IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS CON POTENCIAL DE VERTIMIENTO DE AGROQUÍMICOS EN CUNDINAMARCA, A PARTIR DE LA MODELACIÓN POR MEDIO DEL SOFWARE MODFLOW

ELABORADO POR

SEBASTIÁN RÍOS CAMARGO

MATEO ALEJANDRO APONTE QUIROGA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.
2023

IDENTIFICACIÓN DE SUELOS CON POTENCIAL DE VERTIMIENTO DE AGROQUÍMICOS EN CUNDINAMARCA A PARTIR DE LA MODELACIÓN POR MEDIO DEL SOFWARE MODFLOW

ELABORADO POR

SEBASTIÁN RÍOS CAMARGO

MATEO ALEJANDRO APONTE QUIROGA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS AMBIENTALES EN MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN - INNOVACIÓN

DIRIGIDO POR:

MARTHA ISABEL MEJIA DE ALBA
Ingeniera Química Magíster en Ingeniería Ambiental

SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA PARA EL ESTUDIO Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL IECCA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTADO DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.
2023

AGRADECIMIENTOS

Finiquitar este proyecto de investigación solo fue posible gracias a la fortaleza y paciencia que día a día me brindó Dios; al apoyo y amor incondicional de mi madre, padre, hermanas y sobrinos que siempre estuvieron presentes de diversas formas en mi camino académico; y a mi compañero de trabajo de grado, Mateo, quien quedo junto a mí el primer día de la inducción y ahora casi seis años después acabamos juntos este proceso de pregrado.

Agradezco a Dios por darnos la fortaleza de llegar hasta aquí, fueron varios días de incertidumbre en alcanzar este logro, pero Él nos ayudó. Agradezco a mi familia que estuvo apoyándome en medio de las circunstancias más difíciles, me dieron aliento y contribuyeron a mi formación académica para proyectar el día de hoy el presente trabajo. Agradezco de manera intencional a mi compañero Sebastián, por ser de gran apoyo, mostrando persistencia, esfuerzo que se ve reflejado en el presente trabajo, es un gran honor graduarme junto a él. Agradezco a Anni Velandia, una persona de vital importancia para la culminación de este proyecto, fue mi respaldo y mi impulso para culminar este proceso con altibajos.

Por último, agradecemos a los docentes Martha Mejía de Alba, Cesar Giovanni Álvarez, Diego Alejandro Torres, María de los Ángeles Larrota, Miguel Cepeda y Nancy Leiva Gutiérrez que fueron parte de la construcción de este trabajo, por sus aportes y conocimientos que nutrieron de manera sustancial el desarrollo de nuestra tesis.

Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN **1**

2. ANTECEDENTES **2**

3. JUSTIFICACIÓN **3**

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN **4**

5. OBJETIVOS **7**

5.1 General **7**

5.2 Específicos **7**

6. MARCO **8**

6.1 Teórico Conceptual **8**

6.1.1 El suelo y su clasificación 8

6.1.2 Agroindustria y contaminación del suelo 10

6.1.3 Vertimiento al suelo 10

6.1.4 Parámetros para determinar áreas de exclusión a vertimiento ARnD-T 12

6.1.5 Conceptos básicos para el modelamiento 23

6.1.6 Agroquímicos 26

6.2 Normatividad aplicable **34**

7. METODOLOGÍA **48**

7.1. Fase I. Reconocimiento del suelo del departamento de Cundinamarca. **49**

7.1.1 Revisión, análisis y contraste de bases de datos e información vectorial relacionadas con la caracterización del suelo. 49

7.1.2 Compilación de la estratificación del suelo, textura, relación textural, y determinación de la conductividad hidráulica. 49

7.1.3 Depuración cartográfica de las áreas limitantes para el vertimiento de ARnD-T con base en los criterios técnicos ambientales y normativos. 49

7.2 Fase II. Espacialización geográfica del área objetivo en el departamento de Cundinamarca **49**

7.2.1. Identificación y agrupación espacial de las agroindustrias presentes en el departamento. 49

7.2.2 Cruce cartográfico entre las áreas que no poseen ninguna limitación técnica o ambiental para el vertimiento de ARnD-T con la información vectorial del suelo del departamento. 51

7.2.3 Reconocimiento y purga del suelo usando criterios de idoneidad para el vertimiento de ARnD-T, teniendo en cuenta sus características físicas. 51

7.*2.4 Unión de las zonas con mayor densidad de agroindustrias con los suelos del departamento con mayor idoneidad para el vertimiento de ARnD*-T. 53
7.3 Fase III. Modelación del contaminante 53
7.*3.1 Elección de los agroquímicos y establecimiento de los valores de concentración de entrada y salida del modelo* 53
7.3.2 *Desarrollo del modelo en ModelMuse (Modflow) y elecciones de los suelos con base en el modelado* 56
8. RESULTADOS 68
8.1 Resultados Fase I 68
8.1.1 Áreas protegidas declaradas por la Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca-CAR 69
8.1.2 Rondas hídricas de los cuerpos lóticos y lénticos de Cundinamarca. 70
8.1.3 Zona urbana y cabeceras municipales 71
8.1.4 Suelo con conflicto de uso 72
8.1.5 Clases Agrológicas 73
8.1.6 Páramos 75
8.1.7 Aguas subterráneas- acuíferos 76
8.1.8 Pendientes del terreno 77
8.1.9 Amenaza por inundación 79
8.1.10 Amenaza de movimientos en masa 80
8.1.11 Amenaza por incendios forestales 81
8.1.12 Amenaza por avenidas torrenciales 82
8.1.13 Fases UCS depurados según parámetros ambientales y normativos 83
8.2 Resultados Fase II 84
8.2.1 Clústeres de agroindustria en Cundinamarca 84
8.2.2 Posibles fases de las UCS idóneas para modelamiento de ARnD-T 85
8.2.3 Fases de las UCS idóneas para modelamiento de ARnD-T 86
8.2.4 Unión de las zonas con mayor densidad de agroindustrias con los suelos del departamento con mayor idoneidad para el vertimiento de ARnD-T 87
8.3 Resultados Fase III 88
7.3.1 Elección de los agroquímicos y establecimiento de los valores de concentración de entrada y salida del modelo. 88
7.3.2 Desarrollo del modelo en ModelMuse (Modflow) y elecciones de los suelos con base en el modelado. 88

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 114
10.1 Fase I 114
10.2 Fase II 115
10.3 Fase III 116
11. CONCLUSIONES 118
12. RECOMENDACIONES 120
13. BIBLIOGRAFÍA 122

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Distribución de productores agropecuarios en Cundinamarca por Provincias. 5
Ilustración 2. Conformación de las Unidades Cartográficas del Suelo..... 9
Ilustración 3. Identificación de los elementos constituyentes de la ronda hídrica (flecha roja) cuando el primero (flecha azul) es igual a 30 metros y el resto es hasta el límite de la envolvente de los tres componentes en sistemas: lóticos (izquierda) y lénticos (derecha) .. 15
Ilustración 4. Posición de la ZCIT durante el verano boreal (rojo) y el verano austral (azul) 21
Ilustración 5. Transporte si se produjera sólo por advección..... 24
Ilustración 6. Dispersión longitudinal, por amplitud de canales y transversal. 24
Ilustración 7. Estructura simplificada de la cadena productiva de los agroquímicos en Colombia 27
Ilustración 8. Pesticidas fosforados..... 30
Ilustración 9. Pesticidas clorados 30
Ilustración 10. Carbamatos insecticidas..... 30
Ilustración 11. Heterociclos nitrogenados..... 31
Ilustración 12. Arilmetilureas 31
Ilustración 13. Sales cuaternarias de heterociclos..... 31
Ilustración 14. Nitrilos 32
Ilustración 15. Fungicidas..... 32
Ilustración 16. Acaricidas y nematicidas 33
Ilustración 17. Nematicidas..... 33
Ilustración 18. Fases y actividades del proyecto. 48
Ilustración 19. Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) del sector agroindustrial. 50
Ilustración 20. Clúster de agroindustrias 51
Ilustración 21. Diagrama lógico de la purga de las UCS 53
Ilustración 22. Mapa de áreas protegidas del departamento de Cundinamarca. 69
Ilustración 23. Mapa rondas hídricas cuerpos lóticos y lénticos de Cundinamarca. 70
Ilustración 24. Mapa rondas hídricas cuerpos lóticos y lénticos de Cundinamarca. 71
Ilustración 25. Mapa conflicto de uso de suelo de Cundinamarca..... 72
Ilustración 26. Mapa de clases agrológicas del municipio de Cundinamarca. 74
Ilustración 27. Mapa de páramos del municipio de Cundinamarca. 75
Ilustración 28. Mapa de acuíferos en Cundinamarca. 76
Ilustración 29. Mapa de pendientes altas del municipio de Cundinamarca. 78
Ilustración 30. Mapa amenaza alta de inundación en Cundinamarca. 79
Ilustración 31. Mapa amenaza alta por movimientos en masa en Cundinamarca. 80
Ilustración 32. Mapa amenaza por incendios forestales en Cundinamarca. 81
Ilustración 33. Mapa amenaza avenidas torrenciales en Cundinamarca. 82
Ilustración 34. Mapa de polígonos no idóneos para vertimiento de ARnD-T 83
Ilustración 35. Mapa de clústeres de agroindustrias 84

Ilustración 36. Mapa de posibles UCS para modelar el vertimiento de ARnD-T en Cundinamarca. 85
Ilustración 37. Mapa UCS para modelar el vertimiento de ARnD-T, agroindustrias y clústeres. 87
Ilustración 38. Mapa de las fases de las UCS aptas para el vertimiento de ARnD-T (Malation). 112
Ilustración 39. Mapa de las fases de las UCS aptas para el vertimiento de ARnD-T (TRIPLE 15). 113

Índice de tablas

Tabla 1. Áreas protegidas declaradas por la CAR. 12
Tabla 2. Instrumentos de ordenamiento territorial según el número total de habitantes. ... 16
Tabla 3. Clases agrológicas del suelo. 17
Tabla 4. valor de la producción de la cadena de agroquímicos a nivel nacional 29
Tabla 5. valor de la producción de la cadena de agroquímicos a nivel nacional 34
Tabla 6. Agroquímicos escogidos 55
Tabla 7. Tabla resumen UCS idóneas para vertimiento 86
Tabla 8. Valores de concentración de los agroquímicos escogidos. 88
Tabla 9. Resumen de los aspectos más relevantes derivados de cada uno de los modelos en ModelMuse. 89
Tabla 10. Resumen de resultados de lapsos, concentraciones (en diferentes puntos cardinales) y graficas de los componentes más relevantes de las fases de las UCS modelados en ModelMuse (MODFLOW) y GW-CHART. 93
Tabla 11. Resumen de la selección de los componentes más aptos de las fases de las UCS. 109
Tabla 12. Área de ocupación de mayor a menor de los clústeres agroindustriales por municipio 115

Glosario de siglas y abreviaturas

AASHTO	Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales
ARD-T	Aguas Residuales Domesticas Tratadas
ARnD-T	Aguas Residuales no Domesticas Tratadas
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIIU	Clasificación Industrial Internacional Uniforme
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
ESRI	Enviromental Systems Research Institute
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudias Ambientales
IDIGER	Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático
IGAC	Instituto Cartográfico Agustín Codazzi
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
OC	Objetivos de calidad
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PIB	Producto Interno Bruto-
SIRAP	Sistema Regional de Áreas Protegidas
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación del Suelos
UCS	Unidades Cartográficas de Suelo
UNFPA	Fondo de Población de las Naciones Unidas
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo ha sido uno de los principales objetos de estudio y legislación en los últimos años a nivel nacional. La afectación de esta matriz ha sido tratada por organismos legislativos en busca de una solución que inhiba el desequilibrio fisicoquímico de su estructura interna, como también la regulación de las aguas subterráneas que se encuentren afectadas por este fenómeno.

Por ende, es necesario investigar la génesis de estos impactos, atribuidos mayormente a actividades económicas como la agricultura y la tecnificación de cultivos debido a la utilización de fertilizantes, antioxidantes y pesticidas, con el objetivo de optimizar las diferentes líneas productivas e incrementar la producción. Por tanto, la necesidad del sector agrícola por continuar con su desarrollo y dar abasto a la creciente demanda de alimentos y bienes como la producción de flores y fibras, de la sociedad actual, establece la obligación de crear alternativas de sostenibilidad del recurso suelo compatibilizando los procesos agroindustriales con el medio circundante.

Una de las alternativas para el cumplimiento de la sostenibilidad, se centra en el manejo de residuos líquidos resultante de los procesos agroindustriales en el tratamiento fitosanitario de alimentos y productos ornamentales; el cual, a su vez presenta protocolos de vertimiento, tratamiento y control de la contaminación generada, especialmente en la aspersión de agroquímicos. Es por eso que resulta pertinente proponer opciones en la deposición de efluentes con carga contaminante que no solo se limiten al marco hídrico, si no que pueda haber cabida para emplear la matriz del suelo, de manera racional, para lograr dicha sostenibilidad; manteniendo los criterios técnicos, normativos y económicos en aras de una buena gestión de dichos vertimientos, dando como resultado una armonía entre las necesidades productivas de la agroindustria y el uso racional del suelo bajo criterios ambientales.

Dado lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo general “identificar los tipos de suelos, a nivel Cundinamarca, con la capacidad y pertinencia de asimilación, conducción y dispersión para la disposición de vertimientos de aguas residuales de agroquímicos, a través del trabajo sinérgico de consulta bibliográfica y modelación, realizada por el software Processing Modflow”. Para su desarrollo se definieron las siguientes fases metodológicas:

a) Reconocimiento del suelo departamental, a través de información bibliográfica para la descripción de las propiedades físicas de las unidades cartográficas de suelo-UCS, así como la selección preliminar de aquellas unidades de suelo que presenten problemática a la hora de realizar un punto de descarga al suelo, mediante criterios ambientales, técnicos y normativos.

b) Espacialización geográfica del área objetivo, en la que se definan las zonas del departamento con la estratificación del suelo, texturas, representatividad de componentes de fases de las UCS necesario para poder realizar un vertimiento, en sinergia con las áreas que contienen una densidad considerable de agroindustrias a lo largo del territorio departamental.

c) Modelación de los agroquímicos en la matriz del suelo, por medio del Software Modflow, programa desarrollado por el Servicio Geológico de USA para simular el flujo de agua subterránea, y la evolución de los niveles en las condiciones de bombeo en el suelo, mostrando visual y gráficamente el comportamiento de la concentración a través de la grilla, y transporte por medio de la dispersión. Lo anterior, mediante la selección de tres tipos de agroquímicos frecuentes en la presente actividad económica, cuyas concentraciones, parámetros y clasificación difieren, con el fin de obtener variedad de resultados en el modelado de los suelos.

2. ANTECEDENTES

En Colombia, la disposición de vertimientos de Aguas Residuales Domésticas Tratadas-ARD-T al suelo está regulada, actualmente, por la Resolución 0699 de 2021, mientras que su homólogo contaminante, las Aguas Residuales no Domésticas Tratadas-ARnD-T, no poseen una herramienta normativa que reglamente las condiciones de las zonas donde puedan ser vertidas.

En el contexto nacional, la normatividad para el uso del suelo posee más de ochenta normas vigentes relacionadas de manera directa o indirecta con los usos del suelo. De ellas, se destacan dieciséis (16) a nivel general para recursos naturales, sesenta y uno (61) sobre manejo de residuos sólidos y ocho (8) puntuales sobre vertimientos (Muñoz & Aguirre, 2014).

En relación con los vertimientos, se detallan las siguientes normas: i) Ley 9 de 1979, enfocada en el saneamiento básico y dictando medidas sanitarias sobre suministro de agua, excretas y residuos sólidos; ii) Decreto 1594 de 1984, establece los usos del agua y los residuos líquidos; iii) Ley 99 de 1993, por el cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, encargado del reordenamiento ambiental de Colombia; iv) documento Conpes 3177 de 2002, en el que se detallan las acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales; v) Decreto 3100 de 2003, que establece las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos puntuales; vi) documento Conpes 3383 de 2005, que instaura el plan de desarrollo del sector acueducto y alcantarillado; vii) Decreto 3930 de 2010, reglamenta los usos del agua y los residuos sólidos; y viii) Decreto 2667 de 2013, presenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua, como receptor de vertimientos puntuales. (Sánchez y Holguín, 2013, como se citó en Muñoz & Aguirre, 2014).

Adicionalmente, es menester aludir al Decreto 1076 de 2015 en donde se compila las normas de carácter reglamentario que rigen al sector ambiente, incluido el vertido en el componente suelo. Es sobre esta norma que se modifica y adhieren las tasas retributivas para descargas de tipo ARD-T a través de la Resolución 0699 de 2021.

Los documentos desarrollados por la subdirección agrológica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC sobre los levantamientos generales de suelos para los diferentes departamentos de Colombia, serán el pilar de la investigación dado que con esta información se podrá reconocer aspectos inherentes al suelo (p. ej., el material parental, las asociaciones y los horizontes) que son objeto de análisis para el correcto desarrollo del presente estudio.

La investigación llevada a cabo por Planella, *La agroindustria en Colombia (una revisión y análisis bibliográfico),* en el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-IICA , en 1985, se enfoca en el reconocimiento de este sector económico en el país, gracias a que se abordan temas de relevancia sectorial (p. ej., la naturaleza y localización de las industrias agrícolas, y las normas y control de calidad) que le confieren al presente trabajo una herramienta de peso en el reconocimiento del agro nacional.

Asimismo, el trabajo desarrollado por Saavedra, Escobar y Lara, denominado *Modelación hidráulica y de calidad del agua para el tercio alto del humedal Jaboque*, para la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, en el año 2015, acopla el software Processing Modflow al contexto colombiano para obtener un resultado de modelado que se ajusta a la situación real de contaminación de un humedal (Saavedra, Escobar y Lara, 2015). Por ello, sus condiciones de ajuste comprenden un buen punto de partida para este documento.

3. JUSTIFICACIÓN

Recientemente, a nivel nacional se viene adelantando desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS la descripción técnica y estandarización de los valores límites máximos permisibles para el vertimiento de las ARDT hacia la matriz de suelo, a través de la Resolución 0699 del 2021, como ajuste de cumplimiento a la norma de transición plasmada en el artículo 2.2.3.3.11.1 del Decreto 1076 del 2015 y estableciendo las directrices para el cobro a usuarios productores de este tipo de vertimientos.

Por otro lado, actualmente, el MADS se encuentra en desarrollo técnico de la parametrización de las variables para el vertimiento al suelo de las ARnD-T, grupo en el cual se encuentra los vertimientos por agroquímicos, como forma de control en las disposiciones de contaminantes en el medio natural, como también en alternativas sostenibles para el manejo de aguas residuales de tipo industrial y otros, en el que no solo el medio afectado y de absorción sea

el recurso hídrico, sino también el suelo en su capacidad de conductividad e infiltración. No obstante, el vertimiento al suelo se ve limitado por diferentes factores en el que la capacidad de absorción del contaminante aumenta o disminuye conforme al área de vertido, la estructura y composición del terreno, las propiedades fisicoquímicas del suelo y variables como su profundidad efectiva y la conductividad hidráulica.

Por lo anterior, la legislación de disposición de vertimientos de este tipo (agroquímicos) y la incompatibilidad de algunos suelos a nivel nacional para cumplir a cabalidad los criterios de sostenibilidad en el ejercicio de la asimilación del contaminante, lleva al planteamiento de un mecanismo en el que el sector agroindustrial pueda disponer del recurso suelo y que este, a su vez, sea compatible para este tipo de vertimientos. Por tanto, es necesario identificar los principales suelos en Cundinamarca que presenten las características idóneas en función de la reglamentación que se viene trabajando en el país, en aras de un desarrollo sostenible y de tratamiento de contaminantes derivados del agro.

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El sector agrícola, en el marco industrial, es uno de los principales pilares de la economía de Colombia, lo cual se ve reflejado en su ocupación territorial y financiera en la nación; teniendo en cuenta la encuesta nacional agropecuaria, realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE en 2019, las plantaciones de tipo agroindustrial comprenden 2´186.389 hectáreas, siendo la mayor de las plantaciones en toda la actividad agrícola del país. Por otro lado, en términos económicos, el Producto Interno Bruto-PIB es definido por Bajo y Monés (2000) como la magnitud macroeconómica fundamental que mide el valor total de la corriente de bienes y servicios finales de una economía.

Londoño (1985) postula que el sector agrícola en Colombia ha sido la base y el impulso de su desarrollo económico al facilitar la mano de obra para los demás sectores, los alimentos para el sostenimiento de la fuerza de trabajo en toda la economía y parte de las materias primas utilizadas en la transformación, generando así el ingreso de divisas necesarias para importación de materias primas y bienes de capital. En Colombia, el PIB agropecuario tuvo un crecimiento de 3.3% durante el primer trimestre de 2021; el sector agropecuario acumuló cinco años consecutivos de variaciones anuales positivas en el PIB real del primer trimestre y un promedio aritmético del 4.5% (Portafolio, 2021).

Sin duda alguna, el sector agroindustrial, representa uno de los mayores contribuyentes a la economía nacional. Como se mencionó, su crecimiento no puede ser indiscriminado y, por el contrario, debe proyectarse con cuidado, pues al tratarse de un sector cuyo ciclo productivo

genera diferentes contaminantes, al estar en una etapa de aumento prolongado, demanda diferentes productos fitosanitarios para mantener su crecimiento económico. De esta manera, para poder satisfacer la demanda se necesita de una optimización de la oferta con el fin de responder a lo que requiere el país para este sector. Según Buitrago (2017), desde el año 2013, la producción de alimentos por la agricultura colombiana tuvo un incremento en más de 2.5 millones de toneladas y en el sector ganadero hubo un aumento en más de 500 mil toneladas de carne. Por otro lado, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO, Colombia, es el tercer país latinoamericano con mayor número de hectáreas cultivadas con frutales, gracias a la gran variedad de ecosistemas, se siembran más de 95 tipos de frutales y alrededor de 42 especies de hortalizas (Procolombia, 2016).

De manera específica, la agroindustria en el departamento de Cundinamarca está determinada por la producción de frutas, hortalizas, flores, lácteos y papa, aportando así un 4% al PIB nacional. Según la Gobernación de Cundinamarca (2020), las cinco provincias con más productores agropecuarios en el departamento para 2018 son Ubaté con 51.544 productores; Sumapaz con 48.295 productores, seguidas por Tequendama con 43.090, Almeidas con 34.550 y Oriente con 31.185 productores. Las tres provincias con menor número de productores agropecuarios son Sabana Occidente con 7.141 productores, Medina con 6.403 y Soacha con 1.250.



Ilustración 1. Distribución de productores agropecuarios en Cundinamarca por Provincias.
Fuente: Gobernación de Cundinamarca (2020)

Por otro lado, la calidad de los productos y el crecimiento del sector depende directamente de la salud de los cultivos, por lo que es necesario garantizar la protección de los alimentos

de cosecha, y combatir la presencia de diferentes agentes infecciosos para la siembra, como lo son las plagas, enfermedades y virus. Como ejemplo, en el caso del cultivo de tomate, según el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE (1990), sufre la amenaza de agentes como la araña roja (*Tetranychus urticae, T turkestani y T.ludeni*), la mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* y *Bemisia tabaci*) y algunos nemátodos, también algunas enfermedades propias del cultivo, como Oidiopsis (*Leveillula taurica*) y la bacteriosis de Mancha negra (*Fussarium solani*), por lo que se necesitan de mecanismos de prevención, protección, conservación y eliminación que se ven satisfechos en agroquímicos con función de plaguicidas.

Consecuentemente, usar los agroquímicos como solución de las problemáticas de los cultivos afecta directamente a la integridad de los ecosistemas y la salud ambiental. La contaminación a los componentes agua y suelo por vertimientos de este tipo, se evidencia en el componente hídrico al impedir una regulación óptima del ecosistema, alteración de servicios ecosistémicos, transporte de sustancias nocivas para la ictiofauna y los organismos vegetales acuáticos, y la elevación de los parámetros químicos en las propiedades del agua.

En el componente suelo, según la FAO (2010), el uso intensivo de agroquímicos crea un desequilibrio en la naturaleza, lo que hace que suceda un continuo desbalance en los ciclos biogeoquímicos. La inclusión de estos productos químicos en la industria agrícola contribuye, en gran magnitud, a la desaparición de especies que hacen posible la formación del suelo, trayendo consigo problemáticas como la infertilidad, y la posible contaminación de otros cultivos por medio de la filtración de estos productos en las raíces vegetales, a través de la escorrentía sub-superficial presentada en superficies permeables. Agudizando esta problemática, la capacidad de asimilación en los suelos varía dependiendo de sus características estructurales, por lo que la contaminación se acrecienta cuando el suelo receptor del vertimiento tiene poca capacidad de asimilación y de conductividad de efluentes.

De otro modo, el uso de este tipo de compuestos ocasiona diferentes presiones al ambiente en sus dinámicas relacionales en las que se encuentra el hombre y la naturaleza; los agroquímicos dan cabida al desorden en la salud ambiental y pública del país. Según Pérez, Ruiz, Schneider, Autino & Romanelli (2013), el uso masivo de plaguicidas sintéticos en la agricultura moderna ocasiona distintas problemáticas ambientales que han tenido un constante crecimiento desde la década del sesenta del siglo pasado hasta el punto de agudizarse actualmente.

Las presiones producidas por estos agentes contaminantes se reflejan en intoxicaciones producidas en trabajadores del sector agrícola, presencia de residuos plaguicidas en los alimentos y su persistencia en el ambiente, así como la ruptura de las estrategias de control biológico natural y el desarrollo de resistencia en las poblaciones de plagas, son de los principales efectos de lo agroquímicos que atentan contra la salud humana y el ambiente (Salamanca, 2020); en muchos casos, se presentan intoxicaciones agudas como un problema de salud, que aumenta los riesgos en la población y, por ende, generando ciertas afectaciones

en la salud de las personas, a nivel crónico o subcrónico, algunas veces indetectable, en el funcionamiento del sistema digestivo, respiratorio, circulatorio y a nivel dérmico, sobre todo en las zonas rurales donde se considera que se encuentra el mayor foco de exposición a este tipo de agentes.

Por consiguiente, es el mal manejo de estos compuestos lo que ocasiona impactos al medio ambiente y en la salud debido a que pueden llegar a organismos o sistemas que no son parte de su objetivo, lo que ha confluido a que se creen reglamentaciones que limiten su disposición, como forma de mitigación al daño que produce la aspersión de estos compuestos y, por ende, el estado debe generar estrategias para tratar este tipo de efluentes a través de diversos mecanismos sostenibles y controlables con el fin de promover un crecimiento sostenible del sector agroindustrial. Lo anterior, conlleva a cuestionarse ¿Qué tipo de suelos en Cundinamarca son adecuados y compatibles para el vertimiento de agroquímicos?

5. OBJETIVOS

5.1 General

1. Identificar los tipos de suelos, a nivel departamental, con la capacidad y pertinencia de asimilación, conducción y dispersión para la disposición de vertimientos de aguas residuales de agroquímicos, a través del trabajo sinérgico de consulta bibliográfica y modelación, realizada por el software Processing Modflow.

5.2 Específicos

1. Espacializar geográficamente las zonas que presenten una estratificación de suelo similar y las zonas con mayor densidad de actividad agrícola a través de herramientas cartográficas cuya información se encuentra en los principales portales nacionales.

2. Reconocer las principales variables de estudio de los vertimientos de agroquímicos que son de suma importancia para el modelamiento del efluente sobre el medio poroso, así como también aquellos factores estructurales del suelo que podrían afectar los resultados de la modelación del contaminante.

3. Brindar una documentación técnica que sirva como herramienta orientadora y de conocimiento para el sector agroindustrial en su ejercicio de disponer las aguas residuales no domésticas tratadas en la matriz del suelo en Cundinamarca, teniendo en cuenta la futura reglamentación y estandarización de límites máximos permisibles de estos vertimientos al suelo.

6. MARCO

6.1 Teórico Conceptual

6.1.1 El suelo y su clasificación

A continuación, se profundizará en los aspectos que servirán como contextualización para el correcto progreso de esta investigación.

Teniendo en cuenta la documentación técnica nacional, el suelo se define como el componente fundamental del ambiente natural, el cual está constituido por elementos bióticos y abióticos vitales para la sostenibilidad socioambiental; de igual manera, hace parte fundamental de los ciclos biogeoquímicos, en los cuales hay distribución, transporte, almacenamiento y transformación de algunos materiales (MADS, 2016). De esta manera, el suelo puede ser un elemento del ambiente con la capacidad de renovarse en un periodo de largo plazo y dependiendo de las condiciones en las cuales se le permita regenerarse.

El suelo, al ser una parte fundamental en muchos escenarios de estudio del medio natural, es una matriz multifuncional que constituye la base productiva del 90% de los alimentos humanos, del forraje y ofrece otros servicios que no solo se limitan a la producción (Brissio, 2005). Por tanto, se establecen servicios ecosistémicos asociados al suelo como: *soporte de la estructura socioeconómica* (industria, infraestructura, recreación y estética), *regulación del ciclo hidrológico*, evitando o minimizando eventos extremos, almacenando aguas lluvias y distribuyendo aguas cuenca abajo incluso en épocas sin lluvias, *soporte y mantenimiento de la biodiversidad*, *regulación del clima global y regional*, entre otros (MADS, 2016).

Por otro lado, el suelo, al ser un componente natural, es susceptible a las modificaciones antrópicas o de la naturaleza; es por esto que se habla de *calidad del suelo* definida como "la capacidad que tiene la matriz para funcionar dentro de los límites del ecosistema, para mantener sus capacidades de ofrecer los servicios anteriormente mencionados" (Doran y Parkin, 1994); así, los principales factores para afectar la Calidad del Suelo están relacionados con la Degradación física, química y biológica del mismo, atribuida mayormente a la intervención del ser humano, las cuales pueden ser: compactación, erosión, pérdida de nutrientes, salinización, acidificación, desequilibrio geoquímico, contaminación y pérdida de materia orgánica, degradación en la cual está presente el uso de agroquímicos sobre el medio poroso.

La información pertinente sobre el componente suelo está presentada bajo el nombre de diferentes entidades de alto prestigio académico e investigativo a nivel internacional y local. Una de ellas es el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-USDA, agencia estadounidense que tiene como misión ayudar a la gente para que asista a la tierra por medio

de planes de conservación y proporcionar consejos en el diseño, planeamiento, construcción, administración, operación, mantenimiento y evaluación de las prácticas voluntarias de conservación. Asimismo, también lleva a cabo estudios de suelos y el Inventario de Recursos Naturales en Estados Unidos para propiciar la correcta conservación y evaluación de la condición de la tierra (USDA, s.f.).

En relación con este trabajo, el USDA compone un fuerte pilar en la investigación y parametrización del suelo, debido a que presenta, en su publicación denominada "Keys to Soil Taxonomy", las claves taxonómicas necesarias para la clasificación de los suelos en una forma que se pueden utilizar fácilmente en el campo y, también, permite familiarizar a los usuarios de la taxonomía de suelos con los recientes cambios en el sistema de clasificación (USDA, s.f.), estableciendo un punto de partida para la consulta y posterior comparación de las cualidades cualitativas y cuantitativas de los diferentes horizontes establecidos por el IGAC y, así, poder generar una sinergia teórica del componente suelo.

Adicionalmente, un factor de importancia al establecer qué tipo de suelo es más idóneo para el fin de este proyecto se debe conocer la relevancia de la profundidad efectiva. Según Ibáñez (2010) la profundidad efectiva de un suelo es el espacio en el que las raíces de las plantas comunes pueden penetrar sin mayores obstáculos; asimismo, plantea que los suelos profundos son aquellos que tienen un metro o más hasta llegar a una capa limitante.

Finalmente, el mapa digital de suelos departamento de Cundinamarca (escala 1:100.000), desarrollado por el IGAC (2001), presenta propiedades que atañen a las UCS y sus fases, y asocia información del paisaje, el clima, tipo de relieve, litología, sus características físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas, su taxonomía y distribución espacial. Este shapefile tiene un total de 91 UCS que se disgregan en 183 fases y se reparten espacialmente en diferentes zonas del departamento cubriendo la totalidad de su extensión. Cabe resaltar que las unidades cartográficas del suelo se componen de fases y estas, a su vez, se subdividen según los tipos de componentes, estos componentes pueden ser consociaciones, asociaciones, complejos y grupos diferenciados de varios tipos de suelos (ilustración 3); en consecuencia, todas las fases presentan componentes taxonómicos (suelos) que representan un valor porcentual que refiere su participación dentro de esa fase, y también en la UCS. Pese a lo anterior, a nivel cartográfico no es posible determinar espacialmente cómo se encuentran repartidos esos componentes, por lo cual la unidad mínima que permite asimilar la capacidad de cada UCS son las fases que la conforman.

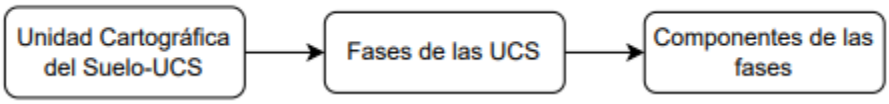


Ilustración 2. Conformación de las Unidades Cartográficas del Suelo
Fuente: autores (2023)

6.1.2 Agroindustria y contaminación del suelo

A nivel a nacional se encuentra la cartera del Ministerio de Ambiente la cual proporcionó la primera Política de Gestión Sostenible del Suelo, como también entidades adscritas y que trabajan en conjunto con el Ministerio, como lo son el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudias Ambientales-IDEAM y el IGAC cuya producción sobre la erosión en los suelos brinda criterios conceptuales fundamentales para la identificación de suelo, al igual que el Libro de Suelos y Tierras de Colombia, con el fin de contextualizar la información foránea a nivel nacional.

Estas entidades y otras como el Ministerio de Agricultura, articulan los estudios de suelo con la actividad económica objeto de estudio del presente trabajo: La agricultura y la tecnificación del cultivo ha sido de las actividades con mayor auge en todo el mundo, no obstante, dicha actividad muestra cuantificablemente su relevancia dependiendo el punto focal económico y productivo característico de cada país. Particularmente, se determina que, en Colombia, según la Encuesta Nacional Agropecuaria, hay una ocupación de uso de suelo de 4´617.116 Ha correspondiente al sector agrícola, y 2´186.389 ha del sector agroindustrial, por lo que son las actividades más destacadas, compartiendo los primeros lugares con el sector pecuario (DANE, 2019).

A partir de cifras cuantificables, la agricultura desarrollada en muchos países es una de las mayores responsables de la contaminación del agua; por ejemplo, el contaminante químico más común en los acuíferos subterráneos es el grupo de los nitratos procedentes de la actividad agrícola. Actualmente, esta actividad es responsable del vertido de grandes cantidades de agroquímicos, materia orgánica y sedimentos en los cuerpos de agua (FAO, 2018). De igual manera, esta actividad es la mayor productora de aguas residuales, por volumen, resultantes de los procesos de lavado de maquinaria o encharcamiento de los cultivos que fueron anteriormente tratados por los agroquímicos, a medida que ha aumentado el uso de plaguicidas sintéticos, fertilizantes y otros insumos.

6.1.3 Vertimiento al suelo

Por lo anterior, a nivel nacional, ha surgido la incógnita de cómo manejar los vertimientos de origen doméstico, pero también el de origen No doméstico con relación a la matriz de suelo. La Resolución 0699 de 2021 brinda las herramientas técnicas para poder entender el vertimiento al suelo de aguas residuales domésticas la cual fue fundamentada en la Política de Gestión Sostenible del Suelo, en la cual se establecen los principales pilares para el entendimiento del suelo como el componente fundamental del ambiente, natural y finito, conformado por minerales, aire , agua, materia orgánica, y la biota, desempeñando procesos

de tipo físico y biótico, cumpliendo funciones en la sociedad y el planeta, por lo que se necesita de una adecuada gestión y protección ambiental del mismo (MADS, 2016).

De este modo, la resolución presenta los componentes necesarios para establecer los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realicen vertimientos puntuales de ARD-T al suelo. El ámbito de aplicación es para Usuarios de vivienda rural dispersa, usuarios equiparables a usuarios de vivienda rural dispersa, usuarios diferentes a usuarios equiparables y a usuarios de vivienda rural dispersa. Estos parámetros son estipulados bajo una clasificación cuantitativa de las velocidades de infiltración que se pueda presentar en el suelo sujeto de estudio y vertimiento.

Al presente año, se encuentra en proceso la legislación para aquellos vertimientos que competen al sector agrícola y su tecnificación, considerando que es de las actividades más representativas en Colombia, las zonas de mayor densidad en actividades agrícolas, mayormente enfocadas en la agroindustria, ofrecen una perspectiva amplia para poder determinar el área de estudio. Según un reciente estudio producido por el IGAC, los mejores suelos para cultivar en Colombia suman 11´009.018 hectáreas, cifra que equivale al 9,6 por ciento de todo el territorio nacional. El ranking de departamentos con la mayor cantidad de hectáreas netas productivas lo lidera uno de los más extensos, Vichada, de la región Orinoquia, que cuenta con un área de más de 10 millones de hectáreas; este departamento alberga un total de 1´486.706 hectáreas con características especiales para recibir cultivos; es decir que el 14,8% del Vichada tiene los mejores suelos para producir en el país. Los siguientes lugares lo ocupan el departamento de Antioquia, Meta, Magdalena, Córdoba y Cesar; Cundinamarca se ubica en el séptimo puesto del ranking con una extensión de área productiva de 568.765 Ha y con una representatividad porcentual del 23.72% de toda la extensión del departamento que es de 2´398.439 ha (IGAC, 2022).

Por último, para reconocer los suelos compatibles a la próxima legislación y considerando el desarrollo del sector productivo en cuestión, es necesario contar con herramientas de modelamiento, pues el comportamiento de los contaminantes en el suelo está dado por la conocida ecuación de convección-dispersión **(1)**, la cual es una ecuación diferencial de segundo orden que depende de las condiciones y entorno iníciales. Varios modelos teóricos se han desarrollado a lo largo de los años para describir el transporte de sustancias químicas en el suelo. El flujo total de solutos disueltos en el suelo (Js) es el resultado del transporte combinado de los mecanismos de convección y la dispersión hidrodinámica, y pueden ser descritos por el modelo de convección y dispersión (Ávila, 2005 como se citó en Villazón et al., 2016).

$$Js = \ Dh * \frac{ac}{ax} + qC \qquad \textbf{(1)}$$

Dónde: Js=masa total del soluto transportado a través de una unidad de área transversal de suelo por unidad de tiempo; q= es el flujo del agua; Dh=el coeficiente hidrodinámico; y (ac/ax) = es la gradiente espacial del soluto.

6.1.4 Parámetros para determinar áreas de exclusión a vertimiento ARnD-T

Con el fin de realizar una adecuada depuración en las diferentes UCS presentes en el departamento de Cundinamarca, es necesario en primer instancia, reconocer las diferentes zonas que presentan algún tipo de obstrucción a la hora de realizar diferentes actividades antrópicas, debido a sus condiciones ecosistémicas, ambientales, climáticas, topográficas, edafológicas, hídricas, paisajística, urbanas, entre otras variables que son sujeto de consideración en el presente estudio, las cuales se explicarán a continuación a mayor detalle.

Áreas protegidas declaradas por la Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca-CAR

El concepto de área protegida fue definido en el Convenio sobre la Diversidad Biológica-CDB como un "espacio geográfico delimitado, que ha sido designado, regulado y administrado para el logro de un objetivo de conservación" (Organización de las Naciones Unidas-ONU, 1992). Con base en el anterior concepto y en la cartografía temática disponible en la página oficial de la CAR (Áreas protegidas declaradas por la CAR, s.f.), el departamento de Cundinamarca cuenta con 49 zonas, reconocidas por el Sistema Regional de Áreas Protegidas - SIRAP, de carácter nacional y regional que incluyen ecosistemas de páramos, humedales, bosques alto andinos, subandinos y tropicales; las áreas en cuestión se encuentran amparadas por diferentes actos administrativos que las exonera de posibles procesos de origen antropogénico, los cuales se evidencia en la tabla 1.

Tabla 1. Áreas protegidas declaradas por la CAR.

ÁREAS PROTEGIDAS DECLARADAS POR LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA-CAR				
ÁMBITO DE GESTIÓN	**N**	**NOMBRE**	**ACTO ADMINISTRATIVO**	**ÁREA (HA)**
NACIONAL	1	Bosque Oriental de Bogotá	Acuerdo INDERENA 30 de 1976 Resolución MINAGRICULTURA 76 de 1977 - Res.MADS 1766 de 2016 - Res.MADS 0685 de 2021	13,140.56
	2	Cuchilla de Peñas Blancas y de Subia	Resolución MINAMBIENTE 112 de 1994	5,886.31
	3	El Hortigal	Resolución MINAGRICULTURA 90 de 1988, Acuerdo INDERENA 56 de 1987	215.67
	4	Cuencas de los Ríos Blanco y Negro	Resolución MINAGRICULTURA 09 de 1983, Resolución MINAGRICULTURA 94 de 1992, Acuerdo INDERENA 28 de 1982	12,684.78
	5	La Mistela	Resolución 117/92 Min Agri, Acuerdo INDERENA 5 de 1992	94.27

ÁREAS PROTEGIDAS DECLARADAS POR LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA-CAR				
ÁMBITO DE GESTIÓN	**N**	**NOMBRE**	**ACTO ADMINISTRATIVO**	**ÁREA (HA)**
	6	Cerro Quininí	Resolución MINAGRICULTURA 122 de 1987, Acuerdo INDERENA 29 de 1987	1,932.06
	7	Cuenca Hidrográfica del río San Francisco	Acuerdo INDERENA 38 de 1981, Resolución MINAGRICULTURA 242 de 1983. Acuerdo Ministerio Agricultura 0062 de 1985 Resolución MAVDT 463 de 2005	2,872.21
	8	Cuenca Alta del Río Bogotá	Acuerdo INDERENA 30 de 1976 Resolución MINAGRICULTURA 76 de 1977 - Res.MADS 138 de 2014 - Res.MADS 456, 762 y 763 de 2014, 1070 y 2027 de 2015 y 1653 de 2016	93,792.33
	9	Sumapaz	Acuerdo 014 de 1977 INDERENA. Resolución No 153 de 1977 Ministerio de Agricultura. Oficio 20161125721	221,754.04
	10	Chingaza	Acuerdo 015 de 1977 INDERENA. Resolución No 154 de 1977 Ministerio de Agricultura. Oficio 20161125721	77,381.63
ÁREA PARCIAL				**429,753.87**
	11	Macizo El Tablazo	Acuerdo CAR 10 de 2021	16,485.77
	12	Cerro de Juaica	Acuerdo CAR 42 de 1999	883.18
	13	Nacimiento del Río Subachoque y pantano de Arce	Acuerdo CAR 17 de 1997	4,210.60
	14	Juaitoque	Acuerdo CAR 1 de 1998	399.23
	15	Nacimiento Quebradas Los Tiestos, La Chorrera y Hoya Fría	Acuerdo CAR 24 de 2000	645.99
	16	Cuchilla El Chuscal	Acuerdo CAR 18 de 1998	2,246,92
	17	Nacimiento Quebrada Honda y Calderitas	Resolución DNP 157 de 1992 - Acuerdo CAR 006 de 1992	486.91
	18	Pantano Redondo y Nacimiento del Río Susagua	Resolución DNP 24 de 1993 - Acuerdo CAR 017 de 1992	1,353.06
	19	El Robledal	Resolución DNP 64 de 1982, Acuerdo CAR 52 de 1981	400.76
	20	Pionono	Acuerdo CAR 17 de 1998, Acuerdo CAR 35 de 2016, Acuerdo CAR 048 de 2017	721.16
	21	El Sapo - San Rafael	Resolución DNP 92 de 1980, Acuerdo CAR 41 de 1996	1,034.90
	22	Laguna de Pedro Palo	Resolución DNP 38 de 1990, Acuerdo CAR 38 de 1989	124.48
	23	Páramos de Telecom y Merchán	Acuerdo CAR 15 de 1999	2,212.31
	24	Futuras Generaciones de Sibaté I y II	Acuerdo CAR 21 de 1997	143.29
	25	Quebradas Paramillo y Queceros	Acuerdo CAR 17 de 1993	248.85
	26	Peñas del Aserradero	Acuerdo CAR 005 de 2005	1,001.86
	27	Cerro el Tabor	Acuerdo CAR 03 de 2021 - Acuerdo CAR 38 de 2005	1,157,01
	28	Laguna La Herrera	Acuerdo 23 de 17 de julio de 2006	326.86
	29	Humedal Tierra Blanca	Acuerdo CAR 033 del 07 de septiembre de 2006	27.79
	30	Humedal de Neuta	Acuerdo CAR 037 de 2006	40.36
	31	RH Humedal el Juncal	Acuerdo CAR No 46 de 2006	57.15
	32	RH Humedal La Florida	Acuerdo CAR No 46 de 2006 - Acuerdo CAR 31 de 2008	104.17
	33	Humedal El Yulo	Acuerdo CAR 039 de 2006	100.72
	34	Laguna de Suesca	Acuerdo CAR 048 de 2006	588.90
	35	Páramo de Guerero	Acuerdo CAR 042 de 2006	1,917.65
	36	Distrito Conservación de Suelos de Tibaitatá	Acuerdo CAR 020 de noviembre 18/ 2008. Acuerdo CAR 20 de 2016	578.55
	37	Cuchilla de San Antonio y Laguna del Coco	Acuerdo CAR 023 de noviembre 18/2008 - Acuerdo CAR 011 de junio 9/2009 - Acuerdo CAR 009 de 2013 - Acuerdo CAR 19 de 2016	13,460.97
	38	Páramo de Guargua y Laguna Verde	Acuerdo CAR 022 de agosto 18/2009 - Acuerdo CAR 037 de 2016	41,145.86

ÁREAS PROTEGIDAS DECLARADAS POR LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA-CAR				
ÁMBITO DE GESTIÓN	**N**	**NOMBRE**	**ACTO ADMINISTRATIVO**	**ÁREA (HA)**
REGIONAL	39	Reserva Forestal Regional Productora del Norte de Bogotá	Acuerdo CAR 011 de Julio 19/2011	1,396.15
	40	Vista Hermosa de Monquentiva	Acuerdo CAR 027 de 2017, Memorando 20173146470	4,282.33
	41	Bosque seco de la vertiente oriental del Río Magdalena	Acuerdo CAR 20 del 17 de julio de 2018, Acuerdo CAR 08 del 21 de mayo de 2020	36,100.31
	42	Páramo de Rabanal	Acuerdo CAR 15 de 2018, Acuerdo CAR 9 de 1992, Resolución DNP 158 de 1992, Memorando 20143123997, Memorando 20173143038	2,578.43
	43	Cuchilla de El Choque	Acuerdo CAR 29 de 2018, Acuerdo CAR 38 de 1997	1,619.69
	44	Páramo El Frailejonal	Acuerdo CAR 43 de 2018, Acuerdo CAR 16 de 1999	1,793.81
	45	Terrenos comprendidos por los Humedales guali tres Esquinas y Lag	Acuerdo CAR 001 de 2014, Acuerdo CAR 11 de 2017	1,189.67
	46	Nacimiento Río Bogotá	Acuerdo CAR No 26 de 2019, Acuerdo CAR No 10 de 1982 y Resolución DNP 142 de 1982	1,354.31
	47	Complejo Lagunar Fúquene, Cucunubá y Palacios	Acuerdo CAR 18 del 11 Julio 2017	18,674.29
	48	Laguna del Cacique Guatavita y Cuchilla de Peña Blanca	Resolución DNP 174 de 1993, Acuerdo CAR 4 de 1993, Acuerdo CAR 21 de 2004, Acuerdo CAR 4 de 2021	661,613
	49	Sector Salto de Tequendama Cerro Manjui	Acuerdo CAR 43 de 1999 - Acuerdo CAR 017 de 2013 - Acuerdo CAR 016 de 2018 - Acuerdo CAR 044 de 2018 - Acuerdo CAR 015 de 2019	10,532.01
ÁREA PARCIAL				**172,286.88**
ÁREA TOTAL DE LAS ÁREAS PROTEGIDAS DECLARADAS POR LA CAR				**602,040.74**

Fuente: autores (2023) con base en Áreas protegidas declaradas por la CAR (s.f.).

