		
			2	3	1
HSD de Tukey(a)	San Luis abajo	3	,98200		
	El Carmen	3		1,09233	
	San Luis Arriba	3			1,18233

Duncan(a)	Sig.		1,000	1,000	1,000
	San Luis abajo	3	,98200		
	El Carmen	3		1,09233	
	San Luis Arriba	3			1,18233
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

**ANEXO H. PRUEBAS ESTADISTICAS: CORRELACIONES DE PEARSON.  
PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS DE LOS SUELOS**

**Correlaciones**

		Arena	Arcilla	Limo	Humedad	Dens Aparente	Nitrogeno	Cond Hidraulica	MO	pH	CIC
Arena	Correlación de Pearson	1	-,999(**)	,508	,507	,899(**)	,267	-,564	,792(*)	,943(**)	-,964(**)
	Sig. (bilateral)		,000	,163	,164	,001	,488	,113	,011	,000	,000
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Arcilla	Correlación de Pearson	-,999(**)	1	-,460	-,553	-,921(**)	-,215	,608	-,824(**)	-,936(**)	,975(**)
	Sig. (bilateral)	,000		,212	,122	,000	,579	,082	,006	,000	,000
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Limo	Correlación de Pearson	,508	-,460	1	-,485	,086	,951(**)	,420	-,120	,577	-,301
	Sig. (bilateral)	,163	,212		,186	,825	,000	,260	,759	,104	,432
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Humedad	Correlación de Pearson	,507	-,553	-,485	1	,825(**)	-,684(*)	-,993(**)	,924(**)	,382	-,681(*)
	Sig. (bilateral)	,164	,122	,186		,006	,042	,000	,000	,311	,044
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Dens Aparente	Correlación de Pearson	,899(**)	-,921(**)	,086	,825(**)	1	-,166	-,865(**)	,972(**)	,800(**)	-,961(**)
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,825	,006		,670	,003	,000	,010	,000
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nitrogeno	Correlación de Pearson	,267	-,215	,951(**)	-,684(*)	-,166	1	,628	-,360	,339	-,026
	Sig. (bilateral)	,488	,579	,000	,042	,670		,070	,341	,372	,947
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
CondHidraulica	Correlación de Pearson	-,564	,608	,420	-,993(**)	-,865(**)	,628	1	-,948(**)	-,423	,730(*)
	Sig. (bilateral)	,113	,082	,260	,000	,003	,070		,000	,256	,025
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
MO	Correlación de Pearson	,792(*)	-,824(**)	-,120	,924(**)	,972(**)	-,360	-,948(**)	1	,658	-,900(**)
	Sig. (bilateral)	,011	,006	,759	,000	,000	,341	,000		,054	,001
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
pH	Correlación de Pearson	,943(**)	-,936(**)	,577	,382	,800(**)	,339	-,423	,658	1	-,877(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,104	,311	,010	,372	,256	,054		,002
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
CIC	Correlación de Pearson	-,964(**)	,975(**)	-,301	-,681(*)	-,961(**)	-,026	,730(*)	-,900(**)	-,877(**)	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,432	,044	,000	,947	,025	,001	,002	
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

## ANEXO I. PRUEBAS ESTADÍSTICAS. CORRELACIONES DE PEARSON Y SPEARMAN: MOVILIDAD, SUELO Y TIEMPO.

### Estadísticos descriptivos

	Media	Desviación típica	N
Movilidad	19,43253	35,849896	57
Suelo	2,50	1,126	72
Tiempo	3,50	1,720	72

### Correlaciones

		Movilidad	Suelo	Tiempo
Movilidad	Correlación de Pearson	1	-,334(*)	-,416(**)
	Sig. (bilateral)		,011	,001
	N	57	57	57
Suelo	Correlación de Pearson	-,334(*)	1	,000
	Sig. (bilateral)	,011		1,000
	N	57	72	72
Tiempo	Correlación de Pearson	-,416(**)	,000	1
	Sig. (bilateral)	,001	1,000	
	N	57	72	72

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

### Correlaciones no paramétricas

#### Correlaciones

			Movilidad	Suelo	Tiempo
Rho de Spearman	Movilidad	Coefficiente de correlación	1,000	-,344(**)	-,309(*)
		Sig. (bilateral)	.	,009	,019
		N	57	57	57
	Suelo	Coefficiente de correlación	-,344(**)	1,000	,000
		Sig. (bilateral)	,009	.	1,000
		N	57	72	72
	Tiempo	Coefficiente de correlación	-,309(*)	,000	1,000
		Sig. (bilateral)	,019	1,000	.
		N	57	72	72

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

**ANEXO J. PRUEBAS ESTADISTICAS. ANOVA DE UN FACTOR, PRUEBA DE DIFERENCIA SIGNIFICATIVA HONESTA (DSH) DE TUKEY EN CADA SUELO ESTUDIADO.**

**Movilidad del 2,4 D EN San Luis Arriba**

HSD de Tukey

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05			
		1	2	3	1
40 días	3	16,1433			
50 días	3	17,3800			
30 días	3	23,3833	23,3833		
10 días	3		26,8933		
20 días	3		29,8167	29,8167	
1 días	3				34,9467
Sig.		,086	,148		,327

