



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá.

Nelson Ricardo Cante Ríos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.
Bogotá, Colombia

2020

Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá.

Nelson Ricardo Cante Ríos

Tesis de investigación de maestría presentada como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Directora:

Ph.D., Martha Cristina Bustos López

Codirector (a):

M.I., Carlos Alberto González Murillo

Línea de Investigación:

Modelación de Fenómenos y amenazas naturales

Grupo de Investigación:

Resiliencia y Saneamiento Ambiental **RESA**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

Bogotá, Colombia

2020

DEDICATORIA:

A la madre tierra y el padre cosmos por permitirme recabar en el conocimiento perdido del mundo y ayudarme a recordar la conjunción del saber con mi sacro oficio.

A mi yo cuántico y a mis más profundos sueños, los cuales siempre llevan mis pasos a lugares inimaginables...

A mis grandes maestras espirituales María Cristina Ríos Céspedes, Lina Soto Afanador y Martha Cristina Bustos López. Que con su entrega infinita, su apoyo incondicional y la grandeza de su espíritu, me guiaron por este mágico camino en la Universidad Nacional de Colombia.

A cielito, por sus alas de libertad, por la inmensidad de sus ojos y de su alma. Por enseñarme a vivir y creer en el amor valiente: de sueños, ilusiones y desapego. Haciendo que mi alma trascendiera las fronteras de la razón, el tiempo, el espacio y el atlántico.

A mi mompirri Nelson Arevalo "Majic" por ser ese apoyo incondicional en todo momento, que con su risa y comentarios desmedidos, hicieron de cada capítulo de esta tesis una epifanía entre la realidad y el pensamiento.

El conocimiento es útil cuando ofrece soluciones que conectan la teoría con la experiencia. El conocimiento es inútil cuando tan solo da información y satisface el ego del individuo.

El conocimiento es enormemente peligroso cuando no sirve al prójimo y se vende a los poderosos. El conocimiento solo tiene éxito cuando se recurre a él, como una herramienta mediante la cual y con la cual se puede conectar la propia vida con los saberes ancestrales del mundo.

Nelson Ricardo Cante Ríos. *Inspirado en Tania Meneses y Zygmunt Bauman.*

Agradecimientos

El autor desea expresar sus agradecimientos a los profesores Martha Cristina Bustos López y Carlos Alberto González Murillo, los cuales fueron mis guías y mis maestros en cada uno de los pasos de este trabajo de maestría. Gracias a su asesoría y apoyo constante fue posible realizar este maravilloso proceso en la Universidad Nacional de Colombia.

Agradezco de manera especial a todo equipo del laboratorio de Ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, a César, Carlos Fernando, Don Saúl, Keile, Pablo y Álvaro por permitirme compartir con ustedes este pequeño instante del tiempo y que gracias a su colaboración constante y buena disposición en cada uno de los ensayos realizados hoy es posible presentar este documento.

A mi estimada colega y amiga María del Pilar Martínez Polanco, que con su ejemplo y perseverancia infinita me inspiro a diario para creer en mis sueños y ver que es posible convertirlos en realidad.

A la Dirección de investigaciones de la sede Bogotá - DIEB, por la financiación al proyecto "Evaluación de alternativas de tratamiento para reúso de aguas residuales en agricultura en la sabana Occidental de Cundinamarca", código 37518.

Agradezco de corazón a la Universidad Nacional de Colombia y al grupo de investigación RESA, por abrirme las puertas de su corazón y creer en las ideas de este loco soñador, de pasiones desmedidas y locuras infinitas. Y finalmente, gracias a la vida que me ha dado tanto...

Resumen

Recientemente el uso de herramientas de simulación ha cobrado mayor significancia para la toma de decisiones, en la gestión de servicios ambientales e impactos asociados con actividades antrópicas en los ecosistemas. Estas herramientas permiten conocer desde una perspectiva hídrica y ambiental, el posible destino final y el grado de movilidad de sustancias fertilizantes como los nitratos (NO_3^-). Sustancias que son comúnmente empleadas en los diferentes sectores agrícolas de la floricultura colombiana, principalmente en áreas productivas estratégicas como la Sabana de Bogotá, en la cual se encuentra cerca del 79% del total de área de cultivo de flores del país (DANE, 2010).

En esta investigación se aborda como objetivo el uso de una herramienta de simulación, para predecir la dinámica del movimiento de los Nitratos (NO_3^-) en un suelo del agroecosistema de la Sabana de Bogotá, empleando condiciones de flujo no saturado y transporte bajo el concepto de no equilibrio físico. Para tal fin se realizó un proceso de modelación con el programa HyDRUS 1D (Simunek et al., 1998), siguiendo las etapas propuestas por los protocolos de Camacho *et al.*, (2003), el IDEAM, (2018) y el MADS, (2018). Dentro de este proceso, se analizó el porcentaje de lixiviación de nitratos (NO_3^-) en el proceso de floricultura de rosa de corte, junto con la determinación en condiciones de laboratorio de los parámetros hidrofísicos y de transporte del suelo estudiado. Experimentalmente, se usaron los métodos de: las ollas de Richard's (Klute, 1986), el aire caliente (Arya et al., 1975) aunados a los ensayos de adsorción dinámica (*Breakthrough Curve - BTC*) (OECD, 2004) y adsorción tipo Batch (OCDE, 2000). Posteriormente, se realizó un proceso de optimización no lineal para determinar los parámetros efectivos que dan solución a las ecuaciones de Richard's's (Richard's, 1931) y de Convección Dispersión (Lapidus y Amundson, 1952), empleando el software RETC (Van Genuchten et al., 1991) y el algoritmo CXTFIT (Toride et al., 1995) presente en el software STANMOD®.

De los resultados obtenidos, se observa que los nitratos (NO_3^-) poseen un alto grado de movilidad en el suelo objeto de estudio, indicando un alto potencial de contaminación del agua subterránea. Principalmente, debido a su bajo porcentaje de adsorción en los suelos y al alto aporte de este tipo de compuestos por parte de los procesos de floricultura presentes en el Agroecosistema de la Sabana de Bogotá.

Palabras Clave: Nitratos, Parámetros Hidrofísicos, Dispersión Hidrodinámica, Floricultura, Sábana de Bogotá, Agroecosistema, simulación matemática y suelos.

Abstract

Recently, the use of simulation tools has become more significant for decision-making, in the management of environmental services and impacts associated with anthropic activities in ecosystems. These tools allow to know from a water and environmental perspective, the possible final destination and the degree of mobility of fertilizer substances such as nitrates (NO_3^-). Substances that are commonly used in the different agricultural sectors of the Colombian floriculture, mainly in strategic productive areas such as the Bogotá Savannah, in which about 79% of the total area of flower cultivation in the country is located (DANE, 2010).

The objective of this research is to use a simulation tool to predict the dynamics of the movement of nitrates (NO_3^-) in a soil of the agroecosystem of the Bogotá savannah, using unsaturated flow and transport conditions under the concept of physical non-equilibrium. For this purpose, a modeling process was carried out with the HyDRUS 1D software (Simunek et al., 1998), following the steps proposed by the protocols of Camacho et al., (2003), IDEAM, (2018) and MADS, (2018). Within this process, the percentage of nitrate leaching (NO_3^-) in the cut rose floriculture process was analyzed, together with the determination under laboratory conditions of the hydrophysical and transport parameters of the soil studied. Experimentally, the methods of: Richard's pots (Klute, 1986), hot air (Arya et al., 1975) were used together with the dynamic adsorption tests (Breakthrough Curve) (OECD, 2004) and Batch type adsorption (OECD, 2000). Subsequently, a non-linear optimization process was carried out to determine the effective parameters that give solution to Richard's (Richard's, 1931) and Dispersion Convection (Lapidus and Amundson, 1952) equations, using the RETC software (Van Genuchten et al., 1991) and the CXTFIT algorithm (Toride et al., 1995) present in the STANMOD® software.

From the obtained results, that nitrates (NO_3^-) have a high degree of mobility in the soil under study, indicating a high potential for groundwater contamination. Mainly, because of its low adsorption percentage in soils and the high contribution of this type of compound by the floriculture processes present in the agro-ecosystem of the Bogota savanna.

Key words: Nitrates, Hydrophysical Parameters, Hydrodynamic Dispersion, Floriculture, Bogota Savanna, Agroecosystem, Mathematical simulation and soils.

Contenido

	Pag
Objetivos.....	3
1 Generalidades	4
1.1 Fenómenos de flujo y transporte asociados a la contaminación de suelo.....	6
1.1.1 Flujo de agua en la zona no saturada	6
1.1.2 Transporte de solutos en la zona no saturada	7
1.2 Determinación de los parámetros de flujo y transporte	7
1.2.1 RETC (REtention Curve)	8
1.2.2 STANMOD. (STudio of ANalytical MODels)	9
1.2.3 HYDRUS-1D.....	11
1.3 Protocolo de modelación.....	12
1.3.1 Objetivo y requerimientos de información.	12
1.3.2 Modelo Conceptual.....	14
1.3.3 Calibración.....	15
1.3.4 Validación y Análisis de Sensibilidad e incertidumbre.....	16
1.3.5 Formulación de escenarios de simulación	17
1.4 Área de estudio	18
1.4.1 Descripción del perfil de suelo del área de estudio	19
1.4.2 Características fisicoquímicas del perfil de suelo	20
2 Caracterización de los parámetros hidrofísicos de un perfil de suelo perteneciente al agroecosistema de la sabana de Bogotá.....	21
2.1 Resumen.....	21
2.2 Abstract.....	22
2.3 Materiales y métodos	23
2.3.1 Curva de Retención de Humedad:.....	23
2.3.2 Ensayo de infiltración - Conductividad hidráulica Saturada.....	24
2.3.3 Curva de Conductividad Hidráulica No Saturada	24
2.4 Resultados y discusión.....	26
2.4.1 Curva de Retención de Humedad.....	26
2.4.2 Ensayo de infiltración – determinación conductividad hidráulica saturada	29
2.4.3 Curva de Conductividad Hidráulica No Saturada	31
3 Determinación de los parámetros de transporte de nitratos (NO₃⁻) en un perfil de suelo perteneciente al agroecosistema de la sabana de Bogotá.....	42
3.1 Resumen.....	42
3.2 Abstract.....	43
3.3 Materiales y métodos	44
3.3.1 Determinación de los parámetros de transporte.....	46
3.3.2 Isotermas de Adsorción:	46
3.4 Resultados y discusión.....	48
3.4.1 Curvas de Elución.....	48
3.4.2 Isotermas De Adsorción.....	55