Rondas hídricas de los cuerpos loticos y lenticos de Cundinamarca

El Plan Vial Departamental de Cundinamarca (2017) expone que "en el departamento de Cundinamarca las aguas superficiales escurren por diez cuencas hacia dos grandes regiones hidrográficas: la del río Magdalena y la del río Meta"; las cuencas en mención de la primera y segunda región corresponden al Magdalena central, Magdalena alto, ríos Bogotá, Negro, Carare, Suárez, y Sumapaz, y, de los ríos Negro, Upía y Humea, respectivamente. En concordancia, los cuerpos lóticos mencionados corresponden a los drenajes más representativos en el departamento. En contraparte, existen cursos de agua de origen natural de primer o segundo orden de caudal permanente o intermitente, llamados drenajes sencillos, los cuales se encuentran en gran número en Cundinamarca.

En relación, el cuidado de los cuerpos lóticos y lénticos es un foco de análisis del ambiente, dado que abarca aspectos naturales, sociales y económicos. Por ello, surge el término de ronda hídrica o buffer de protección, el cual es definido en el Decreto 1076 de 2015 como aquella área que "comprende la faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de los ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho. Así mismo, hará parte de la ronda hídrica el área de protección o conservación aferente"; la guía técnica de criterios para

el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia (2018) determina dos elementos constituyentes de la ronda hídrica establecidos en el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011: la faja paralela a los cuerpos de agua y el área de protección o conservación aferente (ilustración 3).

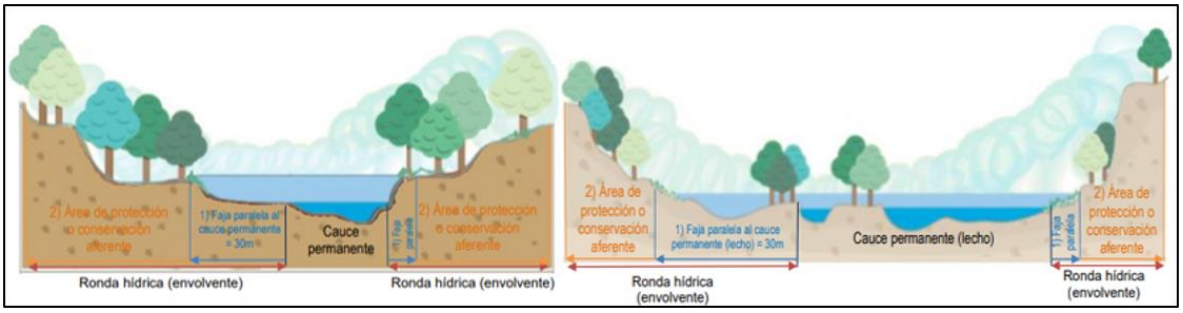


Ilustración 3. Identificación de los elementos constituyentes de la ronda hídrica (flecha roja) cuando el primero (flecha azul) es igual a 30 metros y el resto es hasta el límite de la envolvente de los tres componentes en sistemas: lóticos (izquierda) y lénticos (derecha)
Fuente: Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia (2018)

La definición anterior le confiere un carácter ambiguo al término de ronda hídrica, que dependerá de la naturaleza del cuerpo y de sus condiciones in situ para poder ser definido espacialmente.

Zona urbana y cabeceras municipales

La Ley 1454 de 2011 define al ordenamiento territorial como un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político administrativa del Estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial, entendido este como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia, de modo que cada porción de superficie de tierra posee características propias que la hacen acreedora de una idoneidad para desarrollar diferentes actividades dentro de su territorio; en consecuencia, una herramienta que permite un eficiente control y uso de los recursos locales son las divisiones político administrativas. En Colombia, existen diferentes aspectos que permiten fragmentar el territorio; sin embargo, las que conciernen a este trabajo académico son las porciones que se diferencian con base en la magnitud de su extensión y la dinámica climática que presentan, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL (2017) Colombia

está dividida en 31 departamentos y estos, a su vez, en municipios (1.097), corregimientos departamentales (20), distritos especiales (5) y el distrito capital de Bogotá.

De acuerdo con la Gobernación de Cundinamarca (2018), el departamento cuenta con 116 municipios y dentro de su extensión, aunque con excepciones normativas, se ubica la capital del país. Estas entidades territoriales poseen instrumentos técnicos y normativos de planeación y gestión del territorio sustentados en el ordenamiento territorial que adoptan diferentes nombres conforme a la población total. (tabla 2).

Tabla 2. Instrumentos de ordenamiento territorial según el número total de habitantes.

TÍTULO	SIGLA	CANTIDAD DE HABITANTES
Plan de Ordenamiento Territorial	POT	> 100,000
Plan Básico de Ordenamiento Territorial	PBOT	30,000 y 100,000
Esquema de Ordenamiento Territorial	EOT	< 30,000

Fuente: adaptación de la Ley 388 de 1997.

Un factor común que comparten los tres tipos de instrumentos es que presentan dentro de su espacio áreas especializadas llamadas zonas urbanas, las cuales cuentan con "infraestructura vial, red primaria de todos los servicios públicos domiciliarios y aptitud urbanística" (IGAC, 2003), es decir, ofrecen saneamiento y salubridad mínimos que los convierten en un foco habitacional que magnifica continuamente su densidad poblacional debido a los continuos procesos de inmigración de las zonas rurales a los centros poblados. Lo descrito anteriormente, presenta un reto ambiental dado que debe existir un equilibrio entre el crecimiento humano y el medio natural, siendo menester conservar la mayor cantidad posible de servicios ecosistémicos para garantizar un desarrollo holístico.

Suelo con conflicto de uso

Rico et al. (2014) postula que "el término uso -del suelo- hace referencia a los tipos de cobertura desarrollados por el hombre, como la agricultura, la ganadería, el uso urbano o recreativo. Las condiciones socioeconómicas y culturales de un núcleo poblacional son las que determinan las formas de aprovechamiento de los recursos básicos del territorio y, a su vez, estos recursos influyen directamente en la sociedad que hace uso de ello". Esta definición establece el punto de partida para el análisis de las zonas que presentan una dificultad para realizar el vertimiento de ARnD-T puesto que la naturaleza del suelo es una limitante, y una descarga de este tipo de contaminantes puede ocasionar un nuevo conflicto del uso, esto teniendo en cuenta lo sustentado por el IGAC (2012) que expone un modelo donde se involucra a la oferta ambiental, la demanda ambiental y los conflictos de uso del territorio, siendo "el conflicto es el resultado de la comparación entre la oferta que nos brinda el territorio y el uso que actualmente se da al mismo". la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales-ICDE (2013)

Clases Agrológicas

Dentro del marco de la depuración, otro de los criterios a tener en cuenta para reconocer el área de estudio son las clases agrológicas, las cuales darán elementos importantes en términos de características del terreno y del mismo suelo, puesto que allí se encuentra la aptitud y el manejo ambiental necesario en un área específica. A partir de ello, este parámetro presenta una categorización de unidades cartográficas teniendo en cuenta sus riesgos y limitaciones.

Citando lo conceptuado por el IGAC (2021) respecto a la clasificación de las tierras por su capacidad de uso y a nivel normativo por la Resolución 2965 de 1995 del Ministerio de Ambiente (1995), en la cual se definen los avalúos de la reforma agraria, se evidencia la descripción de ocho diferentes tipos de suelos según su agrología, los cuales se presentan en la tabla 3:

Tabla 3. Clases agrológicas del suelo.

CLASE AGROLÓGICA	DESCRIPCIÓN
CLASE 1	Pendientes menores al 3%, son suelos bien drenados sin peligro de inundaciones, permeabilidad lenta a moderada y moderadamente rápida, nivel de fertilidad moderado a alto. Son suelos aptos para una amplia diversidad de cultivos transitorios y perennes.
CLASE 2	Pendientes inferiores al 12%. Tienen drenaje natural bueno a moderado o imperfecto, presentan encharcamientos no mayores a 1 a 2 días, con nivel de fertilidad moderado, moderadamente alto a alto. Requieren prácticas de manejo más cuidadosas que los suelos de clase I.
CLASE 3	Presentan pendientes que no excedan del 25%, inundaciones hasta por un máximo de 30 días acumulados por año. Retención de agua baja, mediana, alta o muy alta. Nivel de fertilidad alto a muy bajo. Requiere prácticas de manejo y conservación de aplicación rigurosa; control de erosión y de agua, drenajes, fertilización, recuperación de áreas salinas o salino sódicas.
CLASE 4	Pendientes similares a la Clase III, tienen drenaje natural desde extensivo hasta pobremente drenados, Requiere prácticas de manejo y conservación más rigurosas y algo difíciles de aplicar.
CLASE 5	Suelos de relieve plano, con pendientes inferiores al 3%, excesivamente pedregosos, retención de agua excesiva a muy baja. Su uso está limitado principalmente a pastos, bosques o núcleos de árboles y de vida silvestre.
CLASE 6	Las pendientes serán del 25 a 60%, encharcamiento hasta de 90 días acumulados por año, son suelos con aptitud especial para pastoreo con buen manejo de potreros o, cultivos permanentes y bosques. Se pueden encontrar sectores limitados, en donde es posible explotarlos con cultivos limpios de subsistencia.
CLASE 7	Relieve similar a las de la clase VI, presentan encharcamientos de hasta 120 días, retención de agua excesiva a muy baja. Su uso se limita principalmente a la vegetación forestal y áreas de pendientes menos abruptas, a potreros con muy cuidadoso manejo.
CLASE 8	Suelos con las más severas limitaciones; corresponden generalmente a pendientes muy escarpadas y excesiva pedregosidad y rocosidad; muy superficiales, sin planos, son improductivos. Presentan inundaciones por más de 8 meses en el año, salino sódico o rocosos.

Fuente: adaptación del IGAC (2021) y Resolución 2695 de 1995.

Páramos

El páramo es un ecosistema presente en regiones tropicales de alta montaña. Para el caso puntual, Colombia cuenta con un área de páramos de, aproximadamente, 1´443.400 ha según el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2007). Es de aclararse la relevancia de este ecosistema debido a la regulación hídrica que realizan, siendo este su principal servicio ecosistémico; ese potencial se relaciona directamente con la alta retención de agua que presenta su vegetación.

A nivel nacional, Colombia presenta una normatividad rigurosa y específica para la preservación de este ecosistema. En Cundinamarca traduce la principal fuente de agua para la población, así como también uno de los filtros naturales en la potabilización del recurso hídrico. El departamento cuenta con 5 complejos de páramos, intervenidos por la Región Administrativa de Planificación Especial, los cuales son: Altiplano Cundiboyacense, Rabanal y Río Bogotá, Cruz verde- Sumapaz Chingaza y Guerrero, según la información presentada en el shapefile de páramos de la Gobernación de Cundinamarca (2017).

La normatividad a nivel nacional construye dos leyes que amparan el ecosistema de páramos, donde se especifican los criterios para la intervención antrópica de estas zonas, así como la reglamentación para su conservación. De esta manera, son estos instrumentos jurídicos los que determinan la inviabilidad de disponer vertimientos de ARnD-T al suelo en estas zonas, puesto que hacen parte de las áreas protegidas en Colombia. La ley 1930 de 2018 del Ministerio de Ambiente, especifica los instrumentos para la gestión integral y la protección de los páramos, donde se ratifican como áreas protegidas que requieren ser administradas bajo criterios ambientales sostenibles.

La otra normatividad se asocia a la Ley de Páramos, en la cual establece que las actividades agropecuarias de alto impacto deben ser reemplazadas progresivamente por otras de bajo impacto, con el fin de proteger los páramos y sus funciones ecosistémicas. Adicionalmente, se puede citar el Decreto 2372 de 2010 el cual reglamenta el Sistema Nacional de Áreas Protegidas en cual hacen conformación los complejos de páramos en el departamento de Cundinamarca.

Aguas subterráneas

Como bien es sabido, las aguas subterráneas hacen parte del ciclo hidrológico, mediante la filtración de agua por las precipitaciones o fuentes superficiales interconectadas, estas aguas se encuentran en acuíferos, que son formaciones geológicas con características porosas y permeables, que transmiten y almacenan aguas subterráneas, lo que funciona como servicio ecosistémico de aprovisionamiento para la sociedad, en la captación de agua a través de instrumentos como los aljibes, pozos profundos, adecuación de manantiales, entre otros, lo

que resulta de mayor importancia debido a que representan más del 95% del agua disponible de todos los continentes e islas y son esenciales para el mantenimiento de caudales de base de los ríos, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS (2023).

En concreto, el departamento de Cundinamarca cuenta con un sistema variado de acuíferos que alimentan la hidrografía del territorio y de las cuencas que lo componen. Según el shapefile del Estudio Nacional del Agua (2014), el sistema de acuíferos en el departamento está caracterizado por:

•SAM 4.9 Colombia-Dolores
•SAM 1.2 Mariquita- Doradal-Salgar
•SAM 2.2. Purificación-Saldaña
•SAM 4.6 Sabana de Bogotá
•SAM 4.10 Sabana de Bogotá/Tunja
•SAM 4.5 Ubaté-Chiquinquirá
•SAM 3.1 Valle del Cauca

Las aguas subterráneas se expanden por todo el oeste y centro del departamento, siendo una amplia área para la conservación y la preservación. El Decreto 1541 de 1978 del Ministerio de Agricultura (1978), que reglamenta el uso de aguas superficiales y subterráneas, establece que, a fin de prevenir la contaminación y deterioro de aguas subterráneas a causa de actividades que no tengan por objeto el aprovechamiento de aguas, como explotación de minas, trabajos de avenamiento, depósitos de basuras o de materiales contaminantes (dentro de los cuales se pueden encontrar lo vertimientos), se desarrollen mecanismos de coordinación con las entidades competentes para otorgar concesiones, de tal suerte que se puedan prever las obligaciones relacionadas con la preservación del recurso hídrico.

Por otro lado, se encuentra la Ley 99 de 1993 del Ministerio de Ambiente (1993) la cual menciona que la utilización directa o indirecta del agua y del suelo, para introducir o arrojar desechos o desperdicios agrícolas (agroquímicos), mineros o industriales, aguas servidas o de cualquier orden y sustancias nocivas que sean resultado de actividades antrópicas, o actividades económicas, sean o no lucrativas, se sujetan al pago de tasas retributivas por las consecuencias negativas de estas actividades.

Pendiente del terreno

Para la construcción de criterios para la depuración del área es necesario tener en cuenta la pendiente, pues es el grado de inclinación del terreno la que va a influir en la capacidad del terreno para absorber el vertimiento de tal manera que se transporte horizontal y verticalmente en la matriz suelo, aparte de la textura, la porosidad efectiva y la compactación, la inclinación del terreno permitirá o no que el vertimiento se infiltre.

Según la Universidad de Coruña (2005), la permanencia estática del agua en el terreno favorece la infiltración, ya que se da tiempo para que el agua se infiltre; por ello, algunos factores que eviten esa permanencia de agua en forma de detención superficial en el terreno perjudicarán a la infiltración. La pendiente del terreno favorece el tránsito del agua caída en forma de Escorrentía Superficial; a mayor pendiente menor tiempo de tránsito superficial del agua y menor permanencia de agua en el terreno. De igual manera, la vegetación favorece la retención del agua, lo que aumenta el tiempo de permanencia del agua en el terreno y, en consecuencia, la infiltración.

La pendiente del terreno es inversamente proporcional a la infiltración, entre más llana sea la zona (menor pendiente), mayor será el tiempo ocupado del agua en el terreno y, por ende, mayor posibilidad de transportarse en el espacio poroso del suelo, condicionado por la textura del suelo, en términos de porcentajes de arcilla y arenas. Si el grado de inclinación del terreno aumenta, el agua durará menos tiempo en un área determinada y tendrá menos posibilidad de fluir dentro del espacio poroso.

En primer lugar, la determinación de estos valores de pendiente se fundamenta en las bases científicas de la pendiente simple de Zúñiga (2010), en el que propone que las pendientes ligeras van de 3-8% y moderada de 9-15%, y que considera que a partir del 15% la inclinación se considera fuerte.

El segundo tiene que ver con las UCS determinadas por IGAC (2001) en el levantamiento general de suelos del departamento de Cundinamarca, el cual en sus atributos contiene la descripción e interpretación de su génesis, características físicas, químicas, mineralógicas, taxonomía y distribución, paisaje y sus pendientes, dando un rango de porcentaje en el cual, junto con sus demás características mencionadas, establecen el valor promedio límite para considerar una pendiente de 12% como baja o moderadamente llana, puesto que a través del relieve se conoce el comportamiento de la unidad cartográfica, por ejemplo, las terrazas y los vallecitos coluvio-aluviales en sus características presentan una pendiente del 1-7%. Así, se establece una relación entre el tipo de relieve y la pendiente, en donde, el relieve poco montañoso contiene pendientes relativamente bajas.

Amenaza por fenómenos naturales

Con base en Urrea (s.f) la Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT es un sistema meteorológico similar a una banda que se encuentra rodeando al Ecuador, aproximadamente entre 30°N y 30°S, donde se juntan los vientos Alisios provenientes del Noreste y Sureste formándose como resultado un área de fuerte inestabilidad convectiva, por ende, la ZCIT se muestra decisiva en la caracterización de las diferentes condiciones de tiempo y clima en diversas áreas de la Región Tropical. Como es evidente en la imagen 6, Colombia se encuentra inmersa en el área de influencia de la ZCIT haciendo que el comportamiento climatológico que presenta el país obedezca a este condicionante; así mismo, los cambios en los fenómenos meteorológicos: aumento o disminución de la precipitación (dependiendo de la zona geográfica), la variación del nivel del mar, el retroceso de los glaciares y el acrecentamiento de los eventos climáticos extremos (p. ej., olas de calor y frío, ciclones, sequías y lluvias torrenciales), direccionan el clima de Colombia a eventos de cambio climático que se traducen, finalmente, en una amenaza para el ser humano.

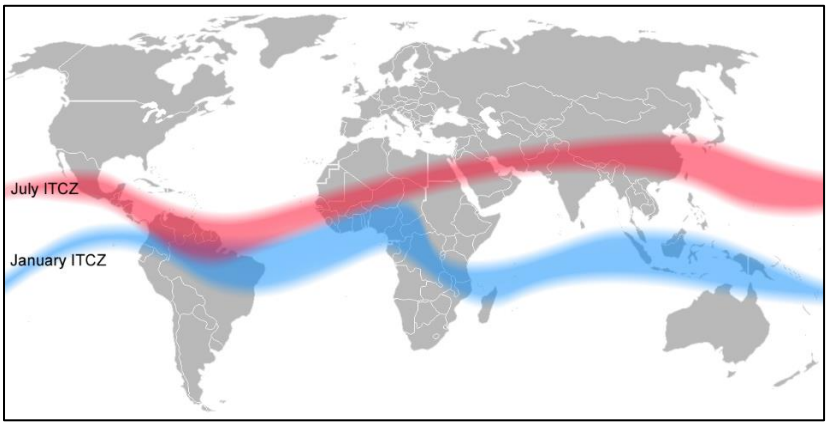


Ilustración 4. Posición de la ZCIT durante el verano boreal (rojo) y el verano austral (azul)
Fuente: Mats Halldin, dominio público, internet.

Cardona et al. (2004) expone una categoría de desastres menores presentes en Colombia, los cuales son los "fenómenos persistentes como deslizamientos, avalanchas, inundaciones, incendios forestales, sequías que pueden ser el resultado de procesos socio-naturales asociados con el deterioro ambiental, también con terremotos, huracanes y erupciones volcánicas de menor escala". En función de lo mencionado y de la información vectorial disponible, para poder determinar la influencia de los siniestros en Cundinamarca, el presente trabajo se centrará, principalmente, en las áreas susceptibles a las amenazas altas de: inundación, movimientos en masa, incendio forestal y avenida torrencial, las cuales se expondrán a continuación.

- ***Amenaza por inundación***

La Gobernación de Cundinamarca (s.f.) declara que el 62.3% de la población cundinamarquesa está expuesta a inundaciones o avalanchas. Dicha estimación se estableció a partir de la herramienta "Índice Municipal de Riesgo de Desastres", usado por el Departamento Nacional de Planeación-DNP. La principal causa de este fenómeno es el aumento de las precipitaciones debido a la variabilidad climática, ocasionando un aumento en el volumen de las fuentes hídricas, que superan la capacidad que tienen estas fuentes de almacenamiento y de transporte. Esto se atribuye a la inadecuada disposición de residuos sólidos y escombros en los cauces de los ríos y quebradas, ocasionando que se obstruyan los cursos de agua (Gobernación de Cundinamarca, s.f.).

- ***Amenaza por movimientos en masa***

La integración de las condiciones propias que conforman los espacios geográficos en los que habitamos (p. ej., la geografía, el clima, la orografía, la geología, la geomorfología y los usos del suelo) pueden confluir en amenazas y fenómenos de todo tipo; de acuerdo con la Gobernación de Cundinamarca (s.f.) "los procesos de inestabilidad de laderas son eventos con una alta recurrencia en el país y el departamento de Cundinamarca no es ajeno a esta realidad"; por ende, el grado de exposición de los cundinamarqueses a los eventos de movilización ladera abajo de suelo y/o roca hacen de este fenómeno un punto a evaluar, debido a que al aumentar las condiciones particulares a las que se encuentra sometido el material térreo podrían desembocar en el acrecentamiento de la problemática.

El Servicio Geológico Colombiano (2016) presenta un mapa temático referente a la amenaza relativa por movimientos en masa (escala 1:100.000), dividiendo el territorio de Cundinamarca en tres categorías, alto, medio y bajo.

- ***Amenaza por incendios forestales***

Los incendios forestales son riesgos atribuidos a la cobertura boscosa, sumado a la variabilidad por incremento en las temperaturas, efectos del cambio climático y que afectan notablemente al departamento, con el denominado fenómeno del niño, conforme comentarios de la Gobernación de Cundinamarca. Según el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático-IDIGER (2023) es el fuego de origen natural o antrópico que se extiende sin control, cuyo combustible principalmente es la vegetación o materia orgánica, el cual ocasiona impactos tanto en los ecosistemas, como a nivel climático, económico y social.

Este factor es de suma relevancia dentro del proceso de filtración de áreas para la modelación. La amenaza por incendios resulta de una suma de determinantes que ocasionan dicho fenómeno, como lo son la topografía del terreno, el tiempo atmosférico y el combustible; así, en zonas cuya topografía sean de pendiente creciente, con aumentos progresivos en la temperatura y con especies forestales de tamaño considerable, serán escenarios favorables para que una zona sea vulnerable a este tipo de eventos. De manera fáctica, estas zonas propensas a incendios resultan poco indicadas para el vertimiento al suelo, puesto que al ocurrir este siniestro, habrá generación de erosión, pérdida de nutrientes traducida en la pérdida de la capa orgánica del suelo, alteración de la vegetación y con ello los cambios en las propiedades del suelo, las cuales causan disminución en las tasas de infiltración, disponibilidad de agua y aumento de la escorrentía; de esta manera la absorción de agua en suelos afectados por incendios se vería alterada notablemente.

- ***Amenaza por avenidas torrenciales***

Las avenidas torrenciales son crecidas repentinas ocasionadas por fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente. Según el Instituto de Gestión del riesgo y cambio climático (2023), estas crecientes se caracterizan por ser acompañadas por flujo de sedimentos de acuerdo con las condiciones de cada cuenca, las principales causas son lluvias frecuentes, altas pendientes (cauces de montaña), pérdida de la cobertura vegetal, aporte de lodo, tierra, bloques, escombros, residuos sólidos, domésticos, sismo, rompimientos de presa y represamiento

6.1.5 Conceptos básicos para el modelamiento

De acuerdo con la capacitación realizada de los programas para el modelamiento de vertimiento de agroquímicos al suelo, con el fin de entender su comportamiento y los factores que influyen en su funcionamiento, es necesario presentar los siguientes conceptos:

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se define como la capacidad del suelo para transportar el agua hacia sus perfiles inferiores, esta propiedad física es indicador de la estabilidad de la estructura y el grado de compactación del suelo, según Castellanos (2000); esto, teniendo en cuenta que el agua fluye en el suelo debido a varios tipos de fuerzas como son: gravedad, ascenso capilar y ósmosis. Asimismo, una baja conductividad hidráulica puede ser originada por un bajo contenido de materia orgánica aunado a un alto contenido de sodio,

particularmente en suelos arcillosos, pues entre mayor porcentaje haya de sodio, menor será la conductividad, debido a la acción degradante del sodio a la estructura del suelo, alterando así la capacidad del transporte del fluido a través de la matriz.

Advección

Sánchez (2008) expone que la advección es el arrastre de la sustancia contaminante por el agua. Si sólo existiera este proceso, el contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada. La advección simplemente transporta las sustancias contaminantes, como se muestra en la siguiente ilustración.

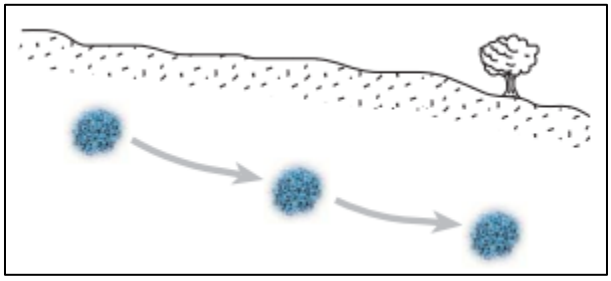


Ilustración 5. Transporte si se produjera sólo por advección.
Fuente: Sánchez (2008)

Dispersión mecánica

Teniendo en cuenta lo investigado por Sánchez (2008), la dispersión mecánica se produce gracias al movimiento del fluido a través del medio poroso; a su vez, se produce teniendo en cuenta el sentido de flujo (longitudinal), puesto que las moléculas que encuentran caminos más tortuosos se retrasan, y lateralmente (trasversal), dada a la bifurcación de los caminos que encuentra el fluido. A continuación, se muestra la siguiente ilustración evidenciando este método.

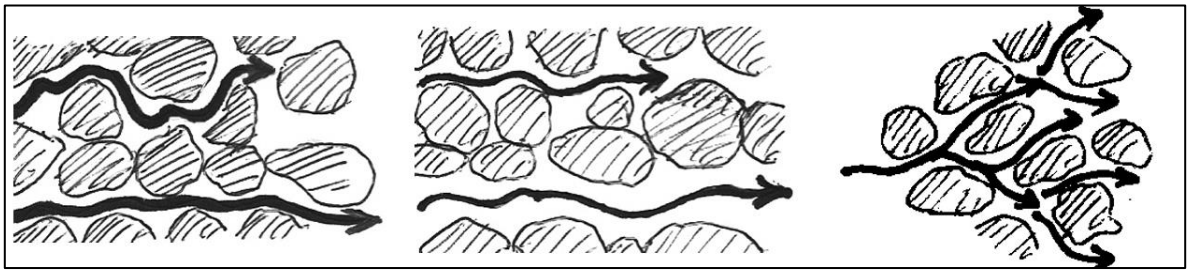


Ilustración 6. Dispersión longitudinal, por amplitud de canales y transversal.
Fuente*:* Sánchez (2008)

ModelMuse

Según Gidahatari (2022) ModelMuse es la plataforma de pre y postprocesamiento también desarrollada por la USGS que implementa Modflow. Dicha plataforma tiene una alta presentación debido su diseño por objetos que optimiza la conceptualización de condiciones de bordes y otros elementos del modelo, disminuyendo el tiempo de construcción del mismo.

MODFLOW

El manual de modelamiento Modflow instaura al software como un programa que efectúa el modelamiento de agua subterránea por el método de diferencias finitas, siendo originalmente diseñado solamente como un modelo de flujo de agua subterránea; sin embargo, las actualizaciones le permitieron convertirse en una estructura modular donde varios paquetes similares son agrupados y, así, ser capaz de simular el flujo de agua subterránea en dos o tres dimensiones. Los procedimientos de entrada han sido diseñados de tal manera que cada tipo de dato de entrada al modelo pueda ser almacenada y leída desde archivos separados externos. La salida de los resultados del modelo es flexible ya que el usuario puede seleccionar cuales datos se mostrarán en la salida, la frecuencia de impresión de resultados y algunos datos acerca del formato de datos de salida. Modflow está escrito en el lenguaje de programación Fortran 90, cuyo método radica en dividir un programa en piezas o subrutinas, por tanto, cada paquete consiste en múltiples subrutinas. El programa principal llama a varias subrutinas de los paquetes secuencialmente para simular el flujo de agua subterránea.

MT3DS

Bedekar et. al. (2016) expone las capacidades y características de esta familia de programas de modelado de aguas subterráneas de diferencias finitas, siendo algunos de los factores más relevantes el trasporte de solutos considerando las reacciones entre el soluto y el componente hidrogeológico; a su vez, permite modelar el trasporte dentro de arroyos y lagos, incluyendo el intercambio de solutos con agua subterránea conectando y encaminar el soluto a través de material seco. Es común que estos modelos se encuentren asociados con programas como MODFLOW o Visual MODFLOW.

GWChart

Teniendo en cuenta lo mencionado por Winston (2020), GWChart es un programa para crear gráficos especializados utilizados en estudios de aguas subterráneas. Hay siete tipos

principales de gráficos creados con GW_Chart: gráficas de calibración, parcelas de presupuesto de agua, hidrogramas, parcelas en el lago, diagramas de tubería, presupuesto de agua celular y presupuesto agrícolas.

6.1.6 Agroquímicos

Generalidades y clasificación de los agroquímicos

La población y la cantidad de alimento disponible para suplir sus necesidades se encuentran estrechamente ligadas, es decir, existe una relación directamente proporcional entre ambas variables, a mayor número de personas más comida se necesita. De acuerdo con Bloom (2020) "el mundo tardó más de 50.000 años en llegar a albergar a 1.000 millones de habitantes. Desde 1960 hemos añadido sucesivos miles de millones cada una o dos décadas. En 1960 había en el mundo 3.000 millones de personas; en 2000, 6.000 millones y, según proyecciones de las Naciones Unidas, llegado 2017 habrá más de 9.000 millones de habitantes", acorde a esto, el Fondo de Población de las Naciones Unidas-UNFPA (2023) detalla que en noviembre de 2022, la población mundial rebasó el umbral de los 8.000 millones de personas. Por lo anterior, es lógico suponer que la magnitud de los alimentos debe acrecentarse en igual medida, sin embargo, no todos los suelos poseen condiciones idóneas para su cultivo y, adicionalmente, su localización espacial no es uniforme en todo el mundo; en consecuencia, es lógico buscar una manera de adaptar y/o potencializar todas aquellas zonas disponibles para realizar esta tarea agrícola.

En concordancia, ya que la agricultura utiliza conocimientos, herramientas y habilidades humanas que se encuentran limitadas por el progreso y crecimiento de la época en la que se desarrollaron, es lógico inferir que actualmente existen diferentes formas de mejorar el rendimiento en la producción de cultivos y por consecuencia aumentar la oferta de productos agrícolas. La FAO (s.f.) expone un proceso general de la producción de cultivos: a) *preparación del terreno*, donde se busca proporcionar a las plantas un suelo en las mejores condiciones (con la mayor cantidad de nutrientes) que permita la germinación de la semilla y establecimiento del cultivo. Para esto, es común el uso de técnicas como la escarda (o eliminación de malas hierbas), la quema de rastrojo y volteo, empero, estas técnicas no son sostenibles a largo plazo y necesitan de una gran cantidad de mano de obra para finiquitarlas; ahora bien, existen formas alternas que permiten obtener resultados similares para la preparación del suelo con un menor esfuerzo, usando métodos químicos como el uso de fertilizantes para nutrir el terreno (p. ej., agregando nitrógeno) y matando a las hierbas malas con un agente de acción selectiva; b) *cosecha*, existen dos tipos de cosechas, la manual que tiende a ser lenta y con herramientas simples (p. ej., hoces y cuchillos), y la mecanizada la cual usa máquinas de pequeña, mediana y gran escala que hacen más eficiente el subproceso y disminuyen las perdidas postcosecha; y c) *postcosecha y valor agregado*, encargado de

subprocesos como el descascarillado, la molienda, el envasado, el transporte, el almacenamiento y la comercialización.

Con base en lo anterior, la presencia de productos químicos se ve en las dos primeras etapas del proceso general de la producción de cultivos planteado por la FAO, ya sea de manera directa o indirecta. Por un lado, en la preparación del terreno se hace mención a los agentes de acción selectivo para eliminar mala hierba, lo que indica el uso de un tipo de un agroquímico (en este caso, un herbicida) enfocado en la maleza; asimismo, se habla de nutrir el suelo para lo cual también es posible aplicar un fertilizante de origen químico. Por otra parte, en la sección de cosecha se deduce que hay más factores que afectan la implantación del cultivo (no solamente se limita al método de cosecha), lo que trae a colación el uso de agroquímicos que se encarguen del control de poblaciones de plagas y enfermedades.

Guzmán et al. (2016) postula que "los agroquímicos son sustancias de uso común en las actividades agrícolas para favorecer y mejorar el desarrollo de cultivos e incrementar la producción. Para el caso concreto de Colombia, el DNP (s.f.) expone que "la cadena productiva de agroquímicos comprende cuatro actividades: la producción de productos intermedios para fertilizantes, la de abonos y fertilizantes, la elaboración de plaguicidas, y de herbicidas y reguladores biológicos", en conformidad, se podría sintetizar que en Colombia la industria de agroquímicos se focaliza en producir los productos químicos derivados de las anteriores actividades.

A continuación, se abordará la descripción y estructura de la cadena productiva de los agroquímicos en Colombia, usando como referente lo descrito por el DNP (s.f), clasificando la cadena de agroquímicos en cuatros eslabones cuya característica principal son los procesos de síntesis y formulación (ilustración 9). Esta sección abordará una síntesis de los agroquímicos como los abonos y fertilizantes y el de plaguicidas, este último enfocado en los herbicidas, plaguicidas y reguladores biológicos.

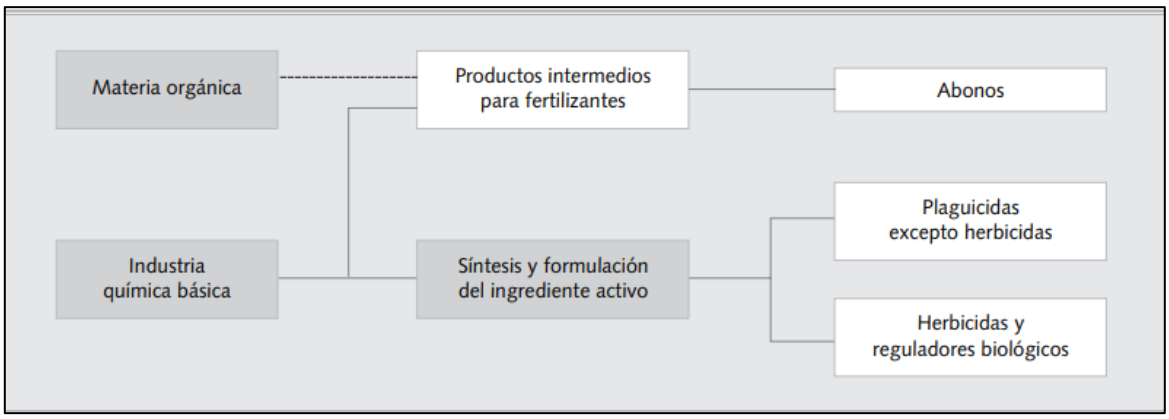


Ilustración 7. Estructura simplificada de la cadena productiva de los agroquímicos en Colombia
Fuente: Departamento Nacional de Planeación-DNP (s.f.)

- Proceso productivo de abonos y fertilizantes

De acuerdo con el DNP (s.f.) la mayoría de los abonos y fertilizantes producidos corresponden a la categoría de fertilizantes compuestos NPK (Los elementos principales requeridos para el crecimiento de las plantas son nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), los cuales se denominan elementos mayores o ingredientes activos), los cuales contienen mezclas en diferentes grados de los tres elementos. Entre esos se encuentran el calcio, el magnesio, el azufre, el hierro, el boro y el zinc, En contraparte, existen los fertilizantes simples los cuales son abonos que se elaboran con un solo de los nutrientes. La participación de ingrediente activo en los fertilizantes compuestos no supera el 30% de la mezcla, el resto está constituido por material de relleno, diluyentes o tierras preparadas; adicionalmente, los elementos básicos quedan integrados en un solo gránulo, a lo que se le denomina fertilizante en mezcla química.

- Proceso productivo de plaguicidas

La Organización Mundial de la Salud-OMS (1992) define plaguicida como una sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir, destruir o controlar cualquier plaga, incluidos vectores de enfermedades humanas o de animales, las especies no deseadas de plantas o animales que causan perjurio o que intervienen de cualquier forma en la producción, elaboración, almacenamiento, transporte o comercialización de alimentos, productos agrícolas, maderas y sus productos o alimentos para animales, o que pueden administrarse a los animales para combatir insectos, arácnidos u otras plagas en o sobre sus cuerpos. El termino incluye sustancias reguladoras del crecimiento de plantas, defoliantes, desecantes, agentes para reducir la densidad de frutas o para evitar la caída prematura de la fruta y las sustancias aplicadas a los cultivos antes o después de la cosecha para proteger el producto del deterioro durante el almacenamientos y transporte (DNP, s.f.).

El DNP (s.f.) postula que las etapas en el proceso de fabricación de plaguicidas son las siguientes: **a)** *síntesis del ingrediente activo,* se centra en la producción de aquellas sustancias que le dan forma de acción al plaguicida, siendo sustancias químicas activas con un amplio espectro de estructuras moleculares. En Colombia se sintetizan cuatro ingredientes activos: Mancozeb, Diuron, 2,4 D Esteres y Propanil; **b)** *Formulación*, consiste en mezclar el ingrediente activo con otros elementos, estas sustancias cumplen un rol de vehículo adoptando el término de excipiente, el cual permite obtener en distintas formas el producto final confiriéndole más eficiencia en su uso permitiendo regular su concentración que se relaciona con la forma en que será aplicado. Adicionalmente, existen otros ingredientes en la mezcla final del plaguicida los cuales pueden ser solventes o productos destinados a mejorar la asimilación p. ej., para formulaciones secas están el talco, sílice, cal, yeso y arcilla, mientras que para las formulaciones húmedas se encuentran el xileno, ciclohexano y aceites derivados del petróleo.

En la tabla 4 se puede detallar el valor de producción en fábrica de los eslabones de los agroquímicos en Colombia en términos monetarios y su participación porcentual.

Tabla 4. valor de la producción de la cadena de agroquímicos a nivel nacional.

ESLABÓN	PRODUCTOS EN FABRICA	
	VALOR ($ MILLONES)	PARTICIPACIÓN (%)
Productos intermedios para fertilizantes	25.454	2,05
Abonos	347.111	27,92
Plaguicidas excepto herbicidas	565.193	45,46
Herbicidas y reguladores biológicos	305.434	24,57
Total cadena	1.243.192	100,00

Fuente: autores (2023) con base en el Departamento Nacional de Planeación-DNP (s.f.)

Composición y caracterización interna de los agroquímicos

En primer lugar, es de notarse que la industria agroquímica se divide en fertilizantes y plaguicidas, según Tejedor (s.f), siendo los fertilizantes basados fundamentalmente en productos inorgánicos (amoniaco, nitrato de amonio y sulfato de amonio) aunque incluyen productos orgánicos como la urea. En cuanto a los plaguicidas, se clasifican en insecticidas, herbicidas, fungicidas, acaricidas y nematicidas. El plaguicida orgánico con mayor antigüedad es el DDT (diclorodifeniltricoloetano) que fue sintetizado por Müller en 1939, ganando así el premio Nobel en 1948.

A partir de la clasificación de los plaguicidas, podemos encontrar su aplicación de acuerdo a su objetivo de control y familias químicas, explicada por Tejedor (s.f):

1. **INSECTICIDAS.** Como su nombre lo indica, destruyen plagas de insectos tales como escarabajos, moscas, pulgones, saltamontes, entre otros destructores. Desde el punto de vista químico se categorizan a partir de sus características químicas de la siguiente manera:

    - Compuestos orgánicos fosforados (fosfatos, fosfonatos, tiofosfatos y tiofosfonatos)
    - Compuestos clorados
    - Insecticidas naturales
    - Carbamatos
    - Nitroderivados

La estructura química de los insecticidas fosforados es la siguiente:

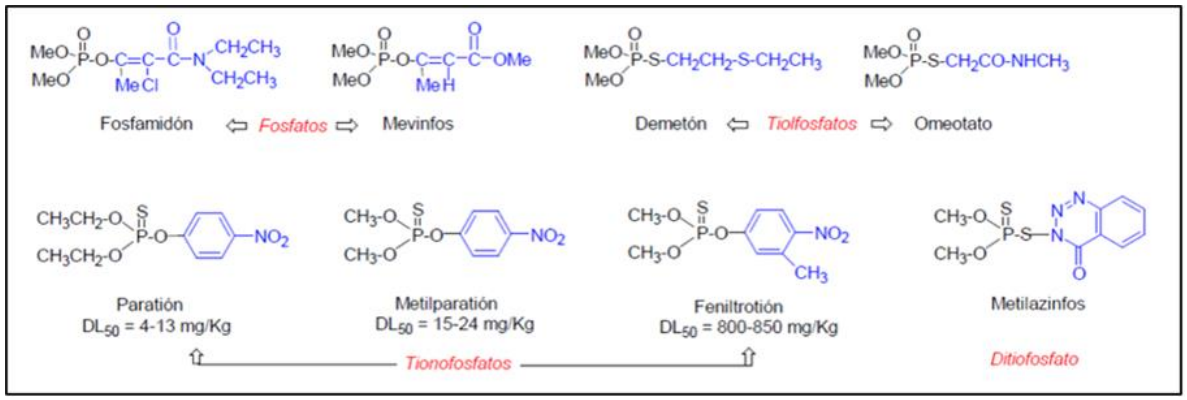


Ilustración 8. Pesticidas fosforados
Fuente: Tejedor (s.f.)

En cuanto a los insecticidas clorados, son muy poco solubles en agua y presentan mayor restricción que los fosforados, no obstante, en su mayoría se encuentran prohibidos en Colombia debido a su capacidad toxicológica, la estructura de este tipo es la siguiente:

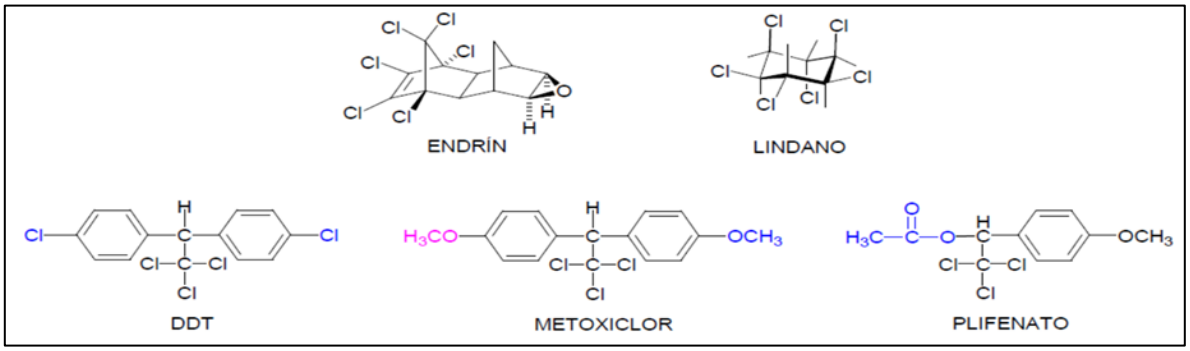


Ilustración 9. Pesticidas clorados
Fuente: Tejedor (s.f.)