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

**Movilidad del 2,4 D EN San Luis Abajo**

HSD de Tukey

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05					
		1	2	3	4	5	1
20 días	3	3,9467					
50 días	3	6,0200	6,0200				
30 días	3		9,4700	9,4700			
40 días	3			10,3867			
10 días	3				18,8667		
1 días	3					23,7467	
Sig.		,541	,111	,969	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

**Movilidad del 2,4 D en El Carmen**

HSD de Tukey

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		2	1
20 días	3	,0547	
40 días	3	,1100	
30 días	3	,1367	
1 días	3	,1853	
10 días	3	,1867	
50 días	3		10,0000
Sig.		,996	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

**Movilidad del 2,4-D en el Control (Arena)**

HSD de Tukey

Tiempo	N	Subconjunto para alfa =	
		2	1
50 dias	3	,7167	
40 dias	3	1,4067	
10 dias	3	1,7333	
30 dias	3	3,1533	
20 dias	3	15,0067	
1 dias	3		162,2700
Sig.		,392	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

**ANEXO K: PRUEBAS ESTADISTICAS. CORRELACIONES DE PEARSON. MOVILIDAD VS PARAMETROS DEL SUELO.**

		Movilidad	Suelo	Tiempo	Arena	Arcilla	Limos	Humedad	Dens Aparente	Carbono	MO	pH	CIC	Nitroge no	Conduc Hidrauli ca
Movilidad	Correlación de Pearson	1	-	-	,192	-,171	-,197	-,300(*)	,221	-,287(*)	-,287(*)	,234(*)	-,219	-,215	,240(*)
	Sig. (bilateral)		,345(**)	,375(**)	,106	,151	,098	,010	,062	,014	,014	,047	,065	,070	,042
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Suelo	Correlación de Pearson	-,345(**)	1	,000	-,643(**)	,586(**)	,666(**)	,915(**)	-,728(**)	,890(**)	,890(**)	-	,719(**)	,715(**)	-,769(**)
	Sig. (bilateral)	,003		1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Tiempo	Correlación de Pearson	-,375(**)	,000	1	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	Sig. (bilateral)	,001	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Arena	Correlación de Pearson	,192	-	,000	1	-	-	-,897(**)	,985(**)	-,911(**)	-	,979(**)	-	-	,965(**)
	Sig. (bilateral)	,106	,643(**)	1,000	,997(**)	,853(**)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Arcilla	Correlación de Pearson	-,171	,586(**)	,000	-,997(**)	1	,825(**)	,863(**)	-,970(**)	,876(**)	,876(**)	-	,976(**)	,926(**)	-,945(**)
	Sig. (bilateral)	,151	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Limos	Correlación de Pearson	-,197	,666(**)	,000	-,853(**)	,825(**)	1	,832(**)	-,919(**)	,893(**)	,893(**)	-	,909(**)	,973(**)	-,919(**)
	Sig. (bilateral)	,098	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Humedad	Correlación de Pearson	-,300(*)	,915(**)	,000	-,897(**)	,863(**)	,832(**)	1	-,938(**)	,992(**)	,992(**)	-	,935(**)	,910(**)	-,951(**)
	Sig. (bilateral)	,010	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
DensApar ente	Correlación de Pearson	,221	-	,000	,985(**)	-,970(**)	-,919(**)	-,938(**)	1	-,959(**)	-,959(**)	-	,999(**)	-,985(**)	,988(**)
	Sig. (bilateral)		,728(**)		,985(**)	,970(**)	,919(**)	,938(**)		,959(**)	,959(**)		,999(**)	,985(**)	,988(**)
	N		72		72	72	72	72		72	72		72	72	72

	Sig. (bilateral)	,062	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Carbono	Correlación de Pearson	-,287(*)	,890(**)	,000	-,911(**)	,876(**)	,893(**)	,992(**)	-,959(**)	1	1,000(**)	-	,955(**)	,950(**)	-,970(**)
	Sig. (bilateral)	,014	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
MO	Correlación de Pearson	-,287(*)	,890(**)	,000	-,911(**)	,876(**)	,893(**)	,992(**)	-,959(**)	1,000(**)	1	-	,955(**)	,950(**)	-,970(**)
	Sig. (bilateral)	,014	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
pH	Correlación de Pearson	,234(*)	-,761(**)	,000	,979(**)	-,960(**)	-,916(**)	-,954(**)	,999(**)	-,972(**)	-	1	-,998(**)	-,983(**)	-,991(**)
	Sig. (bilateral)	,047	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
CIC	Correlación de Pearson	-,219	,719(**)	,000	-,989(**)	,976(**)	,909(**)	,935(**)	-,999(**)	,955(**)	,955(**)	-	1	,980(**)	-,987(**)
	Sig. (bilateral)	,065	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Nitrogeno	Correlación de Pearson	-,215	,715(**)	,000	-,947(**)	,926(**)	,973(**)	,910(**)	-,985(**)	,950(**)	,950(**)	-	,980(**)	1	-,978(**)
	Sig. (bilateral)	,070	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
ConducHidraulica	Correlación de Pearson	,240(*)	-,769(**)	,000	,965(**)	-,945(**)	-,919(**)	-,951(**)	,988(**)	-,970(**)	-	,991(**)	-	-,978(**)	1
	Sig. (bilateral)	,042	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).