4	Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) procedentes de procesos de floricultura en un suelo de la Sabana de Bogotá.....	61
4.1	Resumen	61
4.2	Abstract	62
4.3	Materiales y métodos.....	63
4.3.1	Modelo conceptual	64
4.3.2	Calibración y validación.....	65
4.3.3	Análisis de Sensibilidad e incertidumbre	66
4.3.4	Escenarios de simulación	66
4.4	Resultados y discusión	67
4.4.1	Condiciones iniciales y de frontera.....	67
4.4.2	Calibración	69
4.4.3	Validación.....	69
4.4.4	Sensibilidad e incertidumbre.....	71
4.4.5	Escenarios de Simulación	73
5	Conclusiones	79
6	Referencias	81
Anexo A: Consolidado de datos experimentales parámetros hidrofísicos y de transporte.....		91
Anexo B: Análisis de flujos máxicos de nitratos (NO_3^-) y balance hídrico.....		112
Anexo C: Consolidado de resultados de simulación de la dinámica del transporte de NO_3^- - Hydrus 1D.		118

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Ejemplo de esquematización del sistema para la modelación del transporte de contaminantes en la zona no saturada	14
Figura 1-2. Localización general del área de estudio agroecosistema de la Sabana de Bogotá – Centro Agropecuario Marengo.	18
Figura 2-1. Resultados experimentales de la curva de retención de humedad de los tres horizontes de suelo.	26
Figura 2-2. Resultados de los valores de optimización no lineal obtenidos para la Curva de Retención de Humedad en los tres horizontes de suelo. Modelos: a) Van Genuchten (m,n), b) Van Genuchten (m=1-1/n), c) Van Genuchten (m=1-2/n) y d) Brooks and Corey.	27
Figura 2-3. Resultados experimentales de la curva de retención de humedad.	29
Figura 2-4. Curvas de conductividad hidráulicas no Saturada de los tres horizontes de suelo.	31
Figura 2-5. Curvas de Conductividad Hidráulica No Saturada obtenidas en los tres horizontes de suelo con los modelos: a) Van Genuchten (n,m) – Mualem, b) Van Genuchten (m=1-1/n) - Mualem, c) Van Genuchten (m,n) - Burdine y d) Van Genuchten (m=1-2/n) - Burdine.	32
Figura 2-6. Curvas de Conductividad Hidráulica No Saturada obtenidas con el modelo Van Genuchten – Mualem (n,m), usando diferentes técnicas de optimización: a) Simulados_L≠0,5,b)Simulados_L=0,5_Con_CRH_(α,n ym), c) Simulados_RETC_Rosetta, d)Simulados_RETC_Datos_Textura.....	37
Figura 2-7. Curvas de Conductividad Hidráulica No Saturada obtenidas con el modelo Van Genuchten – Mualem (m=1-1/n), usando diferentes técnicas de optimización: a) Simulados_L≠0,5,b)Simulados_L=0,5_Con_CRH_(α,n ym), c) Simulados_RETC_Rosetta, d)Simulados_RETC_Datos_Textura.....	38
Figura 2-8. Análisis consolidado de los parámetros efectivos obtenidos a partir de los modelos de Conductividad Hidráulica No Saturada Van Genuchten – Mualem (n,m): a) Horizonte A, b) Horizonte B y c) Horizonte C.y Van Genuchten – Mualem (m=1-1/n): e) Horizonte A, f) Horizonte B y g) Horizonte C.	41
Figura 3-1. Resultados experimentales de la curva de elución (BTC) para el ion bromuro (Br ⁻) en los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.....	48
Figura 3-2. Comparación de los datos experimentales obtenidos en las curvas de elución del ion bromuro (Br ⁻) (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>) con los datos de las curvas obtenidas con los métodos CDE y PNE para los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.	50
Figura 3-3. Resultados experimentales de la curva de elución para el ion Nitrato (NO ₃ ⁻) (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>) en los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.	51

Figura 3-4. Comparación de los datos experimentales obtenidos en las curvas de elución del ion nitrato (NO_3^-) (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>) con los datos de las curvas obtenidas con los métodos CDE y PNE para los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.	53
Figura 3-5. Resultados experimentales de las isothermas de adsorción para los horizontes de suelo estudiados.	55
Figura 3-6. Resultados experimentales de las isothermas de adsorción para los horizontes de suelo estudiados - Modelo de Langmuir.	55
Figura 3-7. Resultados experimentales de las isothermas de adsorción para los horizontes de suelo estudiados - Modelo de Freundlich.	56
Figura 4-1. Modelo Conceptual definido para la modelación del transporte de Nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada.	64
Figura 4-2. Esquema general del sistema de referencia y ecuaciones del balance de masa planteado para realizar el análisis de lixiviación de Nitratos.	67
Figura 4-3. Resultados de los perfiles de concentración de Nitratos (NO_3^-) obtenidos experimentalmente en el ensayo de lixiviación y simulados en el software Hydrus 1D. ..	70
Figura 4-4. Resultados del análisis de sensibilidad paramétrica del modelo de flujo Van Genuchten – Mualem ($n=1-1/n$) y de transporte de no equilibrio físico – Horizonte A.	71
Figura 4-5. Resultados del análisis de sensibilidad paramétrica del modelo de flujo Van Genuchten – Mualem (n,m) y de transporte de no equilibrio físico – Horizonte B.	72
Figura 4-6. Resultados HyDrus 1D Escenario 1 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) en el tiempo en condiciones normales.	74
Figura 4-7. Resultados HyDrus 1D Escenario 1 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) a lo largo del perfil de suelo estudiado en condiciones normales.	74
Figura 4-8. Resultados HyDrus 1D Escenario 2 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) en el tiempo en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niño.	75
Figura 4-9. Resultados HyDrus 1D Escenario 2 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) a lo largo del perfil de suelo estudiado en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niño.	75
Figura 4-10. Resultados HyDrus 1D Escenario 3 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) en el tiempo en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niña.	76
Figura 4-11. Resultados HyDrus 1D Escenario 3 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) a lo largo del perfil de suelo estudiado en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niña.	76

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Funciones de análisis de uso extendido en la modelación de contaminantes.	15
Tabla 1-2. Descripción y estratificación del perfil de suelo objeto de estudio.	19
Tabla 1-3. Propiedades físicas y químicas del perfil de suelo objeto de estudio.....	20
Tabla 2-1. Consolidado de los parámetros optimizados de los modelos Van Genuchten (α , n , m , θ_s y θ_r) en los Horizontes de suelo A, B y C.....	28
Tabla 2-2. Consolidado de los parámetros optimizados del modelo Brooks and Corey (α , λ , θ_s y θ_r) en los Horizontes de suelo A, B y C.....	28
Tabla 2-3. Consolidado de Conductividad Hidráulica Saturada (K_s).	30
Tabla 2-4. Consolidado de parámetros optimizados (K_s , α , n , m y L) del modelo Van Genuchten - Mualem - Conductividad Hidráulica No Saturada.....	33
Tabla 2-5. Consolidado de parámetros optimizados (K_s , α , n , m y L) del modelo Van Genuchten – Burdine - Conductividad Hidráulica No Saturada.	33
Tabla 2-6. Consolidado de parámetros: K_s , α , n , m y L , determinados con diferentes técnicas de optimización en el modelo Van Genuchten-Mualem (n,m) - Conductividad Hidráulica No Saturada.	36
Tabla 2-7. Consolidado de parámetros: K_s , α , n , m y L , determinados con diferentes técnicas de optimización en el modelo Van Genuchten-Mualem ($m=1-1/n$) - Conductividad Hidráulica No Sat.	38
Tabla 3-1. Resultados del proceso de optimización no lineal de las curvas de lixiviación de Bromuros (Br^-) en los horizontes de suelo.	49
Tabla 3-2. Resultados del proceso de optimización no lineal de las curvas de lixiviación de Nitratos (NO_3^-) en los horizontes de suelo.	52
Tabla 3-3. Resultados de los coeficientes de adsorción de nitratos (NO_3^-) K_d y K_n calculados bajo los modelos de Langmuir y Freundlich.	56
Tabla 3-4. Consolidado de resultados K_d obtenidos por el modelo Langmuir (método Batch) y el método de optimización no lineal del modelo PNE de las curvas de elución – (BTC).	58
Tabla 4-1. Consolidado de métodos empleados para el proceso de construcción del modelo de transporte de nitratos en la zona no saturada.	63
Tabla 4-2. Consolidado de las variables de entrada: caudal de lixiviación y concentración de Nitratos (NO_3^-) empleadas en el proceso de simulación de Nitratos (NO_3^-) en el suelo.....	68
Tabla 4-3. Consolidado de parámetros obtenidos en el proceso de calibración para la implementación del modelo de transporte de nitratos en la zona no saturada.	69
Tabla 4-4. Resultados del coeficiente de determinación R^2 y SSQ determinados en el proceso de validación para simular la dinámica de transporte de Nitratos (NO_3^-)	70
Tabla A-1. Datos de Curvas de retención de humedad – Horizonte A.	92
Tabla A-2. Datos de Curvas de retención de humedad – Horizonte B.	93
Tabla A-3. Datos de Curvas de retención de humedad – Horizonte C.	94