Por su parte, los carbamatos insecticidas son derivados del ácido carbámico, la estructura química de este tipo se muestra a continuación:

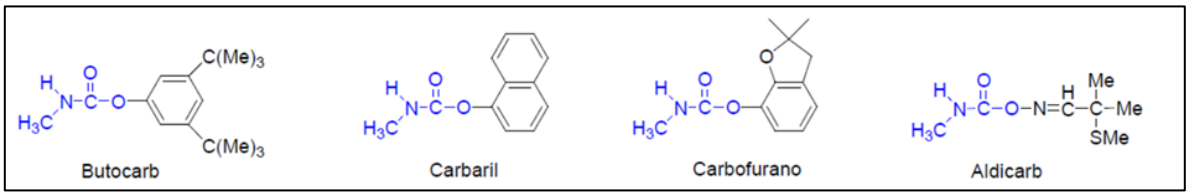


Ilustración 10. Carbamatos insecticidas
Fuente: Tejedor (S.F)

2. HERBICIDAS: la eliminación de malas hierbas es uno de los problemas fundamentales en la agroindustria, debido a su frecuente presencia en diferentes cultivos. Según Tejedor (s.f) los herbicidas se pueden clasificar según dos parámetros, biológico y químico; el biológico agrupa herbicidas que actúan para la inhibición de la fotosíntesis, acelerando los procesos reguladores del crecimiento. A nivel químico, se pueden encontrar variedad de compuestos, que según Tejedor (S.F), se encuentra:

- **Fenoxiácidos**: su principal ejemplar es ácido 2,4-diclorofenoxiacético, 2,4-D, como también algunas variantes como el ácido 2-metil-4-clorofenoxiacético, MCPA.
- **Nitrofenoles**: grupo característico como dinitro-o-cresol, DNOC, y el dinitro-o-sec-butilfenol, Dinoseb.
- **Heterociclos nitrogenados:** fundamentalmente diazinas, triazinas y sus derivados. Mostrados a continuación:

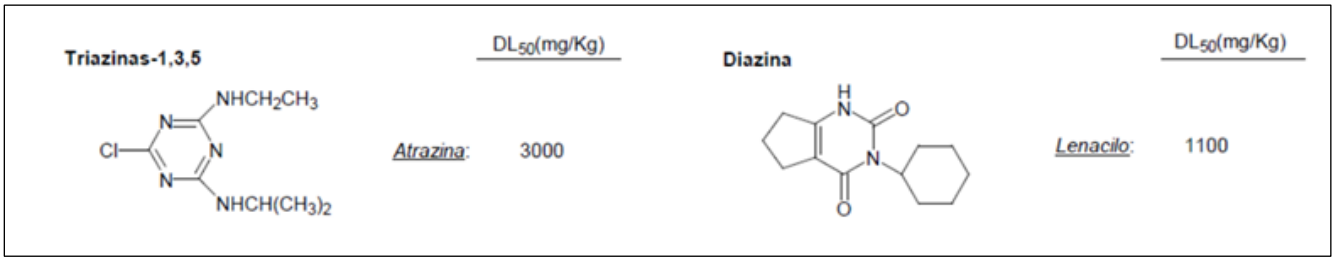


Ilustración 11. Heterociclos nitrogenados
Fuente: Tejedor (S.F)

Arilmetilureas su estructura se presenta a continuación.

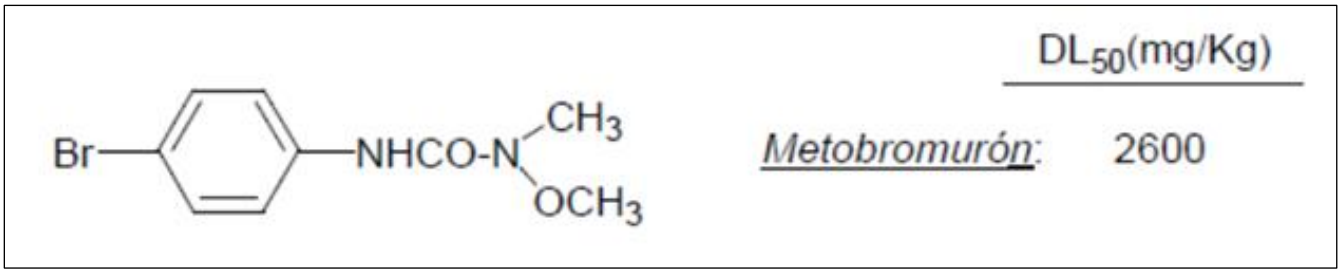


Ilustración 12. Arilmetilureas
Fuente: Tejedor (S.F)

Sales Cuaternarias de Heterociclos: herbicidas como el Paraquat y el Dibenzoquat tienen estructura definida así.

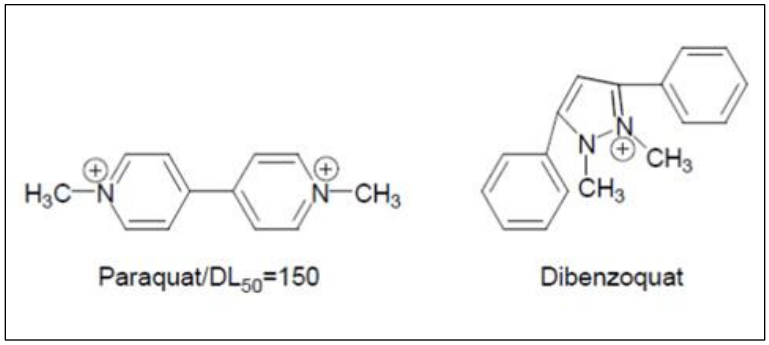


Ilustración 13. Sales cuaternarias de heterociclos
Fuente: Tejedor (S.F)

Nitrilos: estos inhiben la germinación de semillas, el principal ejemplar es el Ioxinil. Su estructura es:

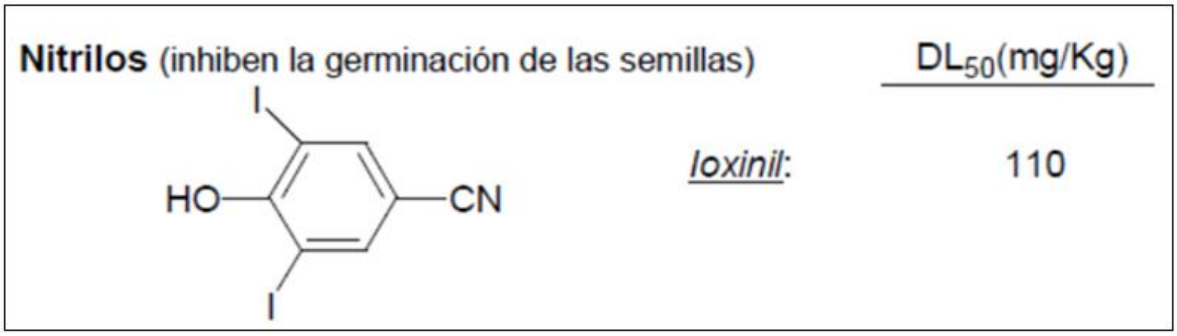


Ilustración 14. Nitrilos
Fuente: Tejedor (s.f.)

3. FUNGICIDAS. Este tipo de sustancias protegen a las plantas de los hongos. Entre los diversos tipos de fungicidas, según Tejedor (S.F) están los derivados como él o-fenilfenol, el Diclorán y el Clorotalonilo, los cuales protegen las semillas; también se encuentran derivados del ácido ditiocarbámico (H_2NCSSH), siendo los más eficaces las sales de Zn y de Mn como el Zineb y el Maneb. También compuestos organometálicos, derivados del Selenio y el Mercurio como el cyhexatin, el fenbutatin y el cloruro de metoximercurio.

La ilustración 17 muestra su estructura química y su respectivo nivel de toxicidad:

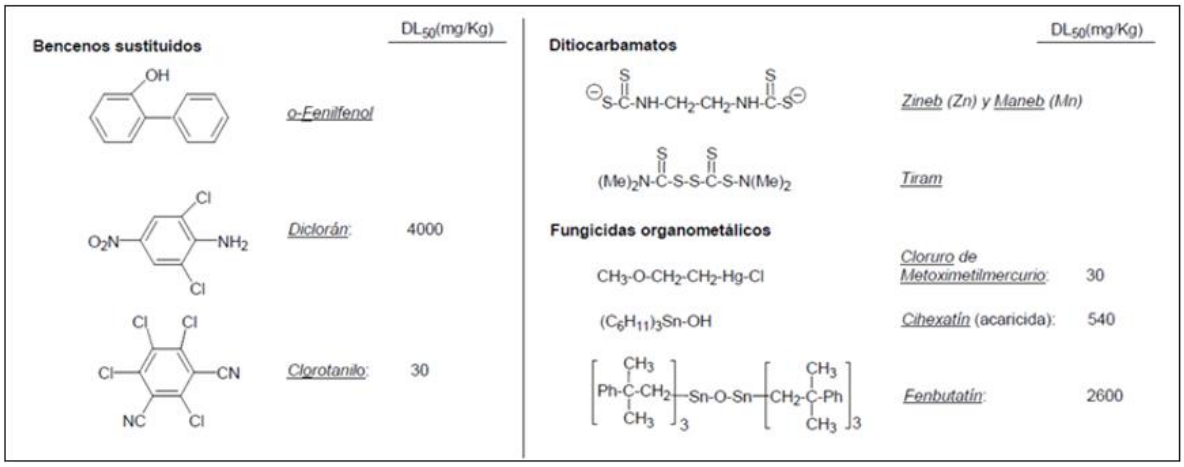


Ilustración 15. Fungicidas
Fuente: Tejedor (s.f.)

4. **ACARICIDAS Y NEMATICIDAS.** Se refiere a aquellos compuestos fabricados para la eliminación de arácnidos (ácaros) y gusanos hialinos (nemátodos) los cuales pueden dañar los cultivos.

Teniendo en cuenta lo anterior, según Tejedor (S.F) algunos insecticidas fosforados como eltriazofos y el carbofenotion son acaricidas activos. Asimismo, algunos fungicidas como el dinocap y el ciclohexatín se pueden usar como acaricida. No obstante, las avermectinas se pueden emplear como acaricida de origen natural y los Fentiocarb, cuyas estructuras se evidencian a continuación:

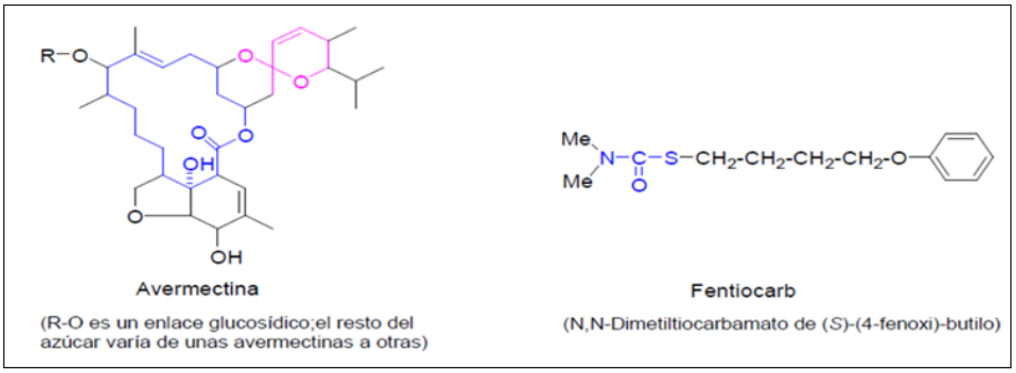


Ilustración 16. Acaricidas y nematicidas
Fuente: Tejedor (s.f.)

En cuanto a los nematicidas, algunos de ellos, según Tejedor (S.F) son gaseosos o líquidos volátiles, otros se convierten en productos gaseosos después de su aplicación (metam, dazomet), estos últimos se convierten en tisocianato de metilo al entrar en contacto con el agua del suelo.

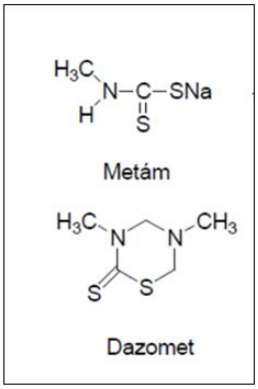


Ilustración 17. Nematicidas
Fuente: Tejedor (s.f.)

Por último, cuando se habla de la composición de los pesticidas, según el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (S.F), normalmente hay una sola sustancia que tiene efecto de plaguicida, que es la denominada como ingrediente activo (IA), los cuales pueden ir mezclados, pero que rara vez pueden mezclarse más de dos de estos compuestos.

En cuanto al resto de ingredientes son los denominados inertes, puesto que no poseen la facultad de exterminar las plagas, si no que tienen funciones diferentes, dentro de los cuales se encuentran: a) solventes, puede ser agua, o algún otro derivado del petróleo, b) humectantes, a fin de permitir su dilución en agua, c) tensoactivos, permiten un mejor contacto de la gota pulverizada con el objetivo, d) adherentes, y e) agentes de aviso, como el olor y el color.

6.2 Normatividad aplicable

En el presente proyecto no solo se fundamentó en criterios técnicos para la determinación de las diferentes fases y su respectivo desarrollo metodológico, enfocado en la obtención de resultados y los objetivos estipulados en el trabajo; se fundamentó también en una compilado normativo, el cual funcionó como criterio básico para poder realizar las depuraciones de las unidades cartográficas de suelo, la elección de parámetros y concentraciones para la modelación y la influencia para la toma de decisiones técnicas en el proceso de construcción de las diferentes partes de la herramienta. A continuación, se presenta la normatividad empleada para los parámetros ambientales utilizados como criterio de depuración en el departamento de Cundinamarca (tabla 5).

Tabla 5. valor de la producción de la cadena de agroquímicos a nivel nacional.

NORMA APLICABLE	DESCRIPCIÓN
Ley 99 de 1993	Esta norma figura como la principal dentro de todo el proceso de estudio del trabajo en cuestión, a través de ella se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se organiza el Sistema Nacional Ambiental-SINA. Es allí donde se establecen los criterios de protección de áreas, páramos, recursos hídricos superficiales y subterráneos, zonas de vulnerabilidad, preservación de recursos naturales incluido el suelo y la compatibilidad del desarrollo socioeconómico y ecosistémico.
Decreto 2372 de 2010	Por medio del cual se reglamenta el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y los procedimientos generales relacionados con este. Reglamentación de suma importancia a la hora de delimitar las zonas prohibidas para el vertimiento de aguas industriales, puntualmente del sector agrícola. Dicha normatividad es la apertura para la declaración de las áreas de protección por la Corporaciones Autónomas en Cundinamarca.
Ley 1450 de 2011	Normatividad por medio de la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo del periodo 2010 – 2014 dentro del cual se reglamenta que la distancia de rondas hídricas debe estar determinada por la Corporaciones Autónomas Regionales, y dependiendo de dicho valor, se determinan cuanta es la distancia de restricción de actividades antrópicas, que impliquen desequilibrio en los ecosistemas y el buen uso de los recursos naturales. Esto a su vez basado por el Decreto 2811 de 1974, en el que se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 388 de 1997	Este reglamento tiene como fin establecer las directrices del funcionamiento del ordenamiento territorial, la participación de la ciudadanía en la organización óptima espacial de las entidades territoriales, así como la armonía entre la destinación de las áreas con los objetivos organizados por las políticas públicas, todo con el fin de evitar problemas que afecten la estructura ecológica principal de las ciudades, generando conflictos de uso de suelo que representan una limitante significativa a la hora de organizar proyectos económicos rurales y urbanos. El uso racional del suelo, la declaración de las zonas de interés urbano y establecidas por esta norma restringe activades de tipo agrícola, industrial y ganadero.

NORMA APLICABLE	DESCRIPCIÓN
Resolución 2695 de 1995	Por la cual se establece el procedimiento para la práctica, elaboración y rendición de los avalúos comerciales de predios y mejoras rurales que se adquieran para fines de reforma agraria, este elemento resulta importante en su apartado de valor intrínseco orgánico de los terrenos, puesto que corresponde a la clasificación de las tierras, con base en las condiciones agrológicas, topográficas, climáticas y de explotación. En las condiciones agrológicas se tiene en cuenta la calidad física y química del suelo, así como las limitaciones de su uso y manejo, esta información es suministrada por las clases agrológicas expuestas por esta norma a través del capítulo II, caracterizadas al detalle y con precisiones fundamentales.
Ley 1930 de 2018	Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia, estableciendo como ecosistemas estratégicos los páramos, así como fija directrices que propendan por su integridad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento, teniendo en cuenta lo que representan a nivel de servicios ecosistémicos, sostenibilidad de biota, regulación de factores abióticos como la temperatura, precipitación y recursos naturales. La presente ley prioriza la conservación sobre cualquier tipo de actividad de interés antrópico de explotación del subsuelo o agua, a su vez afectando la calidad paisajística.
Decreto 1541 de 1978	A través de ella se reglamenta todo lo relacionado con el uso y aprovechamiento del agua que no es marítima, es decir, en todos sus estados, dentro de las cuales se refiere a las aguas las subterráneas o acuíferos como sujetos vulnerables a la contaminación por aguas superficiales, esta norma determina el dominio de las aguas, su reglamentación ocupación de los cauces, las condiciones de obras hidráulicas y la conservación de las mismas, considerando que son de interés público y representan la base de la vida en el mundo.
Ley 1523 de 2012	Se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, la cual se constituye indispensable para asegurar la sostenibilidad y la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible. A partir de dicha política para el ordenamiento del territorio, se da apertura a la identificación de las áreas vulnerables o propensas a sufrir amenazas por inundación, incendios, remoción en masa y avenidas torrenciales, y dentro de las cuales se restrinja ambientalmente el aprovechamiento con el fin de salvaguardar la comunidad y evitar daños mayores por influencia de diferentes actividades económicas.
Decreto 768 de 2022	Por el cual se actualiza la Tabla de Clasificación de Actividades Económicas para el Sistema General de Riesgos Laborales, teniendo en cuenta la Resolución 066 del 31 de enero de 2012, expedida por el DANE, mediante la cual se adoptó la Clasificación de Actividades Económicas - (Clasificación Industrial Internacional Uniforme) CIIU revisión 4 adaptada para Colombia - CIIU Rev. 4. A.C.-, con el objeto de estandarizar la clasificación y códigos de las actividades económicas en las entidades públicas y privadas, siendo la agroindustria variable de estudio en el trabajo en cuestión.
Resolución 0699 de 2021	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, esta norma fija cuantitativamente las directrices para vertimiento, teniendo en cuenta la naturaleza de los puntos de descarga (doméstico), teniendo en cuenta las variables de infiltración, caudal y conductividad hidráulica, elemento que dan la apertura intrínseca para evaluar los parámetros y Límites máximos permisibles para un caso de vertimiento de Aguas Residuales no Domésticas Tratadas al suelo, enfocado en el sector agroindustrial.
Resolución 0631 de 2015	Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, allí se consigna los valores de concentración óptimos para vertimiento puntuales de agua domésticas e industriales, teniendo su actividad económica. En su artículo 7, se hace especial mención al uso de plaguicidas y la concentración de estos en un punto de descarga teniendo en cuenta la composición química del mismo; en el artículo 9 se establecen parámetros de vertimiento puntual para el sector de la agroindustria, todo en unidades de mg/L.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico	Según esta política, los objetivos de calidad en el recurso agua, se establecen para disminuir los niveles de contaminación de las corrientes superficiales o cuerpos lóticos, los cuales forman las diferentes cuencas hidrográficas, en este caso, del departamento de Cundinamarca. A través de esta normatividad, se establecen valores de concentración a los que los diferentes contaminantes deben alcanzar dentro de la corriente de agua, esto dependiendo el uso del agua en aquella zona y la jurisdicción en la que se ubique para que la respectiva Autoridad Ambiental los determine. Para el presente trabajo se utilizaron como herramientas normativas las siguientes: **1.** Río Gachetá (Guavio) - Resolución 1371 de 2011.

NORMA APLICABLE	DESCRIPCIÓN
	2. Río Sumapaz - Resolución 2833 de 2008 **3.** Río Guayuriba - Resolución CAR 4064 de 2010 **4.** Río Bogotá - Acuerdo 43 del 17 de octubre de 2006 **5.** Río Suárez - Resolución 3462 de 2009 **6.** Río Carare (Minero) - Resolución CAR 3463 de 2009 **7.** Río Machetá - Resolución 2814 de 2008 **8.** Río Suárez - Resolución 3462 de 2009 **9.** Río Negro - Resolución 3461 de 2009 **10.** Vertiente Oriental Río Magdalena - Resolución CAR 3484 del 2011

7. METODOLOGÍA

El trabajo de grado se desarrolló en un periodo de cinco (5) meses, tiempo que se disgregó con el fin de cumplir los objetivos de las tres (3) fases que componen la investigación (ilustración 20).

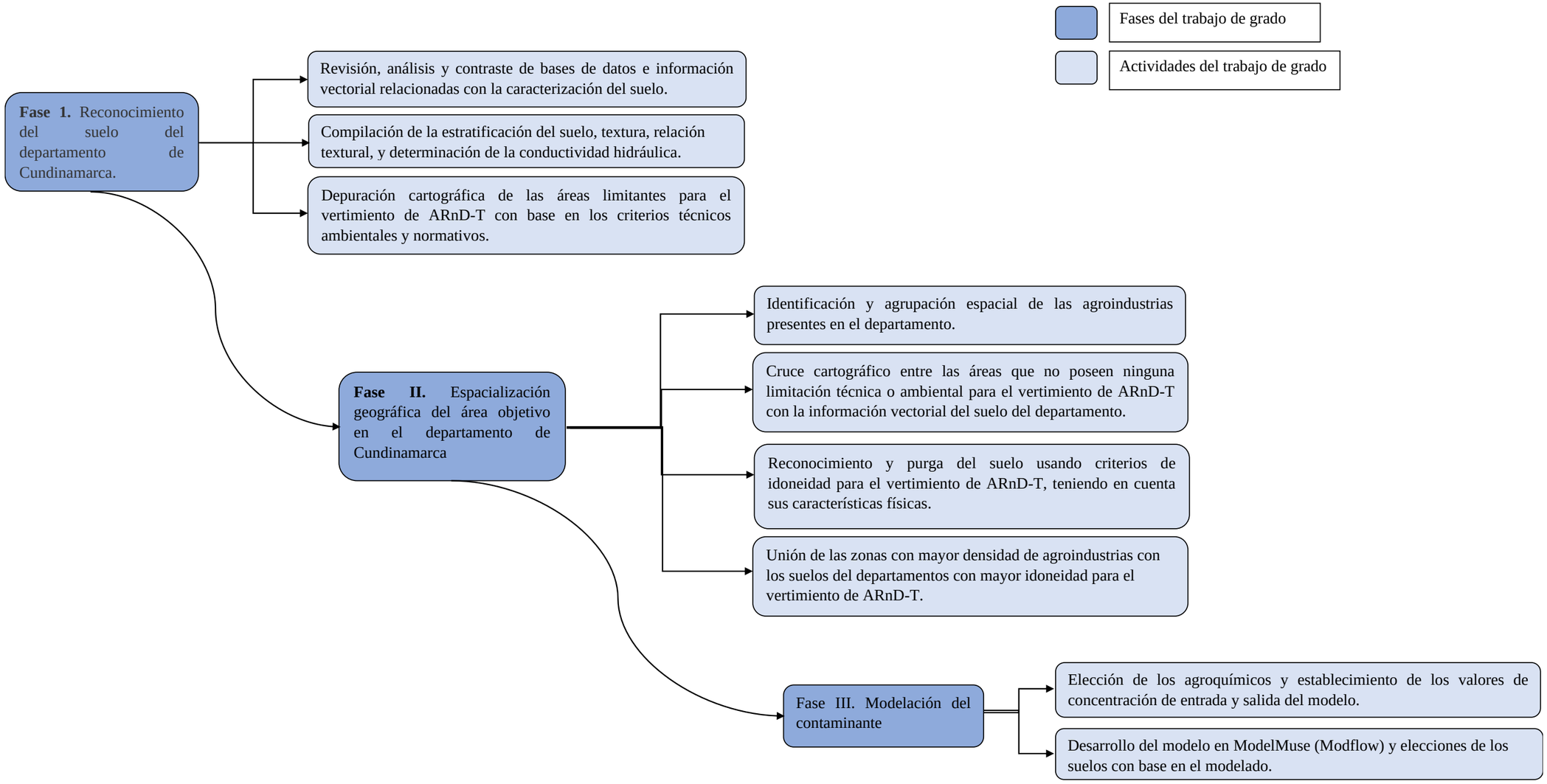


Ilustración 18. Fases y actividades del proyecto.
Fuente: Autores (2023)

7.1. Fase I. Reconocimiento del suelo del departamento de Cundinamarca.

7.1.1 Revisión, análisis y contraste de bases de datos e información vectorial relacionadas con la caracterización del suelo.

Enfocado en la integración y compilación de dos herramientas: el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca, Tomo II (2000) y el Mapa digital de suelos del departamento de Cundinamarca (2001), ambos desarrollados por el IGAC.

7.1.2 Compilación de la estratificación del suelo, textura, relación textural, y determinación de la conductividad hidráulica.

Abarcó, a manera de conglomerado, la información de las UCS señalando aspectos relevantes (p. ej., las fases de las UCS y sus componentes, la textura y la profundidad); asimismo, se calcularon otras propiedades como la conductividad hidráulica (K) ponderada de cada horizonte a partir de los valores de K predeterminada por Coduto (1999) a partir de los tipos de texturas, y su porcentaje de participación en la relación arena-limo-arcilla dentro de cada capa que compone la unidad cartográfica.

7.1.3 Depuración cartográfica de las áreas limitantes para el vertimiento de ARnD-T con base en los criterios técnicos ambientales y normativos.

Focalizado en la depuración de las zonas no viables para vertimiento de ARnD-T (dentro de las cuales se presentan los agroquímicos), a partir de criterios técnicos referentes a las áreas protegidas, rondas hídricas, zonas urbanas y cabeceras municipales, suelos con conflicto de uso, clases agrológicas, áreas de aprovisionamiento hídrico (páramos y acuíferos), pendientes del terreno y zonas susceptibles a amenazas, información sustentada en el marco conceptual y normativo del presente trabajo encontrando un espacio geográfico idóneo que se acople a los requisitos del trabajo.

7.2 Fase II. Espacialización geográfica del área objetivo en el departamento de Cundinamarca

7.2.1. Identificación y agrupación espacial de las agroindustrias presentes en el departamento.

Comprendió la recopilación de empresas en el departamento de Cundinamarca focalizadas según la CIIU como agroindustrias, a las cuales se les hizo el análisis de densidad a través de generación de clústeres representados por puntos que están circunscritos espacialmente cerca.

En primera instancia, la construcción de esta información cartográfica se dio a partir de las agroindustrias en todo el departamento de Cundinamarca. Este último dato fue extraído a partir de una base cartográfica (layer) de Infraestructura de Datos Espaciales Cundinamarca -IDEC- en el cual se tiene la información de las empresas de Colombia del año 2021 de los 32 departamentos del país, en donde se incluye variables de CIIU, nombre, dirección y razón social.

A partir de esta capa de puntos de empresas en Colombia, se hizo uso de ArcMap y sus herramientas para hacer la delimitación de las empresas para el departamento de Cundinamarca. Posteriormente, teniendo la nube de puntos en el área sujeto de estudio, se hizo una selección por atributos de la CIIU, correspondiente a los códigos relacionados con el sector agroindustrial enfocados en el cultivo y elaboración de alimentos, puesto que son estas actividades las que someterán a estudio de asimilación de vertimiento por parte del recurso suelo. Los códigos filtrados cartográficamente se reflejan en la ilustración 21:

CIIU Rev 4. A.C.	Descripción Actividad Económica Asociada al Sector Productivo Agroindustria
0111	Cultivo de cereales (excepto arroz), legumbres y semillas oleaginosas
0112	Cultivo de arroz
0113	Cultivo de hortalizas, raíces y tubérculos
0114	Cultivo de tabaco
0121	Cultivo de frutas tropicales y subtropicales
0122	Cultivo de plátano y banano
0123	Cultivo de café
0124	Cultivo de caña de azúcar
0125	Cultivo de flor de corte
0126	Cultivo de palma para aceite (palma africana) y otros frutos oleaginosos
0127	Cultivo de plantas con las que se preparan bebidas
0128	Cultivo de especias y de plantas aromáticas y medicinales

Ilustración 19. Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) del sector agroindustrial. Fuente: adaptación CINTEL (2021)

Luego, con dicha selección se pudo evidenciar visualmente las agroindustrias en el departamento de Cundinamarca y lista para superponerse con la capa de las fases de las UCS depuradas en la presente etapa.

La elaboración de los clústeres agroindustriales, entendiendo dicho concepto como la agrupación de diferentes empresas con una misma actividad económica y que, a su vez, presentan una distancia geográficamente pequeña, formando zonas de alta densidad espacial de dicho sector económico, se desarrolló de la siguiente manera: la densidad como cantidad de elementos en una unidad de área fue la base técnica para la construcción de los clústeres, para el análisis de densidad de poblaciones o elementos (en este caso, empresas) se hizo uso de la herramienta Buffer de 1 km^2, valor que representa la unidad de espacio e influencia de una empresa sobre un área específica, así como también representa una base predeterminada para estos tipos de análisis espaciales, según Enviromental Systems Research Institute-ESRI (2023), y teniendo en cuenta que el área de estudio es todo el departamento de Cundinamarca. De esta manera, a partir de dicho valor representado en una circunferencia

(verde) alrededor de cada empresa (punto negro), se hizo la unión de aquellos contornos de 1 km^2 de área que se tocaran en, al menos, un punto y que dicha intersección se diera por más de tres circunferencias, para así poder formar los clústeres, adoptando la siguiente forma:

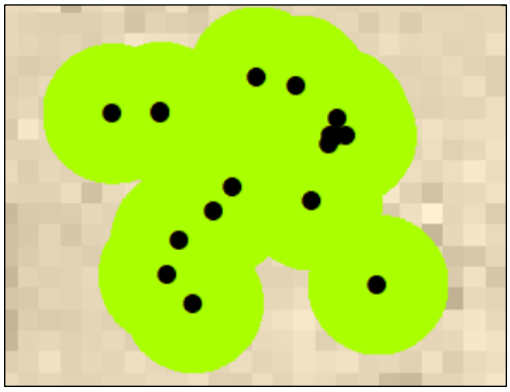


Ilustración 20. Clúster de agroindustrias
Fuente: autores (2023)

7.2.2 *Cruce cartográfico entre las áreas que no poseen ninguna limitación técnica o ambiental para el vertimiento de ARnD-T con la información vectorial del suelo del departamento.*

Se desarrolló tomando como punto de partida la contraparte del ítem 7.1.3 de la fase I, es decir, aquellas áreas que no presentan inconveniente técnico o ambiental, las cuales son por defecto los espacios geográficos donde podría llevarse a cabo el modelamiento del contaminante. Estos espacios fueron el insumo para realizar el recorte del shape del IGAC (2001), a partir del cual se presentan de manera general 44 UCS que, a su vez, se subdividen en 72 fases.

7.2.3 *Reconocimiento y purga del suelo usando criterios de idoneidad para el vertimiento de ARnD-T, teniendo en cuenta sus características físicas.*

Esta sección abarca todo lo concerniente a depuración de las UCS, por medio de una evaluación con tres filtros enfocados en la idoneidad conjunta de la profundidad, textura y valor porcentual de los componentes de cada una de las fases para encontrar así las áreas propicias para efectuar el modelamiento del vertimiento del ARnD-T (ilustración 23).

En concordancia, se realizó una evaluación compuesta por tres (3) filtros que se relacionan y complementan entre sí:

a) Filtro I: se enfocó en la profundidad de las UCS (dada por la sumatoria del espesor de los horizontes que la componen) donde se evaluó que los suelos sean profundos; las capas limitantes presentadas en las fases de las UCS son aquellas que no permitirían la infiltración del fluido, estas capas son, en su mayoría, aquellas compuestas por roca consolidada. Para el caso particular de las 44 UCS disgregadas en 72 fases, se usaron dos criterios, que las fases tuvieran una profundidad total mayor o igual a cien (100) centímetros y, adicionalmente, que fueran representativas, es decir, que los cien (100) centímetros estuvieran compuestos por horizontes conformados por limo y arena los cuales poseen a nivel general una conductividad hidráulica media a alta, respectivamente.

b) Filtro II: se centró en la relación porcentual de arena-limo-arcilla que posee cada horizonte que compone a las fases de las UCS, concluyendo que todo horizonte que tenga una proporción porcentual de arena y limo por encima del 66%, sumando de estas dos texturas, posee una relación significativa dentro de la estructura del perfil, criterio que fue tenido en cuenta a la hora de determinar cuántos centímetros de la profundidad total son realmente relevantes y significativos a la hora de categorizar a esos suelos de los componentes como profundos.

c) Filtro III: se concentró en la participación porcentual del área que poseen los componentes en cada una de las fases de las UCS, estimando así que aquellas que tengan una mayor representatividad dentro de la fase, dictarán si la UCS es idónea o no para realizar el modelamiento de ARnD-T.

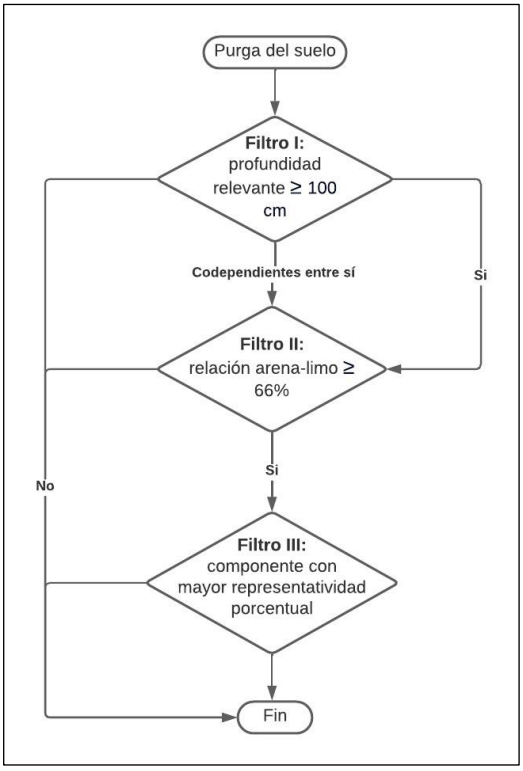


Ilustración 21. Diagrama lógico de la purga de las UCS
Fuente: autores (2023)

7.*2.4 Unión de las zonas con mayor densidad de agroindustrias con los suelos del departamento con mayor idoneidad para el vertimiento de ARnD*-T.

Formando las zonas de alta densidad de agroindustrias, proceso realizado en el ítem 7.2.1 de la Fase II, se superpone el mapa de fases de UCS idóneas para vertimiento elaborado en el ítem 7.2.3, con el fin evaluar la distancia de las agroindustrias con respecto a las UCS depuradas y la posibilidad de generación de nuevas empresas teniendo la ubicación de dichos suelos.

7.3 Fase III. Modelación del contaminante

7.*3.1 Elección de los agroquímicos y establecimiento de los valores de concentración de entrada y salida del modelo*

Consistió en el proceso de elección de sus concentraciones, tanto en el punto de vertimiento como de cumplimiento dentro la matriz de suelo, a partir de la normatividad existente aplicada para el recurso hídrico, debido a la escasa reglamentación aplicada para el recurso suelo en cuestión de ARnD-T.

En primer lugar, la concentración de la cual se usó para modelar, fue extraída de la normatividad aplicada al recurso hídrico, esto debido a la tipología del contaminante (ARnD-T), donde existen los límites máximos permisibles del agente activo que deben salir del punto de vertimiento hacia aguas superficiales y su respectivo objetivo de calidad. Teniendo en cuenta que aún no existe dicha determinación para el recurso suelo, es la manera más conveniente de nutrir el modelo con valores de concentración reales y aplicables al área en cuestión.

Ahora, para poder encontrar la concentración de los contaminantes que nutrirán el modelo en el programa (plaguicida organoclorado, organofosforado y el fertilizante), fue necesario dividirlo en dos momentos, el primero es en el punto de vertimiento, en donde el agroquímico debe tener una concentración de salida teniendo en cuenta lo establecido en la Resolución 0631 de 2015 expedida por el MADS. Para poder seleccionar los agroquímicos que serán parte del insumo para el modelo en ModelMuse (Modflow)-MT3D-Gw Chart se realizó una investigación que se dividió en 3 secciones:

a) Primera sección: se enfocó en la revisión de la Resolución 0631 de 2015, encontrando en el capítulo IV, específicamente en el artículo 7º (donde se definen los "parámetros de ingredientes activos de plaguicidas de las categorías toxicológicas IA, IB y II y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas-ARnD a cuerpos de aguas superficiales y al alcantarillado público"), una correlación entre los objetivos de calidad-(en adelante, OC) de las cuencas caracterizadas de Cundinamarca y la normatividad, concretamente se dilucidan los valores limitantes de los agentes activos de dos (2) tipos de plaguicidas, los organoclorados y los organofosforados, por ende, se establece así el punto de partida para revisar que ordena la resolución para este tipo de plaguicidas; para ambos tipos de compuestos la resolución expone un valor límite máximo permisible de la concentración presente en el vertimiento, para los **compuestos organoclorados** es de **0,05 mg/L** y para los **compuestos organofosforados** es de **0,10 mg/L**, adicionalmente enuncia que los valores mencionados solo aplican para los ingredientes activos de ambos tipos de plaguicidas que entren en la Categoría Toxicológica II y cuyos valores de Dosis Letal Oral (DL_{50}) en ratas más bajos conocidos sean mayores a 200 y menores o iguales a 2.000 mg/Kg.

Por otro lado, entendiendo que **los fertilizantes** son agroquímicos especiales donde su agente activo corresponde a uno o varios nutrientes, se buscó una relación entre las variables presentadas en la compilación de los OC que influyen en nuestro trabajo y la presente norma, hallando así el capítulo VI, particularmente el artículo 9º, donde se muestran los "parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas-ARnD a cuerpos de agua superficiales de actividades productivas de agroindustria y ganadería" y exhibiendo una tabla donde hacen presencia varios compuestos químicos (p. ej., nitritos, nitratos, fosforo y ortofosfatos), sin embargo, para muchos de estos agregados no aparece valor alguno sino que por el contrario presentan

la siguiente descripción **"Análisis y reporte"**, lo que significa que esos valores dependen de las condiciones capturadas en campo.

b) Segunda sección: abarcó la búsqueda puntual de los agroquímicos que se ajusten a las condiciones de la primera sección y que, a su vez, tengan un uso actual y constante en la agroindustria de Cundinamarca. Se realizó la búsqueda virtual de empresas del agro ubicadas en el departamento de las cuales pocas facilitaron la información de los agroquímicos que usaban en sus industrias, pese a esto, cabe resaltar a la empresa Agroindustria Catalamonte SAS, ubicada en Facatativá y dedicada la actividad de cultivo de flor de corte, ya que fue de gran ayuda al mencionar algunos de los compuestos químicos que fueron tenidos en cuenta para la selección final, entre estos se encuentran los siguientes pesticidas: Dianzon, Malation, Procloraz, Paratión y Diclorvos; y en cuanto a los fertilizantes mencionaron: la urea, gallinaza y el triple 15. Con base en la información primaria consultada y en la revisión bibliográfica para confirmar la idoneidad de los compuestos se determinaron **tres (3) agroquímicos** que se ajustan a lo buscado, los cuales son presentados a grandes rasgos en la tabla 5.

Tabla 6. Agroquímicos escogidos.

AGROQUÍMICOS ESCOGIDOS						
PESTICIDAS						
n	**Nombre comercial**	**Agente activo**	**Fórmula**	**Acción**	**Tipología**	**DL_{50} Oral (mg/kg)**
1	Procloraz	Prochloraz	$C_{15}H_{16}Cl_3N_3O_2$	Fungicida	Organoclorado	1600-2400
2	Malathion	Malation	$C_{10}H_{19}O_6PS_2$	Insecticida-acaricida	Organofosforado	1375-5500

FERTILIZANTE					
n	**Nombre comercial**	**Composición**		**Acción**	**Tipología**
		Componente	**Porcentaje**		
3	Triple 15	Nitrógeno total	15	Fertilizante	Mineral
		Fósforo total	15		
		Potasio total	15		
		Azufre total	10		

Fuente: autores (2023) con base en las fichas técnicas Procloraz 45 (2023), Malation (s. f.) y Abonamos triple15 (s.f.).

Antes de entrar a la tercera sección, el segundo momento se encuentra en la determinación de la concentración de cumplimiento en la matriz donde se hace la descarga, teniendo en cuenta los OC de las cuencas hídricas donde se vaya a hacer dicha descarga, esto con el fin de observar en la etapa de modelamiento a qué distancia, en planta y en perfil, el contaminante cumple la concentración objetivo en la matriz.

En el presente caso, como la descarga se hace en la matriz de suelo, se procedió a ubicar espacialmente los diferentes polígonos de las fases de UCS, para encontrar la cuenca a la cual pertenece y, por ende, a la cual se le aplica su respectivo objetivo de calidad, en el anexo 3, se presenta cada UCS depurada de la Fase II con sus respectivos polígonos presentes en todo el departamento de Cundinamarca, la cuenca a la que pertenecen, el tramo de la cuenca donde aparece ubicado el polígono, el área del polígono, la clase en términos de uso de agua a la que corresponde el polígono UCS, el acto administrativo que establece los OC de la cuenca de cada UCS depurada existente, y cada uno de los parámetros de objetivos de calidad en aquella zona.

c) tercera sección: se focalizó en los valores de concentración que fueron seleccionados para el vertimiento, en cuanto a los pesticidas los valores son los presentados en la primera sección (0.05 y 0.10 mg/L para organoclorados y organofosforados, respectivamente), por otra parte, el valor de concentración usado para el fertilizante se escoge con respecto a dos aspectos:

a) lo primero a considerar fue que la única forma de comparar concentraciones antes y después del modelo es con los valores de OC de las cuencas analizadas, por eso, se enfocó el trabajo en encontrar algún químico que compusiera al triple 15, ya fuera nitrógeno, fosforo, potasio o azufre; sin embargo, solo se encontraron valores restrictivos para nitratos y nitritos, y según el DANE (s.f.) el nitrógeno total "corresponde a la relación entre la suma de los valores de nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal muestreados en una estación y el número total de muestreos realizados en la misma", a partir de la anterior premisa se cuenta con el valor del nitrógeno total para establecer la concentración del triple 15.

b) El segundo aspecto corresponde específicamente a qué valor usar, según los OC para todas las cuencas. Los nitritos poseen el mismo valor de 10 mg/L y para los nitratos hay dos valores que son el 1 y el 10 mg/L, de acuerdo a lo anterior y en vista de que hay factores externos que afectan el cálculo del nitrógeno total, como la muestra de datos y la cantidad de estaciones, se decidió como opción más factible tomar la concentración más alta entre ambas variables, es decir, 10 mg/L como dato de entrada en el modelo y el valor más restrictivo (1 mg/L) como valor limitante después de correr el modelo.

7.3.2 *Desarrollo del modelo en ModelMuse (Modflow) y elecciones de los suelos con base en el modelado*

En primera instancia, para el reconocimiento de la funcionalidad del software en cuestión, se realizó un curso de capacitación de libre acceso en YouTube, dictado por la consultora de recursos hídricos y modelamiento numérico Gidahatari de la ciudad de Lima, Perú. Allí se explican los conceptos básicos del programa, el paquete de transporte de contaminación en MT3DS y el paso a paso para la construcción de un modelo general de flujo en Modflow.

La presente etapa de modelamiento consiste en la construcción de los ejemplares en el software de transporte de contaminantes MODFLOW-MT3DS, a partir de la información suministrada de los componentes de las fases de las UCS, su profundidad, nomenclatura y espesor de cada horizonte, conductividad hidráulica de cada horizonte y conductividad global encontradas en la Fase I; la información del contaminante, su concentración y el caudal de vertimiento encontrados en el ítem 7.3.1, y por último, las condiciones de borde, las cuales expresan el potencial hídrico de la matriz a partir de la diferencia de los niveles piezométricos de la grilla sujeto de modelación, los cuales determinan la dirección de flujo en un tiempo elegido por los autores, y que corresponde a 1 día (86.400 segundos). Cabe mencionar que

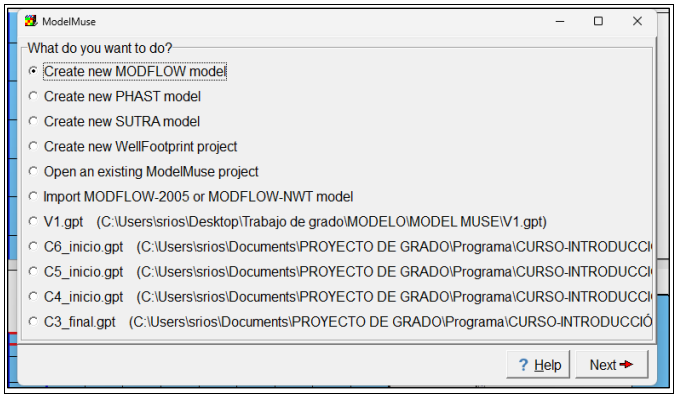
se modelaron cada uno de los componentes de cada fase UCS que superaron la depuración realizada en ítem 7.2.3 de la fase II.

El modelo fabricado para el presente caso se hizo bajo las condiciones **más críticas** de vertimiento, es decir, que durante el tiempo de 86.400 segundos se realiza una descarga constante del contaminante, con un área relativamente grande para cada componente de fase de UCS, y con un caudal de riego correspondiente a un cultivo amplio de flor de corte (0.132 m^3/seg), siendo una actividad común en el departamento de Cundinamarca.

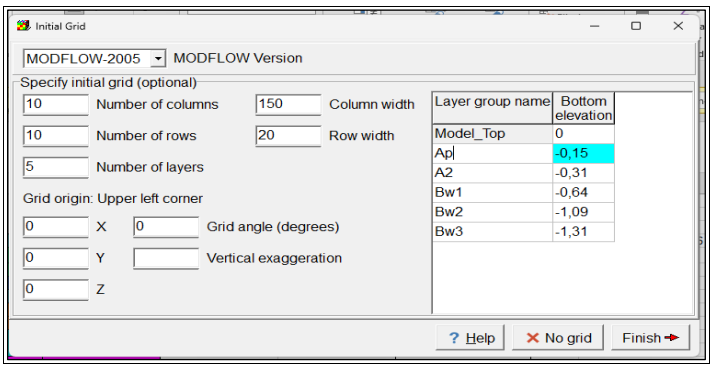
Adicionalmente, se hizo uso del visualizador GW-Chart para proyectar gráficamente el comportamiento de la concentración contra el tiempo dentro del modelo. A continuación, se mostrará el paso a paso realizado por los autores para obtener un modelo genérico.

Sección de ModelMuse (MODFLOW) y MT3DS

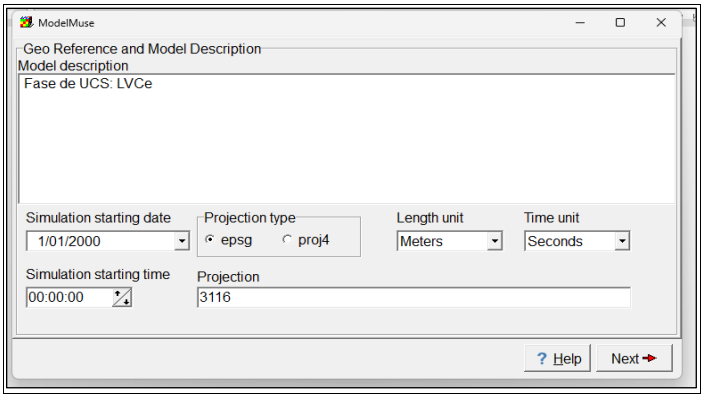
1. El programa ModelMuse permite varias opciones de las cuales se selecciona Create new MODFLOW model.



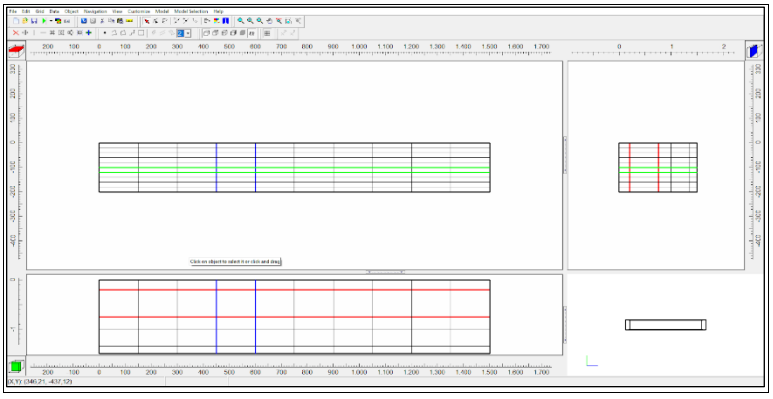
2. El paso siguiente fue definir dos aspectos: la versión de MODFLOW con que se trabajó (V. 2005) y el espacio a modelar para lo cual se estimó una de grilla de 3000 m^2, valor obtenido al definir los tamaños las columnas (150 m) y filas (20 m) magnitudes estimadas con base en el promedio ponderado de las áreas de todas las fases de las UCS que son objeto de modelación. Así mismo, el programa solicita la información que conformará la configuración interna de la grilla que representa la matriz suelo como la cantidad de filas y columnas que se dejaron por defecto con un valor de 10 y se definieron las capas u horizontes que fueron usados con sus respectivas profundidades.



3. Posteriormente, se describió el modelo, a qué fase pertenece, el tipo de proyección (3116, ya que es MAGNA Colombia Bogotá), y las unidades a usar para length (meters) y para time (seconds).

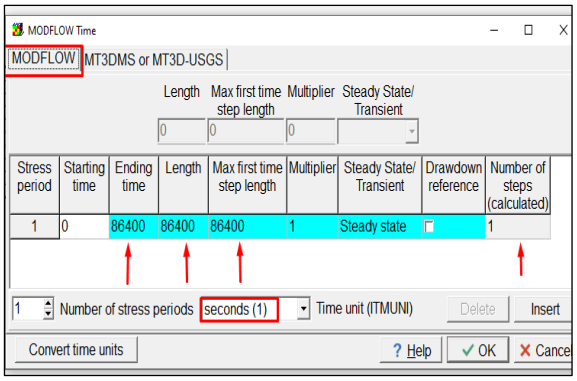


4. A continuación, se mostrará la grilla con las condiciones establecidas en el paso anterior, desde tres vistas diferentes (parte superior izquierda vista “top”, parte superior derecha “side” y parte inferior izquierda vista “front”) en donde se pueden apreciar las filas, columnas y capas de la grilla sujeto de modelación.

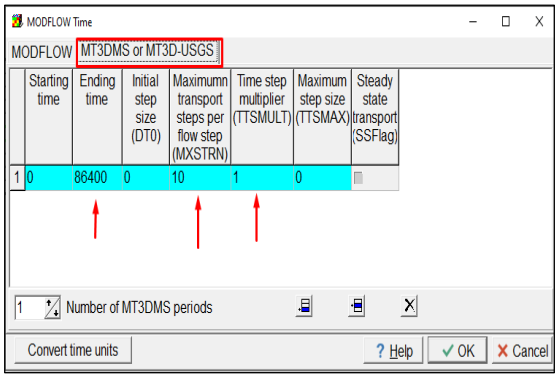


5. Para definir temporalmente la funcionalidad del modelo de flujo, se estableció un margen de un día que corresponde a 86.400 s. Para ello, se realizó el siguiente procedimiento: a) Model-MODFLOW Time-MODFLOW-escribir el tiempo en segundos (86.400)-en Time Steps poner el valor de uno (1); b) en cuanto al tiempo de modelo de transporte, se va al botón MT3DMS- introducir el tiempo en segundos-escribir el máximo de pasos por cada paso de flujo, de diez (10):

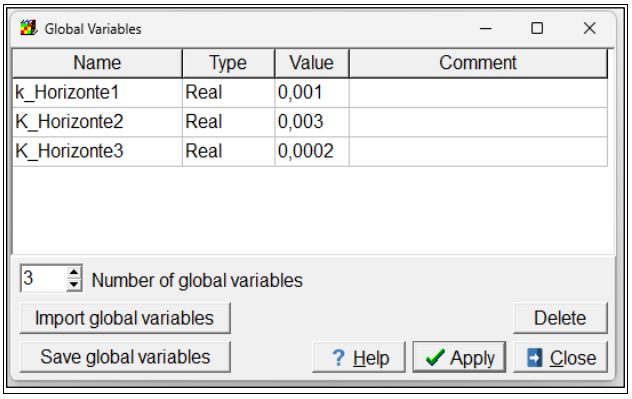
a)



b)



6. Una vez creada la grilla dentro de la interfaz-Data-Edit global variables-cambiar el número de Global Variables para que se ajuste al número de horizontes que se tienen y así agregar los valores de conductividad hidráulica[1] de cada uno-Apply-Close. Teniendo en cuenta las unidades estandarizadas en el paso 3

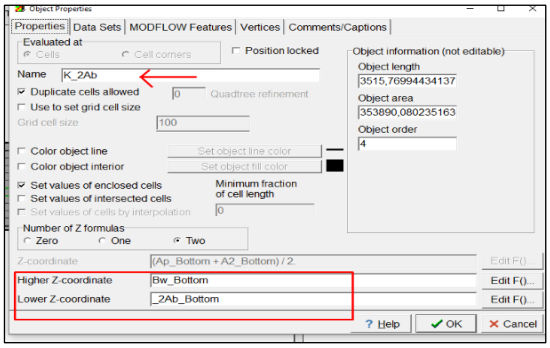


[1] Los datos aquí mostrados están en m/s

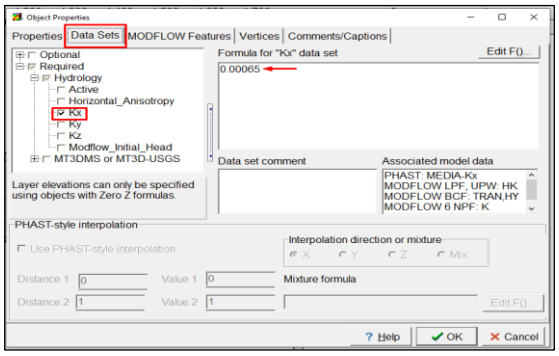
7. Con el fin de poder visualizar la participación de las conductividades, se crearon objetos rectangulares que cubran la totalidad de la grilla y se ubicaron por horizonte, en higher z-coordinate y lower z-coordinate, asignando su conductividad respectiva.

Con la herramienta  se crea el rectángulo, y se realizó lo siguiente: a) se asignará el mismo nombre que se le asignaron a las variables globales, por horizonte, y b) en la opción de Data sets del objeto creado, se activa Kx, y se asigna su respectiva conductividad, así:

a)



b)

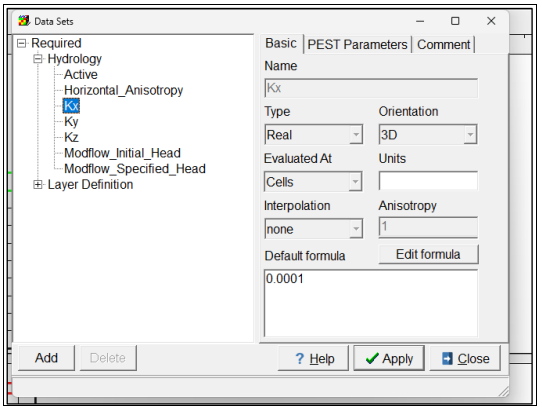


8. Ahora se calculó la conductividad hidráulica horizontal (Kx) tomando en cuenta la ecuación de Darcy y la representación porcentual de cada uno de los horizontes, estimando así un solo valor de Kx, este se introdujo así: Data-Data set-Required-Hydrology-Kx-introducir valor y Ky y Kx se calculan solos. Adicionalmente, en la parte de Modflow_Initial_Head se debe asegurar que quede model_Top-Apply-Close.

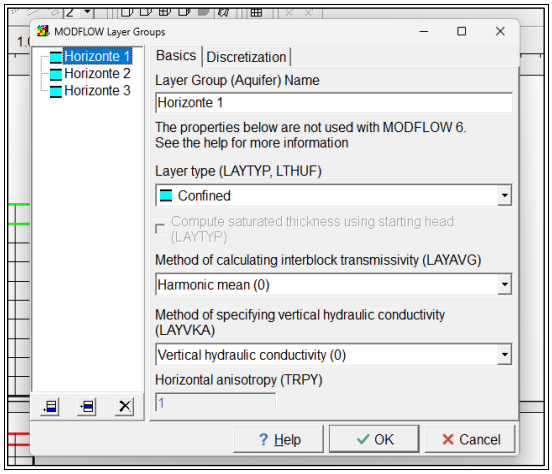
$$K_h = \frac{\left(\sum K_i \cdot b_i\right)}{B}$$

siendo:

K_h = conductividad hidráulica horizontal equivalente
K_i = conductividad hidráulica de cada una de las capas
b_i = espesor de cada una de las capas
B = espesor total, suma de todos los espesores

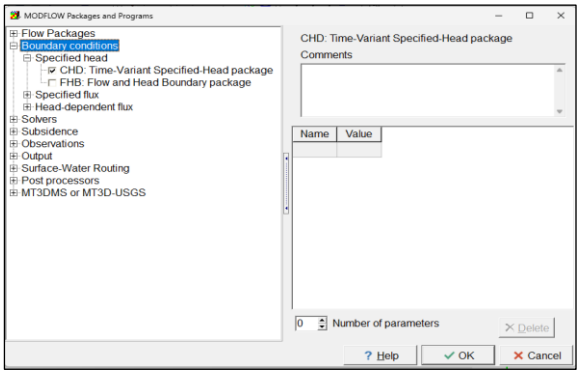


9. En este punto se estableció cómo es el paso del agua a través de los horizontes, para lo cual se hace el siguiente proceso: model-MODFLOW Layer groups- se escogió el horizonte y, ya que el programa toma cada capa como si se tratará de un acuífero, todos deben encontrarse caracterizados en la sección de Later type como convertible a excepción del último que debe ser confinado debido a que de esta forma no va a pasar el agua a partir de ese punto-Ok.

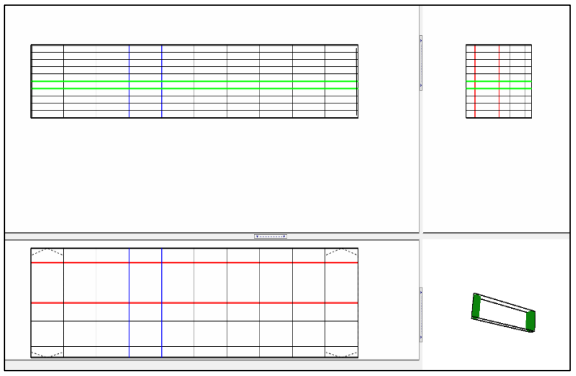


10. Se detallaron las condiciones de borde para limitar de dónde a dónde se iba a mover el vertimiento: a) se habilitó la opción con-model-packages and programs-boundary Conditions-specified head-CHD-ok. Después se trazaron polilíneas con la herramienta de objeto  que fueron las condiciones de borde en los sectores Oeste y Este, b) las cuales se trazaron en la vista "top" y se delimitaron para que se encuentren en las capas predilectas que permitan el movimiento del fluido.

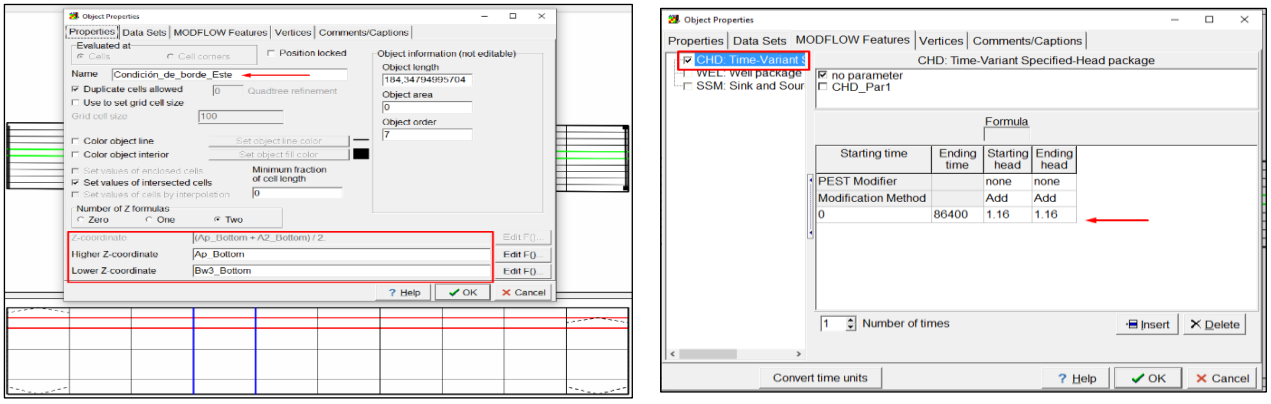
a)



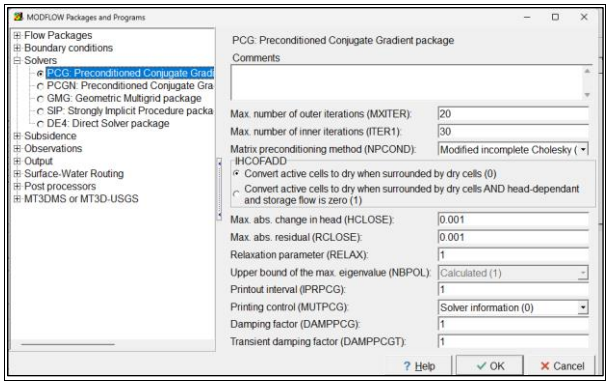
b)



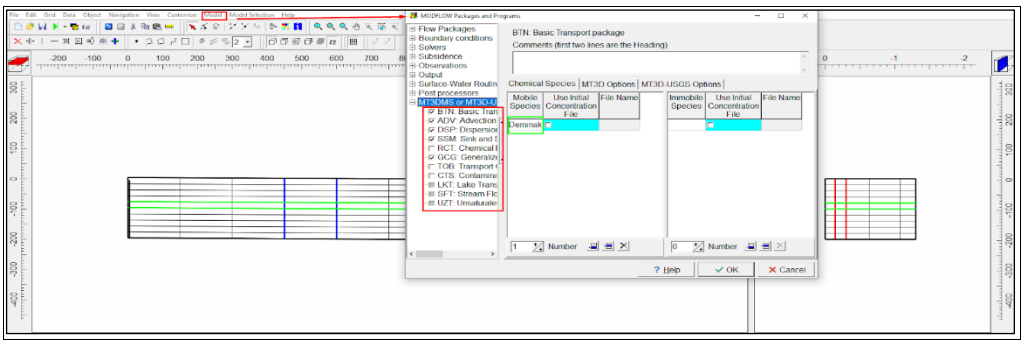
11. Las condiciones de borde no solamente marcarán una delimitación del modelo, sino que también, a través de los valores de potencial hídrico, mostrarán la dirección de flujo dentro de la matriz. Es por esto, que a la primera condición de borde (Oeste) se le asignó el valor de profundidad total del perfil, a manera de cabeza o potencial, mientras que la segunda (Este) se le otorgó el valor de la profundidad total menos el valor de espesor del primer horizonte, con el fin de que el flujo se mueva de izquierda a derecha; en cuanto a las capas de ubicación de las condiciones, se asignaron bajo los mismos criterios que definieron el potencial hídrico.



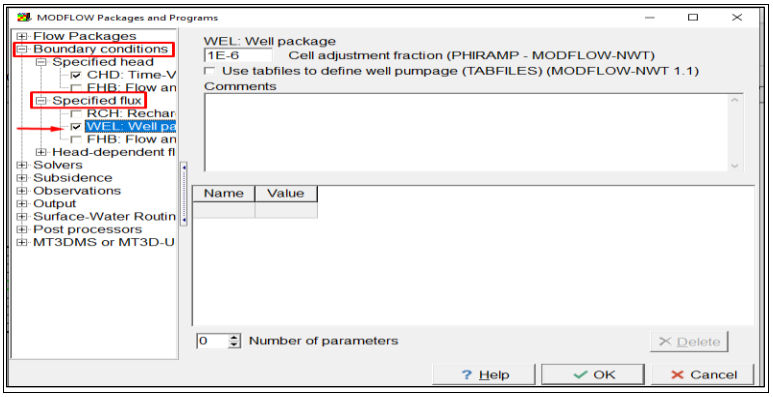
12. En este punto fue necesario definir el solucionador que resolvió el modelo; para seleccionarlo, es necesario ingresar a model-MODFLOW Packages and Programs- Solvers- PCG (Preconditioned Conjugate Gradient package).



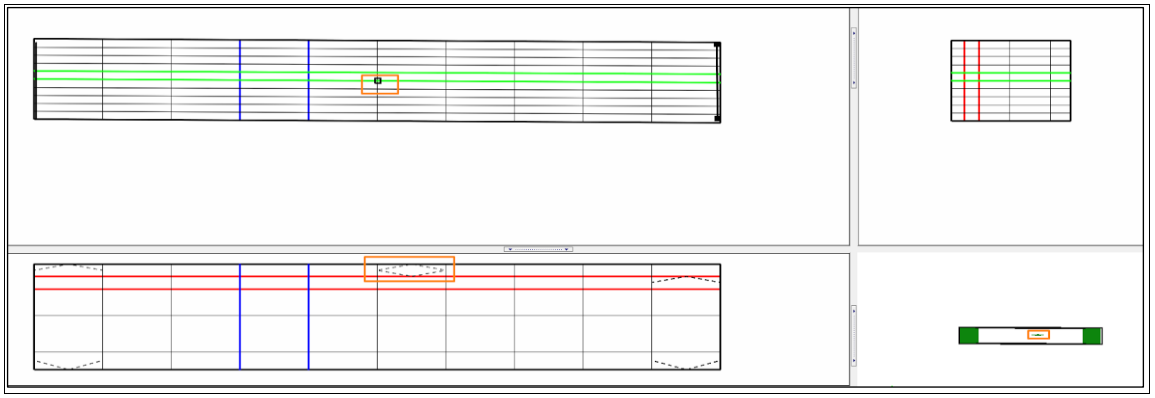
13. El siguiente proceso fue la activación de la extensión de MT3DS, la cual consiste en el transporte de contaminantes en la matriz para saber sus niveles de concentración en el medio poroso. Para esto se fue a la opción Model-Packages & Programs- desplegar MT3DMS or MT3D - USGS- activar opción BTN (Basic Transport Package), en la opción Mobile Species, se puso el nombre del contaminante (Procloraz o Malation) o fertilizante (triple 15); asimismo, se encendieron los paquetes de ADV (Advection), DSP (Dispersión), SSM (Sink and Source Mixing package) y GCG (Generalized Conjugate Gradient Solver), como se muestra a continuación:



14. Aprovechando que la localización está en la opción packages & programs, se desplegó la opción Boundary Conditions>Specified Flux> activar opción WEL (Well Package), la cual consiste en añadir un caudal o rata volumétrica a la matriz, ya sea en forma de bombeo o de suministro hídrico, esto con el fin de simular un vertimiento con un caudal de 0.132 m^3/s ingresando al medio, el cual fue seleccionado teniendo en cuenta la extensión del área calculada al inicio del modelo, ejemplificando dicho valor procedente un cultivo de flor de corte, común en el departamento de Cundinamarca y considerando un valor de caudal alto para una galería de infiltración que pueda estar presente en campo:

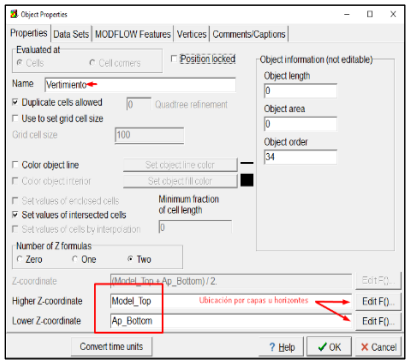


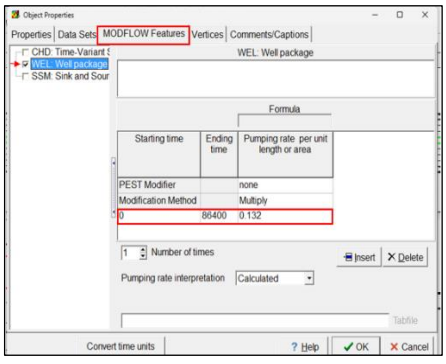
15. Ahora se creó un objeto en forma de punto con la opción , y se ubicó en la vista "top" de la matriz, representando así la zona donde se realizó el vertimiento del contaminante o fertilizante.

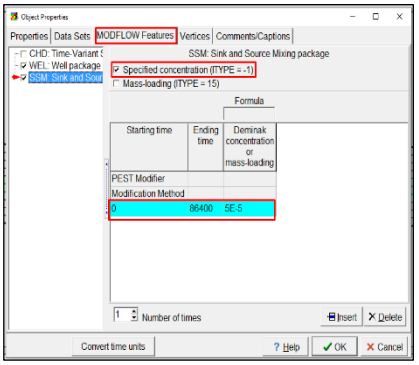


16. Al ubicar el punto, a) apareció una ventana emergente que corresponde a las propiedades del elemento, en la cual se asignó un nombre que fue ‘’vertimiento’’, una ubicación por capas y se asignan los valores cuantitativos a los paquetes activados anteriormente; b) en la opción WEL ser refirió el caudal elegido de vertimiento para esa área específica y bajo el tiempo establecido desde el comienzo; y c) en la opción SSM se puso la concentración de entrada del contaminante elegido y el lapso definido con antelación. Los demás valores concernientes al modelo se dejaron por defecto, para efectos de completar el modelo general.

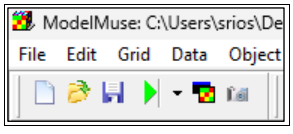
a) b) c)

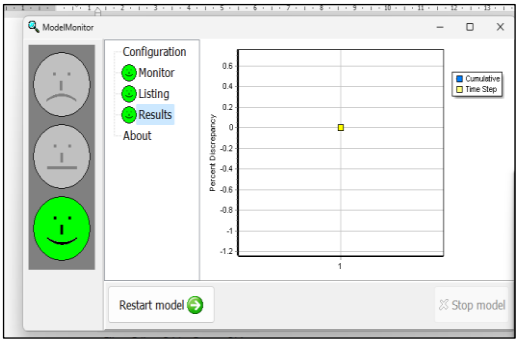


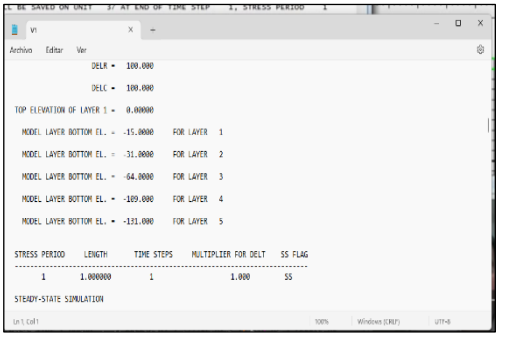




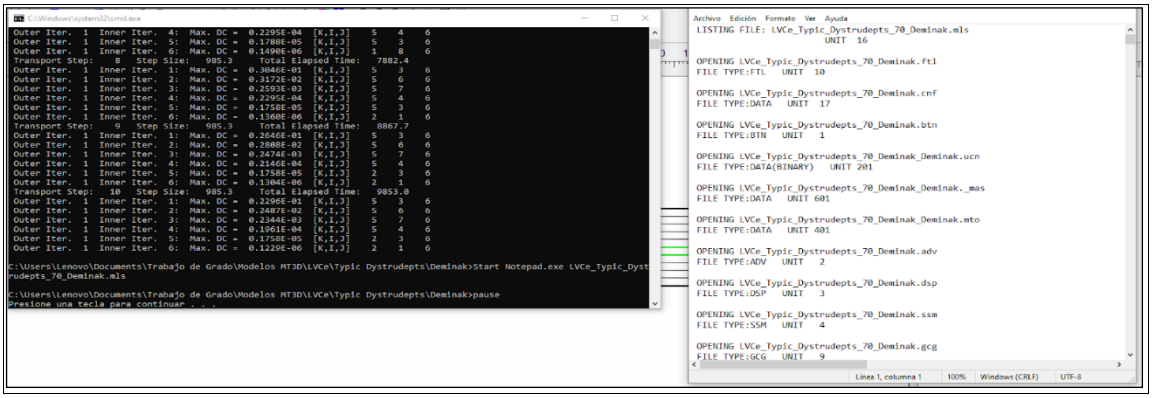
17. Para correr el modelo de flujos se realizó lo siguiente: se dio clic en la flecha verde para que el solucionador comience su proceso y, en caso de no encontrar errores, el programa mostró tres (3) caras verdes en los tres (3) aspectos relevantes del modelo de flujo (monitor, listado y resultados), asimismo, apareció un punto amarillo que indicó un porcentaje de discrepancia que siempre debe tender a cero. Adicionalmente, se generó un resumen del modelo en el block de notas.



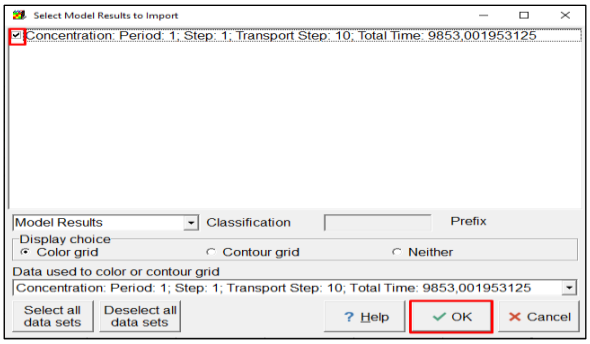


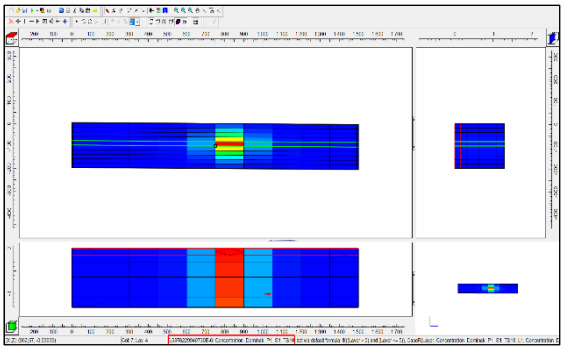


18. Luego de que los resultados dieran correctamente, se corrió el modelo de transporte exportando los archivos MT3DS, con el fin de ver los resultados de concentraciones dentro de la grilla con respecto al flujo estipulado y corrido en el paso anterior. En la flecha de la herramienta  Se desplegó y seleccionó la opción Export MT3D-USGS input files, se buscó la carpeta en donde guardar dichos archivos y se colocó el respectivo nombre. Al correr, saldrán dos ventanas emergentes que muestran el correcto funcionamiento del modelo de transporte.



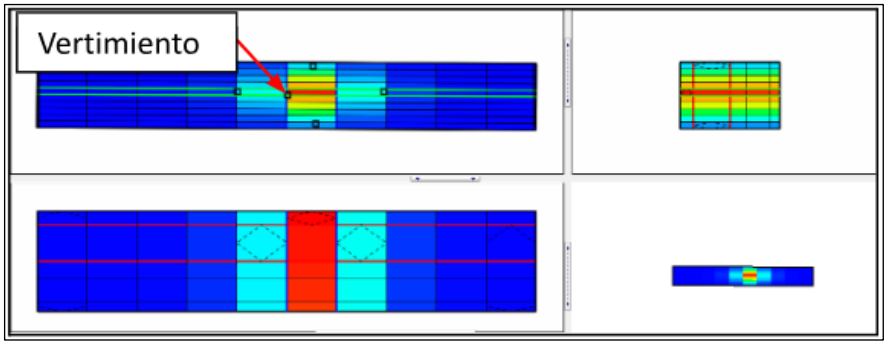
19. Se verificó y visualizaron los resultados obtenidos, con la opción  import and display model results, se seleccionó el archivo exportado del modelo de transporte (con extensión ucn), el cual pertenece al contaminante modelado. Al seleccionarlo se abrió una ventana en la cual se activará el periodo de concentración que se estipuló en MODFLOW Time, se da OK y a continuación se visualizaron los resultados.





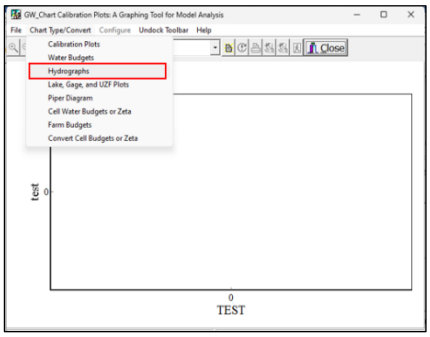
Sección GW-Chart

1. En esta parte, fue indispensable conocer concretamente la concentración del contaminante o fertilizante en diferentes zonas de la grilla por lo cual se planteó ubicar cuatro (4) puntos de observación localizados en los puntos cardinales norte, oeste, este y oeste siendo su centro el punto del vertimiento del cual se encuentran a 120 m, 150 m, 300 m y 120 m, respectivamente, como se muestra a continuación. Posteriormente se repitieron los pasos 17,18 y 19.

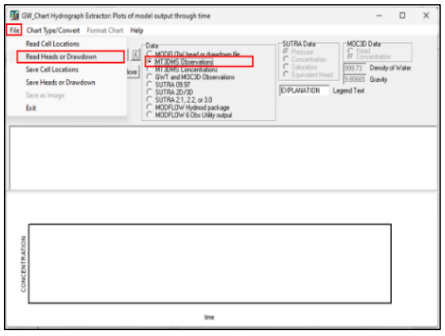


2. Posteriormente, se usó GW CHART para visualizar gráficamente cómo se comporta la concentración del agente activo versus el tiempo que ha transcurrido, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento: a) GW_CHART-Chart Type/Convert-Hidrographs; b) una vez abierta la nueva interfaz se seleccionó la opción MT3DMS Observations-File-reads head or drawdown; y c) se eligió el archivo con la extensión mto-abrir.

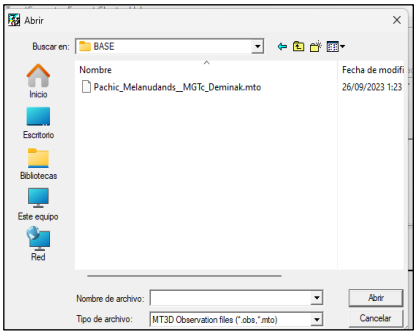
a)



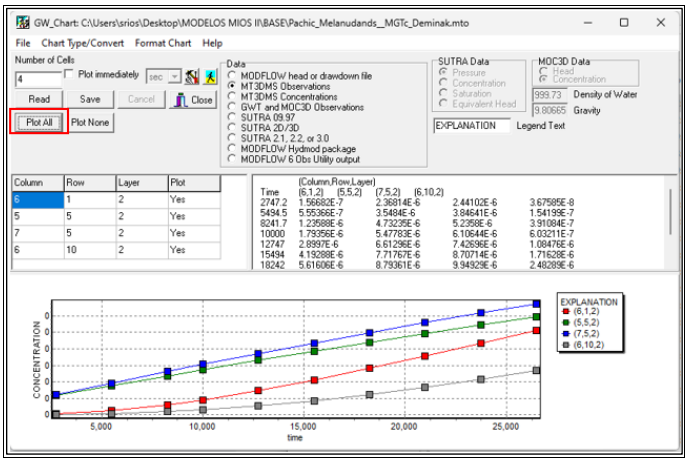
b)



c)



3. Subsecuentemente, se habilitaron los diferentes puntos de observación y para graficarlos se dio clic en Plot all; de esa manera, se obtuvo la gráfica del comportamiento de la concentración vs el tiempo dentro de la matriz de suelo.



Elección de los suelos más idóneos con base en el modelado

Esta parte del proyecto se centralizó en usar los valores de concentración y tiempo derivados del modelo como parámetros que permitieron discernir cuáles suelos fueron los mejores al momento de asimilar los agroquímicos, tomando en cuenta que el eslabón más pequeño analizado y con información disponible son los componentes de las fases que conforman a su vez a las UCS. Para lo anterior se realizó una apreciación que constaba de dos evaluaciones que serán explicadas a continuación:

- Evaluación I. Cumplimiento de la concentración: enfocada en determinar si en cada uno de los cuatro puntos de observación (asociados, a su vez, a un punto cardinal) se cumple o no con la concentración objetivo la cual varió dependiendo del pesticida o fertilizante utilizado en el modelo. De acuerdo a lo anterior, se planteó una diferencia entre la concentración objetivo menos la mostrada en el punto de observación, lo que permitió ver numéricamente si se logró (resultado positivo) o no (resultado negativo) asimilar el contaminante. A partir de lo anterior, se dilucidó en cuántos puntos se logró el objeto de la evaluación, todos los componentes que presentaron los cuatro (4) valores positivos se les asignaba un valor de uno (1), en contra parte, si se presentaba algún valor negativo se fijaba un valor de cero (0).

- Evaluación II. Tiempo óptimo: las diferentes características de cada componente hicieron que los tiempos en que se dispersaron los agroquímicos, dentro de su matriz, fueran igualmente variados, por ende, saber en cuales componentes este lapso fue menor fue el objeto de esta evaluación. Conforme a lo anterior, se calculó el promedio de todos los tiempos finales de dispersión (en horas), y se usó este valor como criterio para determinar cuál componente asimila con más brevedad los contaminantes. Por medio de una diferencia entre el promedio y el tiempo final de dispersión, se obtuvo valores positivos y negativos, los

cuales indican si son más rápidos o no que el promedio, aquellos componentes que posean signos positivos serán valorados con un uno (1) mientras aquellos que posean signos negativos obtuvieron un cero (0).

Finalmente, se buscó integrar ambas evaluaciones por medio de la suma de los resultados numéricos parciales (0 o 1) que fueron fijados al terminar cada evaluación; es decir, los mejores componentes (en consecuencia, los mejores suelos) son aquellos que tienen como factor común un uno (1) en ambas evaluaciones y, al final de la apreciación, un valor de dos (2).

8. RESULTADOS

8.1 Resultados Fase I

Cumpliendo los objetivos del trabajo, puntualmente el objetivo específico 1 y 3, basados en los ítems 7.1.1 y 7.1.2 se compiló la información del suelo en Cundinamarca, con sus características físicas consignadas en el anexo 1.

En cuanto al ítem 7.1.3 del marco metodológico y conforme al marco conceptual relacionado con los parámetros ambientales y normativos para la depuración de las UCS del departamento de Cundinamarca, se presentan los siguientes mapas de cada área sujeto de exclusión:

8.1.1 Áreas protegidas declaradas por la Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca-CAR

Las áreas en cuestión se encuentran amparadas por diferentes actos administrativos que las exonera de posibles procesos de origen antropogénico, como el vertimiento de ARnD-T, estas pueden ser detalladas en la tabla 1 e ilustración 22.

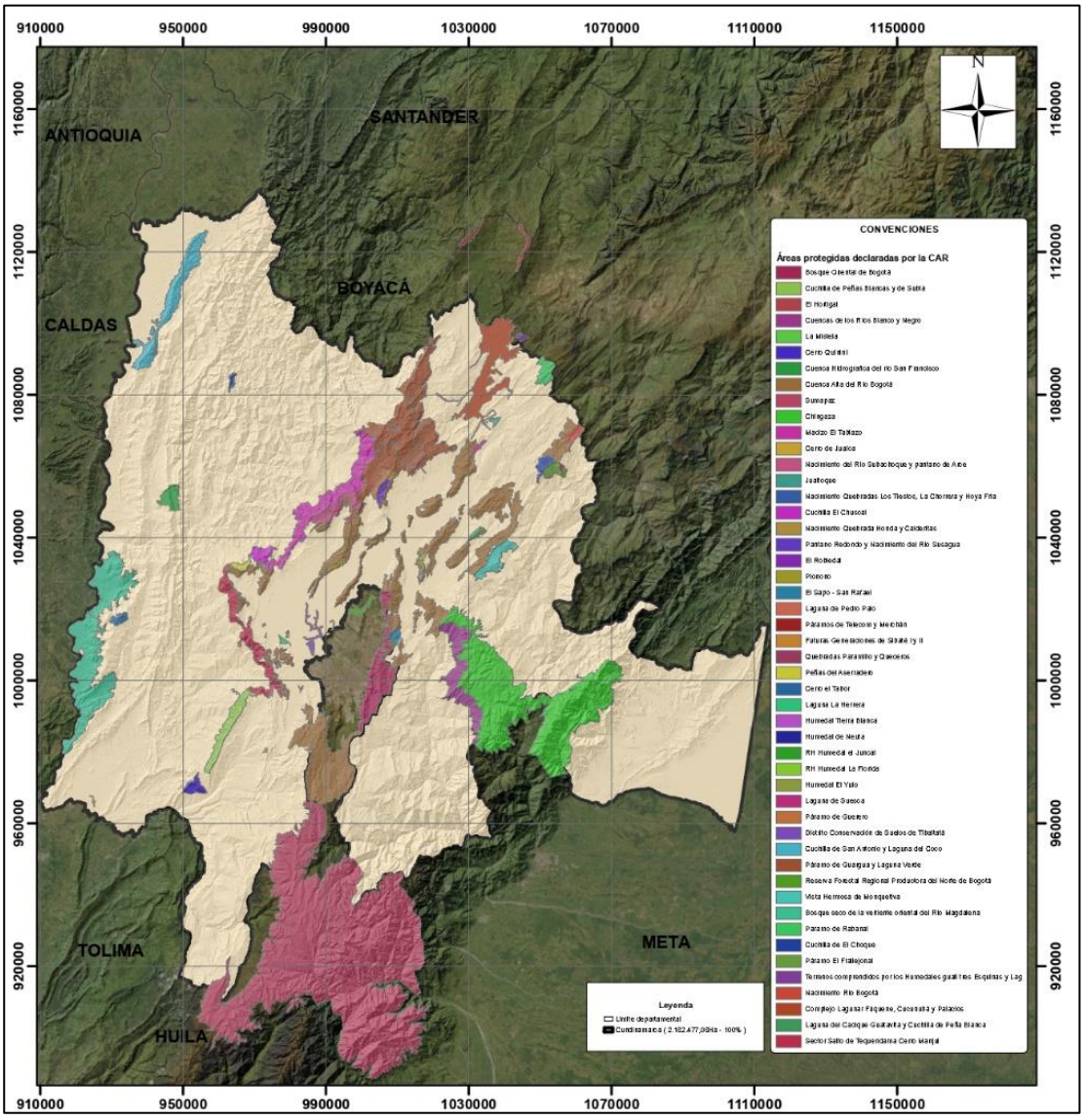


Ilustración 22. Mapa de áreas protegidas del departamento de Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) con base en Áreas protegidas declaradas por la CAR (s.f.).

8.1.2 Rondas hídricas de los cuerpos lóticos y lénticos de Cundinamarca.

De acuerdo a la naturaleza académica de este trabajo y en lo descrito con antelación respecto a las rondas hídricas, se planteó una ronda hídrica envolvente de 30 metros a cada lado del cauce para drenajes sencillos, ciénagas, humedales, jagueyes, pantanos y lagunas, y para los drenajes dobles una ronda hídrica envolvente de 100 metros (ilustración 23).

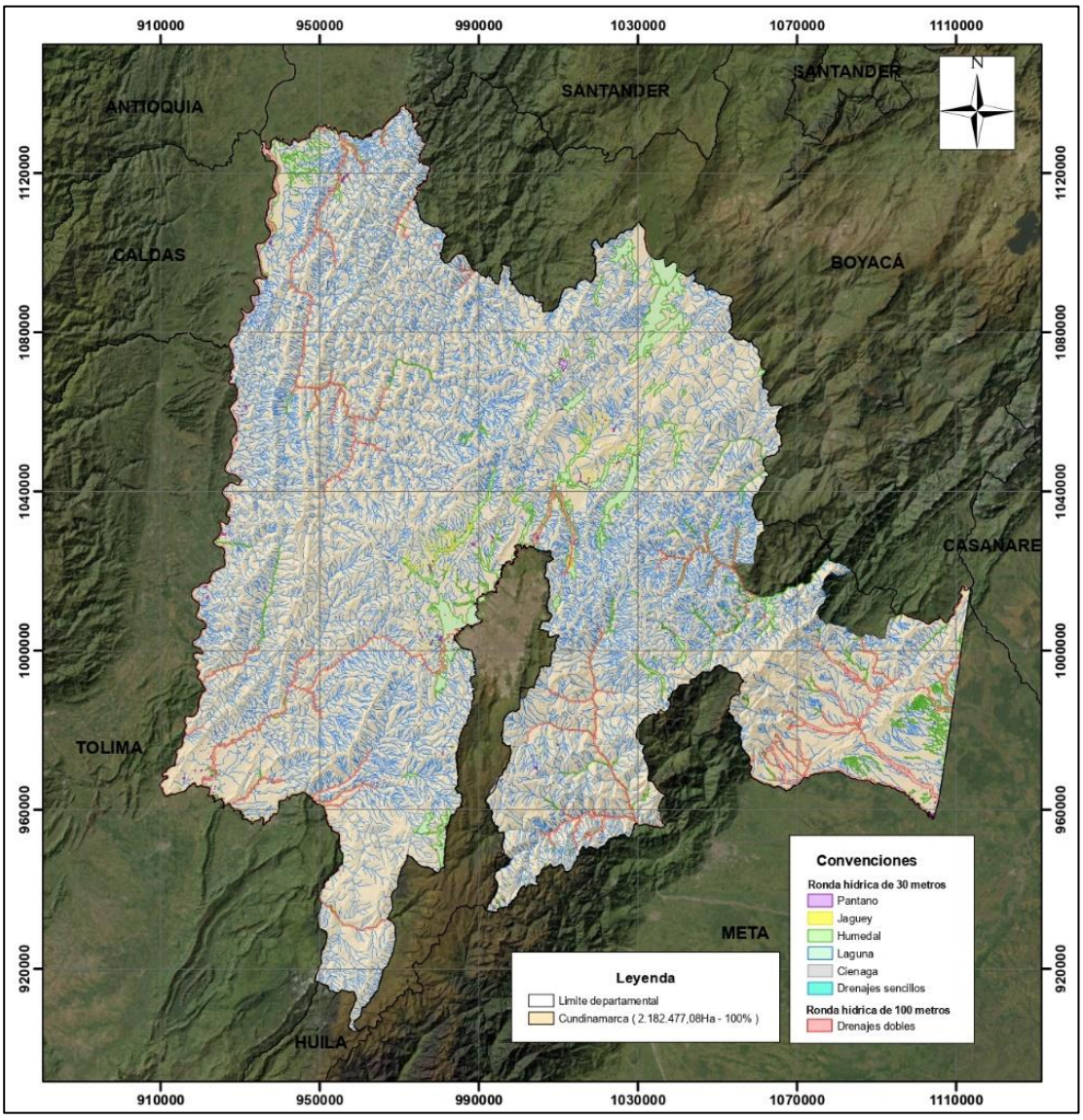


Ilustración 23. Mapa rondas hídricas cuerpos lóticos y lénticos de Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir de la base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000 (2022)

8.1.3 Zona urbana y cabeceras municipales

Bajo el contexto expuesto, referente a las zonas urbanas en el apartado de marco, Cundinamarca posee 116 municipios cada uno con su centro poblado que lo convierte en una zona exclusiva para ser habitada y con estrictos protocolos de conservación de la naturaleza y, de igual manera, aplica para Bogotá. Por esta razón, las zonas urbanas y cabeceras municipales son espacios que no se contemplan como aptas para el vertimiento de ARnD-T, estas se detallan en la ilustración 24.