Tabla A-4. Consolidado de resultados del proceso de optimización de las Curvas de Retención de Humedad de los tres horizontes de suelo. Modelo Van Genuchten y Brooks and Corey.	95
Tabla A-5. Curvas de infiltración o conductividad hidráulica Saturada – Horizonte A y B.	96
Tabla A-6. Curvas de conductividad hidráulica NO Saturada – Horizonte A.	97
Tabla A-7. Curvas de conductividad hidráulica NO Saturada – Horizonte B.	99
Tabla A-8. Curvas de conductividad hidráulica NO Saturada – Horizonte C.	101
Tabla A-9. Curvas de elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte A – Trazador Bromuros.	104
Tabla A-10. Curvas elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte A – Nitratos (NO_3^-).	105
Tabla A-11. Curvas elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte B – Trazador Bromuros (Br).	106
Tabla A-12. Curvas elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte B – Nitratos (NO_3^-).	107
Tabla A-13. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte A – Trazador Bromuros (Br).	108
Tabla A-14. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte A – Nitratos (NO_3^-).	109
Tabla A-14. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte B – Trazador Bromuros (Br).	110
Tabla A-14. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (<i>Breakthrough Curves - BTC</i>). Horizonte B – Nitratos (NO_3^-).	111

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Descripción	Dimensiones
M	Masa	[M]
Q	Caudal	[L ³ T ⁻¹]
m^*	Flujo Másico	[M T ⁻¹]
$[NO_3^-]$	Concentración Nitratos	[ML ³]
ΔS	Delta de Contenido Humedad	[-]
K_c	Coefficiente de Cultivo	[-]
R_s	Radiación Solar	[MT ⁻³]
T	Temperatura	[θ]
CRH	Curva de retención de humedad	
D	Dispersión Hidrodinamica	[L ² T ⁻¹]
H	Potencial Hidráulico	[L]
h	Presión capilar	[L]
$K, K(h), K(\theta)$	Función de conductividad hidráulica	[L.T ⁻¹]
K_s	Conductividad hidráulica saturada	[L.T ⁻¹]
L_c	Altura de la columna de suelo	[L]
L	Parámetro de conectividad entre poros	[-]
$n, m,$	Parámetros de la función de retención de humedad de Van Genuchten	[-]
λ	Parámetro de la función de retención de humedad de Brooks and Corey	[-]
S_e	Grado específico de saturación del suelo	[L ⁻³ L ⁻³]
R^2	Coefficiente de determinación	[-]
MSE	error cuadrático medio	[-]
T	Tiempo	[T]
V	Volumen	[L ³]
α	Parámetro de la función de retención de humedad de Van Genuchten	[-]
θ	Contenido de humedad volumétrica del suelo	[L ³ L ⁻³]
θ_s	Contenido de humedad volumétrica del suelo saturado	[L ³ L ⁻³]
θ_r	Contenido humedad volumétrica residual del suelo	[L ³ L ⁻³]
$C(h),$	Capacidad específica de agua, es la pendiente de la Curva de retención de humedad del suelo	[-]

$S(h,z)$	Término que representa el agua extraída por las raíces.	[-]
c_r	Volumen promedio o concentración residente de la fase líquida.	[ML^{-3}]
J_w	Densidad de flujo volumétrico de agua	[LT^{-1}]
ρ_b	densidad aparente del suelo	[ML^{-3}]
μ	Coefficientes de decaimiento de primer orden del soluto en el líquido	[T^{-1}]
γ_l	Términos de producción de orden cero para la fase líquida	[$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$]
s	Concentración de la fase adsorbida	[MM^{-1}]
v	Velocidad real de poros	[LT^{-1}]
β	Coefficiente de partición entre las fases de equilibrio y no equilibrio	[-]
X	Distancia	[L]
ω	Coefficiente de transferencia de masas	[-]
R	Factor de retardo	[-]
f	Fracción de sitios de adsorción en contacto con la región móvil.	[-]
K_{ads}, K_d	Constante de equilibrio	[$\text{L}^3 \text{M}^{-1}$]
T	Tiempo	[T]
CDE	Modelo Clásico de Equilibrio	[-]
PNE	Modelo de no equilibrio de origen físico	[-]
BTC	<i>Breakthrough Curves</i> o Curva de elución	[-]

Introducción

La floricultura se ha convertido en una de las actividades del sector agropecuario más importantes en el mercado internacional, en los últimos años la Sabana de Bogotá ha concentrado cerca del 79% del total de área de cultivo de flores del país (Guarín, 2013). En el año 2010 el mercado floricultor colombiano abarcó el 14% de la producción mundial, con un peso cercano al 3% de las exportaciones colombianas (DANE, 2009) y una participación del 7% en el PIB agropecuario nacional en el año 2013 (Gómez et al., 2014). El crecimiento de la capacidad de producción del sector floricultor, ha implicado el aumento del consumo de agua e insumos químicos, principalmente insumos de sales fertilizantes que aportan nutrientes al cultivo y mantienen las condiciones de producción.

Sin embargo, el uso excesivo de sales fertilizantes en la floricultura del agroecosistema de la Sabana de Bogotá, se ha convertido en un factor determinante a la hora de analizar la contaminación del recurso hídrico. Principalmente, porque los excesos de sales fertilizantes que no son adsorbidos por el sistema de floricultura, terminan depositados en el agua superficial o agua subterránea. A partir de lo cual se genera un desbalance en los ciclos biogeoquímicos, principalmente el del Nitrógeno que constituye uno de los compuestos fundamentales para el sostenimiento de los ecosistemas. Dentro de los efectos de alteración sobre el ciclo biogeoquímico del nitrógeno se destacan: los procesos de eutrofización de cuerpos lenticos y loticos cercanos al área de floricultivo, el cambio en las dinámicas tróficas del suelo y la alteración de las características de calidad del agua subterránea. Este último efecto, debido a la acumulación de nitratos en la zona no saturada, que por procesos de lixiviación llegan hasta las unidades hidrogeológicas que constituyen los sistemas acuíferos (Calvachi & Sanchez, 2013).

En el marco de este análisis el problema de los efectos adversos de las altas concentraciones de nitrógeno, que son aportadas por los procesos de floricultura y que terminan en los diferentes hidrosistemas, es uno de los puntos de especial interés ambiental, el cual implica un proceso de conocimiento y mitigación, con el cual se logre garantizar la calidad del recurso hídrico, la preservación de los ecosistemas asociados y la formulación de estrategias de sostenibilidad que permitan la generación de procesos productivos sostenibles. En consecuencia, para generar este conocimiento, actualmente existe una amplia gama de modelos de simulación que permiten conocer el movimiento en el suelo de los nutrientes o agroquímicos de origen agrícola (Samper, 2005).

El uso de estos modelos de simulación, puede ser una manera de hacer frente a la problemática del conocimiento del destino final de los fertilizantes nitrogenados usados en los diferentes procesos agrícolas. Con lo cual, se pueden proponer estrategias de sostenibilidad que controlen y prevengan la contaminación tanto de las fuentes hídricas superficiales como de los sistemas acuíferos. Tomando como referente este último planteamiento, en esta investigación se estudió el movimiento de las moléculas de nitratos presentes en los fertilizantes empleados en procesos de floricultura de rosa en sustrato, dentro del agroecosistema de la Sabana de Bogotá. Con el objetivo de dar a conocer la dinámica del transporte de este tipo de compuestos en el suelo, mediante la aplicación de herramientas de simulación que vinculan un análisis integral del proceso productivo, la caracterización hidrofísica del medio receptor (suelo), las condiciones del transporte de la matriz de suelo y la predicción del movimiento de estas sustancias de acuerdo con las características hidrofísicas, de transporte e hidroclimatológicas pertenecientes a la Sabana de Bogotá.

Los resultados de dicho proceso de simulación están organizados a lo largo de 4 capítulos en el presente documento. El capítulo 1 relaciona la problemática de la contaminación de nitratos, el marco de referencia y el área de estudio. En el segundo y tercer capítulo, se presentan los resultados de la caracterización de los parámetros hidrofísicos del suelo: Curva de Retención de Humedad (CRH), Curva de Conductividad Hidráulica (CCH), y de los parámetros de transporte, a partir de las curvas de elución (*Breakthrough Curve - BTC*) e isothermas de adsorción de nitratos. Siguiendo los procedimientos experimentales definidos por: el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006), la guía metodológica de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2000.) (OCDE, 2004.) y los procedimientos estándar empleados en los laboratorios de ingeniería ambiental y agrícola de la Universidad Nacional de Colombia APHA, (2017). Los parámetros de flujo y de transporte de solutos se ajustaron usando procesos de optimización no lineal (Marquardt, 1963.) con los programas RETC y STANMOD. Las isothermas de adsorción fueron ajustadas a los modelos de Freundlich y Langmuir. En el cuarto y último capítulo, se presentan los resultados del proceso de modelación de la dinámica del movimiento de nitratos en la zona no saturada, incluyendo la descripción de las etapas del protocolo de modelación y para finalmente concluir con los resultados de la simulación del transporte de nitratos en la zona no saturada mediante la aplicación del software Hydrus 1D.

Objetivos

General:

Modelar la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo usado en un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá.

Específicos:

- Caracterizar los parámetros hidrofísicos del flujo de agua del perfil de suelo.
- Determinar los parámetros de transporte del Nitrato (NO_3^-), en la zona no saturada de un perfil de suelo.
- Simular el proceso de flujo y transporte de Nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada del suelo empleado con base en un programa computacional (*HIDRUS 1D*).

1 Generalidades

El Estudio Nacional del Agua – ENA (IDEAM, 2019), estableció que uno de los problemas que más afecta el recurso hídrico en nuestro país es la contaminación por nitrógeno: nitrógeno amoniacal NH_4 y Nitratos NO_3^- , procedentes de aguas residuales domésticas y procesos agroindustriales como la floricultura. En el ENA, se estima que debido a estas últimas “fuentes difusas” de contaminación, actualmente diferentes fuentes hídricas del país presentan cargas de contaminante de hasta $7,0 \text{ Ton día}^{-1}$ de NO_3^- . Álvarez, et al., (2000), señala además que estas fuentes difusas de contaminación son difíciles de identificar y en determinadas cuencas hidrográficas representan más del 50% del aporte total de nitrógeno presente en los cuerpos hídricos.

El aporte de nutrientes al ambiente por parte del sector floricultor, está ligado al mejoramiento de los rendimientos del cultivo, con el fin de soportar los requerimientos nutricionales y salvaguardar la dinámica de oferta y demanda de este tipo de mercados (Sánchez 2004; Townsend et al., 2003). En Colombia la Sabana de Bogotá, es una de las áreas con mayor presencia de actividades de floricultura, sobre las cuales Casas (2015) indica que cerca del 70% de las sales de nitrógeno aplicadas en cultivos de esta área no son aprovechadas por el cultivo y terminan infiltradas en el suelo. Esto conlleva al incremento de la cantidad de nitrógeno disponible en la biosfera y por ende la alteración en múltiples escalas del ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Galloway et al., 2004).

Investigaciones como la de Parrado en 2015, evidencian que las cantidades de nitrógeno aportadas por los procesos de floricultura de rosa de corte, oscilan entre $749,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $1142,1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Los continuos aportes de nutrientes al ambiente, promueven su acumulación en el suelo y la saturación de los ecosistemas con sales de nitrato. Esta saturación y acumulación de nutrientes, ocasiona que las plantas no puedan seguir absorbiendo más nitrógeno (Hammond & Mathews 1999) y que se potencie el movimiento de estos compuestos a otros componentes ambientales (Townsend et al., 2003; Galloway et al., 2008). El movimiento de nutrientes en el ecosistema, genera procesos de eutrofización en cuerpos lenticos y la alteración de las características de calidad del agua subterránea, principalmente por lixiviación de este tipo de compuestos desde el suelo hasta las unidades hidrogeológicas (Calvachi & Sanchez, 2013).

Ante esta problemática, conocer el destino final y el movimiento de los nitratos procedentes de procesos de floricultura en el suelo, es una necesidad básica para lograr implementar mecanismos de planificación de los recursos naturales y la conservación de sus servicios ecosistémicos. A raíz de esto, los modelos de simulación se presentan como una herramienta de análisis y predicción, que permite hacer frente al proceso de conocimiento la dinámica del transporte de estas sustancias en el ambiente y el suelo. Lo cual permite establecer un marco de referencia para la planificación e implementación de mecanismos de control sobre las actividades agrícolas y la prevención de la contaminación a las fuentes hídricas superficiales y los sistemas acuíferos.

Existen muchas formas de conceptualizar el transporte tanto de nitratos como de solutos en general en el suelo, esto ha originado una variedad de modelos que son usados para predecir el transporte de solutos (Vanderborght et al.1997). Las aproximaciones más empleadas son de carácter puntual, en donde se caracterizan las propiedades de hidrofísicas y de transporte, empleando modelos 1D y 2D. Investigaciones del transporte de nitratos, como las desarrolladas por Muñoz-Carpena et al., (1999), Sánchez, et al., (2003) Thorburn et al., (2003), Poch et al., (2005), Montoya (2008), Marinho et al., (2016), Veizaga et al., (2016) muestran el desarrollo de este planteamiento. En la caracterización de la dinámica del flujo y transporte de los nutrientes en el suelo se encuentran diversos programas para caracterizar y simular su movimiento, tales como: RETC (Van Genuchten et al., 1991), STANMOD (Simunek et al., 1999), WAVE (Vanclooster et al., 1994), MACRO (Jarvis, 1994), HYDRUS (Van Genuchten et al., 2013) SWAP (Van Dam et al., 1997), UNSATCHEM (Simunek et al., 1996) y VS2DI (Lappala et al., 1987).

La implementación de estos programas como herramientas de simulación, han logrado identificar y predecir los potenciales impactos ambientales de las actividades antrópicas y sus efectos sobre el recurso hídrico y el suelo. Con lo cual, se ha creado un umbral de conocimiento que permite, la planificación e instauración de mecanismos orientados a disminuir los niveles de presión en los recursos naturales, y que además promueve la formulación de lineamientos normativos ambientales tales como: el decreto 50 del 2018 (MADS, 2018) el cual está en sincronía con la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (MAVDT, 2010), promoviendo el desarrollo del sector floricultor con criterios lineamientos de sostenibilidad en caminados a la preservación de los servicios ecosistémicos.

1.1 Fenómenos de flujo y transporte asociados a la contaminación de suelo.

En la descripción general de la dinámica del movimiento de un soluto en disolución que interactúa con el suelo, se producen diferentes procesos fisicoquímicos que se enmarcan bajo dos condiciones generales: a) flujo y b) transporte. La condición de flujo está ligada al fenómeno de advección, en el cual el movimiento del soluto se lleva a cabo por la fuerza de arrastre que ejerce el fluido en el cual se encuentra disuelto y con respecto a la condición de transporte, en esta se consideran los efectos reactivos que pueden potenciar o inhibir el movimiento del soluto en el proceso de interacción con el medio.

1.1.1 Flujo de agua en la zona no saturada

Una de las conceptualizaciones más comunes para describir el flujo de agua en la zona no saturada del suelo es la formulada por Richard's en 1931 (Ecuación 1-1). Esta formulación expresa la variación del contenido de agua, generalmente expresado como el contenido de humedad volumétrica (θ), en función del tiempo y de la posición. La ecuación de Richard's, conjuga la ley de Darcy con la ecuación de continuidad, definiendo una ecuación diferencial parcial que permite describir el movimiento del fluido en la zona no saturada. Si en el suelo se presentara sólo el fenómeno advectivo, el contaminante se movería con una velocidad igual a la del fluido (Sánchez, 2012), no obstante, se conoce que el agua y el soluto no viajan uniformemente en el suelo (Kutilek & Nielsen, 1994). La implementación de los métodos numéricos considera como punto de partida para la solución de la ecuación de Richard's, las curvas o funciones de retención de humedad y conductividad hidráulica no saturada del suelo. Por lo general estos métodos numéricos se ejecutan a partir de procesos iterativos con algoritmos que discretizan la unidad de suelo y resuelven bajo diferentes condiciones de frontera el flujo de agua en la zona no saturada.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{C(h)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S}{C(h)}$$

Ecuación 1-1. Ecuación general de Richard's.

Donde $C(h)$, la capacidad específica de agua, es la pendiente de la Curva de retención de humedad del suelo $\partial\theta/\partial h$ en el punto h de la función. $K(h)$ es la función de conductividad hidráulica en el punto h [$\text{L}\cdot\text{T}^{-1}$]. h es el valor de la presión en función del contenido de humedad volumétrico θ del suelo [L]. $S(h,z)$ el término que representa el agua extraída por las raíces.

1.1.2 Transporte de solutos en la zona no saturada

La definición del transporte de solutos en la zona no saturada se fundamenta en la ecuación 1-2 de convección-dispersión (Lapidus y Amundson, 1952). Dentro del análisis que establece la ecuación de convección dispersión se define el transporte en una dimensión para solutos reactivos, considerando un suelo isotrópico sobre el cual el soluto está sujeto a procesos de adsorción, degradación de primer orden y producción.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c_r + \rho_b s) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial c_r}{\partial x} - J_w c \right) - \theta \mu_l c_r - \rho_b \mu_s s + \theta \gamma_l(x) + \rho_b \gamma_s(x)$$

Ecuación 1-2. Convección-Dispersión con procesos de degradación y producción de los solutos.

En donde: c_r : volumen promedio o concentración residente de la fase líquida [ML^{-3}], s : concentración de la fase adsorbida [MM^{-1}], D : coeficiente de dispersión [L^2T^{-1}], θ : contenido volumétrico de agua [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$], J_w : densidad de flujo volumétrico de agua [LT^{-1}], ρ_b : densidad aparente del suelo [ML^{-3}], μ y μ_s : son los coeficientes de decaimiento de primer orden del soluto en el líquido y en la fase absorbida respectivamente [T^{-1}], γ_l [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$] y γ_s [$\text{MM}^{-1} \text{T}^{-1}$]: son términos de producción de orden cero para la fase líquida y adsorbida respectivamente X : distancia [L], T : tiempo [T], Se asume que μ no puede ser negativo y todas las funciones de producción están dadas en función de la distancia. Existen múltiples modelos y simplificaciones para dar solución a la ecuación de convección-dispersión. Algunos autores como Nielsen, Th. Van Genuchten, & Biggar, (1986) y van Genuchten, (1981), presentan acercamientos matemáticos como: el modelo clásico de equilibrio (CDE), el modelo de no equilibrio de origen físico (PNE), el modelo de no equilibrio de origen químico (CNE) “*two site model*”, Macroporos, etc., en los cuales a partir de diferentes condiciones iniciales y de frontera, se formulan soluciones complejas al problema del modelamiento del transporte de contaminantes en el suelo.

1.2 Determinación de los parámetros de flujo y transporte

Las soluciones de las ecuaciones de Richard's y convección dispersión, requieren entre otras cosas especificar las funciones características del suelo: conductividad hidráulica $K(\theta)$ y función de retención de humedad $h(\theta)$, junto con las condiciones de transporte del soluto definidas en la curva de elución (*Breakthrough Curves -BTC*) $C(t)$. Por lo general, dichas curvas y funciones se determinan con base en la experimentación y pueden ser estimadas en forma tabular o algebraica. Estas últimas, preferidas por lo que facilitan la solución numérica de dichas ecuaciones. (González, et al., 2006).

Para lograr obtener los parámetros que describen los modelos algebraicos tanto de las condiciones de flujo: a) contenido de humedad residual (θ_r), b) contenido máximo de humedad del suelo (θ_s), c) m y n: parámetros del modelo de la curva de retención de humedad, d) la presión de entrada de aire o la presión de burbujeo (α), como de transporte: a) el coeficiente de dispersión hidrodinámico (D), b) la velocidad real de poros (v), c) el coeficiente de degradación de primer orden (μ), d) el factor de retardo (R), e) el coeficiente de producción de orden cero (γ), f) el coeficiente de partición entre las fases de equilibrio y no equilibrio (β) y g) el coeficiente de transferencia de masas (ω). se emplean procesos de optimización no lineal. En el proceso de optimización se compara la discrepancia entre los datos experimentales obtenidos y los predichos por el modelo, mediante un proceso de minimización de una función objetivo. Estos procesos, son por lo general realizados mediante técnicas iterativas con algoritmos que logran el grado de precisión deseado. En la práctica se emplea software de dominio público como el RETC (RETention Curve), el STANMOD (STudio of ANalytical MODels) y el Hydrus para obtener los parámetros de flujo y transporte de los solutos.