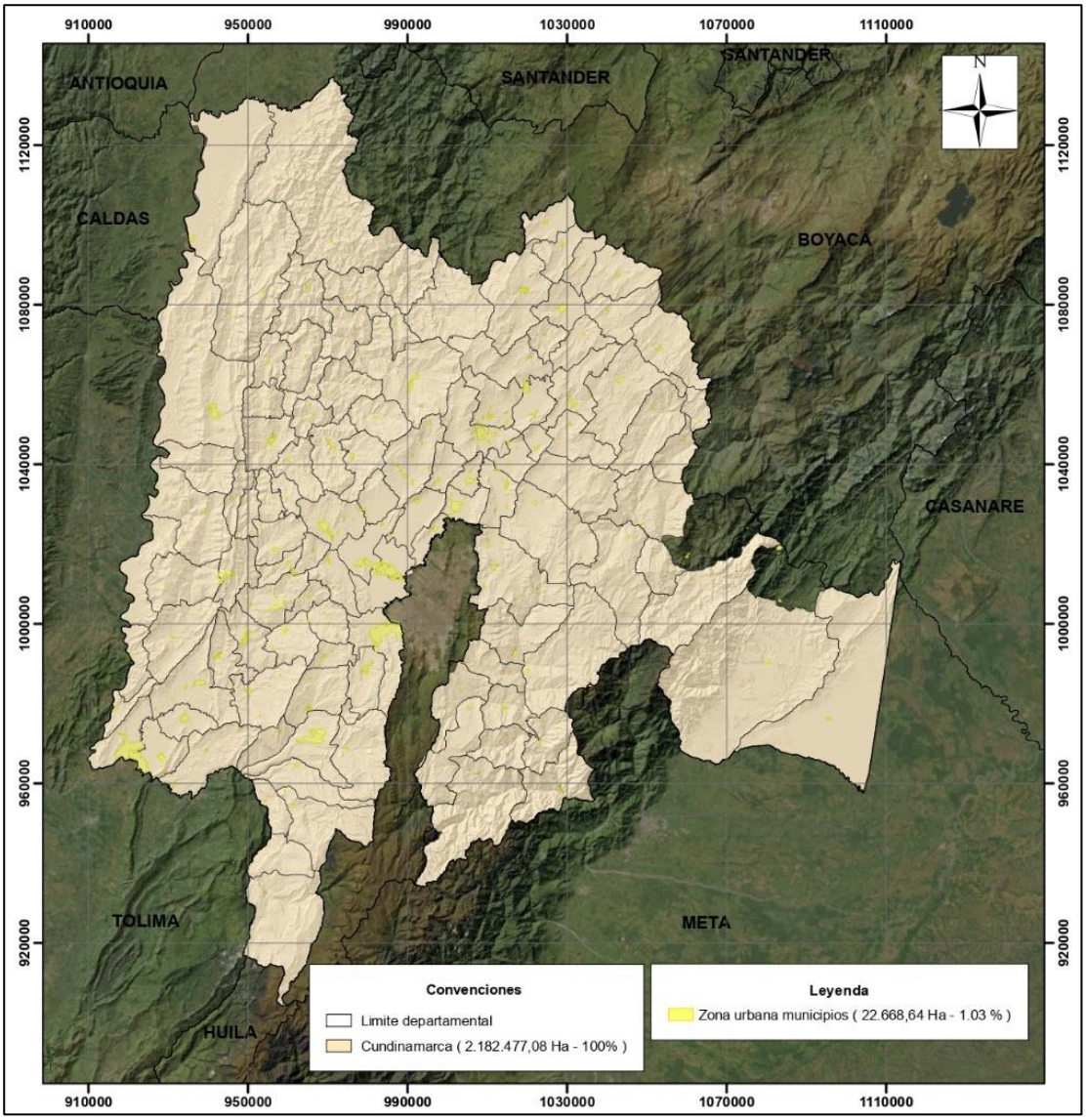


Ilustración 24. Mapa rondas hídricas cuerpos lóticos y lénticos de Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir de la base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000 (2022)

8.1.4 Suelo con conflicto de uso

De acuerdo a lo descrito en el marco conceptual y a la ilustración 25, el territorio de Cundinamarca posee zonas que presentan una condición conflictiva del suelo; por ende, considerando que el 42.3 % (251.976,77,68 Ha) de la superficie del departamento es categorizado como en conflicto de algún tipo, ya sea con los cuerpos de agua, con las zonas urbanas y suburbanas, o con la sobreutilización de la corteza terrestre, es importante no aumentar la magnitud de esta problemática estableciendo así que las posibles zonas adecuadas para realizar el vertimiento de ARnD-T se encuentran en el 38.4% restante del área departamental.

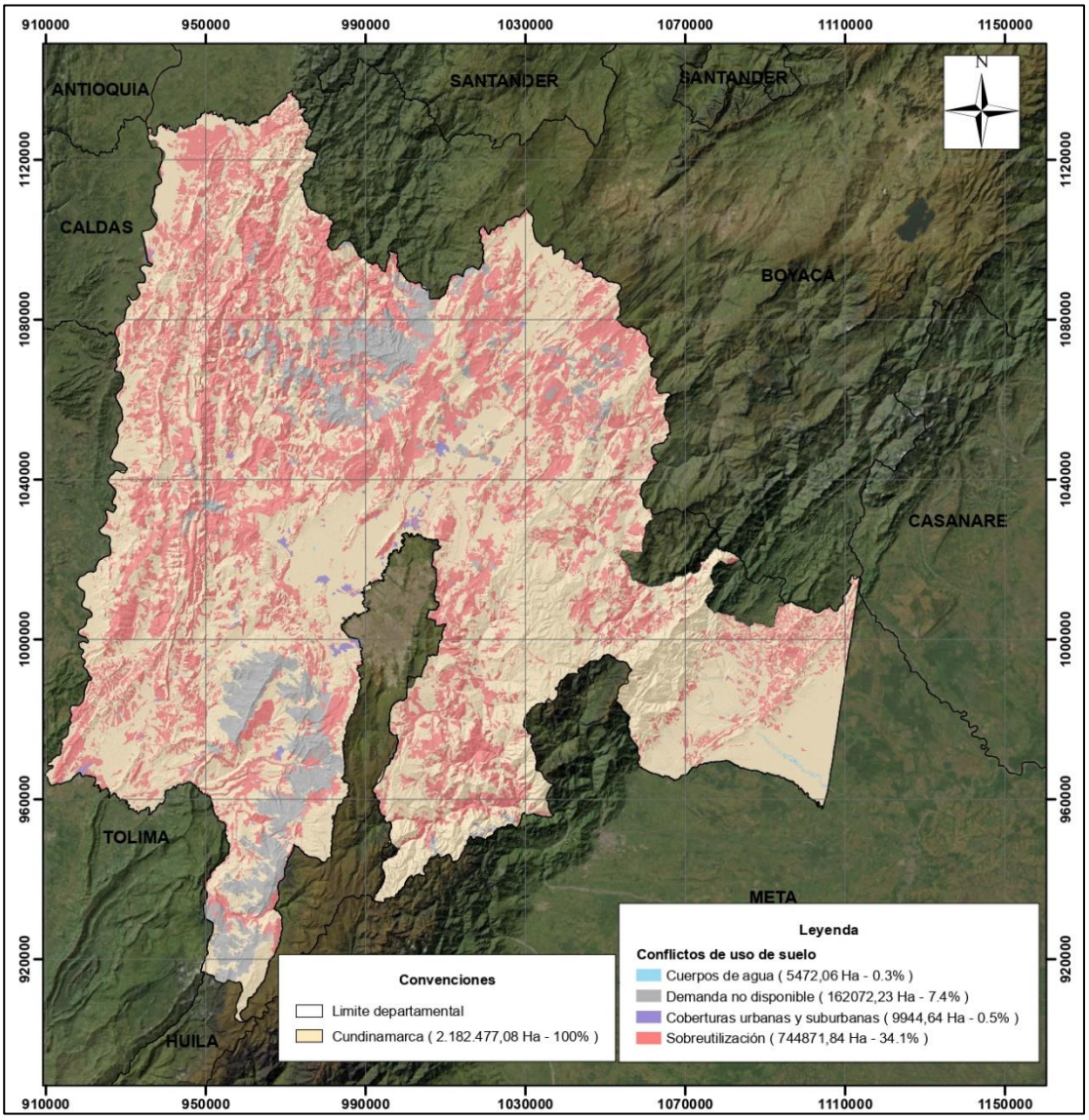


Ilustración 25. Mapa conflicto de uso de suelo de Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del Mapa Digital de Conflictos de Uso, República de Colombia, Escala 1:100.000 (2013)

8.1.5 Clases Agrológicas

Teniendo en cuenta lo expuesto respecto a las clases agrológicas, es de notarse que los suelos con mayor fertilidad, periodos largos de inundaciones y encharcamientos frecuentes, pendientes escarpadas y con propiedades rocosas, serán suelos que fueron filtrados en la depuración realizada; para el caso particular, los suelos de clase agrológicas de tipo 7 y 8 presentan grandes dificultades y, por ende, serán sumamente improductivos para cualquier actividad, incluyendo la deposición de vertimientos, puesto que presentan una vulnerabilidad alta debido a que son áreas muy escarpadas y con importantes limitaciones para su uso agropecuario, incluyendo pendientes y pedregosidad muy altas. La representación gráfica de estas zonas se encuentra evidenciada en la ilustración 26, siendo así polígonos no idóneos para descargas.

Es menester indicar que la presente selección debe tener en cuenta la clase agrológica 5, puesto a sus condiciones de encharcamiento y restricciones de uso. No obstante, dentro de la información desarrollada por el IGAC escala 1:100.000 en cuestión de Capacidad de Uso de las Tierras de Colombia, no se aprecia en sus atributos las clases agrológicas 1 y 5, por lo que no fue incluido dentro de la ilustración 26.

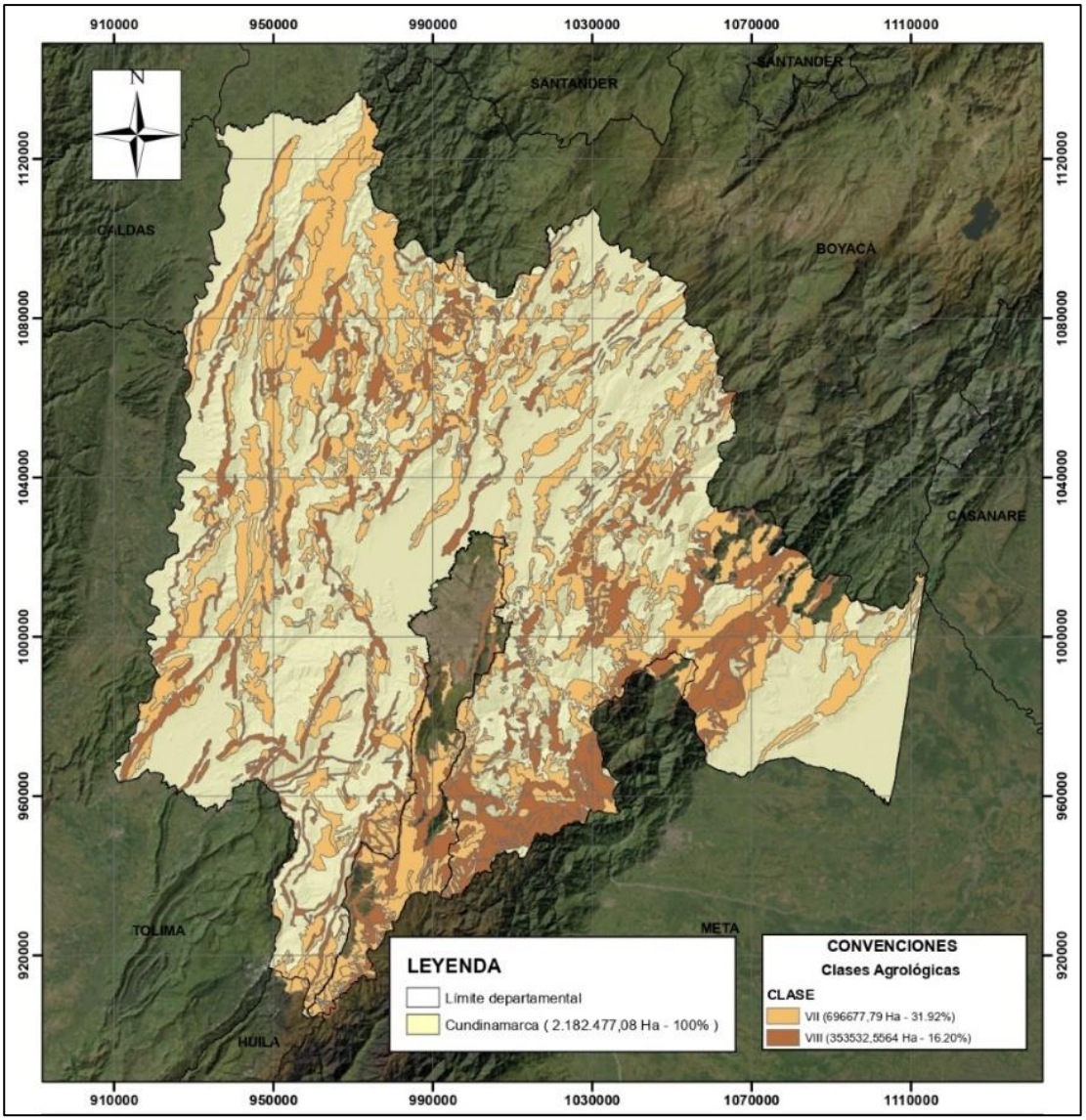


Ilustración 26. Mapa de clases agrológicas del municipio de Cundinamarca.

Fuente: autores (2023) a partir del Mapas de Capacidad de Uso de las Tierras del Territorio Colombiano a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

8.1.6 Páramos

La normatividad expuesta determina las áreas del ecosistema de páramos y la necesidad de salvaguardarlo gracias a sus servicios ecosistémicos. Estas zonas de exclusión por aprovisionamiento hídrico se pueden evidenciar en la ilustración 27.

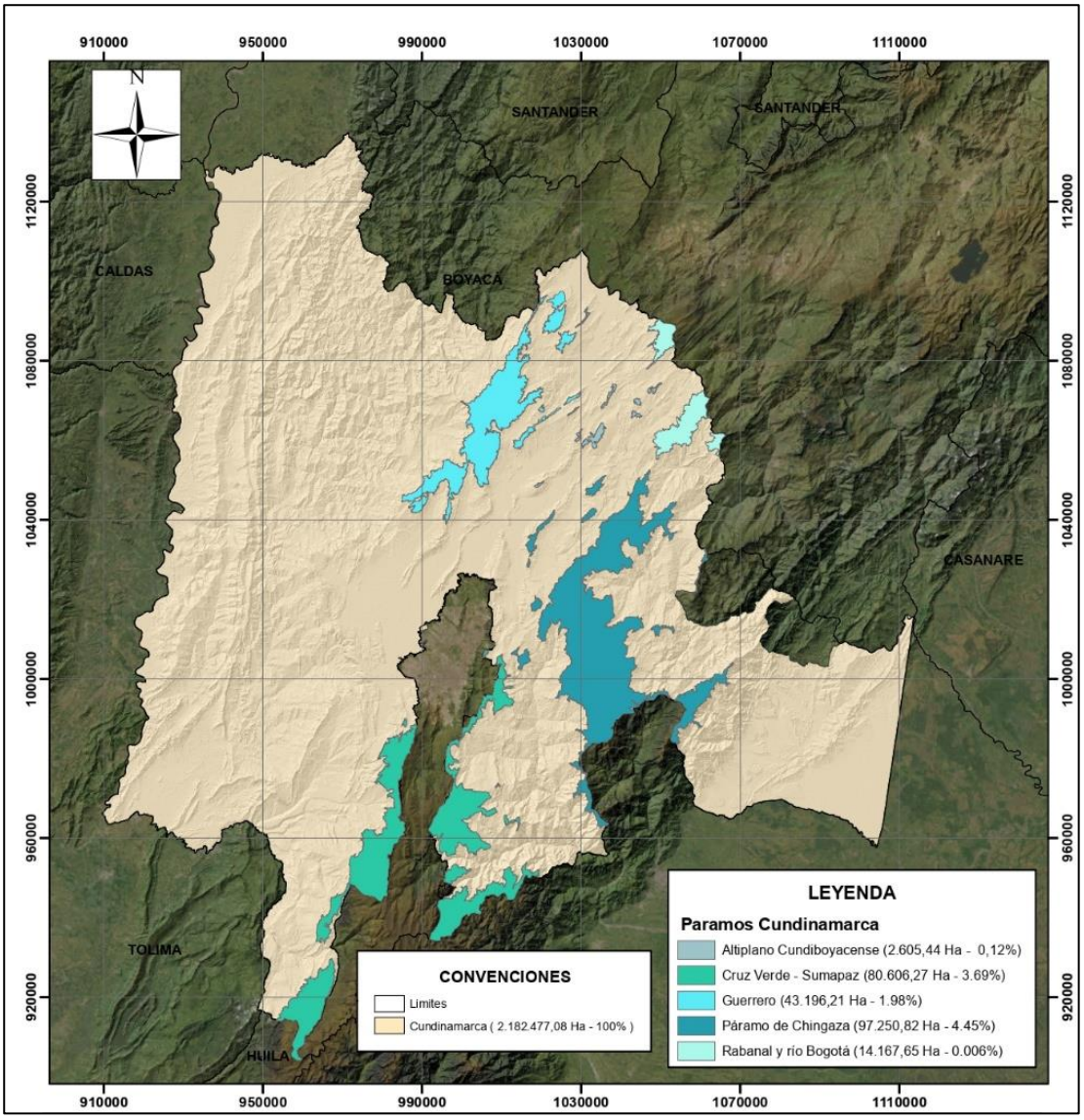


Ilustración 27. Mapa de páramos del municipio de Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del mapa de páramos escala 1:100000 de la Gobernación de Cundinamarca (2017)

8.1.7 Aguas subterráneas- acuíferos

Estableciendo el riesgo por contaminación de vertimientos al suelo con el fin de buscar su infiltración, debe someterse a discriminación en dado caso que en dicha zona se cuente con un sistema de aguas subterráneas, puesto que la difusión o infiltración de ARnD- T creará una alteración fisicoquímica de la calidad de agua de los acuíferos, lo que ocasionará contaminación a aguas superficiales y serios problemas de salud ambiental y pública en dichas zonas. Así, la reglamentación citada establece la prohibición de actividades de deposición de vertimientos en zonas de acuíferos, lo que genera una suficiente causal para someter a depuración dichas áreas dentro del presente estudio. Estas zonas se espacializaron a continuación en el mapa del sistema de acuíferos del departamento de Cundinamarca.

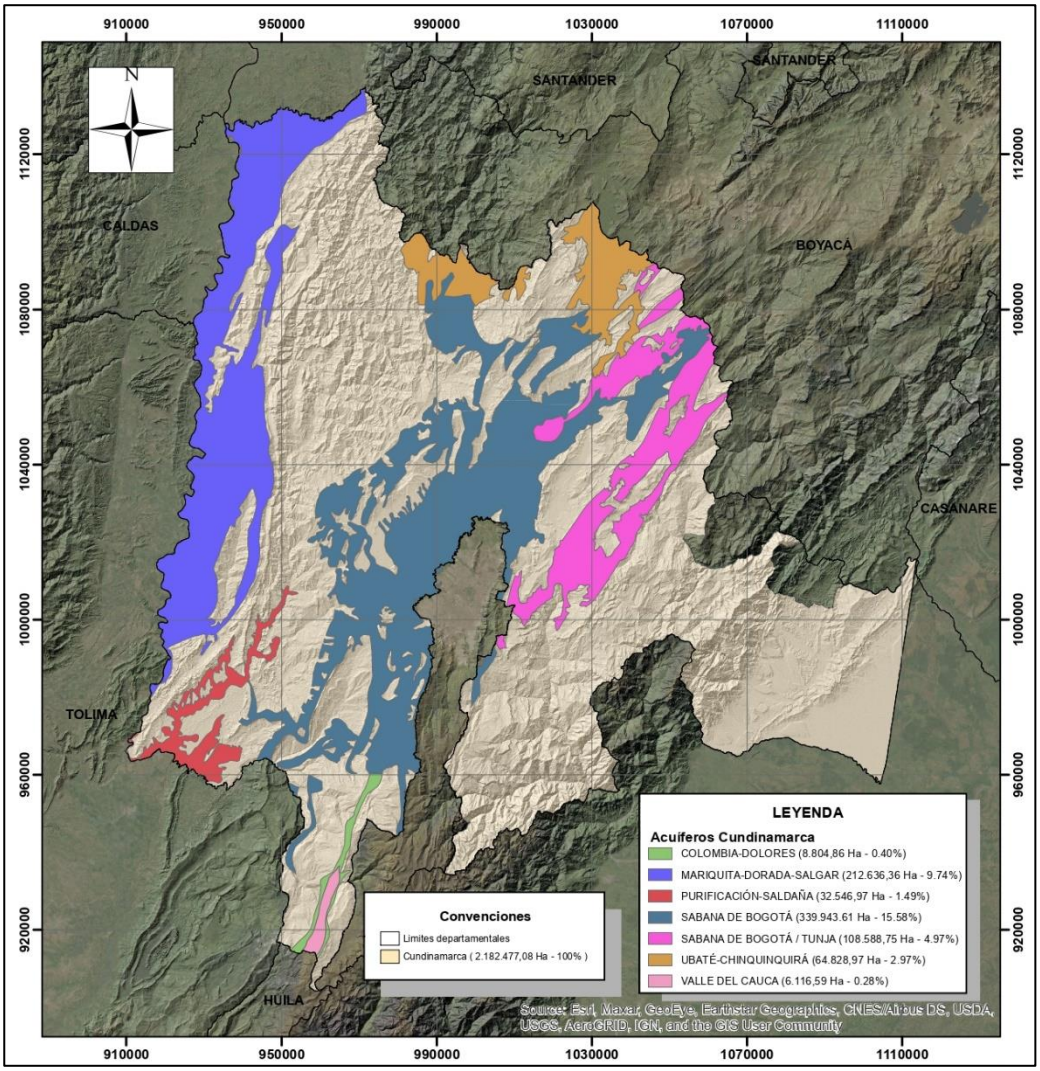


Ilustración 28. Mapa de acuíferos en Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del mapa sistema de acuíferos de Cundinamarca escala 1:100000 de ENA (2014)

8.1.8 Pendientes del terreno

Dado que son varios los condicionantes para establecer una galería de infiltración óptima para vertimientos de agroquímicos, como la textura, el perfil del suelo, la porosidad efectiva, conductividad hidráulica y, en este caso, la pendiente, es necesario establecer de este último parámetro un porcentaje de terreno no mayor al 12% para realizar dichos vertimientos, con el fin de que el suelo absorba las aguas tratadas y no se escurra a través de las cuencas hidrográficas, ocasionando contaminación en zonas de recarga hídrica o en cuerpos lóticos y lénticos. Tomando como base lo estipulado en el marco conceptual en las pendientes del terreno, las unidades cartográficas que contengan pendientes mayores al 12% en sus atributos suministrados por el IGAC, y sometiéndolas a comparación perceptual con la pendiente simple del departamento de Cundinamarca, serán el área seleccionada para depurar y despreciar puesto que no serán zonas donde haya infiltración efectiva, según la ilustración 29.

Es preciso indicar que dentro de la información contenida en la tabla de atributos del shape de las unidades cartográficas, existen fases de UCS con pendientes mayores al 12% y que están presentes en la ilustración 29, puesto que dentro de su caracterización hay rangos de porcentaje del 7% al 25%, incluso mayores al 25%, no obstante, dentro de dicha información no se puede especificar espacialmente cuáles zonas de las fases de UCS pertenecen estrictamente a los porcentajes menores al 12% despreciando a las que son mayores a esta proporción, debido a que pertenecen a una misma fase. En consecuencia, se encontrarán las fases de las UCS que se adhieran a la anterior premisa (ilustración 29).

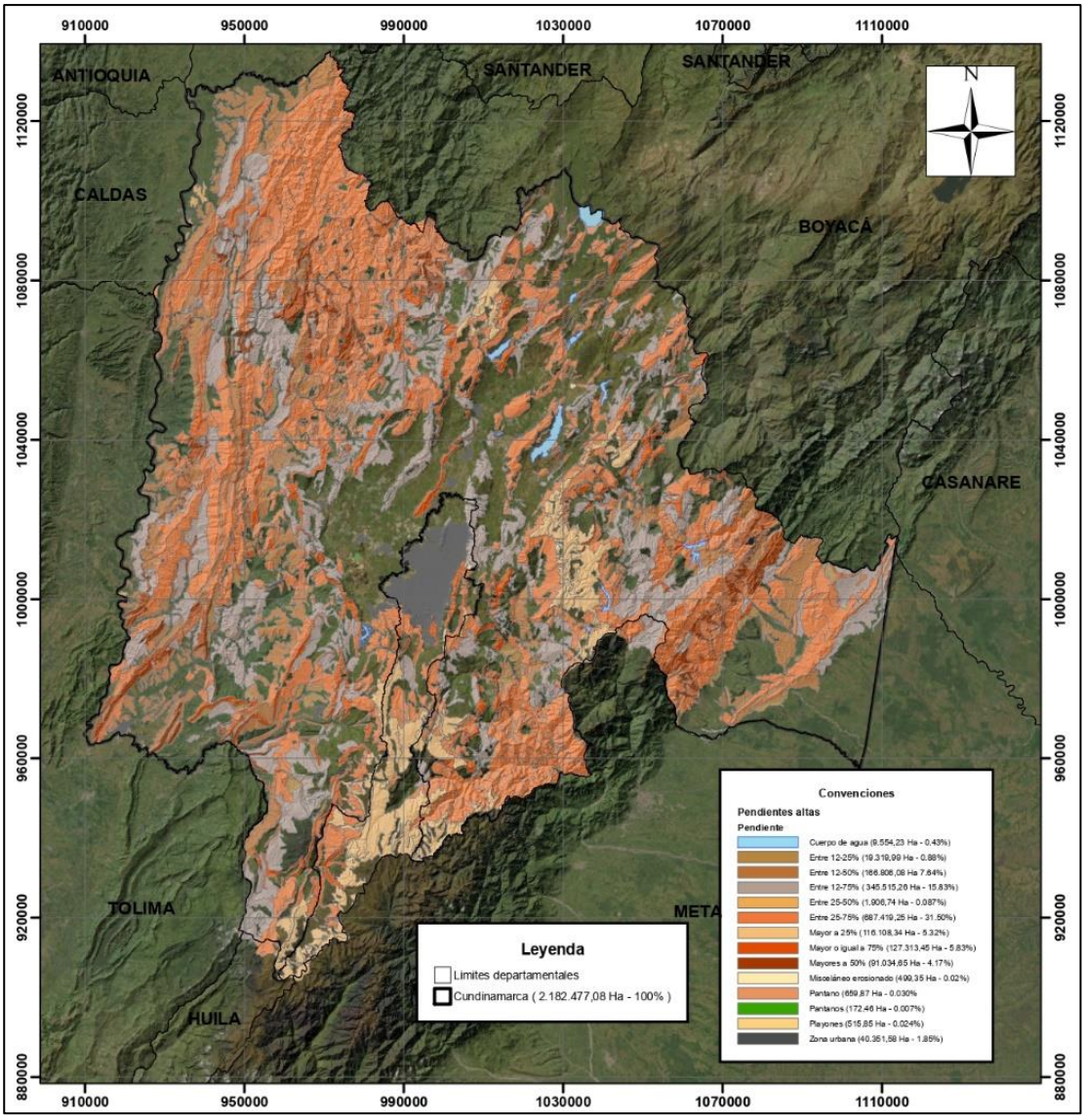


Ilustración 29. Mapa de pendientes altas del municipio de Cundinamarca.

Fuente: autores (2023) a partir del mapa de tipos de suelo de Cundinamarca a escala 1:100000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

8.1.9 Amenaza por inundación

La ilustración 30 detalla los polígonos y representación porcentual (1.64%) de la circunspección del departamento que se encuentra en la categoría de amenaza alta de inundación; la información gráfica presentada se extrajo del mapa realizado por la Gobernación de Cundinamarca (s.f.) exhibiendo la zonificación de amenazas por inundación; las áreas representadas fueron escogidas sobre las demás debido a que están asociadas principalmente a las riberas y/o valles de inundación de los drenajes dobles del departamento, por ende, estas zonas no se consideran apropiadas para el vertimiento de ARnD-T, teniendo así un carácter de exclusión en el ejercicio académico.

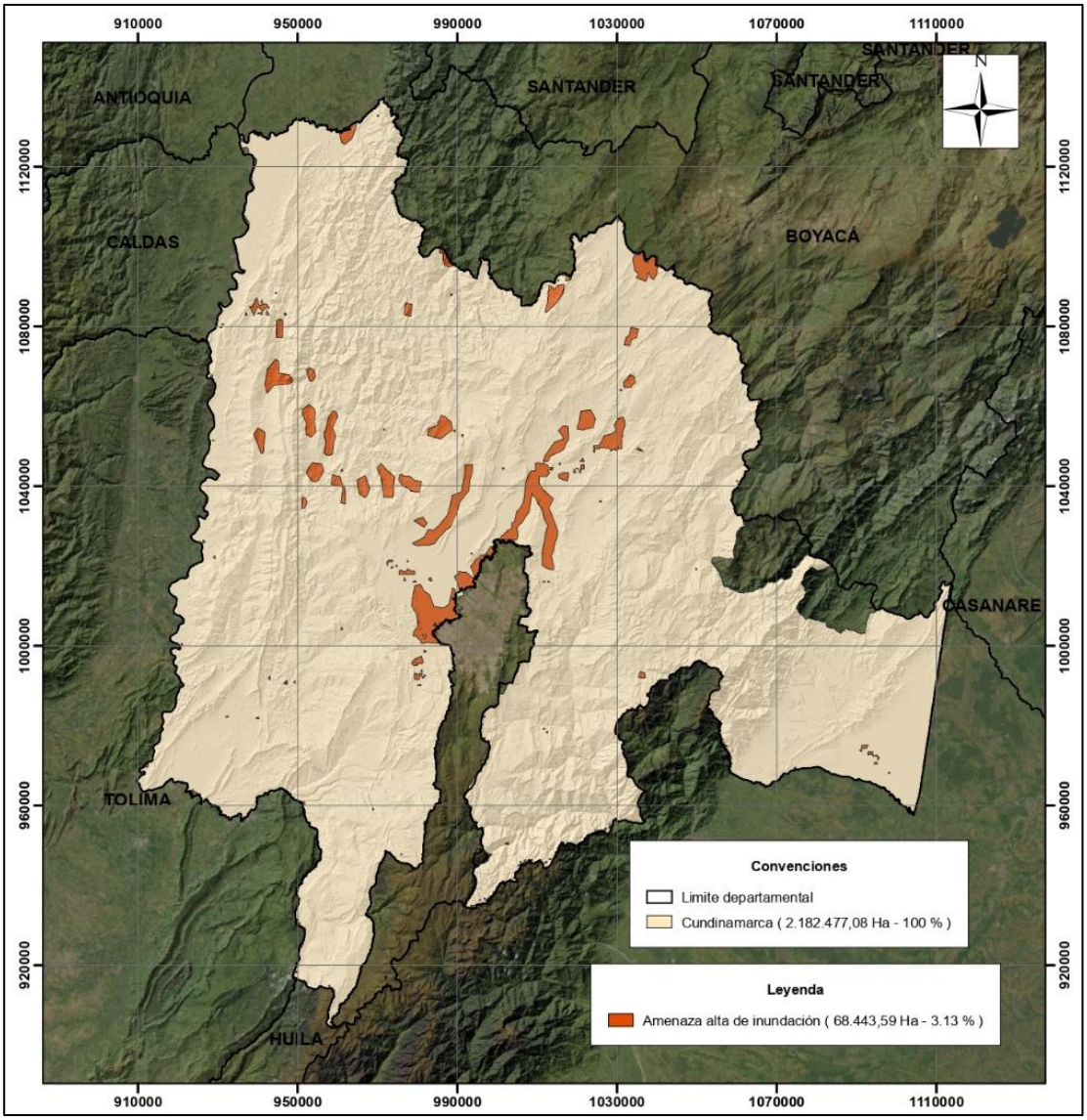


Ilustración 30. Mapa amenaza alta de inundación en Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del mapa desarrollado por la Gobernación de Cundinamarca (s.f).

8.1.10 Amenaza de movimientos en masa

De acuerdo a lo expuesto respecto a la amenaza de movimiento en masa, se presenta la ilustración 31, que se centra principalmente en el 62.6% del territorio departamental clasificado con alto grado de amenaza por movimientos en masa haciendo de esos polígonos un área no apta para realizar vertimiento de ARnD-T, debido a que disminuye la capacidad de asimilación del suelo al nuevo caudal agregado.

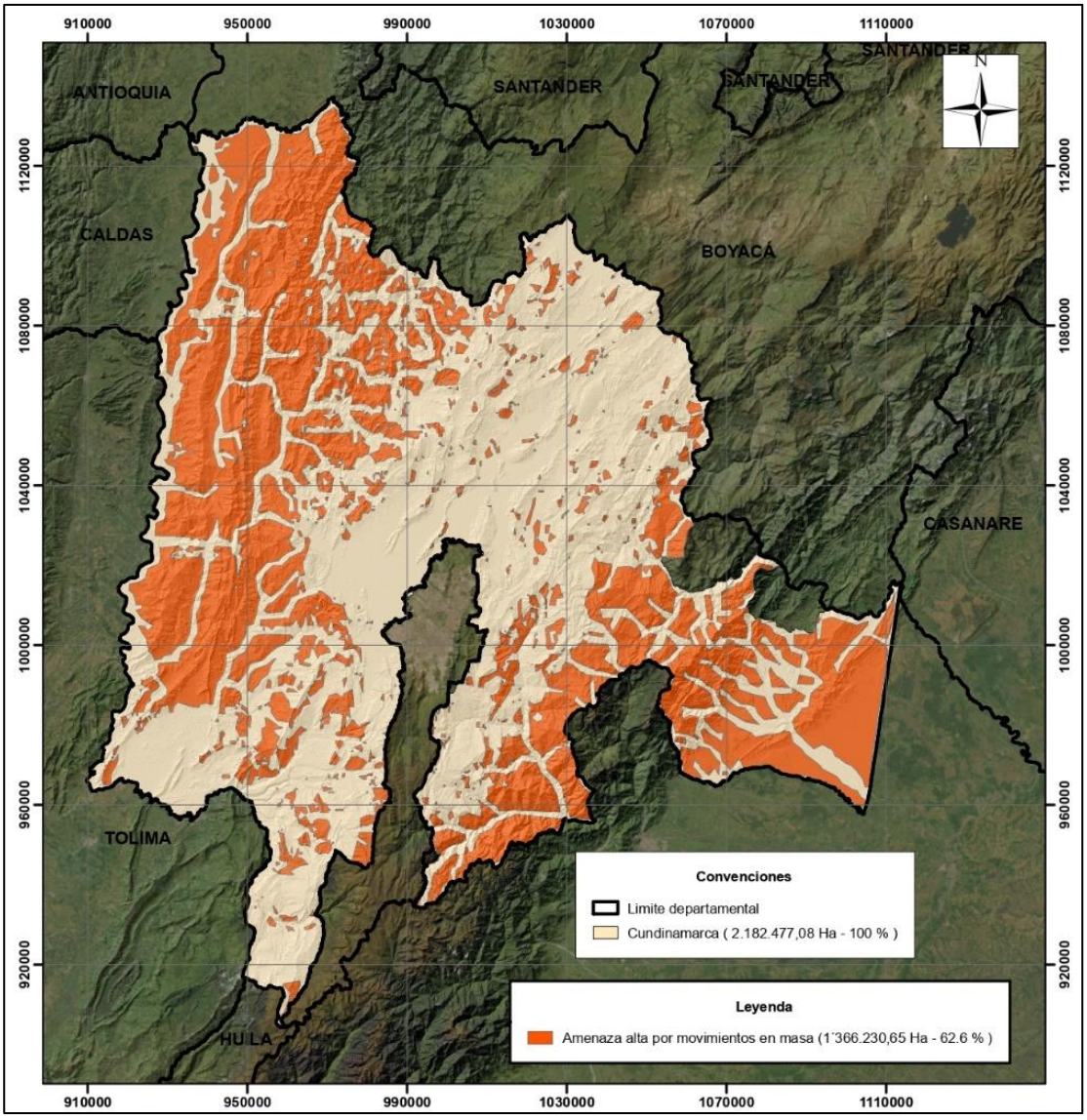


Ilustración 31. Mapa amenaza alta por movimientos en masa en Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del mapa de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100000 del Servicio Geológico Colombiano (2016)

8.1.11 Amenaza por incendios forestales

Basado en el marco conceptual, con información de la CAR, la Gobernación de Cundinamarca (2013) realizó de manera parcial una zonificación básica por amenaza de incendios forestales, para la jurisdicción de la CAR (66,6%) del departamento. Dentro de dicho mapa se extrajeron y depuraron las áreas cuyas zonas representan amenaza muy alta (4,24%), que muestran la cantidad de eventos en un periodo de 10 años en las provincias del departamento, dentro de las cuales están: Gualivá (226 eventos, 18,04%) y Rionegro (165 eventos, 13,17%). En la ilustración 32, correspondiente a la amenaza por incendios forestales, se pueden evidenciar las áreas en cuestión.

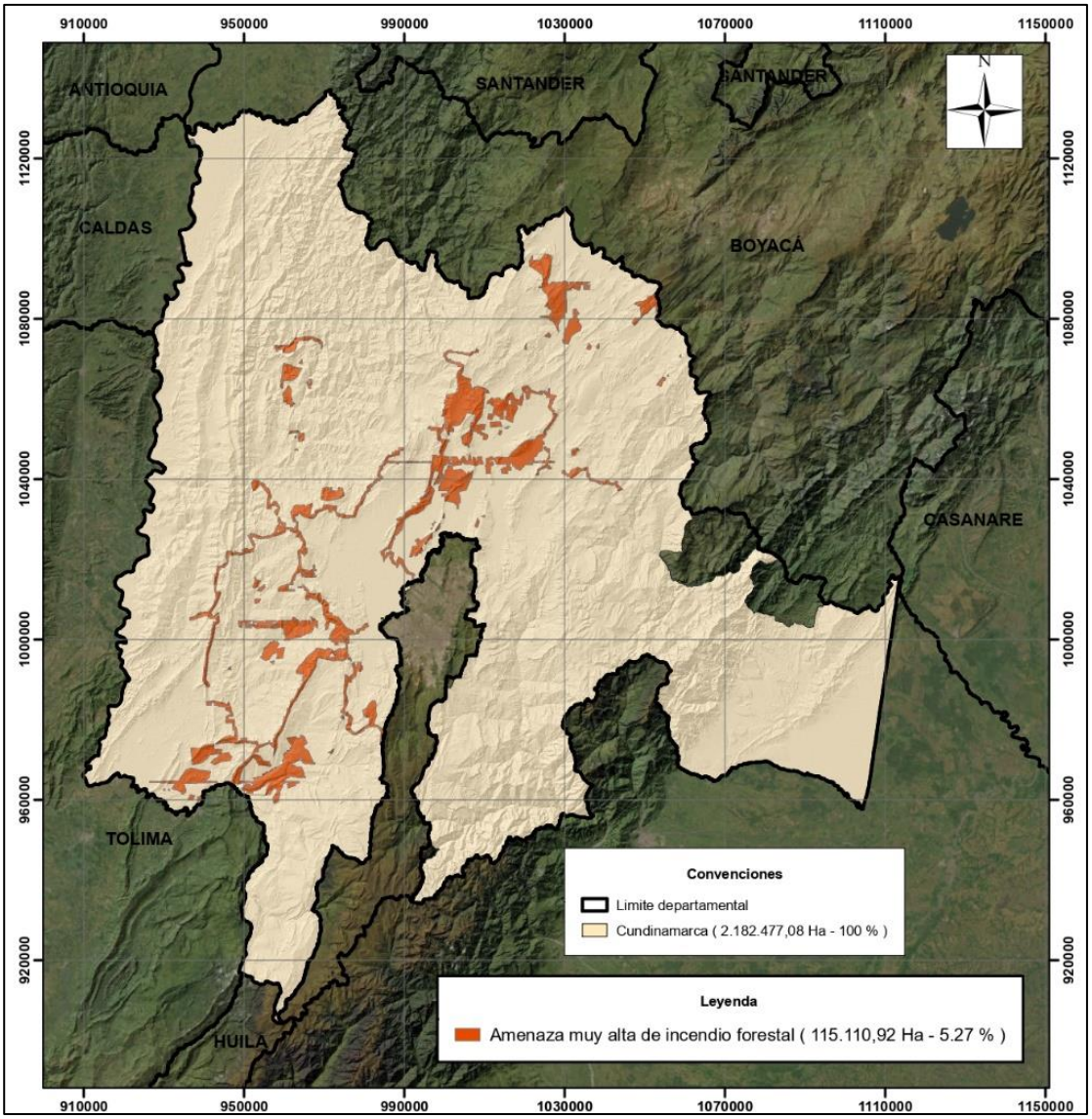


Ilustración 32. Mapa amenaza por incendios forestales en Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del mapa desarrollado por Corporación autónoma regional de Cundinamarca (2014).

8.1.12 Amenaza por avenidas torrenciales

Según información suministrada por la Gobernación de Cundinamarca (2013) a través de los registros de la Unidad Nacional del Riesgo, se evidencia que la provincia con mayor riesgo por avenidas torrenciales es Guavio con, aproximadamente, 76 eventos (un 32.48% de representatividad) en un periodo de diez años, del 2006-2016, siendo esta la zona objeto de depuración del presente estudio. Los polígonos sujetos de exclusión por este tipo de riesgos se encuentran en el siguiente mapa de avenidas torrenciales para el departamento de Cundinamarca.

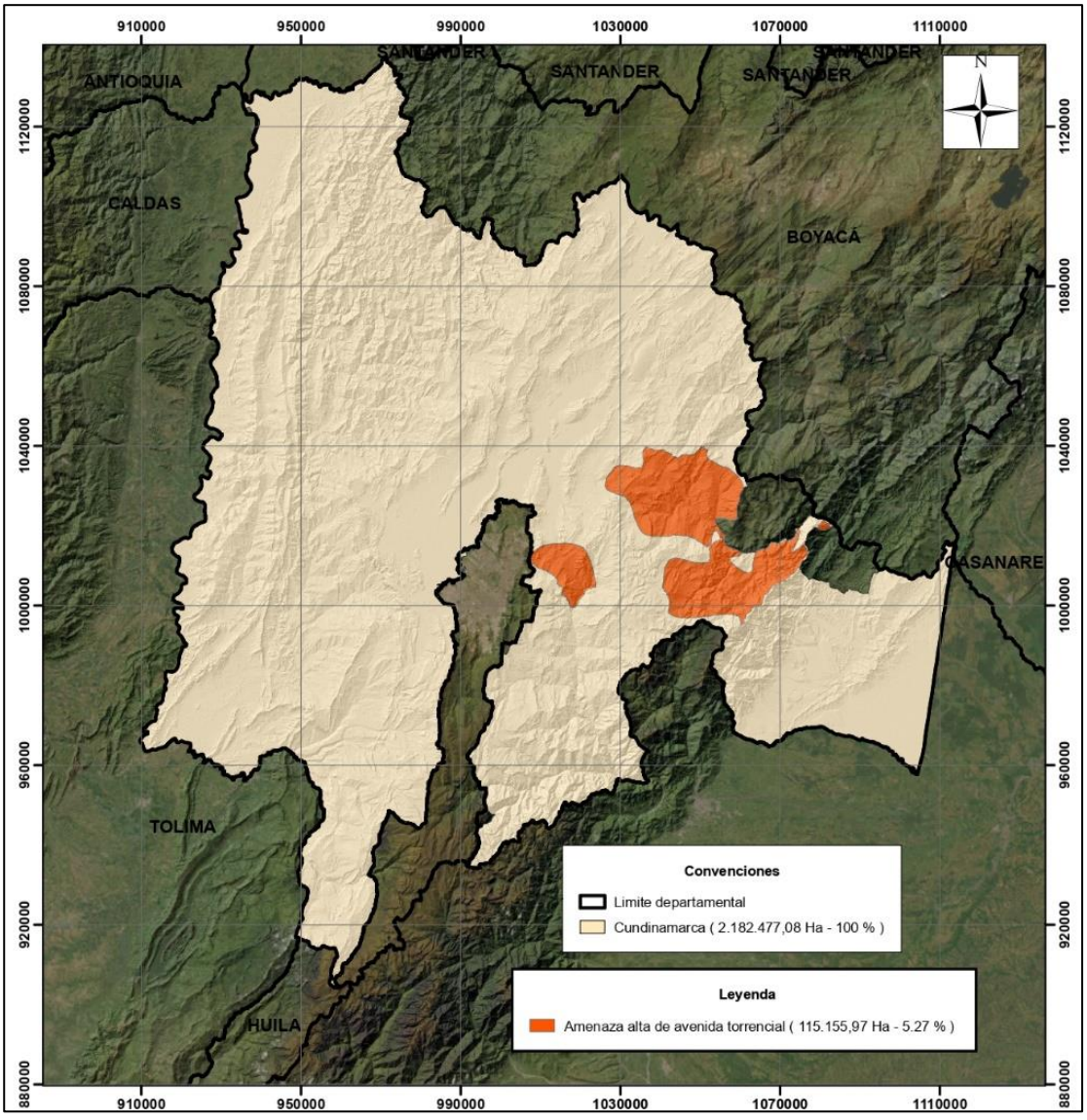


Ilustración 33. Mapa amenaza avenidas torrenciales en Cundinamarca.