1.2.1 RETC (RETention Curve)¹

El RETC es un software empleado para la evaluación de las propiedades hidráulicas de los suelos en la zona vadosa o no saturada. Dentro de estas propiedades se encuentra la curva de retención de humedad y la curva de conductividad hidráulica no saturada. A partir de estas propiedades hidráulicas, el RETC identifica las condiciones de flujo del agua, empleando modelos paramétricos como los propuestos por: a) Modelo de Brooks y Corey (1964), b) Modelo de Van Genuchten (1980) y c) Log Normal – Kosugi (1996). En cuanto a los modelos por los cuales se describe la distribución de tamaño de poro, para la predicción de funciones de conductividad hidráulica se encuentran: a) Modelo de Mualem (1976) y b) Modelo de Burdine (1953). Mediante estos modelos se estiman tanto las funciones de retención y conductividad hidráulica, así como los parámetros efectivos que permiten describir el comportamiento del flujo de agua con base en dichos modelos paramétricos.

¹ The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils

Este software permite realizar tanto la solución del problema directo como la solución del problema inverso. Mediante esta última solución, es posible obtener el conjunto de parámetros óptimos: a) θ_r : contenido de humedad residual [L^3L^{-3}], b) θ_s : contenido máximo de humedad del suelo [L^3L^{-3}], c) m y n: parámetros del modelo de la curva de retención de humedad, d) α : parámetro empírico (L^{-1}) cuyo inverso a menudo se define como la presión de entrada de aire o la presión de burbujeo y e) K_s Conductividad hidráulica saturada [LT^{-1}]. Sobre estos parámetros se describen las funciones hidráulicas del suelo, empleando un proceso de optimización no lineal por mínimos cuadrados mediante el algoritmo de Marquardt (1963). Dentro de las múltiples posibilidades que ofrece el software, se encuentra el módulo Rosetta (Schaap, et al., 2001) que emplea un algoritmo de redes neuronales para la predicción de los parámetros hidráulicos que describen el movimiento del agua en el suelo. Por lo general estos valores son definidos mediante funciones de pedotransferencia que a partir de las condiciones texturales del suelo, permiten determinar los parámetros hidrofísicos que describen los modelos inmersos en el software RETC. Con lo que actualmente, el RETC se ha convertido en una poderosa herramienta de calibración independiente para la obtención de los parámetros hidrofísicos.

1.2.2 STANMOD. (STudio of ANalytical MODEls)²

El STANMOD es un software de uso libre, que contiene una gran cantidad de modelos de transporte de solutos que han sido desarrollados a lo largo de las últimas décadas. Dentro de los modelos que abarca el STANMOD, se destacan aquellos que fueron desarrollados por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos y en la Universidad de California. Matemáticamente hablando, este software se usa para la descripción del modelo de transporte de solutos con la ecuación de Convección-Dispersión (CDE), sobre el cual se define el movimiento de diferentes sustancias en una dimensión, involucrando condiciones reactivas, tales como procesos de adsorción y degradación de primer orden. Dentro de las últimas versiones de este programa, en especial la versión 2.08.1130 se incluyen múltiples códigos, para la determinación de los parámetros de transporte de un soluto con base en las observaciones de campo o experimentos de columnas de suelo en laboratorio.

² The STANMOD Computer Software for Evaluating Solute Transport in Porous Media Using Analytical Solutions of Convection-Dispersion Equation. Versions 1,0 and 2,0

Dentro de estos códigos se encuentran el: a) CXTFIT (*Toride et al.*, 1995), b) el CHAIN, (*Van Genuchten*, 1985), c) CFTIM (*Van Genuchten*, 1980), d) CFITIM, (*Van Genuchten*, 1981), e) 3DADE, (*Leij and Bradford*, 1994), f) N3DADE, (*Leij and Toride*, 1997) y g) SCREEN (*Jury et al.* 1982). Todos estos códigos empleados ampliamente para el análisis de experimentos de desplazamiento miscible de solutos y el cálculo de los parámetros efectivos de transporte bajo diferentes conceptualizaciones tales como: reacciones de decaimiento de primer orden, transporte en no equilibrio en varias dimensiones y comportamiento para trazadores orgánicos en el suelo, entre otros.

El programa STANMOD comprende la principal interfaz del software sobre la cual se encuentra definido el entorno computacional del sistema. En este módulo se visualizan las diferentes opciones que tiene el programa para analizar las condiciones particulares de cada problema de transporte de solutos que se requiera analizar. Para tal fin el STANMOD incluye las especificaciones tanto de los parámetros necesarios en la correcta ejecución de los códigos en el lenguaje FORTRAN como las visualizaciones gráficas paramétricas que permiten al usuario para la representación gráfica de los resultados obtenidos. De forma paralela, el STANMOD proporciona en un archivo tipo .txt la información numérica resultado del proceso de transporte de solutos analizado, mediante el cual el usuario puede implementar diferentes herramientas de post procesamiento para visualizar o generar análisis de los resultados obtenidos. Este software, se encuentra definido para ambientes MS Windows y está sincronizado a con las bibliotecas del software HYDRUS-1D y 2D.

Uno de los códigos más empleados dentro del STANMOD, es el CXTFIT (*Toride et al.*, 1995). En este, se pueden llevar a cabo diferentes tipos de evaluaciones del transporte de solutos con el fin de calcular parámetros como: a) el coeficiente de dispersión hidrodinámico (D), b) la velocidad real de poros (v), c) el coeficiente de degradación de primer orden (μ), d) el factor de retardo (R), e) el coeficiente de producción de orden cero (γ), f) el coeficiente de partición entre las fases de equilibrio y no equilibrio (β) y g) el coeficiente de transferencia de masas (ω). Por lo general el proceso de determinación de estos parámetros se realiza con base en la evolución de las curvas de elución o de avance del soluto (concentración observada en el tiempo o a lo largo del perfil de suelo).

1.2.3 HYDRUS-1D³

El HYDRUS (Simunek et al., 1998) es software de uso libre que permite simular el flujo de agua en la zona no saturada o en diferentes medios porosos. Este programa permite a partir de un método numérico de elementos finitos resolver la ecuación de Richard's y la ecuación de transporte de solutos: convección dispersión.

Dentro de la gama de opciones que proporciona el HYDRUS, se incluye la vinculación de procesos histeréticos, procesos no isotermos con flujos de calor, junto con la inclusión de parámetros hidroclimatológicos como precipitación, evaporación y radiación solar. Dentro de las aplicaciones que el programa puede ejecutar, se encuentra la simulación del movimiento del agua y diversos contaminantes o solutos en medios porosos con diferentes condiciones de saturación. Para llevar a cabo el proceso de simulación, HYDRUS 1D emplea como información base las características de los medios porosos tales como los parámetros hidrofísicos del suelo y las condiciones de transporte asociadas a la molécula, soluto o contaminante objeto de interés. Dentro de las principales características encontramos: a) cantidad y espesor de los horizontes que componen el suelo o medio poroso, b) profundidad de las raíces, c) tipo de modelo y parámetros hidráulicos para solucionar la ecuación de Richard's, d) tipo de modelo y parámetros de transporte del soluto y e) climáticos del área tales como la precipitación y la temperatura.

De igual manera, dentro del software HYDRUS, se encuentra vinculado el concepto de flujo en dos regiones, el cual asume que el movimiento del flujo de agua se da entre la zona móvil e inmóvil. En la región móvil, los solutos se mueven por procesos de advección y dispersión, a diferencia de la zona inmóvil en donde el movimiento se da a través de difusión molecular (Jacques, et al., 2007). En la conceptualización del programa HYDRUS, se asume desplazamiento miscible en donde los contaminantes están disueltos y se mueven con el agua. Dentro de las distintas funciones que contiene el software para mejorar la predicción del transporte de solutos encontramos:

- Histéresis en la relación suelo – agua y en la conductividad hidráulica
- Escalamiento de funciones hidráulicas de suelo no saturado
- Condiciones de frontera en los bordes

³ The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media

Para la modelación a través del programa HYDRUS 1D, es necesario conocer las condiciones hidrofísicas del suelo (parámetros de las curvas de Retención de humedad y Curva de Conductividad Hidráulica), las características de transporte del o los solutos objeto de estudio (Parámetros de las curvas de elución: *Breakthrough Curves -BTC*) y la información de carácter climatológico del área de influencia en donde se desarrolla el proceso de simulación.

1.3 Protocolo de modelación

En términos generales el protocolo de modelación, es un compendio de pasos lógicos que se deben considerar a la hora de realizar un proceso de modelación. Desde la literatura, se encuentran propuesta de protocolos de modelación de fenómenos ambientales como los definidos por Fischer *et al.* (1979), Thomann (1987), Chapra (1997), Camacho *et al.* (2003). En consecuencia, son diversas las propuestas de protocolo que se pueden implementar en un proceso de modelación, las cuales pueden variar en función de los lineamientos metodológicos, el alcance de la modelación y el objetivo de la misma. No obstante, a continuación se dan a conocer el conjunto de etapas mínimas que se deben formular en un proceso de modelación de contaminantes en la zona no saturada, con el fin de proporcionar un marco general que permita definir las actividades inmersas en el proceso de modelación del transporte de solutos.

1.3.1 Objetivo y requerimientos de información.

Como primera instancia el desarrollo de un proceso de modelación requiere de la delimitación del alcance, los objetivos y el grado de detalle requerido. IDEAM. (2018). Desde la definición de estos tres aspectos se realiza la selección del modelo a implementar y se evalúan los requerimientos de información del modelo en lo que concierne a: disponibilidad, cantidad y calidad de la información requerida para cumplir con el propósito de la modelación. Esta etapa inicial es una de las más críticas a la hora de plantear un proceso de modelación de dispersión de contaminantes en la zona no saturada, toda vez que desde acá se establecen los criterios las limitantes o potencialidades del proceso de modelación que se pretende implementar y además se define la planificación preliminar para recabar toda la información requerida. A continuación se presenta una descripción preliminar de la información mínima necesaria para llevar a cabo un proceso de análisis de contaminantes en el suelo.

- **Características de la fuente de generación del contaminante:** Tipo de fuente, tiempo, frecuencia, ubicación, caudal de descarga, concentración del o los contaminantes de interés y demás condiciones del proceso que estén inmersas o cambien las características de generación o emisión del contaminante.
- **Información del área de estudio:** Usos del suelo, estudios previos y datos hidroclimatológicos.
- **Nivel freático y Estratigrafía del suelo:** De acuerdo con el objetivo de la modelación se debe definir el nivel freático del área de estudio, para diferenciar la zona saturada y no saturada del suelo. Posteriormente se debe realizar la división estratigráfica de la zona no saturada considerando los horizontes identificados.
- **Caracterización fisicoquímica del suelo:** medición de las variables fisicoquímicas que pueden llegar a intervenir en el proceso de transporte del contaminante. Por ejemplo, textura, humedad, pH, Capacidad de intercambio catiónico, porosidad, densidad aparente, relación de absorción de sodio y las demás que se consideren necesarias. Se debe caracterizar una la línea base de sustancias químicas presentes en el suelo, en especial los compuestos que sean objeto de interés en la modelación.
- **Parámetros Hidrofísicos:** Curvas de retención de humedad, Curva de conductividad hidráulica del suelo. Para cada uno de los horizontes de suelo identificados.
- **Parámetros de Transporte:** Curva de elución (*Breakthrough Curves* - BTC) del o los contaminantes que se deseen analizar. Para cada uno de los horizontes de suelo identificados. Si el objetivo de la modelación incluye condiciones reactivas, se deben caracterizar los procesos de adsorción, degradación y transformación de los compuestos químicos de interés.
- **Características Microbiológicas e interacciones de vegetación:** Si el objetivo de la modelación establece el análisis de la transformación del compuesto por condiciones microbiológicas y los cambios del flujo de agua por los requerimientos hídricos de la vegetación, se deben definir los procesos dominantes y la inclusión de la información a integrar dentro del modelo.

Con respecto a los requerimientos de información, son múltiples las fuentes o estrategias que se pueden considerar para llevar a cabo el proceso de modelación de dispersión de contaminantes en la zona no saturada. En algunos casos la información es tomada de manera experimental, en otras a partir de información secundaria de la literatura o deducida indirectamente a partir de ecuaciones empíricas.

1.3.2 Modelo Conceptual

Un modelo conceptual es una descripción de la realidad a través de abstracciones verbales, ecuaciones, relaciones constitutivas o leyes naturales. Se trata de una representación de los procesos físicos, químicos y biológicos predominantes en el área de estudio en conjunto con las simplificaciones y los límites que se suponen como aceptables, con el fin de alcanzar los objetivos de la modelación. MADS, (2018). Así las cosas el modelo conceptual permite dentro del proceso de modelación definir la esquematización general del sistema a modelar, considerando los procesos dominantes y las simplificaciones incluidas para esquematizar el flujo y el transporte de los contaminante en la zona no saturada.

Es válido precisar que si bien el modelo conceptual se presenta como una etapa subsiguiente a la definición del objetivo de la modelación y los requerimientos de información, el modelo conceptual se encuentra íntimamente relacionado con los con estos dos aspectos. La materialización del modelo conceptual se lleva a cabo a partir de la presentación de una esquematización gráfica del sistema, en donde se presenten en conjunto las entradas, salidas, condiciones de frontera y de borde, representación de los procesos de flujo y transporte, segmentación inicial del sistema, el método numérico usado para la solución de las ecuaciones diferenciales y las simplificaciones empleadas.

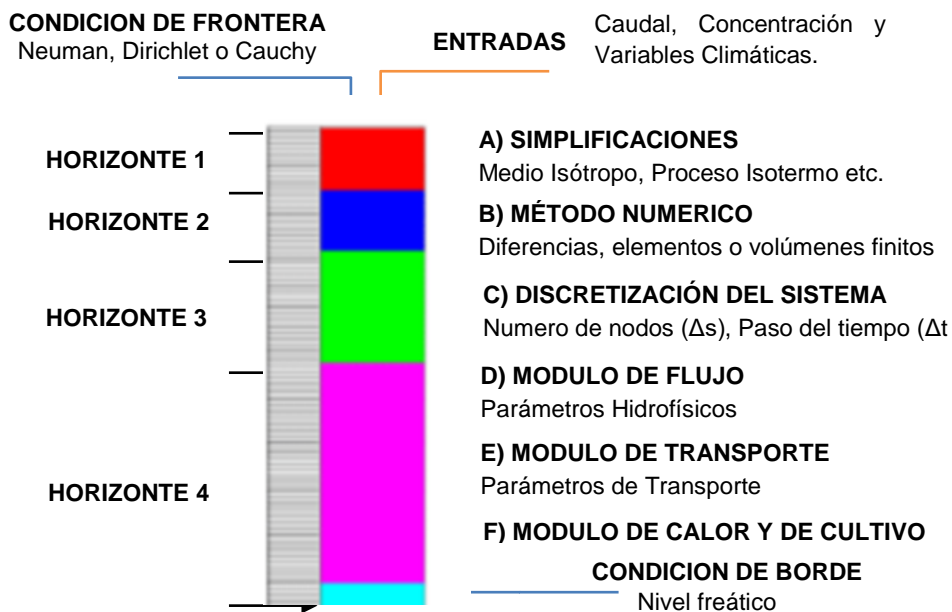


Figura 1-1. Ejemplo de esquematización del sistema para la modelación del transporte de contaminantes en la zona no saturada

1.3.3 Calibración

La calibración es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros del modelo con el fin de hacer coincidir, tanto como sea posible, los resultados de la simulación con los datos medidos en campo (Gupta et al., 2005). En este orden de ideas, el proceso de calibración del modelo consiste en la definición de los parámetros óptimos que describen la representación del fenómeno simulado, considerando como criterio de análisis una función objetivo que permita valorar el nivel de discrepancia entre los valores experimentales observados y los valores simulados.

La etapa de calibración contempla para su ejecución la asignación o definición de un conjunto de valores iniciales de los parámetros que describen el fenómeno a modelar (Bowie et al., 1985). Por lo general, estos parámetros se obtienen a partir de la solución del problema inverso, en el cual se evalúa el desempeño de una función objetivo, por medio de un proceso iterativo de optimización que usa un método no lineal de mínimos cuadrados Maquardt (1963). En este proceso, se toman como referentes los valores experimentales y se determinan los parámetros de ajuste u óptimos que describen el fenómeno a modelar. En la tabla 1-1. se presentan algunas de las funciones de análisis comúnmente empleadas en los procesos de modelación de la dispersión de contaminantes en la zona no saturada.

Tabla 1-1. Funciones de análisis de uso extendido en la modelación de contaminantes.

	ECUACIÓN
Coeficiente de determinación R ²	$R^2 = 1 - \frac{[\sum_{i=1}^N (y_i - y)(y_i - \hat{y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$ <p>Ecuación 1-3. R² Coeficiente de determinación.</p>
Sumatoria de Cuadrados SSQ	$SSQ(b) = \sum_{i=1}^N [C(x_i) - C_f(x_i; b)]^2$ <p>Ecuación 1-4. SSQ – Sumatoria de Cuadrados.</p>
Coeficiente del Error Cuadrático Medio MSE	$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$ <p>Ecuación 1-5. MSE: valor medio del error al cuadrado.</p>

Fuente: Adaptada de Madsen et al. (2007)

El uso de estas funciones de análisis, se definen con base en las funciones presentes en el software: a) RETC (van Genuchten, et al., 1991), b) STANMOD- CXTFIT (Toride et al., 1995), y c) HyDrus 1D (Simunek et al., 1998). En algunas ocasiones, el proceso de calibración se puede tomar a partir de los valores de estudios de modelación realizados en lugares de características similares (Camacho et al., 2012; Rojas, 2011; entre otros).

1.3.4 Validación y Análisis de Sensibilidad e incertidumbre

La validación se entiende como un proceso de verificación, en el cual se corrobora la oportunidad de los parámetros óptimos del modelo para predecir el fenómeno estudiado. En este proceso permite contrastar y tipificar las características de la modelación frente a las simplificaciones, argumentos, métodos y usados (Merriam 1963). En este orden de ideas en los procesos de modelación, la validación consiste en comparar los resultados que arroja el modelo con los datos reales del fenómeno que se está evaluando. A partir de lo cual se logra, analizar el desempeño de los parámetros efectivos (obtenidos en el proceso de calibración), mediante el contraste de las predicciones realizadas por este conjunto de parámetros con un conjunto de datos de respuesta del fenómeno estudiado, que deben ser diferentes al conjunto de datos empleados en la calibración. Es importante mencionar que a la hora implementar los procesos de validación en escala real, se debe contemplar la viabilidad para la escalabilidad de los parámetros obtenidos en el proceso de calibración en escala de laboratorio. Toda vez que en ocasiones los parámetros hidrodinámicos calculados con técnicas de laboratorio puede que no concuerden con los parámetros definidos en escalas regionales o modelos bidimensionales.

La incertidumbre se entiende como la certeza con la cual los resultados del modelo representan la realidad (McIntyre et al., 2002). De acuerdo con Hernández (2014), existen diferentes fuentes que generan la discrepancia entre los resultados obtenidos en la modelación con respecto a los valores medidos u observados en la valoración del fenómeno de estudio. Entre las diferentes causas asociadas a la esta incertidumbre, se encuentran fuentes de error en: a) los valores de los parámetros del modelo, b) la estructura del modelo, c) de tipo numérico (truncamiento, redondeo y codificación), d) las condiciones iniciales y de frontera, e) de medición, f) de sesgo en la información etc. Es importante aclarar que, en la mayoría de ejercicios de modelación, la cuantificación de la incertidumbre asociada a aspectos como errores en la estructura del modelo, el método numérico y las condiciones iniciales y de frontera, se encuentra por fuera del alcance del estudio MADS, (2018). En consecuencia, es recomendable realizar un análisis de la incertidumbre paramétrica, sobre límites de confianza asociados con los resultados de los parámetros calibrados para el modelo (Camacho et al., 2003). Por su parte, el análisis de sensibilidad hace alusión al nivel de influencia que tienen los parámetros sobre la respuesta del modelo, en donde un parámetro con una sensibilidad alta repercute ampliamente sobre el modelo.