Fuente: autores (2023) a partir del mapa desarrollado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2017)

8.1.13 Fases UCS depurados según parámetros ambientales y normativos

A continuación, se presentan todas las áreas no idóneas para realizar el vertimiento, las cuales son el resultado de la unión de todos los polígonos presentes en los resultados del ítem 8.1.1 al 8.1.12, reflejados en la ilustración 34.

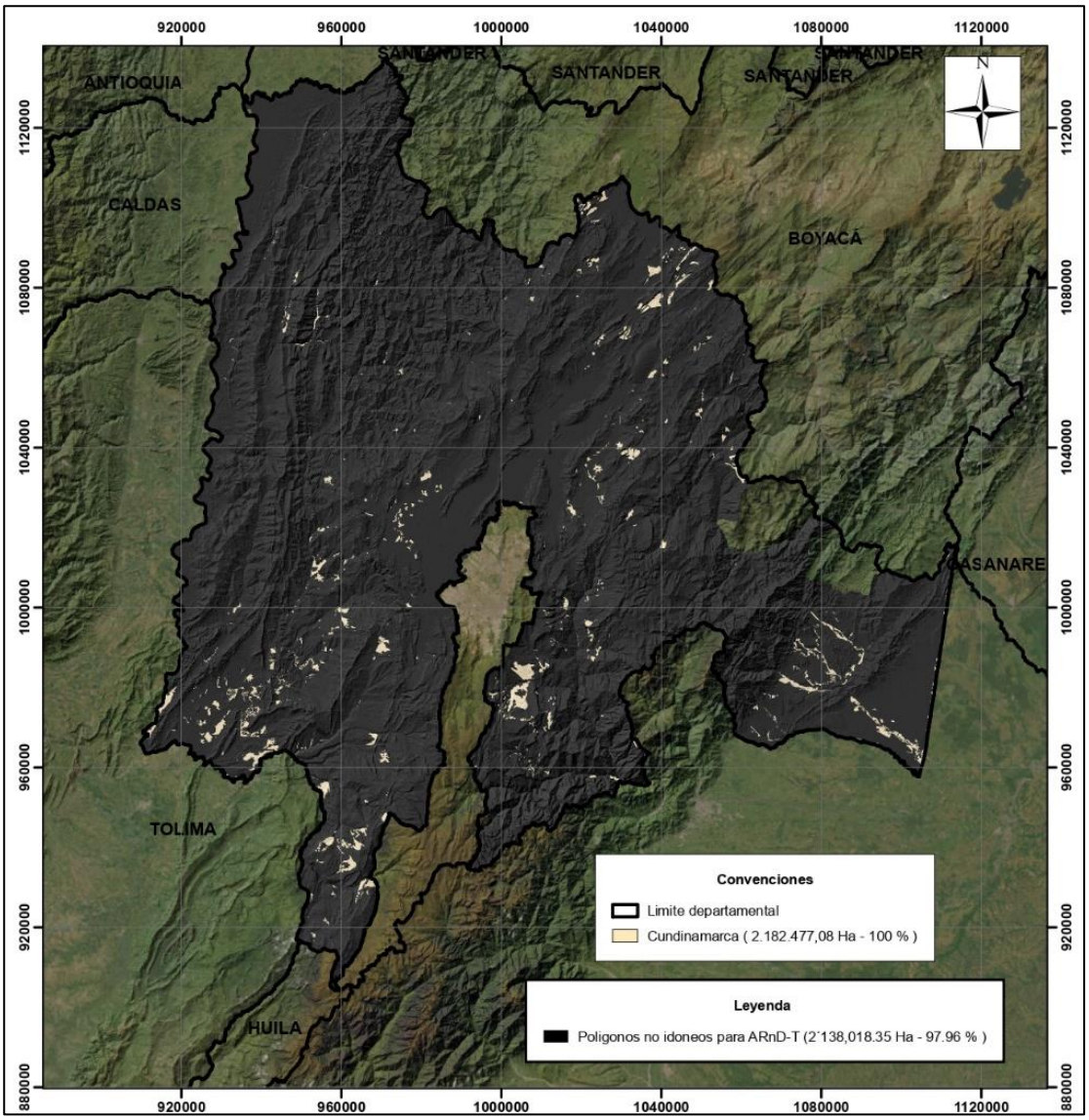


Ilustración 34. Mapa de polígonos no idóneos para vertimiento de ARnD-T
Fuente: autores (2023)

8.2 Resultados Fase II

Cumpliendo los objetivos del trabajo, específicamente el objetivo específico 1 y 3, y en concordancia con los ítems 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3 y 7.2.4 de la metodología, se presentan los siguientes resultados.

8.2.1 Clústeres de agroindustria en Cundinamarca

La generación de los clústeres explicados en ítem 7.2.1 se puede reflejar en el mapa de agroindustrias y análisis de densidad, a través de la ilustración 35 mostrada a continuación.

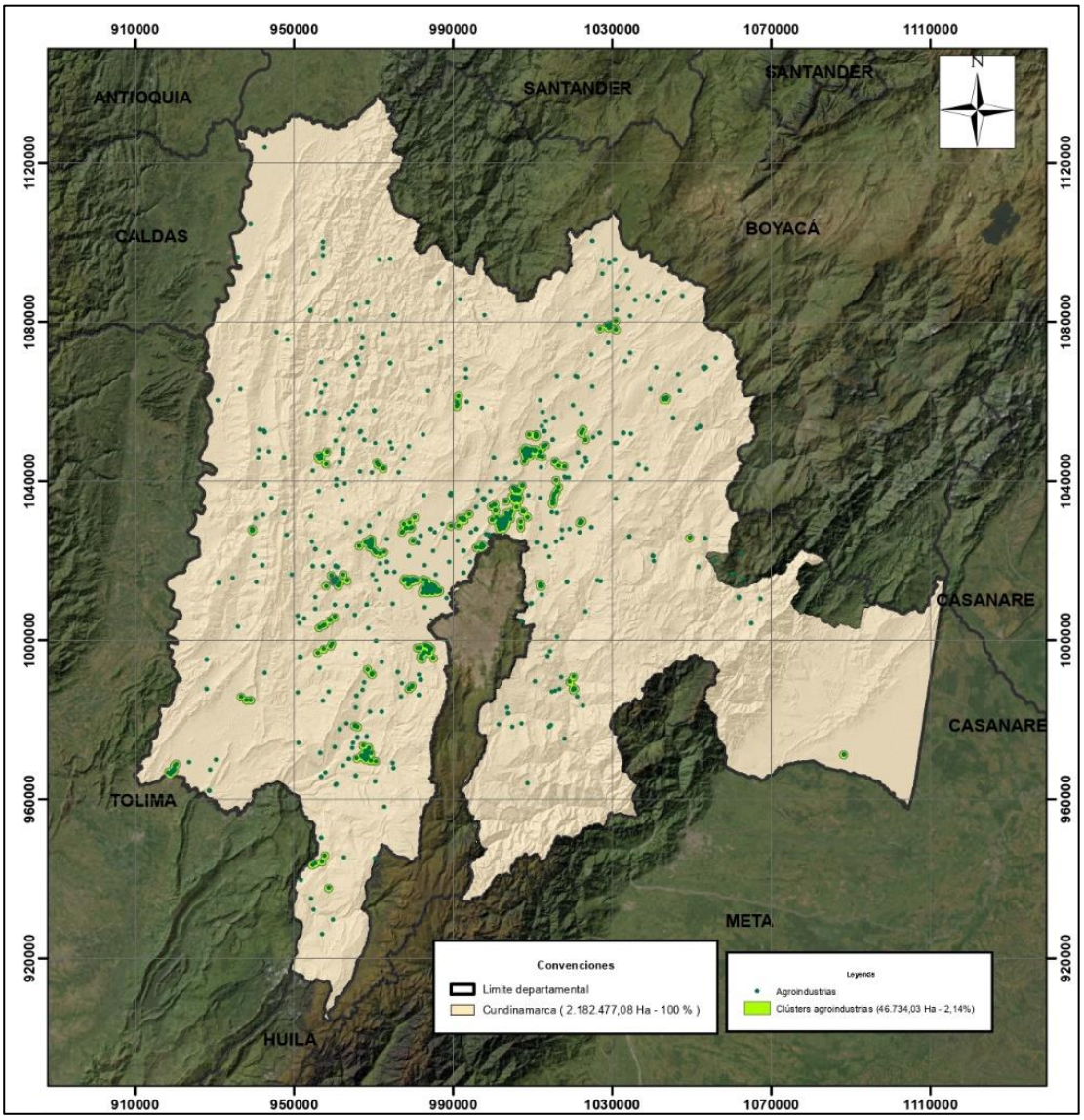


Ilustración 35. Mapa de clústeres de agroindustrias

Fuente: autores (2023) A partir de Infraestructura de Datos Espaciales Cundinamarca IDEC (2021)

8.2.2 Posibles fases de las UCS idóneas para modelamiento de ARnD-T

Con base en el resultado obtenido en el ítem 8.1.13 (ilustración 34), donde se presenta gráficamente la unión de todas las zonas que tienen en su espacio geográfico algún impedimento para realizar el vertimiento de agroquímicos tratados, se presentan de igual manera, la existencia de espacios en blanco los cuales son por defecto las áreas donde podría llevarse a cabo el modelamiento del contaminante.

Estos espacios son el insumo para realizar el recorte del shape del IGAC (2001) consiguiendo así la ilustración 36, en la cual se representan de manera general 44 UCS que, a su vez, se subdividen en 72 fases, las cuales serán analizadas más adelante tomando en consideración aspectos como la profundidad, textura, y la composición de cada unidad.

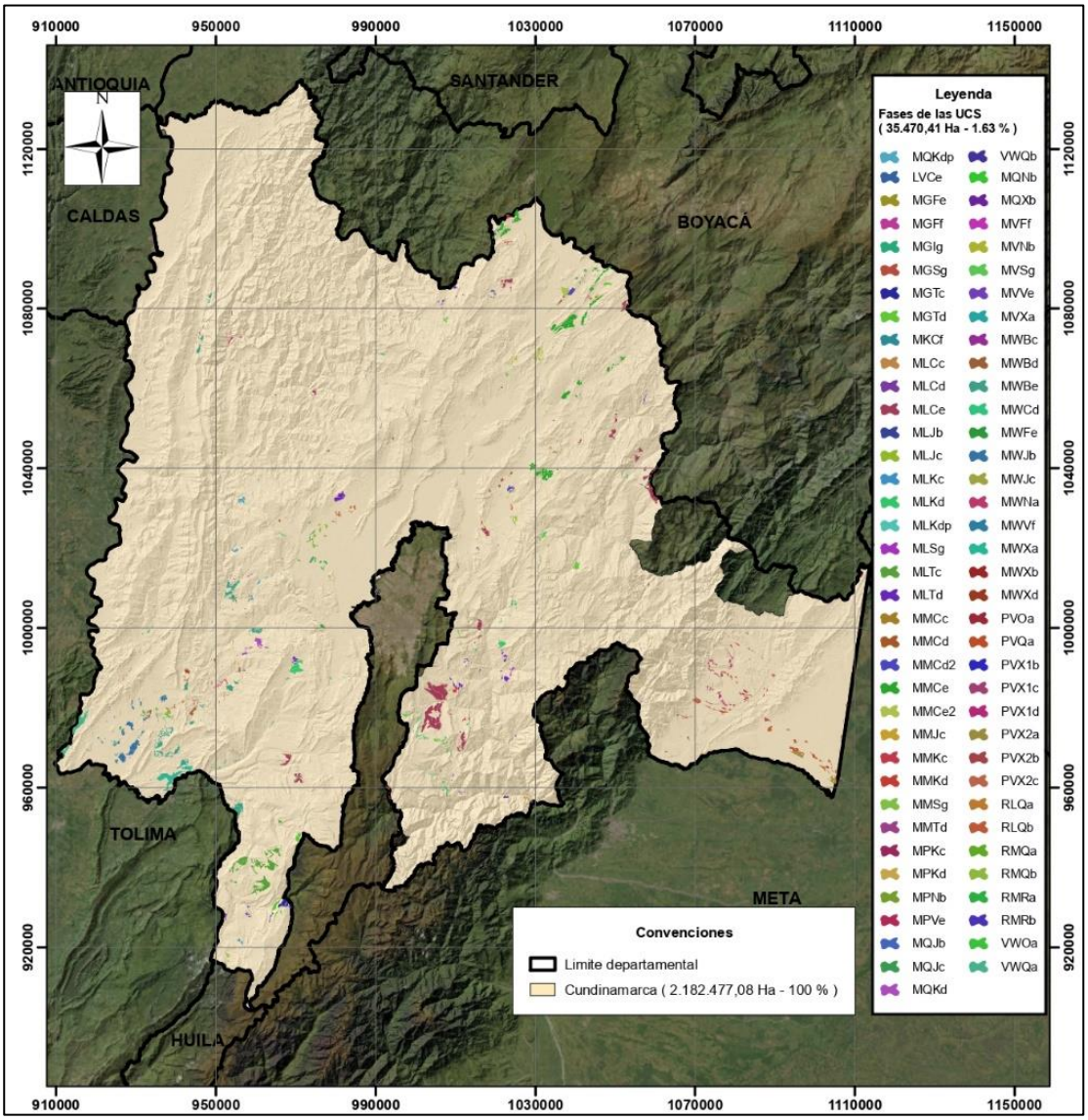


Ilustración 36. Mapa de posibles UCS para modelar el vertimiento de ARnD-T en Cundinamarca.
Fuente: autores (2023) a partir del clip del mapa digital de suelos del departamento de Cundinamarca (2021)

8.2.3 Fases de las UCS idóneas para modelamiento de ARnD-T

Siguiendo la lógica expuesta en el ítem 7.2.3 de la metodología, se logró virar de 44 UCS (disgregadas en 72 fases) a 8 UCS (separadas en 15 fases); esta información se puede visualizar en la tabla 7 a manera de resumen de todo el proceso de depuración, el cual se encuentra en el anexo 2.

Tabla 7. Tabla resumen UCS idóneas para vertimiento

n	UCS	FASES UCS	COMPOSICIÓN		RESULTADO COMPONENTE	RESULTADO FINAL
			COMPONENTE	PORCENTAJE		
1	LVC	LVCe	Typic Dystrudepts	70	apto	apto
			Entic Hapludolls	30	apto	
2	MGT	MGTc	Typic Hapludands	30	apto	apto
			Pachic Melanudands	30	apto	
3		MGTd	Humic Lithic Dystrudepts	30	no apto	
			Hydric Haplohemists	10	no apto	
4	MLC	MLCc	Humic Dystrudepts	30	apto	apto
5		MLCd	Typic Argiudolls	30	no apto	
			Typic Hapludands	20	apto	
6		MLCe	Thaptic Hapludands	20	apto	
7	MLJ	MLJb	Typic Melanudands	50	apto	apto
8		MLJc	Pachic Melanudands	40	no apto	
			Humic Dystrudepts	10	apto	
9	MLK	MLKc	Pachic Melanudands	35	apto	apto
10		MLKd	Typic Hapludands	35	apto	
11		MLKdp	Andic Dystrudepts	30	no apto	
12	MQK	MQKd	Typic Eutrudepts	35	apto	apto
13		MQKdp	Typic Udipsamments	15	apto	
14	MQN	MQNb	Typic Eutrudepts	50	apto	apto
			Typic Udorthents	40	apto	
15	VWO	VWOa	Typic Ustipsamments	60	apto	apto
			Typic Calciusterts	25	no apto	

Fuente: autores (2023)

8.2.4 Unión de las zonas con mayor densidad de agroindustrias con los suelos del departamento con mayor idoneidad para el vertimiento de ARnD-T

Formando las zonas de alta densidad de agroindustrias, se superpone el mapa de fases de UCS idóneas para vertimiento elaborado en el paso anterior y queda como resultante el mapa presentado a continuación:

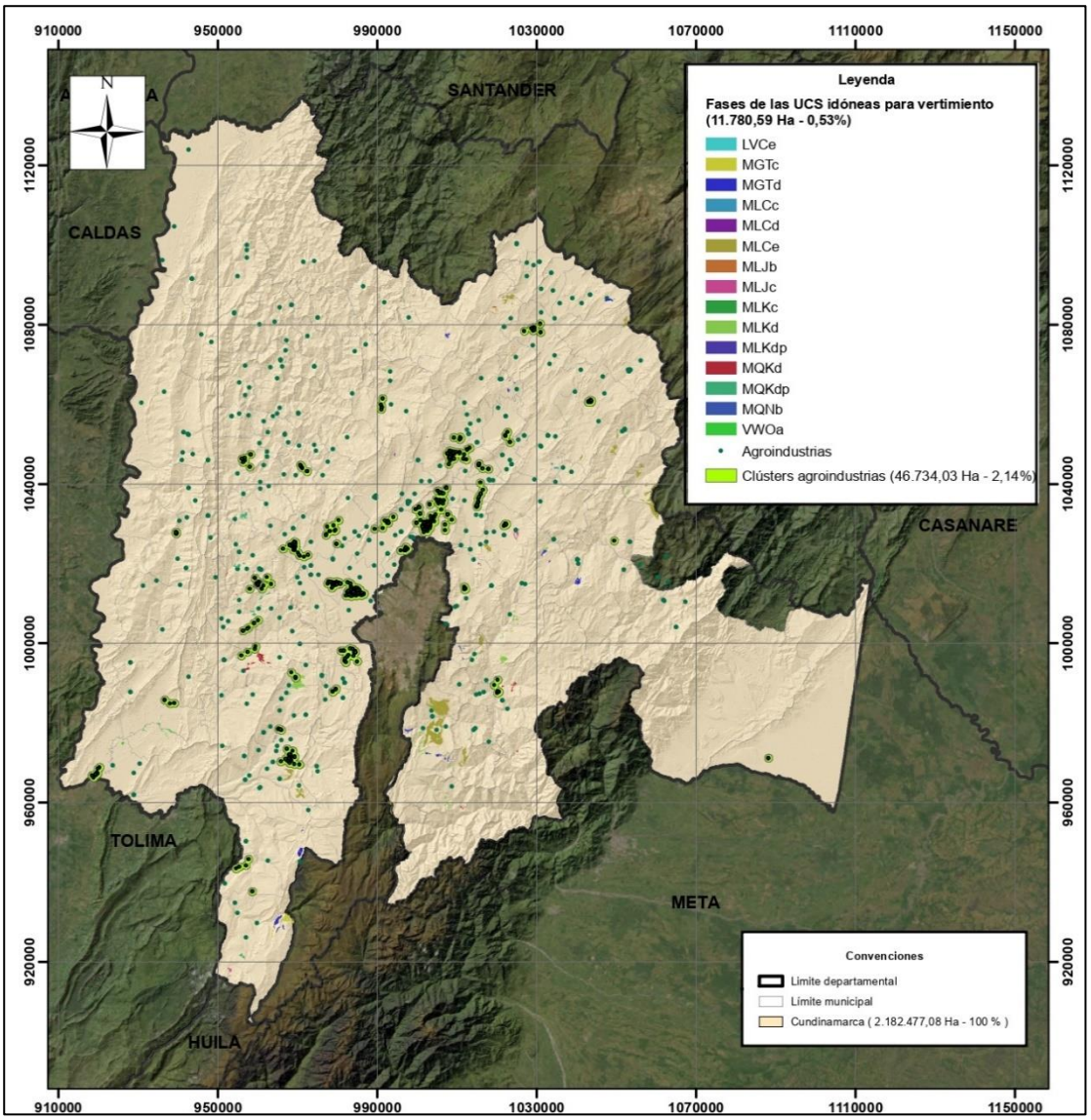


Ilustración 37. Mapa UCS para modelar el vertimiento de ARnD-T, agroindustrias y clústeres.
Fuente: autores (2023) con base en el mapa digital de suelos del departamento de Cundinamarca (2021)

Teniendo en cuenta la información municipal, las fases de UCS idóneas para vertimiento y los clústeres de agroindustrias, presentados en la ilustración 37, las entidades territoriales con mayor potencial de vertimiento de ARnD-T de agroquímicos, son El Colegio, Cachipay, Granada, Une, Facatativá, Anolaima, Fusagasugá y La Mesa, esto al hecho de que son zonas que presentan una alta densidad de empresas agrícolas y con suelos idóneos para la deposición de efluentes.

8.3 Resultados Fase III

Los siguientes resultados buscan suplir el segundo objetivo específico y, por ende, apoyar al cumplimiento del objetivo general del trabajo; adicionalmente, responden a los ítems 7.3.1 y 7.3.2 de la metodología.

7.3.1 Elección de los agroquímicos y establecimiento de los valores de concentración de entrada y salida del modelo.

Con base en lo mencionado en el apartado de la metodología, el modelo se alimentó con el siguiente insumo de concentraciones.

Tabla 8. Valores de concentración de los agroquímicos escogidos.

AGROQUÍMICOS ESCOGIDOS					
n	**Nombre**	**Concentración (g/L)**			
		Inicial (0631 de 2015)		**Final (Objetivos de Calidad)**	
1	Procloraz	0.00005	$5x10^{-5}$	0.000001	$1x10^{-6}$
2	Malathion	0.0001	$1x10^{-4}$	0.00005	$5x10^{-5}$
3	Triple15	0.01	$1x10^{-2}$	0.001	$1x10^{-3}$

Fuente: autores (2023)

7.3.2 Desarrollo del modelo en ModelMuse (Modflow) y elecciones de los suelos con base en el modelado.

Gracias a los apartados anteriores, se definió la cantidad de modelos a realizar, magnitud que se estimó de acuerdo a la siguiente información: ocho (8) UCS que se disgregan en quince (15) fases cartográficas y estas, a su vez, en dieciséis (16) componentes; estos últimos fueron el punto de partida ya que fueron modelados con cada uno de los tres (3) agroquímicos escogidos, en otras palabras, se realizó un total de cuarenta y ocho (48) modelos, donde las características particulares de cada modelo se mantuvieron y solo se viró la concentración de entrada.

Ahora bien, la tabla 8, presenta un breve resumen de los aspectos numéricos más relevantes arrojados en cada uno de los modelos, estos son el tiempo final de dispersión y la concentración en los cuatro puntos de observación.

Tabla 9. Resumen de los aspectos más relevantes derivados de cada uno de los modelos en ModelMuse.

n	AGROQUÍMICO	n	UCS	n	FASE	n	COMPONENTE	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN		CONCENTRACIÓN P. OBSERVACIÓN (g/L)			
								SEG	HORA	N	O	E	S
1	**Procloraz**	1	MGT	1	MGTc	1	Pachic Melanudands	26.483	7,3	1.020×10^{-5}	1.185×10^{-5}	1.342×10^{-5}	5.374×10^{-6}
2				2	MGTd	2	Typic Hapludands	11.168	3,1	3.051×10^{-6}	6.849×10^{-6}	7.865×10^{-6}	1.115×10^{-6}
3		2	LVC	3	LVCe	3	Entic Hapludolls	14.351	3,9	5.067×10^{-6}	8.283×10^{-6}	9.498×10^{-6}	2.148×10^{-6}
4						4	Typic Dystrudepts	9.853	2,7	1.991×10^{-6}	5.757×10^{-6}	6.584×10^{-6}	6.517×10^{-7}
5		3	MLC	4	MLCc	5	Humic Dystrudepts	17.850	4,9	6.758×10^{-6}	9.616×10^{-6}	1.093×10^{-5}	3.125×10^{-6}
6				5	MLCd	6	Thaptic Hapludands	12.745	3,5	3.386×10^{-6}	7.100×10^{-6}	8.095×10^{-6}	1.249×10^{-6}
7				6	MLCe	7	Typic Hapludands	12.795	3,5	3.457×10^{-6}	7.171×10^{-6}	8.180×10^{-6}	1.290×10^{-6}
8		4	MLJ	7	MLJb	8	Humic Dystrudepts	17.001	4,7	6.995×10^{-6}	9.733×10^{-6}	1.107×10^{-5}	3.248×10^{-6}
9				8	MLJc	9	Typic Melanudands	9.857	2,7	2.240×10^{-6}	5.937×10^{-6}	6.807×10^{-6}	7.295×10^{-7}
10		5	MLK	9	MLKc	10	Pachic Melanudands	14.330	3,9	3.186×10^{-6}	6.892×10^{-6}	7.855×10^{-6}	1.148×10^{-6}
11				10	MLKd	11	Typic Hapludands	14.403	4	5.205×10^{-6}	8.378×10^{-6}	9.550×10^{-6}	2.210×10^{-6}
				11	MLKdp								
12		6	MQK	12	MQKd	12	Typic Eutrudepts	33.419	9.2	1.809×10^{-5}	1.442×10^{-5}	1.848×10^{-5}	1.160×10^{-5}
13				13	MQKdp	13	Typic Udipsamments	4.407	1.2	2.584×10^{-7}	3.015×10^{-6}	3.445×10^{-6}	4.691×10^{-8}
14		7	MQN	14	MQNb	14	Typic Eutrudepts	17.870	4.9	7.866×10^{-6}	1.023×10^{-5}	1.160×10^{-5}	3.785×10^{-6}
15						15	Typic Udorthents	14.613	4.1	5.224×10^{-6}	2.782×10^{-7}	9.410×10^{-6}	2.249×10^{-6}
16		8	VWO	15	VWOa	16	Typic Ustipsamments	5,531	1.5	4.403×10^{-7}	3.529×10^{-6}	4.031×10^{-6}	9.109×10^{-8}
17		1	MGT	1	MGTc	1	Pachic Melanudands	26.483	7,3	2.040×10^{-5}	2.370×10^{-5}	2.684×10^{-5}	1.074×10^{-5}
18				2	MGTd	2	Typic Hapludands	11.168	3,1	6.102×10^{-6}	1.369×10^{-5}	1.573×10^{-5}	2.230×10^{-6}

n	AGROQUÍMICO	n	UCS	n	FASE	n	COMPONENTE	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN		CONCENTRACIÓN P. OBSERVACIÓN (g/L)			
								SEG	HORA	N	O	E	S
19	**Malation**	2	LVC	3	LVCe	3	Entic Hapludolls	14.351	3,9	1.013×10^{-5}	1.656×10^{-5}	1.899×10^{-5}	4.296×10^{-6}
20						4	Typic Dystrudepts	9.853	2,7	3.983×10^{-6}	1.151×10^{-5}	1.316×10^{-5}	1.303×10^{-6}
21		3	MLC	4	MLCc	5	Humic Dystrudepts	17.850	4,9	1.351×10^{-5}	1.923×10^{-5}	2.186×10^{-5}	6.251×10^{-6}
22				5	MLCd	6	Thaptic Hapludands	12.745	3,5	6.772×10^{-6}	1.420×10^{-5}	1.619×10^{-5}	2.498×10^{-6}
23				6	MLCe	7	Typic Hapludands	12.795	3,5	6.915×10^{-6}	1.434×10^{-5}	1.636×10^{-5}	2.580×10^{-6}
24		4	MLJ	7	MLJb	8	Humic Dystrudepts	17.001	4,7	1.399×10^{-5}	1.946×10^{-5}	$2,214 \times 10^{-5}$	$6.497x\ 10^{-6}$
25				8	MLJc	9	Typic Melanudands	9.857	2,7	1.394×10^{-5}	5.757×10^{-7}	$2.185x\ 10^{-5}$	$6.440x\ 10^{-6}$
26		5	MLK	9	MLKc	10	Pachic Melanudands	14.330	3.9	6.372×10^{-6}	1.378×10^{-5}	$1.571x\ 10^{-5}$	$2.296x\ 10^{-6}$
27				10	MLKd	11	Typic Hapludands	14.403	4	4.164×10^{-5}	6.703×10^{-5}	7.640×10^{-5}	1.768×10^{-5}
				11	MLKdp								
28		6	MQK	12	MQKd	12	Typic Eutrudepts	33.419	9.2	3.704×10^{-5}	3.352×10^{-5}	3.735×10^{-5}	2.396×10^{-5}
29				13	MQKdp	13	Typic Udipsamments	4.407	1.2	5.165×10^{-7}	6.619×10^{-8}	6.890×10^{-6}	9.383×10^{-8}
30		7	MQN	14	MQNb	14	Typic Eutrudepts	17.870	4.9	1.573×10^{-5}	2.047×10^{-5}	2.321×10^{-5}	7.571 x 10-6
31						15	Typic Udorthents	14.613	4.1	1.044×10^{-5}	1.647×10^{-5}	1.884×10^{-5}	4.498×10^{-6}
32		8	VWO	15	VWOa	16	Typic Ustipsamments	5,531	1.5	8.807×10^{-7}	7.059×10^{-6}	8.063×10^{-6}	1.821×10^{-7}
33	**Triple 15**	1	MGT	1	MGTc	1	Pachic Melanudands	26.483	7,3	2.040×10^{-3}	2.370×10^{-3}	2.684×10^{-3}	1.074×10^{-3}
34				2	MGTd	2	Typic Hapludands	11.168	3,1	6.102×10^{-4}	1.369×10^{-3}	1.573×10^{-3}	2.230×10^{-4}

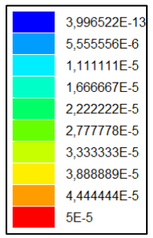
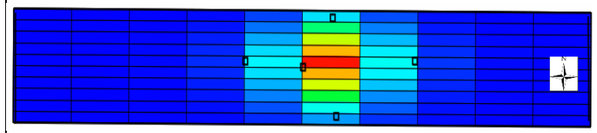
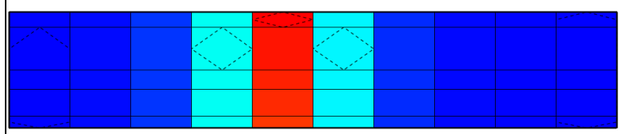
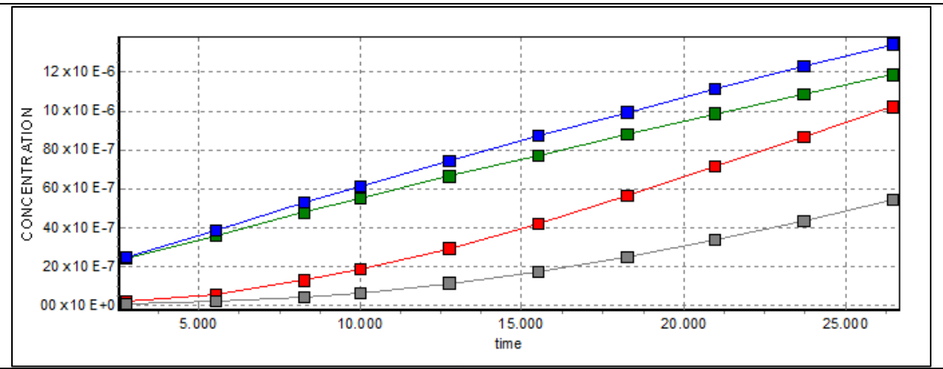
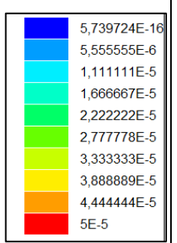
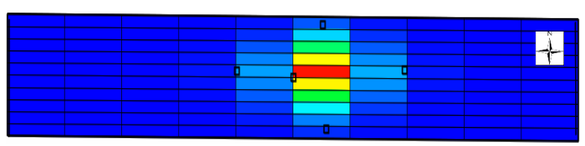
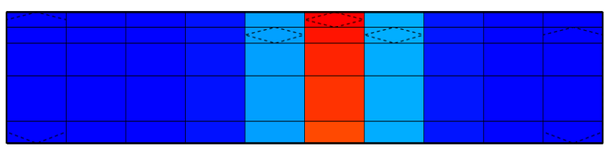
n	AGROQUÍMICO	n	UCS	n	FASE	n	COMPONENTE	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN		CONCENTRACIÓN P. OBSERVACIÓN (g/L)			
								SEG	HORA	N	O	E	S
35		2	LVC	3	LVCe	3	Entic Hapludolls	14.351	3,9	1.013×10^{-3}	1.656×10^{-3}	1.899×10^{-3}	4.296×10^{-4}
36						4	Typic Dystrudepts	9.853	2,7	3.983×10^{-4}	1.151×10^{-3}	1.316×10^{-3}	1.303×10^{-4}
37		3	MLC	4	MLCc	5	Humic Dystrudepts	17.850	4,9	1.351×10^{-3}	1.923×10^{-3}	2.1846×10^{-3}	6.251×10^{-4}
38				5	MLCd	6	Thaptic Hapludands	12.745	3,5	6.772×10^{-4}	1.420×10^{-3}	1.619×10^{-3}	2.498×10^{-4}
39				6	MLCe	7	Typic Hapludands	12.795	3,5	6.915×10^{-4}	1.434×10^{-3}	1.636×10^{-3}	2.580×10^{-4}
40		4	MLJ	7	MLJb	8	Humic Dystrudepts	17.001	4,7	1.399×10^{-3}	1.946×10^{-3}	2.214×10^{-3}	6.497×10^{-4}
41				8	MLJc	9	Typic Melanudands	9.857	2,7	4.480×10^{-4}	1.187×10^{-3}	1.364×10^{-3}	1.459×10^{-4}
42		5	MLK	9	MLKc	10	Pachic Melanudands	14.330	3.9	6.372×10^{-4}	1.378×10^{-3}	1.571×10^{-3}	2.296×10^{-4}
43				10	MLKd	11	Typic Hapludands	14.403	4	1.041×10^{-3}	1.675×10^{-3}	1.910×10^{-3}	4.420×10^{-4}
				11	MLKdp								
44		6	MQK	12	MQKd	12	Typic Eutrudepts	33.419	9.2	3.619×10^{-3}	3.297×10^{-3}	3.696×10^{-3}	2.320×10^{-3}
45				13	MQKdp	13	Typic Udipsamments	4.407	1.2	5.168×10^{-5}	6.031×10^{-4}	6.890×10^{-4}	9.383×10^{-6}
46		7	MQN	14	MQNb	14	Typic Eutrudepts	17.870	4.9	1.573×10^{-3}	2.047×10^{-3}	2.321×10^{-3}	7.571×10^{-4}
47						15	Typic Udorthents	14.613	4.1	1.044×10^{-3}	1.647×10^{-3}	1.884×10^{-3}	4.498×10^{-4}
48		8	VWO	15	VWOa	16	Typic Ustipsamments	5,531	1.5	8.807×10^{-5}	7.059×10^{-4}	8.063×10^{-4}	1.821×10^{-5}

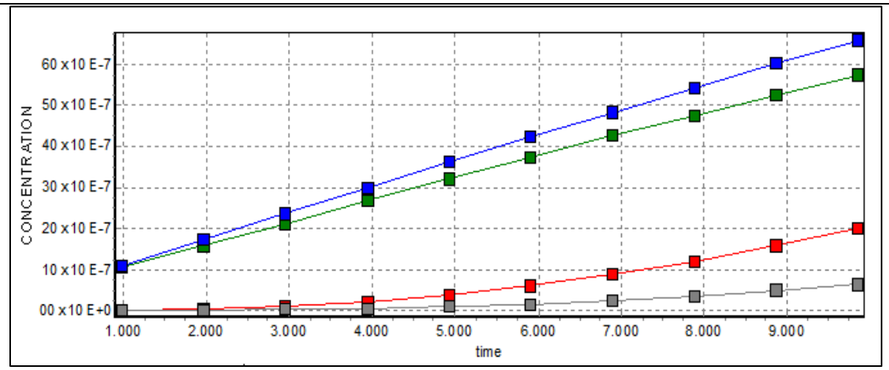
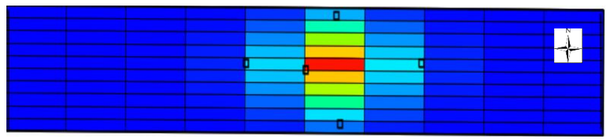
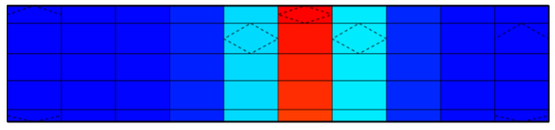
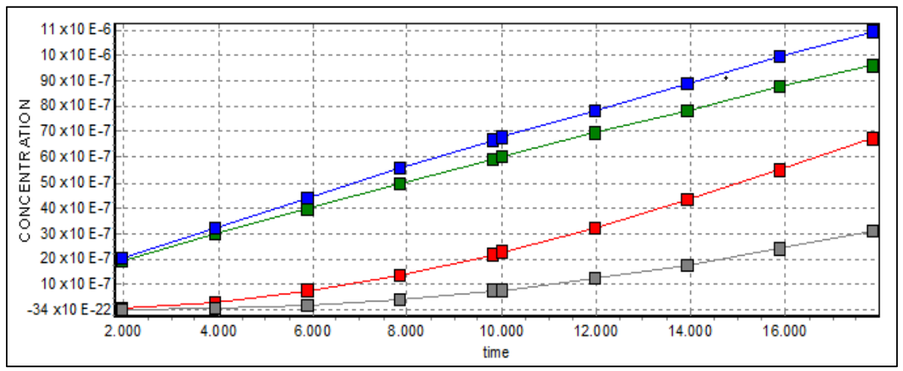
Fuente: autores (2023)

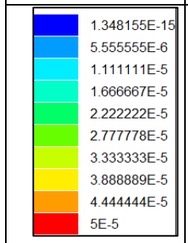
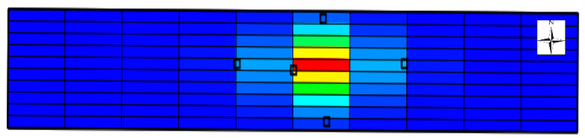
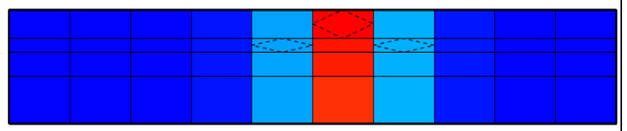
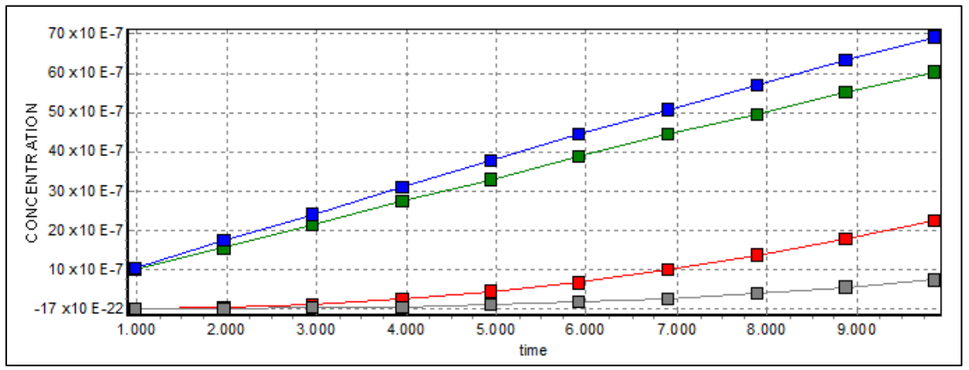
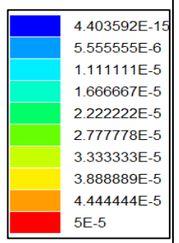
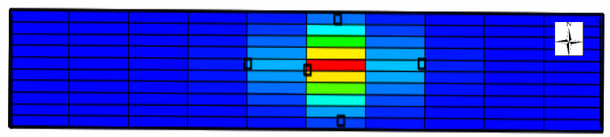
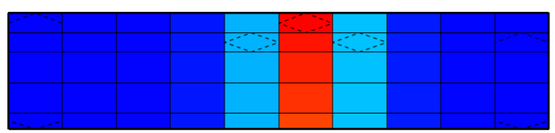
Este apartado se encuentra incompleto sin un apoyo visual que permita entender, de manera más simplificada, el movimiento de los tres agroquímicos dentro de la matriz suelo; por esta razón, se presentan las vistas “top” y “front” del modelo en ModelMuse y, a su vez, se usó

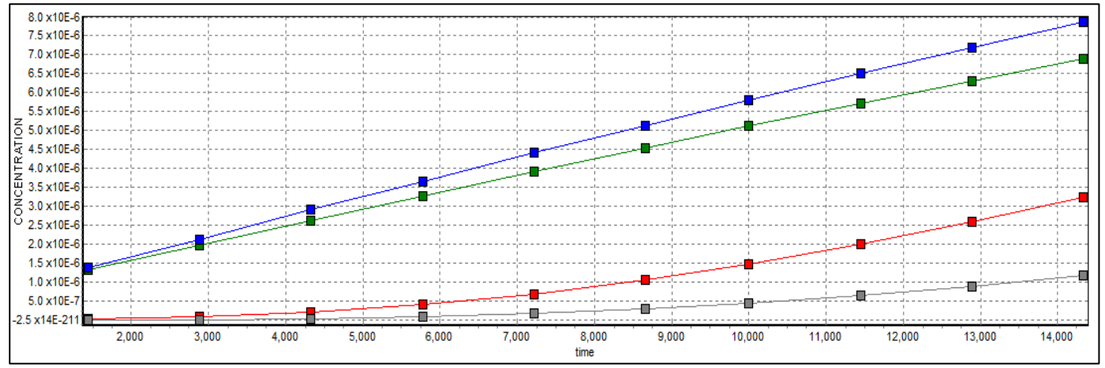
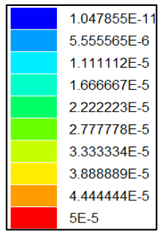
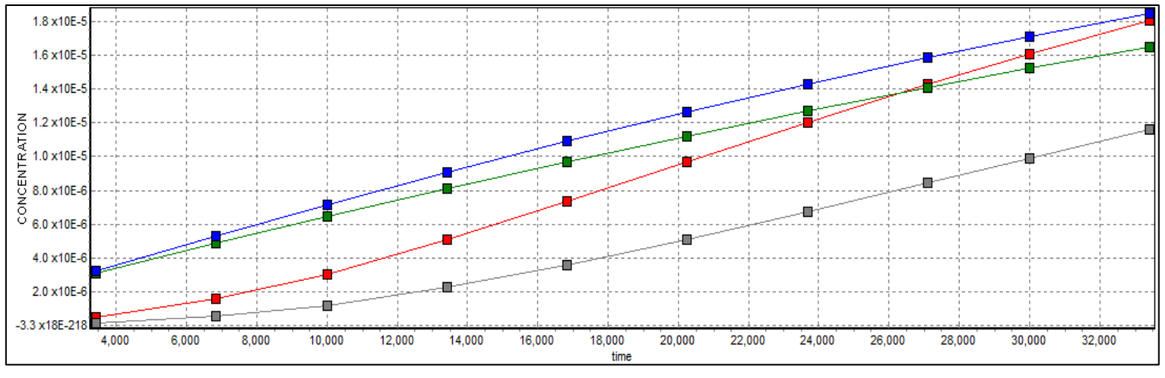
un graficador (GW-CHART) para presentar la relación entre la concentración, en los diferentes puntos de observación, y el tiempo final de dispersión. Sin embargo, al tratarse de cuarenta y ocho (48) modelos saldrían una cantidad significativa de graficas que podrían ser un inconveniente visual, razón por la cual se presentarán aquellos modelos correspondientes a los componentes de las fases de las UCS que poseen mayor representatividad porcentual dentro de la composición total; de esta manera, se presentan ocho (8) componentes que serán sometidos a cada contaminante, por ende, la siguiente tabla abarcará veinticuatro (24) modelos.

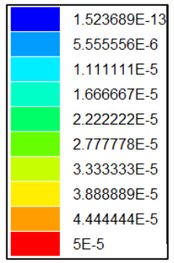
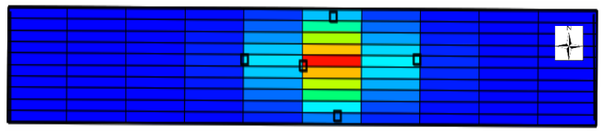
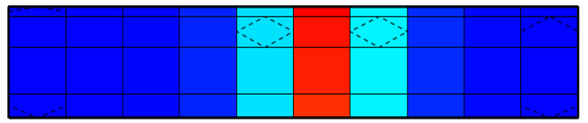
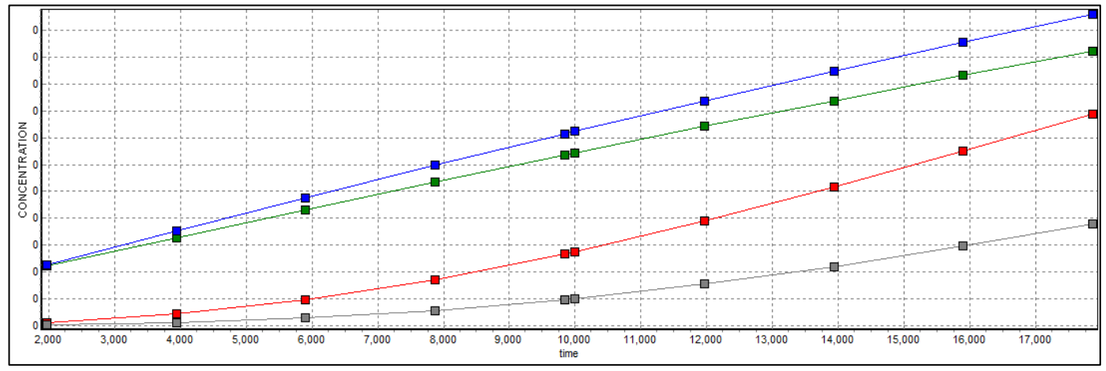
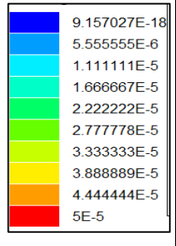
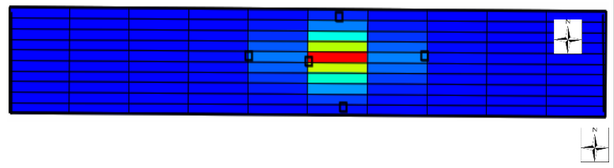
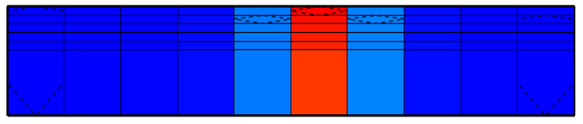
Tabla 10. Resumen de resultados de lapsos, concentraciones (en diferentes puntos cardinales) y graficas de los componentes más relevantes de las fases de las UCS modelados en ModelMuse (MODFLOW) y GW-CHART.