1.3.5 Formulación de escenarios de simulación

La formulación de escenarios de simulación, es el proceso mediante el cual se definen los contextos sobre los cuales se quiere evaluar el impacto potencial y el destino final de las sustancias contaminantes que se descargan en el suelo. En este proceso se pueden integrar análisis encaminados a una gestión sostenible de los recursos, mediante la predicción de resultados a partir de variaciones en:

- a) **Las características del proceso productivo:** asociadas al cambio de las condiciones de cantidad o calidad del flujo de contaminantes. Principalmente por la instauración de otros métodos de riego, cambios en el tipo de cultivo, implementación de sistemas de tratamiento o recirculación del recurso hídrico empleado, instauración de alternativas de producción más limpia que vinculan sustitución de materias primas y procesos de reingeniería en las tecnologías empleadas en la actividad generadora de las sustancias contaminantes.
- b) **Las condiciones hidroclimatológicas:** ligadas a las modificaciones de la precipitación y la temperatura en el área de estudio, por ejemplo la vinculación de escenarios del fenómeno de la oscilación del sur *ENSO* (Por sus siglas en inglés *El Niño-Southern Oscillation*) en sus fases fría y cálida, la evaluación de la incidencia de los eventos extremos sobre el transporte de los contaminantes y análisis de vulnerabilidad de los recursos hídricos de acuerdo con las condiciones de variabilidad climática con base en la predicción del destino final de los contaminantes descargados en el suelo por actividades antrópicas
- c) **Los instrumentos de planificación o la normatividad ambiental vigente:** debido al cambio de las políticas de usos del suelo, que pueden establecer lineamientos de ordenamiento del territorio sobre los cuales se implementen nuevos mecanismos de gestión del uso de los recursos naturales. Y por normas ambientales que bajo el principio del rigor subsidiario modifiquen los criterios de calidad de agua, con el fin de articular estrategias de gestión encaminadas a mantener las condiciones de capacidad de carga y resiliencia de los ecosistemas.

1.4 Área de estudio

El área de estudio se sitúa en el agroecosistema de la sabana de Bogotá, municipio de Mosquera, las coordenadas geográficas corresponden a $74^\circ 12'$ Longitud Oeste y $4^\circ 72'$ Latitud Norte. Se encuentra ubicado en el costado oriental de La Sabana, limita por el occidente con el Río SuBatchoque el cual lo separa del distrito de Bojacá; al norte con la vía La Mesa - Funza y las ciénagas de Tres Esquinas y Gualí, y al oriente y el sur con el río Bogotá. Este presenta una extensión de 6.500 Ha brutas, el área neta para explotación agropecuaria es de 5.500 Ha. Casas (2015). Hidrográficamente, la zona de estudio hace parte de la cuenca hidrográfica del río Bogotá, sobre la cual se escogió un suelo de orden inceptisol y suborden ácuico, característico de las interacciones de la actividad antrópica de cultivo de rosa de corte con los recursos ambientales (suelo y agua) en la Sabana de Bogotá.

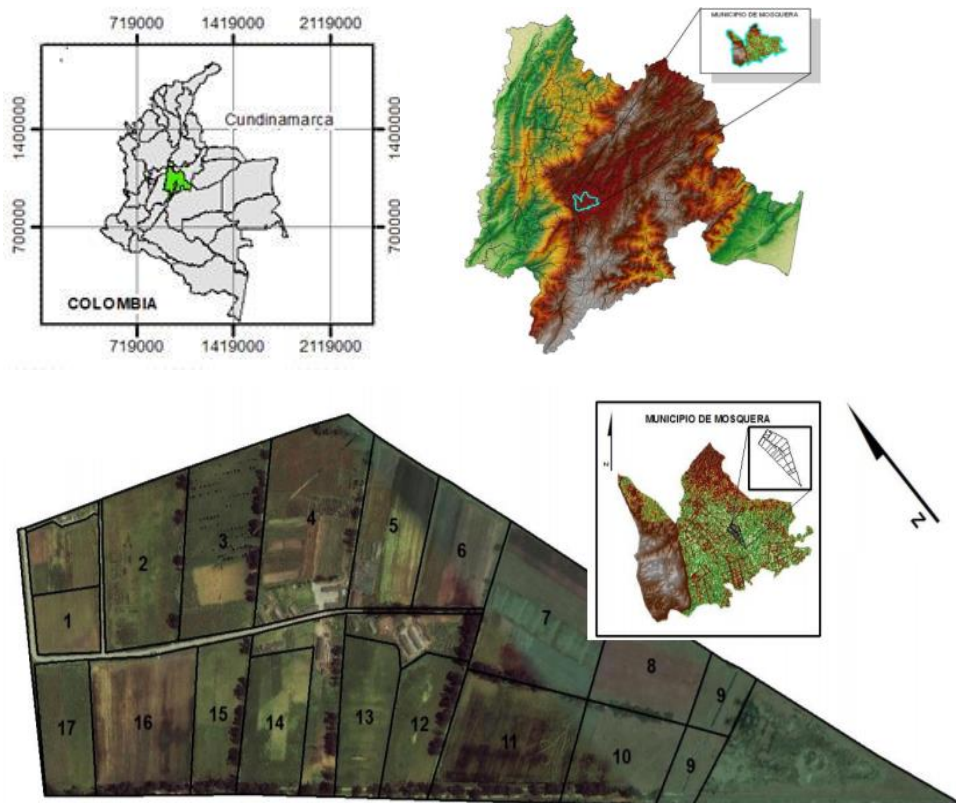


Figura 1-2. Localización general del área de estudio agroecosistema de la Sabana de Bogotá – Centro Agropecuario Marengo.

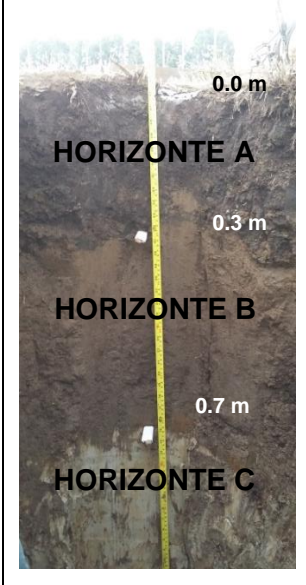
Fuente: adaptado de IGAC et al., (2014)

Las características de zona de vida correspondientes a bosque seco montano bajo (bsmb), temperatura media de 13,1°C, humedad relativa media de 80,7 %, brillo solar diario medio 4,6 h, velocidad del viento 1,7 m.s⁻¹ y precipitación anual media de 680 mm (CAM, 2010). El proceso de floricultura analizado, se desarrolla bajo condiciones de invernadero y hace parte del centro multisectorial de rosa y clavel, perteneciente al agroecosistema de la Sabana de Bogotá.

1.4.1 Descripción del perfil de suelo del área de estudio

El área de estudio se encuentra entre los 2539 y 2542 m.s.n.m.; los suelos se desarrollaron a partir de depósitos aluviales finos o medios, en algunos sectores sobre cenizas volcánicas o en otras áreas originados únicamente por estos materiales piroclásticos no consolidados; este proceso de deposición se llevó a cabo sobre partículas muy finas, arcillas lacustres. (IGAC, 2014). En dicha área, se encuentran relieves de tipo terrazas con pendientes que oscilan entre el 1% y el 3%, caracterizadas por un ambiente fluviolacustre con planos de inundación del orden máximo del 1% y un paisaje de planicie aluvial. Generalmente, los suelos son profundos, moderadamente drenados, de texturas finas y medias; presentan altos contenidos de sales y altos contenidos de carbono orgánico. (UNAL, 2013). La Tabla 1-2 muestra la estratificación del perfil de suelo objeto de estudio.

Tabla 1-2. Descripción y estratificación del perfil de suelo objeto de estudio.

IMAGEN	DESCRIPCIÓN
	HORIZONTE A – Profundidad: 0 – 30cm
	Suelo de textura franco limosa, color en húmedo negro (10YR2/1 y frecuentes moteados de color pardo amarillento oscuro (10YR4/6). Estructura en bloques subangulares medios y gruesos, abundantes poros, finos y medios; muchas raíces gruesas, medias y finas. Con mucha actividad de macroorganismos.
	HORIZONTE B – Profundidad: 30 – 70cm
Suelo con características texturales franco arcillosas, color en húmedo pardo amarillento (10YR5/4) y frecuentes moteados de color pardo amarillento (10YR5/6). Estructura en bloques subangulares medios y finos, con consistencia en mojado pegajosa y ligeramente plástica. Con baja frecuencia de raíces y poca actividad de macroorganismos.	
HORIZONTE C – Profundidad: >70 cm	
Suelo de textura arcillosa, con color en húmedo gris claro (10YR7/1) con manchas de color rojo amarillento (5YR5/8) frecuentes; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y muy plástica; frecuentes poros muy finos; no hay raíces; no hay actividad de macroorganismos.	

Fuente: Adaptada de IGAC et al. (2014)

1.4.2 Características fisicoquímicas del perfil de suelo

El perfil de suelo objeto de estudio, se caracterizan por tener valores de pH ligeramente ácidos, conductividad eléctrica mayor a $4,0 \text{ dS m}^{-1}$. En general con respecto a los porcentajes de porosidad total, se observa que estos fluctúan entre 50% y 74%, con fracciones similares entre el contenido de micro y macro poros. Los horizontes de suelo presentan altos contenidos de arcilla con porcentajes superiores al 39% con variaciones en su porcentaje de carbono orgánico que van desde el 0,2% al 3,3%. La Tabla 1-3 presenta el compendio de propiedades físicas y químicas de los tres horizontes que constituyen el perfil de suelo estudiado.