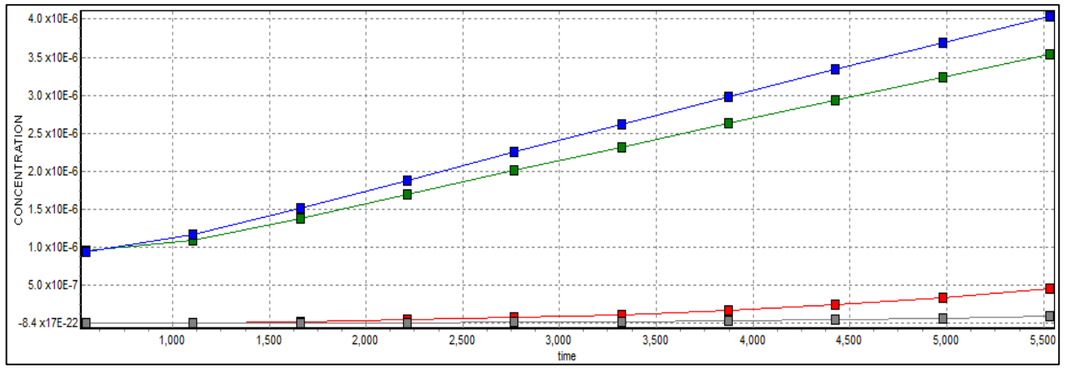
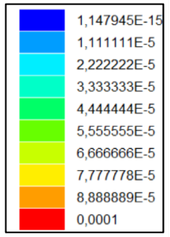
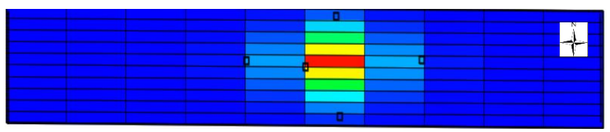
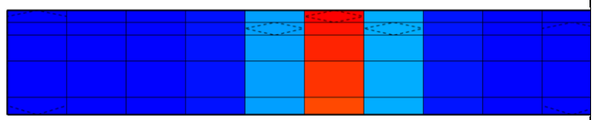
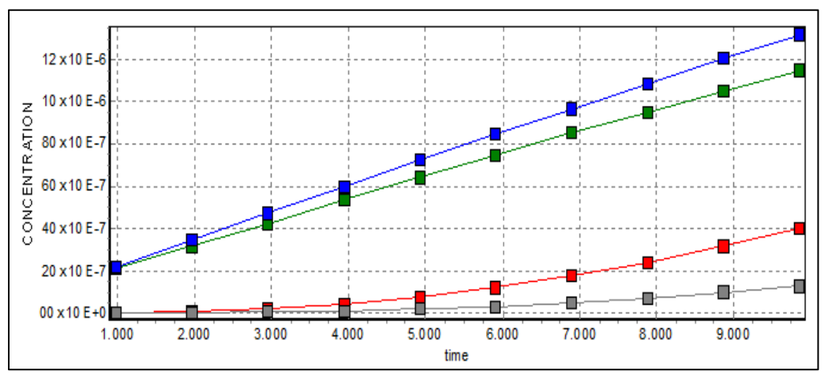
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
1	PROCLORAZ	MGT	MGTc MGTd	Pachic Melanudands (30)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil**  **Leyenda**  **Concentración vs Tiempo** 	26.483 segundos = 7.3 horas	**Norte:** 1.020 x 10^{-5} **Oeste:** 1.185 x 10^{-5} **Este:** 1.342 x 10^{-5} **Sur:** 5.374 x 10^{-6}
2		LVC	LVCe	Typic Dystrudepts (70)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil** 	9.853 segundos= 2.7 horas	**Norte:** 1.991 x 10^{-6} **Oeste:** 5.757 x 10^{-6} **Este:** 6.584 x 10^{-6} **Sur:** 6.517 x 10^{-7}

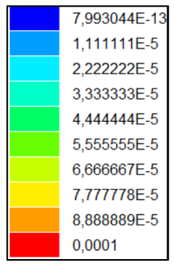
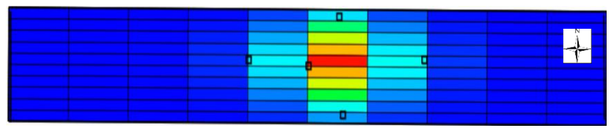
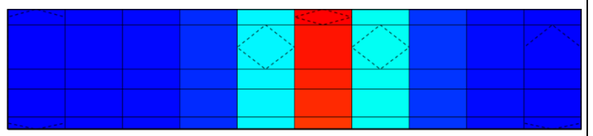
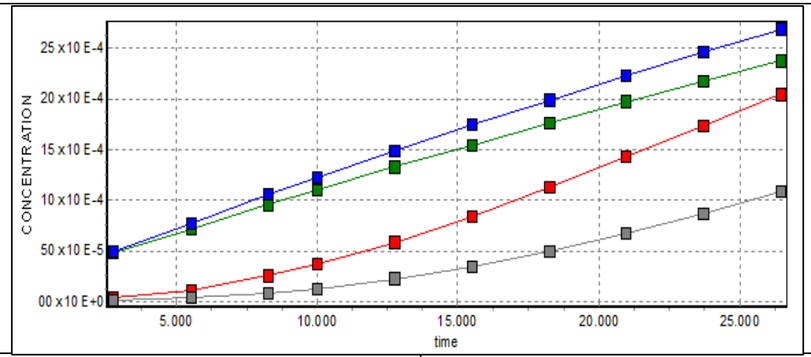
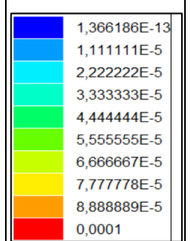
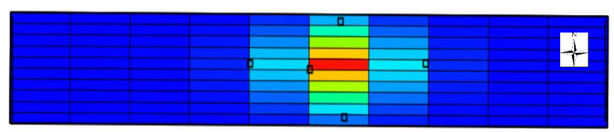
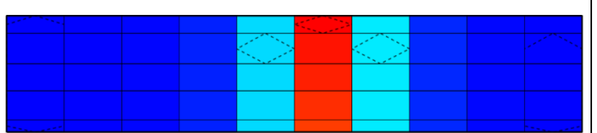
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					Leyenda: P_Obs_Norte, P_Obs_Oeste, P_Obs_Este, P_Obs_Sur **Concentración vs Tiempo**: 		
3		MLC	MLCc MLCd MLCe	Humic Dystrudepts (30)	**Leyenda**: 6,830929E-14, 5,555555E-6, 1,111111E-5, 1,666667E-5, 2,222222E-5, 2,777778E-5, 3,333333E-5, 3,888889E-5, 4,444444E-5, 5E-5 **Vista en planta**:  **Vista en perfil**:  **Leyenda**: P_Obs_Norte, P_Obs_Oeste, P_Obs_Este, P_Obs_Sur **Concentración vs Tiempo**: 	17.850 segundos = 4.95 horas	**Norte:** 6.758 x 10^{-6} **Oeste:** 9.616 x 10^{-6} **Este:** 1.093 x 10^{-5} **Sur:** 3.125 x 10^{-6}

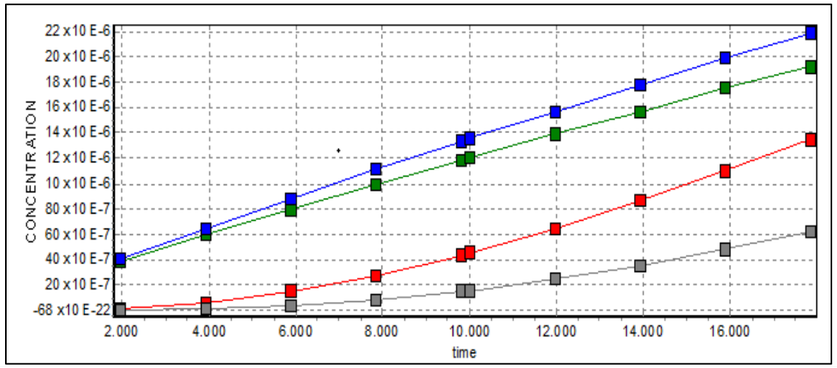
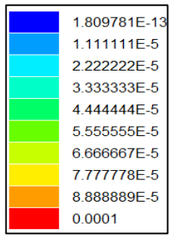
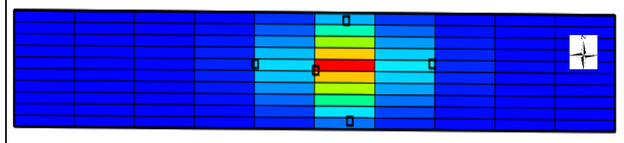
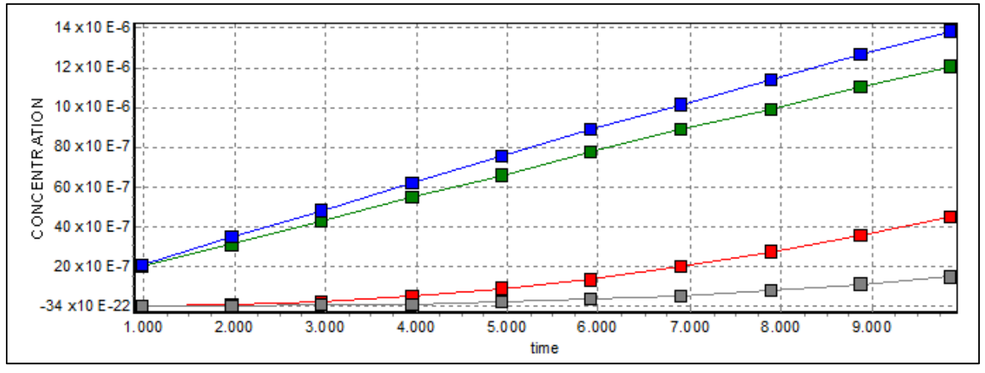
<table>
<tr><th>n</th><th>AGROQUÍMICO</th><th>UCS</th><th>FASE</th><th>COMPONENTE (MAYOR %)</th><th colspan="3">GRÁFICAS
RESULTADO MONITOR</th><th>TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN</th><th>CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">MLJ</td><td rowspan="2">MLJb
MLJc</td><td rowspan="2">Typic Melanudands (50)</td><td>Leyenda</td><td>Vista en planta</td><td>Vista en perfil</td><td rowspan="2">9.857 segundos=
7 horas</td><td rowspan="2">Norte: 2.240 x 10^{-6}
Oeste: 5.937 x 10^{-6}
Este: 6.807x 10^{-6}
Sur: 7.295 x 10^{-7}</td></tr>
<tr><td>
</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">5</td><td rowspan="2">MLK</td><td rowspan="2">MLKc,
MLKd</td><td rowspan="2">Pachic Melanudands
(35)</td><td>Leyenda</td><td colspan="2">Concentración vs Tiempo</td><td rowspan="2">14.330 segundos=
3.9 horas</td><td rowspan="2">Norte: 3.186 x 10^{-6}
Oeste: 6.892 x 10^{-6}
Este: 7.855 x 10^{-6}
Sur: 1.148 x 10^{-6}</td></tr>
<tr><td>
</td><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td>5</td><td>MLK</td><td>MLKc,
MLKd</td><td>Pachic Melanudands
(35)</td><td>Leyenda</td><td>Vista en planta</td><td>Vista en perfil</td><td>14.330 segundos=
3.9 horas</td><td>Norte: 3.186 x 10^{-6}
Oeste: 6.892 x 10^{-6}
Este: 7.855 x 10^{-6}
Sur: 1.148 x 10^{-6}</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>
</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

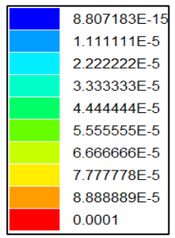
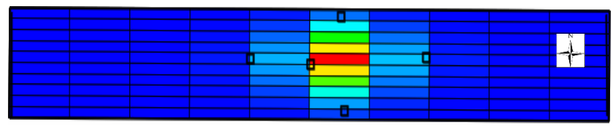
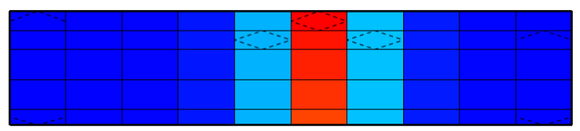
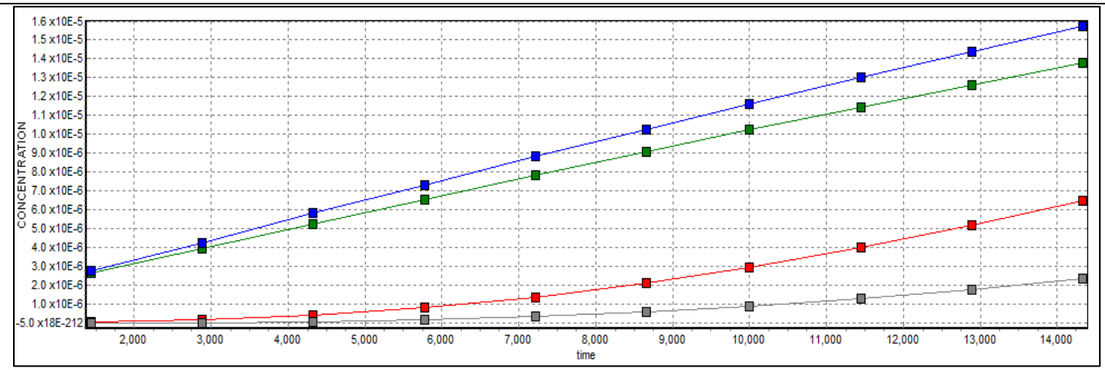
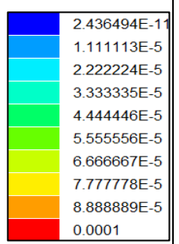
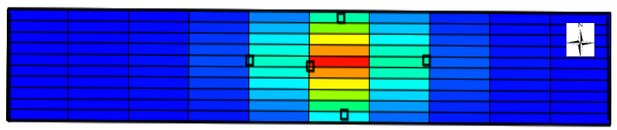
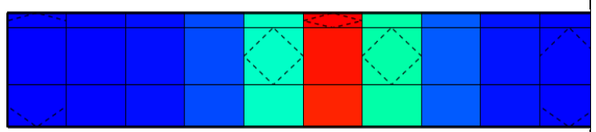
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 		
6		MQK	MQKd, MQKdp	Typic Eutrudepts (35)	**Leyenda** 	**Vista en planta** **Vista en perfil** 	33.419 segundos= 9.8 horas	**Norte:** 1.809 x 10^{-5} **Oeste:** 1.442 x 10^{-5} **Este:** 1.848 x 10^{-5} **Sur:** 1.160 x 10^{-5}
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 		

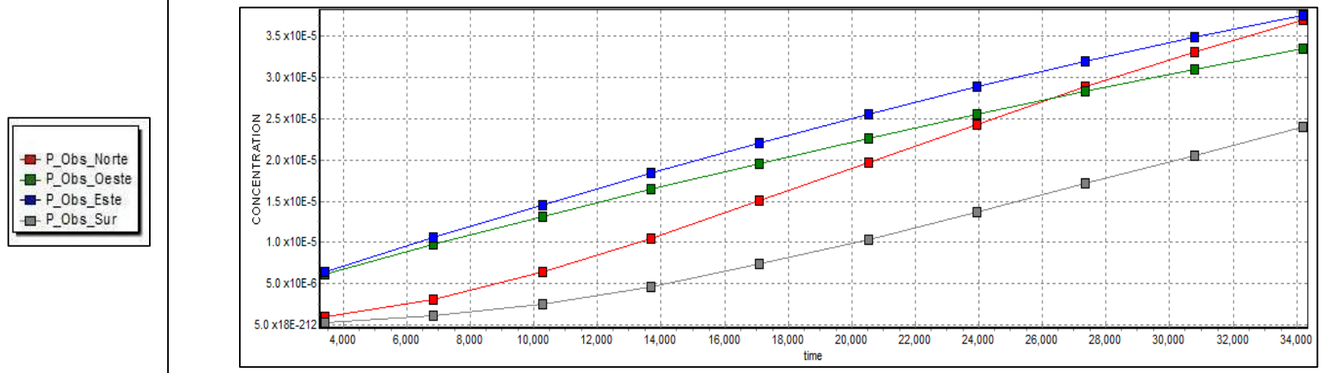
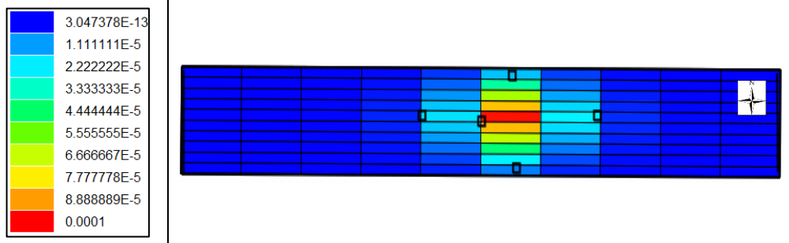
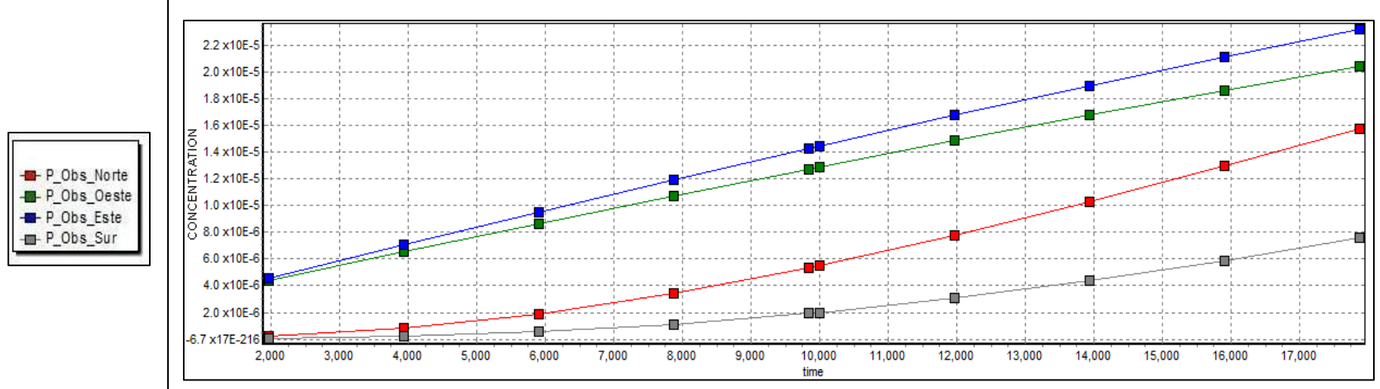
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR			TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
7		MQN	MQNb	Typic Eutrudepts (50)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	17.870 segundos= 4.9 horas	**Norte:** 7.866 x 10^{-6} **Oeste:** 1.023 x 10^{-5} **Este:** 1.160 x 10^{-5} **Sur:** 3.785 x 10^{-6}
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 			
8		VWO	VWOa	Typic Ustipsamments (60)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	5,531 segundos= 1.5 horas	**Norte:** 4.403 x 10^{-7} **Oeste:** 3.529 x 10^{-6} **Este:** 4.031 x 10^{-6} **Sur:** 9.109 x 10^{-8}

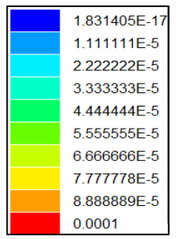
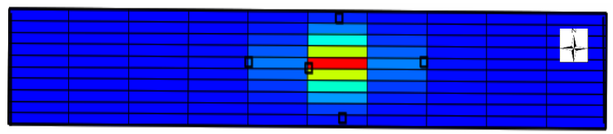
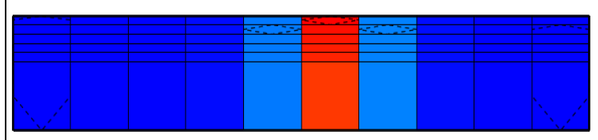
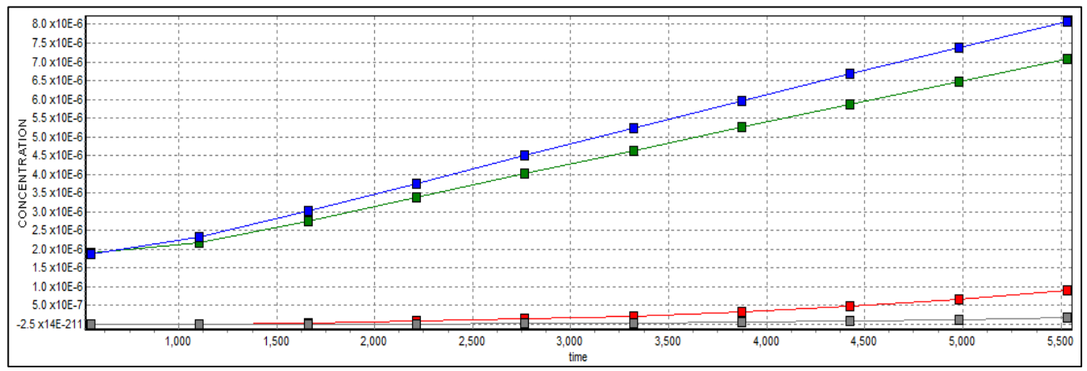
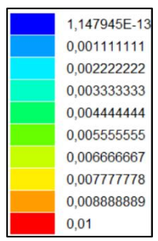
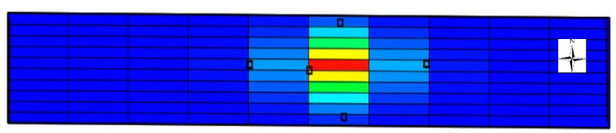
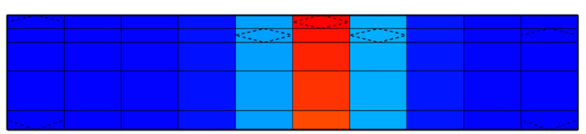
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR		TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					Leyenda	**Concentración vs Tiempo**		
								
9	MALATION	LVC	LVCe	Typic Dystrudepts (70)	**Leyenda**	**Vista en planta**	**Vista en perfil**	9.853 segundos = 2.7 horas	**Norte:** 3.983 x 10^{-6} **Oeste:** 1.151 x 10^{-5} **Este:** 1.316 x 10^{-5} **Sur:** 1.303 x 10^{-6}
									
					Leyenda	**Concentración vs Tiempo**			
								

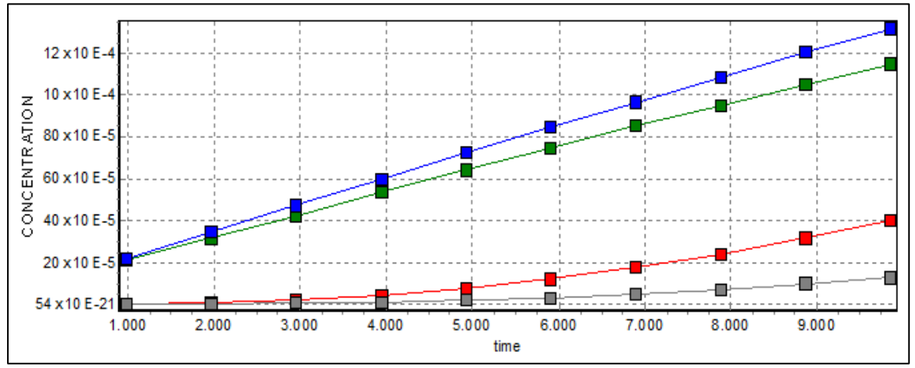
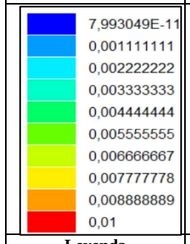
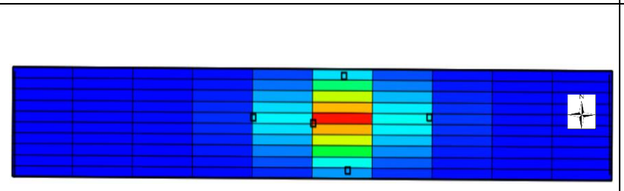
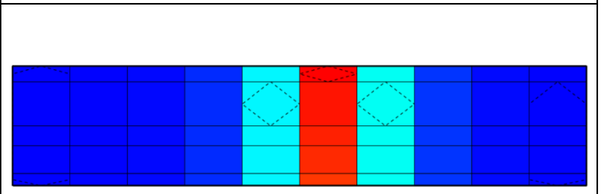
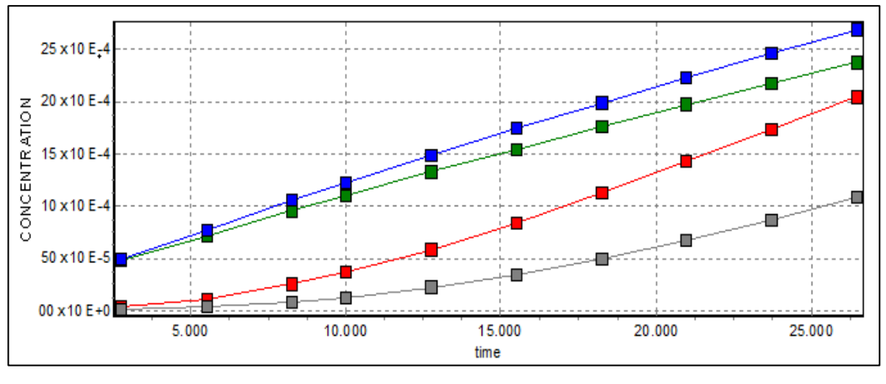
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR			TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
10		MGT	MGTc MGTd	Pachic Melanudands (30)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	26.483 segundos = 7.35 horas	**Norte:** 2.040 x 10^{-5} **Oeste:** 2.370 x 10^{-5} **Este:** 2.684 x 10^{-5} **Sur:** 1.074 x 10^{-5}
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 			
11		MLC	MLCc MLCd MLCe	Humic Dystrudepts (30)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	17.850 segundos= 4.95 horas	**Norte:** 1.351 x 10^{-5} **Oeste:** 1.923 x 10^{-5} **Este:** 2.186 x 10^{-5} **Sur:** 6.251 x 10^{-6}

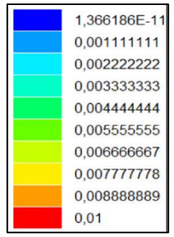
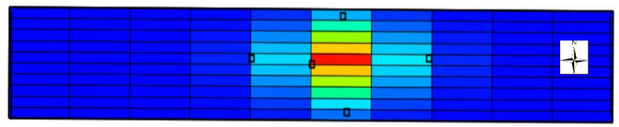
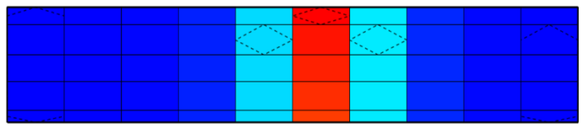
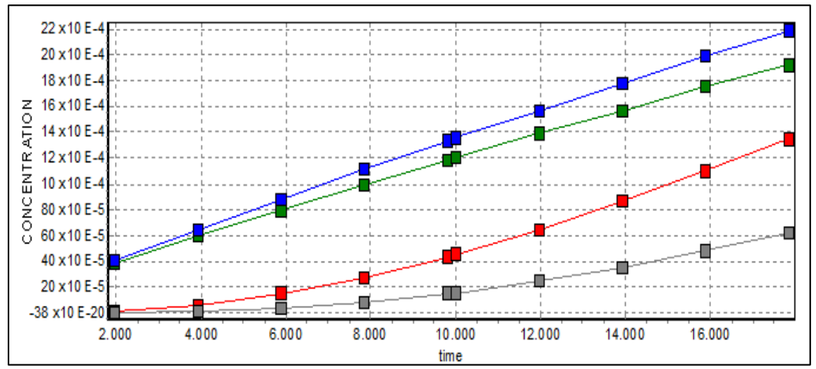
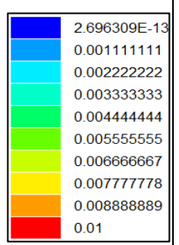
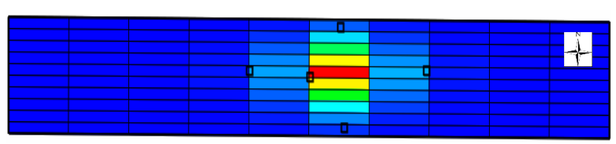
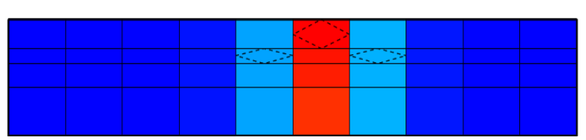
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS		TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					RESULTADO MONITOR			
					Leyenda	Concentración vs Tiempo		
								
					Leyenda	Vista en planta	Vista en perfil		
									
					Leyenda	Concentración vs Tiempo			
12		MLJ	MLJc MLJb	Typic Melanudands (50)			9.857 segundos= 7 horas	**Norte:** 1.394 x 10^{-5} **Oeste:** 5.757 x 10^{-7} **Este:** 2.185x 10^{-5} **Sur:** 6.440x 10^{-6}

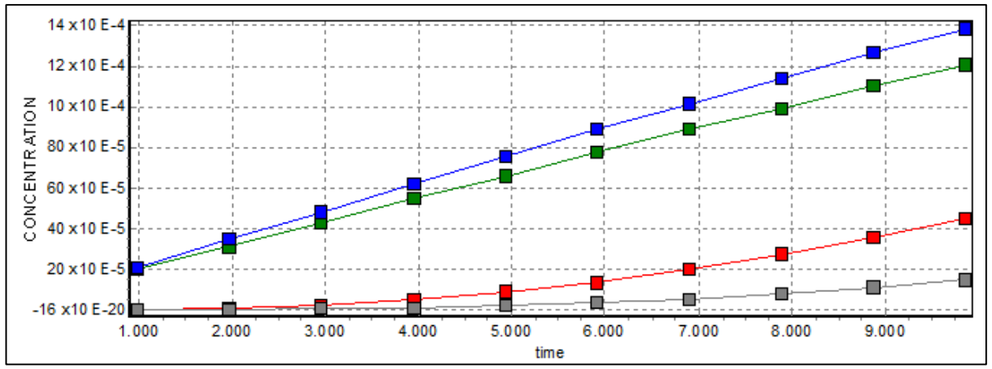
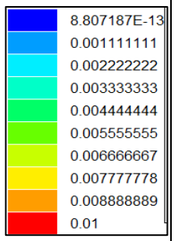
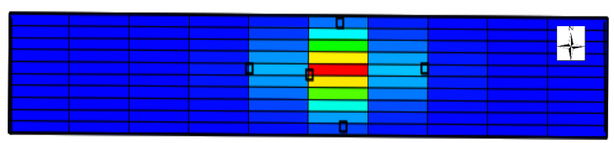
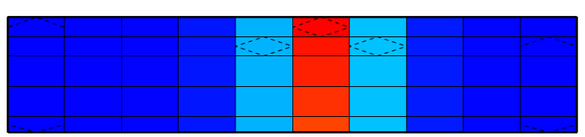
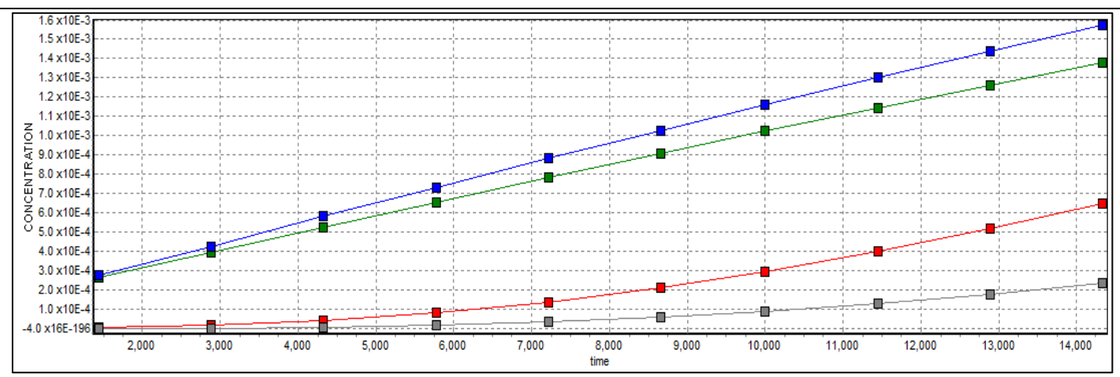
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
13		MLK	MLKc, MLKd	Pachic Melanudands (35)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil**  **Leyenda**  **Concentración vs Tiempo** 	14.330 segundos= 3.98 horas	**Norte:** 6.372 x 10^{-6} **Oeste:** 1.378 x 10^{-5} **Este:** 1.571x 10^{-5} **Sur:** 2.296x 10^{-6}
14		MQK	MQKd, MQKdp	Typic Eutrudepts (35)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil** 	34.193 segundos= 9.4 horas	**Norte:** 3.704 x 10^{-5} **Oeste:** 3.352 x 10^{-5} **Este:** 3.7356 x 10^{-5} **Sur:** 2.396x 10^{-5}

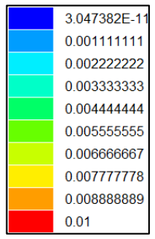
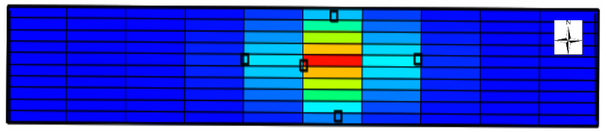
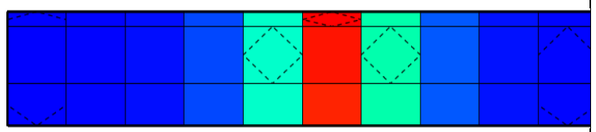
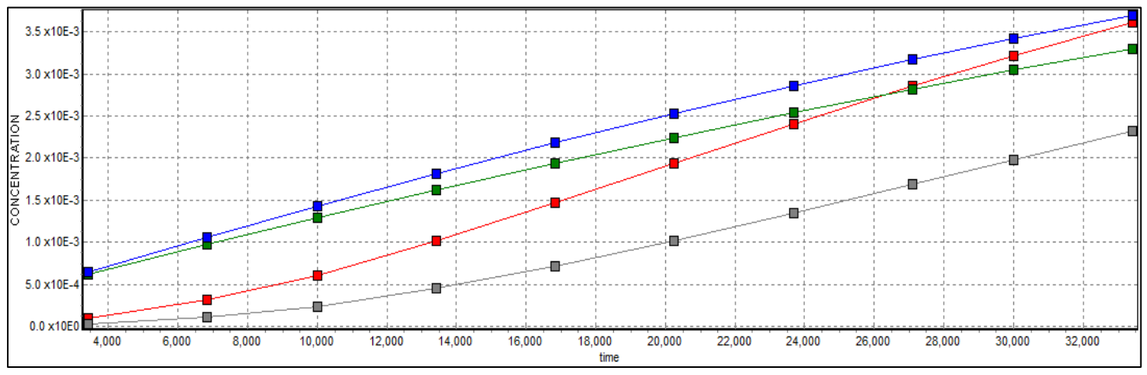
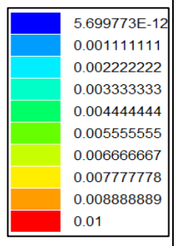
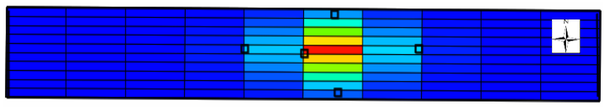
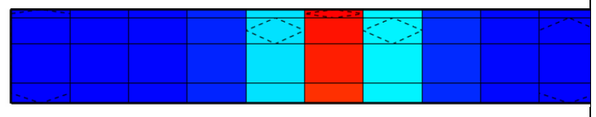
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					RESULTADO MONITOR		
					Leyenda / **Concentración vs Tiempo**		
							
15		MQN	MQNb	Typic Eutrudepts (50)	**Leyenda** / **Vista en planta** / **Vista en perfil**	17.870 segundos= 4.9 horas	**Norte:** 1.573 x 10^{-5} **Oeste:** 2.047 x 10^{-5} **Este:** 2.321 x 10^{-5} **Sur:** 7.571 x 10^{-6}
							
					Leyenda / **Concentración vs Tiempo**		
							

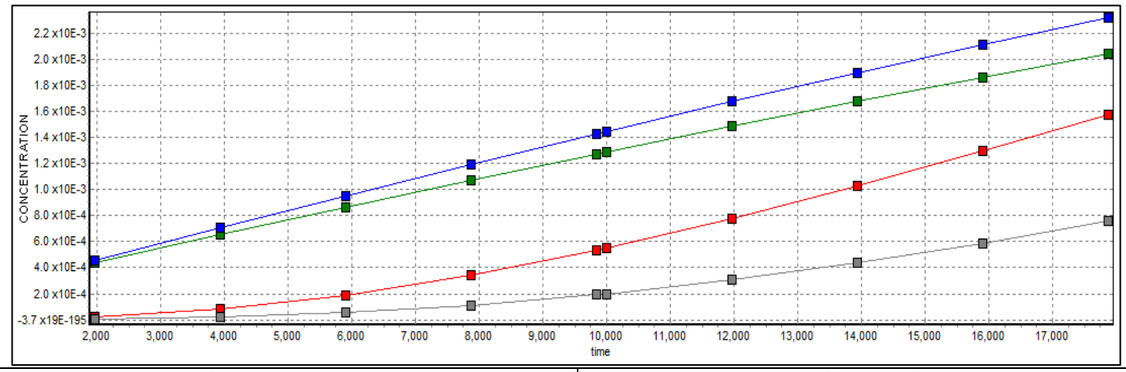
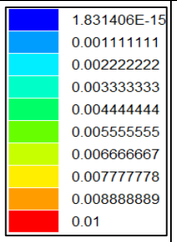
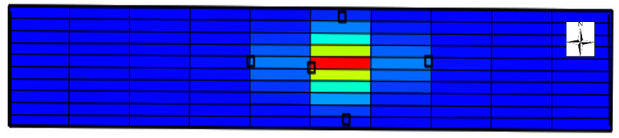
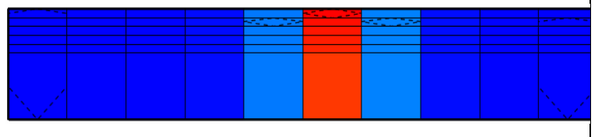
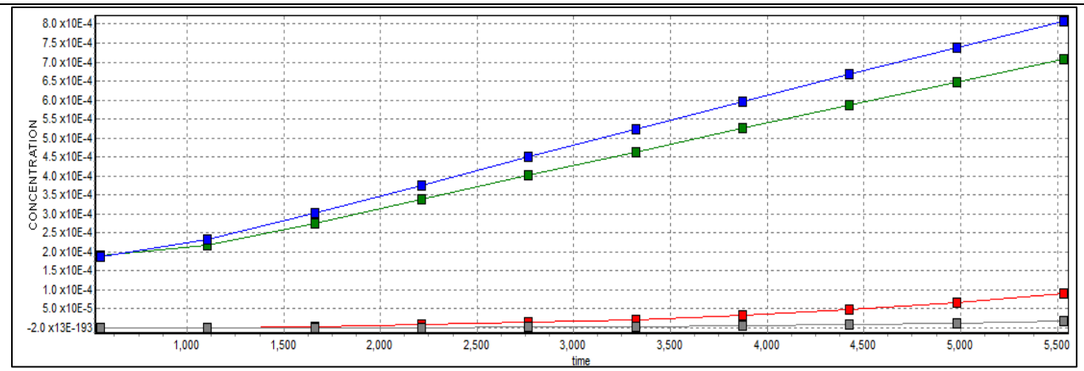
n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
16		VWO	VWOa	Typic Ustipsamments (60)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil**  **Leyenda**  **Concentración vs Tiempo** 	5.531 segundos= 1.5 horas	**Norte:** 8.807 x 10^{-7} **Oeste:** 7.059 x 10^{-6} **Este:** 8.063 x 10^{-6} **Sur:** 1.821 x 10^{-7}
17		LVC	LVCe	Typic Dystrudepts (70)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil** 	9.853 segundos = 2.7 horas	**Norte:** 3.983 x 10^{-4} **Oeste:** 1.151 x 10^{-3} **Este:** 1.316 x 10^{-3} **Sur:** 1.303 x 10^{-4}

n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
	TRIPLE15				**Leyenda**  **Concentración vs Tiempo** 		
18		MGT	MGTc MGTd	Pachic Melanudands (30)	**Leyenda**  **Vista en planta**  **Vista en perfil**  **Leyenda** **Concentración vs Tiempo**  	26.483 segundos= 7.35 horas	**Norte:** 2.040 x 10^{-3} **Oeste:** 2.370 x 10^{-3} **Este:** 2.684 x 10^{-3} **Sur:** 1.074 x 10^{-3}

n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR			TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
19		MLC	MLCc MLCd MLCe	Humic Dystrudepts (30)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	17.850 segundos = 4.95 horas	**Norte:** 1.351 x 10^{-3} **Oeste:** 1.923 x 10^{-3} **Este:** 2.1846 x 10^{-3} **Sur:** 6.251 x 10^{-4}
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 			
20		MLJ	MLJb MLJc	Typic Melanudands (50)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	9.854 segundos= 2.7 horas	**Norte:** 4.480 x 10^{-4} **Oeste:** 1.187 x 10^{-3} **Este:** 1.364 x 10^{-3} **Sur:** 1.459 x 10^{-4}

n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR			TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					Leyenda	Concentración vs Tiempo			
									
21		MLK	MLKc, MLKd	Pachic Melanudands (35)	Leyenda	Vista en planta	Vista en perfil	14.330 segundos= 3.9 horas	**Norte:** 6.372 x 10^{-4} **Oeste:** 1.378 x 10^{-3} **Este:** 1.571 x 10^{-3} **Sur:** 2.296 x 10^{-4}
									
					Leyenda	Concentración vs Tiempo			
									

n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR			TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					Leyenda	**Vista en planta**	**Vista en perfil**		
22		MQK	MQKd ,MQDdp	Typic Eutrudepts (35}				33.419 segundos= 9.2 horas	**Norte:** 3.619 x 10^{-3} **Oeste:** 3.297 x 10^{-3} **Este:** 3.696 x 10^{-3} **Sur:** 2.320 x 10^{-3}
					Leyenda	**Concentración vs Tiempo**			
									
23		MQN	MQNb	Typic Eutrudepts (50)	**Leyenda**	**Vista en planta**	**Vista en perfil**	17.870 segundos= 4.9 horas	**Norte:** 1.573 x 10^{-3} **Oeste:** 2.047 x 10^{-3} **Este:** 2.321 x 10^{-3} **Sur:** 7.571 x 10^{-4}
									

n	AGROQUÍMICO	UCS	FASE	COMPONENTE (MAYOR %)	GRÁFICAS RESULTADO MONITOR	TIEMPO FINAL DE DISPERSIÓN	CONCENTRACIÓN PUNTO OBS. (G/L)
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 		
24		VWO	VWOa	Typic Ustipsamments (60)	**Leyenda** 	**Vista en planta** 	**Vista en perfil** 	5.531 segundos= 1.5 horas	**Norte:** 8.807 x 10^{-5} **Oeste:** 7.059 x 10^{-4} **Este:** 8.063 x 10^{-4} **Sur:** 1.821 x 10^{-5}
					Leyenda 	**Concentración vs Tiempo** 		

Fuente: autores (2023)

Finalmente, se pudo discernir cuáles fueron los mejores componentes en el proceso de asimilación de agroquímicos, cumpliendo así con el objetivo principal, el cual se sintetiza en la siguiente tabla resumen que, a su vez, surge como producto de la selección de componentes explicada en el apartado ***Elección de los suelos más idóneos con base en el modelado*** del ítem 7.3.2 de la metodología, visualizado en el anexo 4, que se enfoca en los componentes de las fases que componen las UCS y que por defecto, conllevan a un comportamiento generalizado de la unidad.

Tabla 11. Resumen de la selección de los componentes más aptos de las fases de las UCS.

AGROQUÍMICO	N	UCS	N	FASE	N	COMPONENTE	EVALUCIÓN I: CUMPLIMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN		EVALUCIÓN II: TIEMPO OPTIMO		RESULTADO
							SI	+	NO	-	COMPONENTES APTOS
Procloraz	1	MGT	1	MGTc	1	Pachic Melanudands	-		-		NO APTO
			2	MGTd	2	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
	2	LVC	3	LVCe	3	Entic Hapludolls	-		+		NO APTO
					4	Typic Dystrudepts	-		+		NO APTO
	3	MLC	4	MLCc	5	Humic Dystrudepts	-		-		NO APTO
			5	MLCd	6	Thaptic Hapludands	-		+		NO APTO
			6	MLCe	7	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
	4	MLJ	7	MLJb	8	Humic Dystrudepts	-		-		NO APTO
			8	MLJc	9	Typic Melanudands	-		+		NO APTO
	5	MLK	9	MLKc	10	Pachic Melanudands	-		+		NO APTO
			10	MLKd	11	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
			11	MLKdp			-		+		NO APTO
	6	MQK	12	MQKd	12	Typic Eutrudepts	-		-		NO APTO
			13	MQKdp	13	Typic Udipsamments	-		+		NO APTO
	7	MQN	14	MQNb	14	Typic Eutrudepts	-		-		NO APTO
					15	Typic Udorthents	-		-		NO APTO
	8	VWO	15	VWOa	16	Typic Ustipsamments	-		+		NO APTO
Malation	1	MGT	1	MGTc	1	Pachic Melanudands	+		-		NO APTO
			2	MGTd	2	Typic Hapludands	+		+		APTO
	2	LVC	3	LVCe	3	Entic Hapludolls	+		+		APTO
					4	Typic Dystrudepts	+		+		APTO

AGROQUÍMICO	N	UCS	N	FASE	N	COMPONENTE	EVALUCIÓN I: CUMPLIMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN		EVALUCIÓN II: TIEMPO OPTIMO		RESULTADO
							SI	+	NO	-	COMPONENTES APTOS
	3	MLC	4	MLCc	5	Humic Dystrudepts	+		-		NO APTO
			5	MLCd	6	Thaptic Hapludands	+		+		APTO
			6	MLCe	7	Typic Hapludands	+		+		APTO
	4	MLJ	7	MLJb	8	Humic Dystrudepts	+		-		NO APTO
			8	MLJc	9	Typic Melanudands	+		+		APTO
	5	MLK	9	MLKc	10	Pachic Melanudands	+		+		APTO
			10	MLKd	11	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
			11	MLKdp					+		NO APTO
	6	MQK	12	MQKd	12	Typic Eutrudepts	+		-		NO APTO
			13	MQKdp	13	Typic Udipsamments	+		+		APTO
	7	MQN	14	MQNb	14	Typic Eutrudepts	+		-		NO APTO
					15	Typic Udorthents	+		-		NO APTO
	8	VWO	15	VWOa	16	Typic Ustipsamments	+		+		APTO
Triple15	1	MGT	1	MGTc	1	Pachic Melanudands	-		-		NO APTO
			2	MGTd	2	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
	2	LVC	3	LVCe	3	Entic Hapludolls	-		+		NO APTO
					4	Typic Dystrudepts	-		+		NO APTO
	3	MLC	4	MLCc	5	Humic Dystrudepts	-		-		NO APTO
			5	MLCd	6	Thaptic Hapludands	-		+		NO APTO
			6	MLCe	7	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
	4	MLJ	7	MLJb	8	Humic Dystrudepts	-		-		NO APTO
			8	MLJc	9	Typic Melanudands	-		+		NO APTO
	5	MLK	9	MLKc	10	Pachic Melanudands	-		+		NO APTO
			10	MLKd	11	Typic Hapludands	-		+		NO APTO
			11	MLKdp			-		+		NO APTO
	6	MQK	12	MQKd	12	Typic Eutrudepts	-		-		NO APTO
			13	MQKdp	13	Typic Udipsamments	+		+		APTO
	7	MQN	14	MQNb	14	Typic Eutrudepts	-		-		NO APTO

AGROQUÍMICO	N	UCS	N	FASE	N	COMPONENTE	EVALUCIÓN I: CUMPLIMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN		EVALUCIÓN II: TIEMPO OPTIMO		RESULTADO
							SI	+	NO	-	COMPONENTES APTOS
					15	Typic Udorthents	-		-		NO APTO
	8	VWO	15	VWOa	16	Typic Ustipsamments	+		+		APTO

Fuente: autores (2023)

En concordancia con la tabla anterior, se presentan las siguientes imágenes que abarcan gráficamente las agroindustrias, los clústeres y las unidades óptimas para el vertimiento de ARnD-T enfocadas en los agroquímicos Malation y Triple 15; en contra parte, al realizar el modelado con el Procloraz no se logró establecer el cumplimiento de la concentración objetivo lo que resultó en que ningún componente fuera idóneo para el fin del proyecto, por ende, no se presenta ninguna ilustración de referencia.

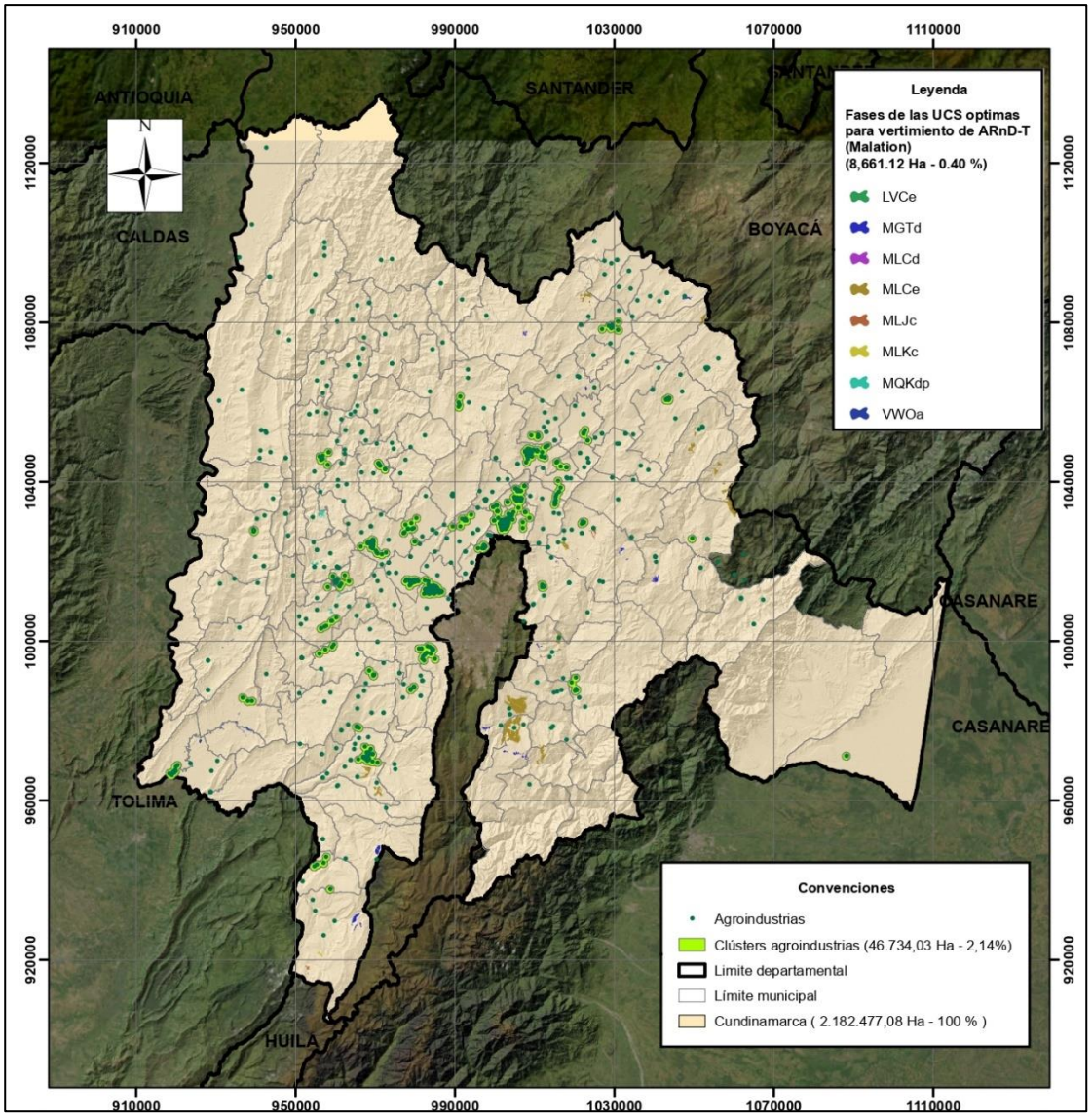


Ilustración 38. Mapa de las fases de las UCS aptas para el vertimiento de ARnD-T (Malation).
Fuente: autores (2023) con base en el mapa digital de suelos del departamento de Cundinamarca (2021)

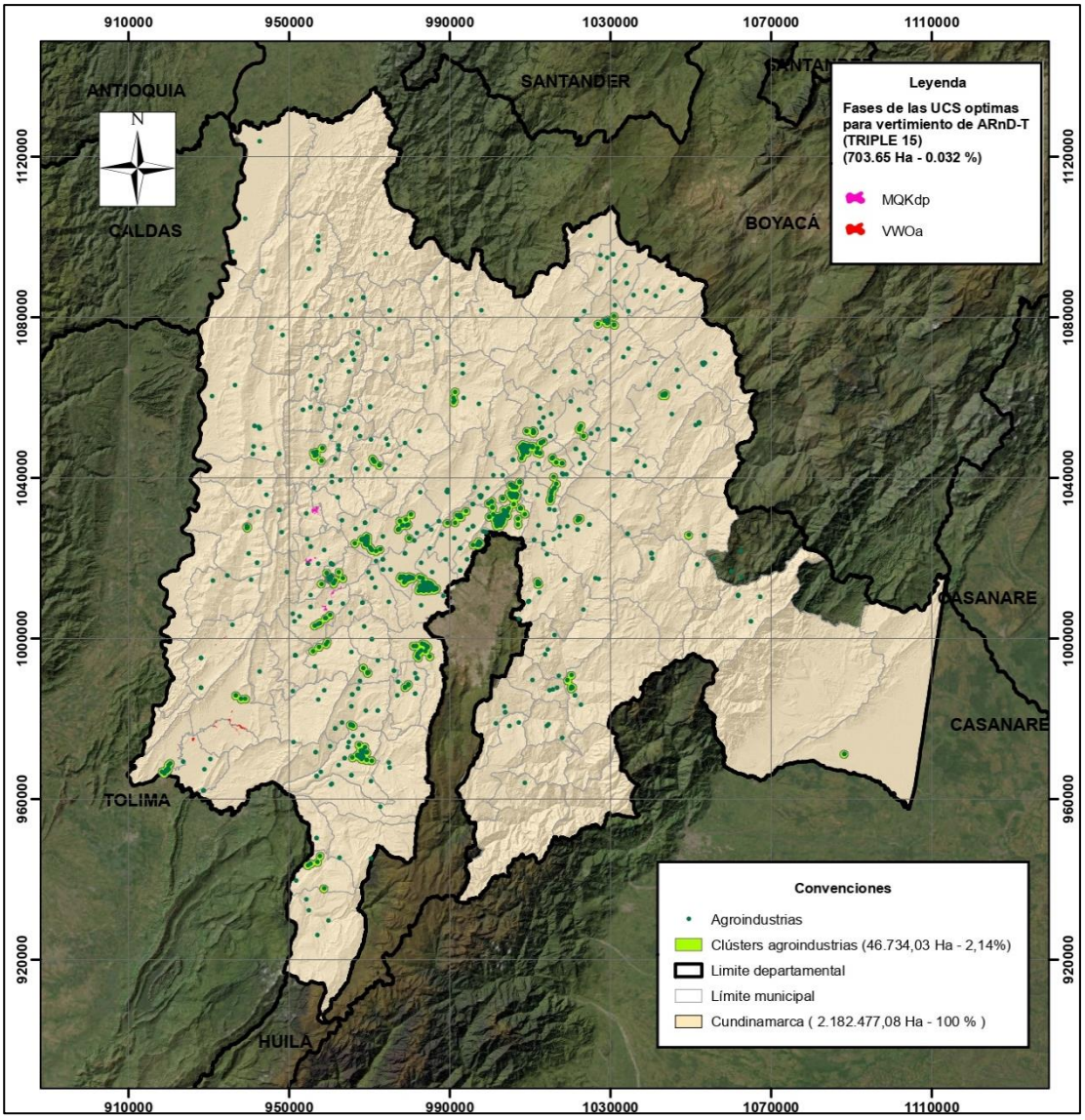


Ilustración 39. Mapa de las fases de las UCS aptas para el vertimiento de ARnD-T (TRIPLE 15).
Fuente: autores (2023) con base en el mapa digital de suelos del departamento de Cundinamarca (2021)

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

10.1 Fase I

Los resultados de la presente fase giraron en torno a la caracterización del suelo en Cundinamarca y la depuración de las áreas que presentan restricciones conforme a los parámetros ambientales y normativos. Es de notarse que el levantamiento realizado por el IGAC para los suelos en el departamento de Cundinamarca es generalizado y presenta un tiempo de antigüedad de más de 20 años. De igual manera, que las UCS presentan a su vez diferentes componentes de suelo con variados porcentajes de composición dentro del polígono de la unidad de suelo; no obstante, la ubicación espacial de esta composición no se encuentra teóricamente determinada, sino a través de trabajos de campo y levantamiento de suelo, lo que resulta siendo una limitante a la hora de precisar los resultados posteriores del presente trabajo.

Ahora, es pertinente justificar la inclusión de las amenazas climáticas como parámetro de exclusión de áreas para vertimiento de ARnD-T, dentro del presente análisis, es necesario incluir este tipo de amenazas que involucran factores anteriormente analizados, como lo son las pendientes, rondas hídricas y las propiedades agrológicas del suelo. Así, despreciar estas zonas con este riesgo resulta justificable gracias a dos razones, la primera de ellas es gracias a los factores dichos previamente y que fueron despreciados (zonas de alta pendiente, clases agrológicas poco adecuadas y actividad hídrica); y la segunda, por los grandes efectos que genera este fenómeno en las zonas donde sucede, como lo son la erosión y el descubrimiento de la capa orgánica del suelo, inestabilidad en el terreno debido a cambios en la estructura del paisaje y que afecte las galerías de infiltración, y el exceso de agua cargada de sedimentos que puede pasar por los terrenos, causando el ocupamiento de la porosidad efectiva del terreno y así encharcar la zona especializada para el vertimiento.

Considerando lo anterior, resulta pertinente afirmar que la reunión de parámetros ambientales y normativos para realizar la exclusión de áreas para vertimiento al suelo, podría ser un recurso importante para las autoridades ambientales con jurisdicción en el departamento de Cundinamarca y, de igual manera, podrían servir de insumo para realizar dicha depuración en las diferentes entidades territoriales de todo el país, con el fin de encontrar idoneidad a nivel de suelo, brindando bases de crecimiento en el sector agroindustrial en materia ambiental. Igualmente, esta información podría servir como base de criterio normativo y técnico para las Corporaciones en su ánimo de crear políticas públicas aplicables en su jurisdicción, en efecto podría considerarse el presente estudio para la expedición de la estandarización de los límites máximos permisibles de ARnD-T al suelo.

Por último, es de precisar que, luego de toda la compilación anterior, habrá un valor de área sujeto de exclusión, contrastado con el área de estudio completa. Para el caso en cuestión, el departamento de Cundinamarca tiene una extensión de 2´182.477,08 Ha (100%), de la cual

2´138.018,35 Ha resultan siendo las zonas de exclusión al vertimiento de ARnD-T (97.96%) del departamento.

10.2 Fase II

Partiendo de los resultados obtenidos, hay dos aspectos relevantes para analizar en la presente fase. El primero de ellos, son los filtros realizados a partir de criterios de las propiedades físicas del suelo, en el que de 72 fases solamente superaron esta prueba 15 fases UCS, representando así, aproximadamente, el 21% de este valor y, a su vez, representando el 12% de todas las fases de UCS en todo el departamento de Cundinamarca (183 fases UCS);, esto quiere decir que solo esta cantidad de UCS en términos físicos, presenta una profundidad efectiva, relación textural y porcentaje de componentes óptimas para vertimiento de ARnD-T. La profundidad efectiva resultó ser una gran limitante, algunos suelos son poco desarrollados a nivel de espesores, o presentan roca madre cercana a la superficie, o con gran porcentaje de arcilla impermeable, lo cual influyó en dicho parámetro a la hora de la evaluación.

Por otro lado, contrastando el análisis espacial y cartográfico de las agroindustrias, y la depuración realizada en el ítem 8.2.3 a través de la ilustración 38, muestra fases de las UCS idóneas muy cercanas a los clústeres de agroindustrias, ubicadas al suroeste del departamento. Por su parte, en la zona sureste de Cundinamarca, las UCS se encuentran aproximadamente a 11.3 km de distancia del clúster más cercano. Por otro lado, en términos de área y ubicación, se puede apreciar en la tabla 11, que la mayor concentración de industrias se ubica de mayor a menor de la siguiente manera:

Tabla 12. Área de ocupación de mayor a menor de los clústeres agroindustriales por municipio

NÚMERO DE CLÚSTER	MUNICIPIOS DE CONCENTRACIÓN	ÁREA OCUPADA (Ha)
1	Chía, Cajicá	6941,3
2	Mosquera, Madrid, Funza	3696,80
3	Zipaquirá	2741,71
4	Fusagasugá	2295,26
5	Soacha	2230,91
6	Facatativá	2139,27
7	Cachipay, Zipacón	2075,01
8	Facatativá, El Rosal	1621,55
9	Fomeque, La Calera	1534,66
10	Sopó, Tocancipá	1527,86
11	Ubaté	1506,24
12	Tenjo	1498,73
13	Villeta	1260,81
14	La Mesa	1165,88
15	Venecia	1077,58
16	El Colegio	1067,33
17	Girardot	1064,29
18	Tocancipá, Zipaquirá	885,02
19	Nemocón	855,41
20	Pacho	823,59
21	Tocaima	809,61

NÚMERO DE CLÚSTER	MUNICIPIOS DE CONCENTRACIÓN	ÁREA OCUPADA (Ha)
22	Cota	776,45
23	La Vega	759,80
24	Cogua	728,45
25	Granada	645,46
26	Chocontá	557,63
27	Sibaté	557,27
28	Guasca	497,68
29	Silvania	497,68
30	San Juan de Rioseco	407,50

Fuente: autores (2023)

La tabla anterior muestra que hay una gran cantidad de agroindustrias ubicadas en Chía, Cajicá, Mosquera y Madrid por lo que, a nivel espacial, para poder realizar un vertimiento efectivo e idóneo tendrían que desplazarse en promedio 11 kilómetros lineales hacia las zonas de suelo preliminarmente óptimo para dicha actividad, ubicados respectivamente en los municipios de Guasca, Zipacón y Facatativá. Por otro lado, lo analizado se sustenta en la diferencia cuantitativa en las áreas de los clústeres con respecto a la de las fases UCS idóneas, siendo mayor la densidad de agroindustrias que los suelos sujetos de infiltración, por lo que será tarea de las empresas que desean realizar vertimiento al suelo buscar la zona que se ajuste a sus oportunidades económicas y necesidades a nivel geográfico.

Por último, el presente análisis en este apartado tiene en cuenta las Buenas Prácticas Agrícolas en referencia al manejo de residuos de plaguicidas, elaborado por entidades como el Instituto Colombiano Agropecuario o AGROSAVIA, en los cuales se precisa que dichos residuos líquidos se manejan a través de dos mecanismos complementarios, el primero de ellos tiene que ver con el triple lavado de los envases de agroquímicos, los cuales al momento de ser limpiados con el agua deben ser perforados para evitar un envase en el mismo recipiente. El segundo referente a el líquido resultante del triple lavado, se construyen zonas de barbecho, que son terrenos los cuales deben estar alejados de las fuentes hídricas para evitar su contaminación, y en donde ocurriría la disposición final de dichos elementos. Así, el presente estudio jugaría un papel importante para la escogencia de dicha área de barbecho, especialmente en zonas de agroindustria y agricultura intensiva en el departamento.

No obstante, la alternativa de vertimiento presentada en este proyecto, cobra un papel principal cuando se hace recolección de residuos líquidos de agroquímicos por escorrentía, a través de medidas de manejo ambiental como las zanjas de coronación, las cuales necesitarán un disposición final controlada, con el fin de evitar la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos no puntuales y ofrezca una alternativa sostenible para el posconsumo de los plaguicidas y fertilizantes que se empleen en cualquier cultivo.

10.3 Fase III

Las concentraciones de entrada del modelo pueden variar de manera significativa dependiendo del tipo de agroquímico; por tanto, un aporte de este proyecto serían los modelos

que representan las condiciones físicas de dieciséis (16) componentes de las fases de las UCS del departamento de Cundinamarca en una extensión genérica de 3000 m^2, es decir, que podrían evaluarse gran cantidad de otros contaminantes y entender cómo se dispersan en estos suelos.

Al realizar los diferentes modelos se ve reflejado la importancia de ciertos aspectos que tendrán un impacto en la forma en que el solucionador dará respuesta a las condiciones de la matriz; entre estos aspectos se encuentran: a) los puntos de observación, debido a que estos son colocados de manera manual y arbitraria, aunque con tendencia a los bordes de la grilla, pueden reflejar condiciones de concentración que no representen realmente la situación dentro del componente modelado, por lo que se planteó ubicarlos en los puntos cardinales; b) las condiciones de borde, siendo las zonas oeste y este de importancia dado que deben considerar la profundidad total de cada componente y, a su vez, con su longitud decirle al programa hacia dónde va la dirección de flujo; c) el cabezal de descarga, el cual se ubicó en una zona central ya que se infirió como la mejor manera para observar la dispersión de los contaminantes; por otro lado, si se posiciona en otra zona de la grilla, p., ej., en su borde izquierdo, se esperaría ver una pluma de dispersión unilateral.

Cabe resaltar la influencia de las conductividades hidráulicas en desarrollo del modelo, siendo complementadas con rectángulos a los cuales se les añade su valor intrínseco y estos abarcan el grosor particular de cada horizonte que estructura a los componentes, dando así diferentes conductividades para un solo componente; sin embargo, cuando varios horizontes poseen la misma conductividad se sospecha que el solucionador los toma como una sola capa y generaliza la dispersión en esa zona. Adicionalmente, la conductividad hidráulica horizontal permite unir todas las conductividades en una sola y darle este valor a todo el componente en cuestión dando valores de magnitud menor que los que se tienen de manera individual; por ende, es posible que este factor disminuya la dispersión total de los agroquímicos.

En términos generales, todos los modelos presentan un comportamiento visual similar de dispersión; esto se debe, en su gran mayoría, a que fueron inyectados con el mismo valor de caudal, por tanto, fue indispensable encontrar variaciones de los otros parámetros entre los cuarenta y ocho (48) modelos para determinar focos de análisis. En consecuencia, se observó que existen dos nichos de análisis: a) los tiempos finales de dispersión, gracias a que en cada componente en particular se repiten, independientemente del tipo de agroquímico a que este se someta, permiten deducir la importancia que tienen las características de los horizontes (p. ej., conductividades y profundidades) en el aspecto de la asimilación; y b) las concentraciones monitoreadas por los puntos de observación ubicados anteriormente, que a grandes rasgos, presentan una tendencia en la matriz donde los puntos localizados al oeste y sur presentan menor concentración en comparación con aquellos ubicados en el norte y este; lo anterior no viró sin importar el contaminante. Este comportamiento se debe, principalmente, al potencial hídrico (dado por las condiciones de borde) haciendo que el fluido se desplace más hacia la derecha que hacia la zona izquierda de la grilla desde la vista “top”.

Los mejores suelos resultantes de la apreciación ***elección de los suelos más idóneos con base en el modelado***, comprenden a los componentes "utópicos", en otras palabras, aquellos que sobresalen de los demás en aspectos de cumplimiento de la concentración objetivo y de menores tiempos finales de dispersión; sin embargo, lo anterior no significa que aquellos que se encuentren por encima del promedio en cuanto al lapso de asimilación de los agroquímicos no sean opciones aptas, ya que al cumplir con la primera evaluación serian componentes "idóneos" aunque el proceso de dispersión se demore un poco más. Pese a lo anterior, para el caso del pesticida organoclorado Procloraz no existe ningún componente que pase la primera evaluación; en el caso del Malation (pesticida organofosforado), se sumaron a los nueve (9) componentes utópicos seis (6) componentes idóneos; y, por último, para el triple 15 no hubo variaciones entre el número de componentes aptos.

En cuanto a la interpretación de la gráfica, como se observa en el diagrama, hay una tendencia de crecimiento directamente proporcional tanto en el tiempo como en la concentración para los cuatro puntos de observación, esto se debe a las condiciones críticas en las que se desarrolló el modelo, donde hay un aumento de la carga contaminante en las celdas donde se ubicaron los puntos antes mencionados, dado a que el vertimiento se hizo de manera constante, causando una acumulación en las zonas especificadas.

Por otro lado, el comportamiento de la concentración se debe al transporte seleccionado para el presente caso (dispersión), dado a que a medida que avanza el tiempo, el contaminante se va desplazando hacia las zonas limítrofes del vertimiento, y gracias a que el vertimiento es constante, ese desplazamiento en términos de concentración incrementará en las celdas seleccionadas para la observación.

En relación, lo obtenido en el modelado permite presumir una posible explicación del porque el Procloraz no cumple con la concentración objetivo. En primer lugar, las condiciones bajo las cuales se realizó el modelo, es decir, la matriz suelo expuesta a una condición constante del contaminante; en segundo lugar, las concentraciones del plaguicida organoclorado, siendo la concentración inicial la más alta ($5x10^{-5}$g/L) y la concentración objetivo o final ($1x10^{-6}$g/L) la más baja de los tres (3) agroquímicos estudiados, en consecuencia, el viraje de concentración es de 50 veces el original; por último, se plantea la correlación entre el anterior aspecto, el área del suelo representada por medio de la grilla y el caudal del vertimiento, infiriendo que la naturaleza de área y caudal presentadas en este trabajo no poseen la magnitud adecuada para la asimilación del contaminante.

11. CONCLUSIONES

Posterior al proceso de modelado, se determinó cuáles fueron los componentes más aptos a nivel departamental para el vertimiento de los tres (3) agroquímicos cumpliendo con la concentración objetivo. Para el pesticida organoclorado Procloraz no hay ningún componente

y, en consecuencia, ninguna UCS que asimilará correctamente el contaminante; en el caso del Malation (pesticida organofosforado) se encontraron quince (15) componentes que hacen parte de trece (13) fases de UCS que asimilaron este contaminante, estas son: MGTc, MGTd, LVCe, MLCc, MLCd, MLCe, MLJb, MLJc, MLKc, MQKd, MQKdp, MQNb, VWOa; y por último, para el Triple 15 las fases de MQKdp y VWO son las únicas que cumplieron bajo las condiciones del modelo, alcanzar la concentración objetivo.

De acuerdo con la cartografía desarrollada para visualizar espacialmente la localización de las fases de las UCS y las agroindustrias en Cundinamarca, se determina que la convergencia entre ambas refleja las áreas con posible potencial para vertimiento de ARnD-T las cuales se ubican en los municipios de El Colegio, Cachipay, Granada, Une, Facatativá, Anolaima, Fusagasugá y La Mesa.

A partir de la construcción y estandarización del modelo en software MODFLOW, es posible identificar que las variables indispensables para la visualización del comportamiento de la concentración en la grilla, son las condiciones de borde para el potencial hídrico, el valor de entrada del vertimiento en términos de concentración y caudal volumétrico, la elección del solucionador PCG (Precinditioned Conjugate Gradient package) y en efecto el tipo de transporte al que se sometió el contaminante (dispersividad). En cuanto a los factores estructurales del suelo y del programa, para la influencia en los resultados de concentración objetivo, se encuentra las conductividades hidráulicas y los espesores de cada horizonte, el tiempo de flujo en la matriz y el transporte del contaminante, la ubicación del punto de descarga y por supuesto, el área de la grilla en representación de los componentes de las UCS.

El presente estudio funciona como una herramienta técnica orientadora en el área de disposición de aguas industriales enfocadas en agroquímicos al recurso suelo, que se ve sintetizada en este documento, y que pueden ser de gran importancia a la hora de ejecutar investigaciones relacionadas con dicha temática, así como una consideración interesante en la construcción de una futura normativa enfocada a la fijación de límites máximos permisibles para vertimiento de ARnD-T.

El filtro en los resultados de los modelos fueron determinados bajo condiciones estrictamente utópicas, en los que se hayan cumplido objetivos de calidad a distancias relativamente pequeñas al punto de vertimiento y, a su vez, a un tiempo en horas medianamente corto teniendo en cuenta el tiempo total de modelación (1 día), lo que quiere decir que dichos resultados de elección de los suelos ideales no desprecian los otros tipos de componentes de suelo y su capacidad para asimilar el contaminante.

El Malatión es un plaguicida organofosforado, cuya naturaleza o relación química (fósforo), le permite ser un agroquímico de bastante uso en todo el territorio nacional, lo que significa que los resultados obtenidos respecto a este, en el que existen quince (15) componentes ideales para su vertimiento, terminan siendo una información bastante útil para la industria alimentaria en Cundinamarca, en el ejercicio de cultivo y manejo de residuos líquidos de plaguicidas.

Teniendo en cuenta la magnitud del caudal volumétrico expuesto en el modelo, se infiere que, con caudales mayores de vertimiento, la concentración del contaminante será menor, debido a la relación de solutos con respecto al solvente, y se disipará de manera más sencilla en términos de profundidad desde el punto de vertimiento. Esto debido a que no existe ninguna perforación, si no que el efluente cae directamente al suelo y con una velocidad respecto a la distancia mucho menor.

En la modelación del plaguicida organoclorado cuyo nombre comercial es Procloraz, se obtuvo que las concentraciones en los puntos de observación no cumplieron con el objetivo de calidad propuesto; sin embargo, esto no significa que en toda la matriz de suelo no haya cumplimento de dichos objetivos, puesto que la ubicación de los puntos de observación se realizó con base en los cambios del comportamiento del contaminante en el tiempo de finalización del modelo. Asimismo, puede presentarse un suelo con mayor área y cumplir los objetivos de calidad esperados, como también una situación con un caudal mucho mayor al modelado confluyendo en una concentración menor.

El presente modelo es flexible a diferentes cambios y a ser aplicable a un estudio más detallado en un área puntual, en el que se puede cambiar las condiciones de borde, los niveles de cabeza piezométrico, potencial hídrico e hidráulico de la zona a través de pruebas de bombeo, ensayos de determinación de la velocidad de infiltración, e información adicional que pueda nutrir mayormente el modelo bajo las condiciones específicas que requiera el profesional encargado del vertimiento. De igual manera, como los valores de porosidad efectiva y la conductividad hidráulica son relativos dependiendo el ensayo y el tipo de suelo a la que se le realice, estas variables calculadas en campo pueden nutrir de manera más precisa lo propuesto por los autores.

12. RECOMENDACIONES

La diferencia cuantitativa en las áreas ocupadas por los clústeres de agroindustria con respecto a la de las fases UCS ideales, es mucho mayor, por lo que será tarea de las empresas que desean realizar vertimiento al suelo buscar la zona que se ajuste a sus oportunidades económicas y necesidades a nivel geográfico. Estas zonas resultan tener un potencial económico y ambiental importante para el sector agroindustrial

Para disminuir la concentración dentro de la matriz de suelo, se plantea el uso de un caudal volumétrico adicional, que dependerá del estudio específico del área sujeta a la descarga. Ese caudal volumétrico debe ser considerado mediante alternativas como la construcción de un pozo de bombeo, que vaya acorde a las propiedades físicas del suelo, su conductividad, porosidad efectiva, contenido de materia orgánica y bajo contenido de sodio.

Uno de los limitantes al momento de realizar un vertimiento está directamente relacionado con la información predial y catastral de las zonas estudiadas; el vertimiento al suelo se limita a que su contaminante puede superar los límites prediales y contaminar un área cuya propiedad pertenezca a otra persona. Es por eso que un estudio previo para el vertimiento

debe tener en cuenta la situación predial de la zona en concreto, con el fin de evitar problemas por denuncia ambiental ante las Corporaciones.

El presente estudio se hizo conforme a las propiedades físicas del suelo, pero hay que tener en cuenta el comportamiento químico del suelo para verter el contaminante; lo anterior debido al comportamiento molecular e iónico del soluto de ingreso en el medio poroso, que puede cambiar sus condiciones de intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica, entre otros.

Según el mapa de clústeres agroindustria y fases UCS idóneas para vertimiento, se vislumbra una oportunidad de crecimiento del sector agroindustrial, puesto que representa áreas para nuevas empresas de esta actividad en el departamento. Tener un suelo productivo para la generación de un alimento y, a su vez, óptimo para hacer un vertimiento de agroquímicos resulta ser bastante rentable en términos económicos y ambientales.

Considerando que el modelado hizo el transporte del contaminante por dispersión, se recomienda profundizar en la ecuación de Ogata-Banks con el fin de saber cuánta área en metros cuadrados se necesita para cumplir el objetivo de calidad en el suelo con un agroquímico determinado, con el fin de tener un estudio mayormente justificado para hacer el vertimiento de aguas industriales al suelo.

Es preciso resaltar que la escala de estudio del presente trabajo es a nivel departamental, por lo que se sugiere que lo estudios posteriores relacionados con este tema se hagan a escalas mucho más detalladas, con el fin de encontrar limitantes que interfieran con el objeto, por ejemplo, los conflictos de uso de suelo de las zonas, los planes de ordenamiento territorial y la organización catastral donde se requiera hacer el vertimiento.

13. BIBLIOGRAFÍA

Abel Dario Urrea P. (s.f.). Teledetección de la ZCIT. Dirección de Seguridad Operacional Aeroclub de Colombia

Abonamos Fertilizante Permaxion triple 15 —. (s. f.). Abonamos. https://www.abonamos.com/permaxion-15-15-15

Álvarez, Y. R. (2011). Incidencia del PIB agropecuario en el PIB nacional. Evolución y transformación. Cali: Universidad de San Buenaventura Cali-Colombia.

Áreas protegidas declaradas CAR. (s. f.). https://datosgeograficos.car.gov.co/datasets/CARCundinamarca::areas-protegidas-declaradas-car/about

Bajo, O., & Monés, M. A. (2000). Curso de macroeconomía. Antoni Bosch editor.

Bancolombia. (2021). Informe del sector agropecuario en el segundo trimestre de 2021. Grupo Bancolombia. https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/informe-sector-agropecuario-segundo-trimestre-2021

Bedekar, V., Morway, ED, Langevin, CD y Tonkin, M. (2016), MT3D-USGS versión 1: una versión de MT3DMS del Servicio Geológico de EE. UU. actualizada con capacidades de transporte nuevas y ampliadas para su uso con MODFLOW: Técnicas del Servicio Geológico de EE. UU. y Métodos 6-A53, 69 p., http://dx.doi.org/10.3133/tm6A53

Bloom, D. E. (2020). Población 2020: La demografía puede incidir poderosamente en la velocidad y el proceso del desarrollo económico. *Finanzas y desarrollo: publicación trimestral del Fondo Monetario Internacional y del Banco Mundial*, *57*(1), 6-9.

Brissio, Pedro Augusto. 2005. Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera. Escuela Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional del Comahue (Neuquén - Argentina), disponible en http:// www.tesis.bioetica.org/pab2-3.htm Consultado julio 26 de 2022.

Cardona, Wilches, García, Mansilla, Ramírez & Marulanda (2004). Definición de la Responsabilidad del Estado, su Exposición Ante Desastres Naturales y Diseño de Mecanismos para la Cobertura de los Riesgos Residuales del Estado. Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: estimación de pérdida y cuantificación de costos.

Castellanos, J.Z. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas 2ª Edición. 186 p.

CATIE. (1990). Guía para el manejo integrado de plagas del cultivo de tomate. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza.

CEPAL (2017). Configuración territorial de las provincias de Colombia, ruralidad y redes. Oficina de la Cepal en Bogotá.

CINTEL (2021). PROYECTO BPIN 2019000050007 – FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES PRODUCTIVAS MEDIANTE EJERCICIOS DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE MIPYMES EN BOGOTÁ – "TRANSFORMA TECH". Anexo 1. Códigos CIIU de los sectores productivos objeto del proyecto.

Coduto, D.P. (1999) Geotechnical Engineering: Principles and Practice. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.

COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1450 (16, junio, 2011). Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.

COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 388 (18, julio, 1997). Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 1076 (26, mayo, 2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Consorcio Río Garagoa (2017) Actualización POMCA Río Garagoa. Corporación Autónoma Regional.

DANE (s.f.) FICHA TECNICA Sistema de Información del Medio Ambiente. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Nitrogenos_totales_13.pdf

de: https://igac.gov.co/es/noticias/en-donde-estan-los-mejores-suelos-para-cultivar-en-el-pais#:~:text=El%20estudio%20del%20IGAC%20tambi%C3%A9n,)%20y%20Antioquia%20(20%2C3

DEMINAK 45 (2023) EC > Agroactivo. Agroactivo. https://agroactivocol.com/producto/sanidad-vegetal-alimentos-saludables/fungicida-prochloraz-deminak-45/

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019). Boletín Técnico Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). Bogotá D.C: DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2019/boletin_ena_2019.pdf

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019). Boletín Técnico Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). Bogotá D.C: DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2019/boletin_ena_2019.pdf

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-USDA. (s.f). About the U.S. Department of Agriculture. USDA. https://www.usda.gov/our-agency/about-usda

Departamento Nacional de Planeación-DNP (s.f.). Agroquímicos. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Empresarial/agroquimicos.pdf

Doran J. y T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 3-21. En: Doran, J. W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B. A. Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication #35. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI.

ESRI (2023). Calcular densidad (Análisis ráster). ArcGIS Pro 3.1. Visitado 1/08/2023. Sitio web. https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/raster-analysis/calculate-density.htm

FAO (2018) Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta. Objetivos de desarrollo sostenible. Obtenido de: https://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/

FAO. (2010). Buenas prácticas agrícolas -BPA- en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. Colombia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Fondo de Población de las Naciones Unidas-UNFPA (2023). Informe sobre el Estado de la Población Mundial 2023.

Gidahatari (2022). Programa de Modelamiento Numérico en Aguas Subterráneas – Asincrónico. Gestión sostenible del agua. Lima, Perú.

Gobernación de Cundinamarca (2013) Capítulo 2. Subsistema Gestión del Riesgo y Cambio climático.

Gobernación de Cundinamarca (2013) Capítulo 2. Subsistema Gestión del Riesgo y Cambio climático.

Gobernación de Cundinamarca (2018). Línea base objetivos de desarrollo sostenibles departamento de Cundinamarca y provincias

Gobernación de Cundinamarca (s.f). Subsistema de cambio climático y gestión del riesgo. Recuperado de: https://www.cundinamarca.gov.co/wcm/connect/6ffb2042-c879-46fd-baa8-1bf9d370b2f9/CAPITULO%2B2%2BSUBSISTEMA%2BCAMBIO%2BCLIMA%CC%81TICO%2BY%2BGESTION%2BDEL%2BRIESGO.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=ROOTWORKSPACE-6ffb2042-c879-46fd-baa8-1bf9d370b2f9-nRFGFrz

Guía Técnica De Criterios Para El Acotamiento De Las Rondas Hídricas En Colombia (2018). https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/18.-Anexo-18-Guia-Criterios-para-el-acotamiento-de-las-Rondas-Hidricas-1.pdf

Guzmán-Plazola, P., Guevara-Gutiérrez, R. D., Olguín-López, J. L., & Mancilla-Villa, O. R. (2016). Perspectiva campesina, intoxicaciones por plaguicidas y uso de agroquímicos. *Idesia (Arica)*, *34*(3), 69-80.

http://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/aguas-subterraneas-y-acuiferos/

Ibáñez, JJ (2010). Profundidad efectiva y Capacidades de Uso del Suelo (Régulo León Arteta) - Un Universo invisible bajo nuestros pies. Un Universo invisible bajo nuestros pies - Los suelos y la vida. https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/14/61286#:~:text=Suelos%20profundos%20tienen%20un%20metro,tienen%20menos%20de%200.25%20m.

ICDE (2013). Mapa Digital de Conflictos de Uso, República de Colombia, Escala 1:100.000.
IDEC (2021). Empresas de Colombia actualizado. Datos y estadísticas Cundinamarca.

IGAC (2003). Conflicto de uso del territorio colombiano. Escala: 1:100.000. Convenio marco de cooperación especial.

IGAC (2003). Gestión del Suelo Urbano en el marco del Ordenamiento Territorial. Subdirección de Geografía

IGAC (2013). Mapa Digital de Conflictos de Uso, República de Colombia, Escala 1:100.000.
IGAC (2021) CLASIFICACIÓN DE LAS TIERRAS POR SU CAPACIDAD DE USO. Código IN-GAG-PC05-02. Subdirección de Agrología
IGAC (2022) ¿En dónde están los mejores suelos para cultivar en el país? Obtenido

IGAC (2022). Colombia en Mapas. https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.43784778320864,-0.17644239911865092,71.23179309571162,9.90326984502256,4686

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2007) Atlas de páramos de Colombia. ISBN: 9588151915
Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (2023). Caracterización General del Escenario de Riesgo por Avenidas Torrenciales. Visitado 08/06/2023 a través de: https://www.idiger.gov.co/riesgo-por-avenidas-torrenciales#:~:text=1.-,%C2%BFQu%C3%A9%20son%20las%20avenidas%20torrenciales%3F,las%20condiciones%20de%20la%20cuenca.
Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (2023). Caracterización General del Escenario de Riesgo por Incendio Forestal. Visitado 08/06/2023 a través de: https://www.idiger.gov.co/rincendiof

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (S.F). Capítulo 2: PLAGUICIDAS QUÍMICOS, COMPOSICIÓN Y FORMULACIONES, ETIQUETADO, CLASIFICACIÓN TOXICOLÓGICA, RESIDUOS Y MÉTODOS DE APLICACIÓN. APLICACIÓN EFICIENTE DE FITOSANITARIOS. Ministerios de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina.

Londoño, G. A. (1985). Estructura económica colombiana (No. 12). Editorial Norma.

Lorenzo Borselli (2021). Instituto de Geología-Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

MADS (2015). Resolución 0631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. REPUBLICA DE COLOMBIA.

Malation. (s. f.). http://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr/index.php/base-de-datos-menu/358-malation

Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW (s.f.). Curso de Modelamiento con MODFLOW. Recuperado de : https://static1.squarespace.com/static/521e95f4e4b01c5870ce81cf/t/57cf70f7c534a5b2c35ce4e7/1473212682390/Manual_de_Modflow_Esp.pdf

Mapa Digital de Suelos del Departamento de Cundinamarca, República de Colombia. Escala 1:100.000. Año 2001.

Mapa Digital de Suelos del Departamento de Cundinamarca, República de Colombia. Escala 1:100.000. Año 2001.

Ministerio de Agricultura (1978). Decreto 1541 de 1978. Para la reglamentación de las aguas no marítimas. República de Colombia. Tomado de: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1250#:~:text=%2D%20Todos%20los%20habitantes%20pueden%20utilizar,de%20los%20recursos%20naturales%20renovables.
Ministerio de Ambiente (2023) Aguas subterráneas y acuíferos. Visitado en mayo de 2023.
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Política para la Gestión Sostenible del Suelo. Bogotá D.C.

Ministerio de Medio Ambiente (1995). Resolución 2965 de 1995. Formación de avalúos comerciales de predios mejoras rurales. República de Colombia.
Ministerio de Medio Ambiente (2010). Decreto 2372 de 2010. Por medio del cual se reglamenta el Sistema de áreas protegidas. República de Colombia. Tomado de: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=39961
Ministerio de Medio Ambiente (2018). Ley 1930 de 2018. POR MEDIO DE LA CUAL SE DICTAN DISPOSICIONES PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS PÁRAMOS EN COLOMBIA. República de Colombia.
Ministerio del Medio Ambiente (1993). Ley 99 de 1993. Organización del Sistema Nacional Ambiental. República de Colombia.
Muñoz, M. D. P. S., & Aguirre, M. T. H. (2014). La institucionalidad del suelo en Colombia: ¿utopía o realidad? Ambiente y Desarrollo, 18(34), 57-76.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura . (nd-b). produccion de cultivos | Mecanización Agrícola Sostenible |. https://www.fao.org/sustainable-agricultural-mechanization/guidelinesoperations/cropproduction/es/

Organización de las Naciones Unidas-ONU. (1992). CONVENIO SOBRE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA NACIONES UNIDAS 1992.

Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra, Suiza, 1992. Consecuencias Sanitarias del Empleo de Plaguicidas en la Agricultura.

Pérez, M. E., Ruiz, D. M., Schneider, M., Autino, J. C., & Romanelli, G. (2013). La química verde como fuente de nuevos compuestos para el control de plagas agrícolas. Ciencia En Desarrollo, 4(2), 83

Plan Vial Departamental Cundinamarca (2017). https://www.efr-cundinamarca.gov.co/sites/default/files/efr-pdf/plan-vial-deptal-final-2019-c.pdf

Planella, I. (1985). La agroindustria en Colombia (Una revisión y análisis bibliográfico).

Portafolio, R. (2021, 21 junio). La economía agropecuaria, protagonista en el PIB 2021. Portafolio.co. https://www.portafolio.co/economia/finanzas/la-economia-agropecuaria-protagonista-en-el-pib-2021-553168}

Rico Calvano, F., Villanueva Imitola, A., Polo Bolaño, M., & Rico Fontalvo, H. (2014). Uso actual del suelo, tenencia de la tierra y conflictos del territorio en los departamentos de Atlántico y Bolívar: una reflexión.

Saavedra, L. J., Escobar V, J. A., & Lara, J. A. MODELACIÓN HIDRÁULICA Y DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL TERCIO ALTO DEL HUMEDAL JABOQUE.

Salamanca Castillo, G. F. (2020). Efecto de los agroquímicos en salud pública y medio ambiente.

Sánchez, F.J. (2008). Transporte de contaminantes. Conceptos fundamentales de hidrogeología. Dpto de Geología. Universidad de Salamanca.

Servicio Geológico Colombiano (2016). Mapa de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100000

Tejedor, A.S (S.F) La industria agroquímica. Química Orgánica Industrial. Universidad de Valladolid. Consultado por: https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-01.php

Universidade da Coruña (2005). HIDROLOGÍA I. CICLO HIDROLÓGICO. Capítulo 6. Infiltración. Flujo en zona no saturada.

Villazón, M. F., Oporto, C., Álvarez, M., Tapia, D., Canaviri, C., & Guaygua, J. L. (2016) MODELACIÓN MATEMÁTICA DE CONTAMINANTES (METALES PESADOS Y PESTICIDAS) EN COLUMNAS DE SUELO, CASO DE ESTUDIO: COCHABAMBA-BOLIVIA.

Winston, RB, 2020, GW_Chart versión 1.30: Lanzamiento del software del Servicio Geológico de EE. UU., 26 de junio de 2020, https://doi.org/10.5066/P9Y29U1H

Zúñiga, H (2012). La pendiente compleja atributo del territorio, útil en el ordenamiento espacial del municipio. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.