Tabla 1-3. Propiedades físicas y químicas del perfil de suelo objeto de estudio.

PROPIEDAD	HORIZONTE A Profundidad: 0–30cm	HORIZONTE B Profundidad: 30–70cm	HORIZONTE C Profundidad: >70cm
Textura	Franco Limoso	Franco Arcilloso	Arcilloso
Arenas	4,25 %	9,31 %	0,43 %
Limos	56,27 %	34,01 %	20,73 %
Arcilla	39,48 %	56,68 %	78,84 %
Densidad Aparente	$1,17 \text{ g cm}^{-3}$	$1,05 \text{ g cm}^{-3}$	$1,22 \text{ g cm}^{-3}$
Materia Orgánica	5,7 %	2,4 %	0,34 %
Carbono Orgánico	3,3 %	1,4 %	0,2 %
Conductividad Eléctrica	$4,0 \text{ dS m}^{-1}$	$6,2 \text{ dS m}^{-1}$	$6,3 \text{ dS m}^{-1}$
RAS	13,6 %	18,9 %	18,1 %
Microporos	34,78	40,69	28,51
Macroporos	29,85	33,66	12,29
Porosidad total	64,63	74,35	50,8
pH	5,4	5,2	4,6
Nitratos	$52,58 \text{ mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ Suelo}$	$39,93 \text{ mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ Suelo}$	$18,88 \text{ mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ Suelo}$
Fosforo	$45,7 \text{ mg L}^{-1}$	$11,2 \text{ mg L}^{-1}$	$5,2 \text{ mg L}^{-1}$

La caracterización del perfil de suelo, permite evidenciar la presencia de sales y sodio en cada uno de los tres horizontes caracterizados. Para el caso del contenido de nitratos las concentraciones encontradas presentan valores de: $52,58 \text{ mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ Suelo}$ en el primer horizonte, $39,93 \text{ mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ Suelo}$ en el horizonte B y de $18,88 \text{ mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ Suelo}$ en el Horizonte C.

2 Caracterización de los parámetros hidrofísicos de un perfil de suelo perteneciente al agroecosistema de la sabana de Bogotá.

2.1 Resumen

La evaluación de propiedades físicas de los suelos, es una herramienta de análisis que permiten formular predicciones sobre el movimiento y la disponibilidad de una sustancia en una superficie. Caracterizar estas propiedades establece el marco de referencia para el análisis del movimiento de las sustancias, su impacto potencial en el ambiente y la gestión de recursos naturales. En consecuencia, dentro del presente estudio se muestran los resultados de la caracterización de los parámetros hidrofísicos: Curva de retención de Humedad, Curva de conductividad hidráulica, en un perfil de suelo empleado para procesos de floricultura en el agroecosistema de la sabana de Bogotá.

La metodología empleada se fundamenta en un análisis experimental empleando los métodos de: a) las placas de Richard's descrito por Klute (1986), b) el infiltrometro de doble anillo (Bouwer, 1986) y c) el método del aire caliente para la evaluación de la curva de conductividad hidráulica no saturada propuesto por Arya, et al., (1975). Los resultados experimentales, se evaluaron con el programa RETC (van Genuchten, et al., 1991). En dicha evaluación, se consideraron los modelos de retención de humedad propuestos por Van Genuchten (1980) y Brooks and Corey (1964), y los modelos de conductividad hidráulica no saturada de Van Genuchten - Mualem (1976) y Van Genuchten Burdine (1953). La selección de los mejores modelos de ajuste y de los parámetros efectivos, se realizó con base en el contraste de los resultados del coeficiente de determinación R^2 . Como resultados, se evidencia que el modelo Van Genuchten $n = 1-1/n$ y Van Genuchten - Mualem presenta las mejores condiciones de ajuste para los datos de la curva de retención de humedad y la curva de conductividad hidráulica no saturada. Con valores del coeficiente de determinación R^2 en el orden de 0,999 y 0,9500 respectivamente.

Palabras Clave: Agroecosistema, Parámetros Hidrofísicos, Retención de Humedad, Conductividad hidráulica no saturada y Sábana de Bogotá.

2.2 Abstract

The evaluation of physical properties of soil is an analytical tool that allows to make predictions about the movement and availability of a substance on a surface. Characterizing these properties establishes the frame of reference for the analysis of the movement of substances, their potential impact on the environment and the management of natural resources. Consequently, within the present study, the results of the characterization of the hydrophysical parameters are shown: Moisture retention curve, unsaturated hydraulic conductivity curve, in a soil profile used for floriculture processes in the Bogota savanna agroecosystem.

The methodology used is based on an experimental analysis using the methods of: a) the Richard's plates described by Klute (1986), b) the double-ring infiltrometer (Bouwer, 1986) and c) the hot air method for the evaluation of the unsaturated hydraulic conductivity curve proposed by Arya, et al., (1975). The experimental results were evaluated with the RETC software (van Genuchten, et al., 1991). In this evaluation, the moisture retention models proposed by Van Genuchten (1980) and Brooks and Corey (1964) and the unsaturated hydraulic conductivity models of Van Genuchten - Mualem (1976) and Van Genuchten Burdine (1953) were considered. In this evaluation, the moisture retention models proposed by Van Genuchten (1980) and Brooks and Corey (1964) and the unsaturated hydraulic conductivity models of Van Genuchten - Mualem (1976) and Van Genuchten Burdine (1953) were considered. The selection of the best adjustment models and the effective parameters was made based on the contrast of the results of the determination coefficient R^2 . As a result, it is evident that the model Van Genuchten $n = 1-1/n$ and Van Genuchten - Mualem presents the best adjustment conditions for the data of the moisture retention curve and the unsaturated hydraulic conductivity curve. With determination coefficient values R^2 in the order of 0,9990 and 0,9500 respectively.

Keywords: *Agroecosystem, Hydrophysical Parameters, Moisture Retention, Unsaturated Hydraulic Conductivity and Bogota Savanna.*

2.3 Materiales y métodos

La descripción de la dinámica del flujo del agua en la zona no saturada del suelo, se realizó a partir del modelo matemático descrito en la ecuación de Richard's (1931) para una dimensión. Ecuación 2-1. En la solución de dicha ecuación se empleó el método de diferencias finitas, considerando los resultados experimentales de los parámetros hidrofísicos de la curva de retención de humedad y la curva de conductividad hidráulica.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

Ecuación 2-1. Ecuación de Richard's para flujo vertical.

Donde $K(h)$ es la función de conductividad hidráulica en el punto h [LT^{-1}]. h es el valor de la presión en función del contenido de humedad volumétrico θ del suelo [L]. $\partial\theta/\partial t$ es la pendiente de la Curva de retención de humedad del suelo en el punto h de la función. Y $\partial h/\partial z$ es la función del potencial de presión y gravitacional en la coordenada espacial z . El desarrollo experimental empleado para la caracterización de los parámetros hidrofísicos del suelo, se realizó en los laboratorios de Ingeniería Ambiental y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia APHA, (2017). Los resultados experimentales de las curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica, se evaluaron para diferentes modelos de ajuste considerando el coeficiente de determinación R^2 como criterio de decisión, de acuerdo con el manual del software: RETC (van Genuchten, et al., 1991). A continuación, se describe el enfoque metodológico desarrollado para la obtención de los parámetros hidrofísicos, junto con las ecuaciones que describen cada uno de los modelos de ajuste objeto de la presente investigación.

2.3.1 Curva de Retención de Humedad:

La curva de retención de humedad se determinó con el método de las placas de Richard's descrito por Klute (1986). En su implementación se tomaron muestras de suelo sin disturbar para cada uno de los horizontes de suelo identificados, sobre las cuales se realizó el seguimiento del cambio de la humedad volumétrica (θ) sobre un intervalo de tensión de -0,3 a -1,5 Bares. Posteriormente se cuantificaron los parámetros óptimos de la curva de retención de humedad, empleando un proceso de optimización no lineal con el algoritmo de Marquardt (1963) presente del software RETC (van Genuchten, et al., 1991). Dentro de este proceso de optimización, se determinaron los parámetros óptimos que se describen en los modelos de retención de humedad propuestos por Van Genuchten (1980) (Ecuación 2-2) y Brooks and Corey (1964) (Ecuación 2-3).

$$Se = \frac{\theta_x - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + [\alpha h]^n]^{-m}$$

Ecuación 2-2. Modelo de Van Genuchten

$$Se = \frac{\theta_x - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [\alpha h]^{-\lambda}$$

Ecuación 2-3. Modelo de Brooks and Corey.

Donde Se es el grado específico de saturación del suelo, dado por $Se = (\theta_x - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ [L⁻³L⁻³]. El parámetro θ es la humedad volumétrica [L³*L⁻³]. θ_r es el contenido de humedad residual [L³*L⁻³]. θ_s es el contenido máximo de humedad o humedad del suelo saturado en [L³*L⁻³]. h es la presión capilar [L], el parámetro α es un parámetro empírico (L⁻¹) cuyo inverso a menudo se define como la presión de entrada de aire o la presión de burbujeo. Los parámetros m y n son parámetros de ajuste del modelo de la curva de retención de humedad (característicos de cada tipo de suelo). Y λ es el índice de la distribución del tamaño de los poros que afecta la pendiente de la función de retención de humedad.

2.3.2 Ensayo de infiltración - Conductividad hidráulica Saturada

La determinación de la curva de conductividad hidráulica Saturada se realizó mediante el método del doble anillo o anillos concéntricos, este método consiste en hincar en terreno dos anillos concéntricos a una profundidad de 15 cm sin alterar el terreno (Luna et al., 2005). En dicha prueba se evaluó la velocidad de infiltración instantánea hasta alcanzar una tasa de infiltración constante. Los resultados experimentales se analizaron de acuerdo con el modelo propuesto por Kostiaikov (1932) determinando el Ks o conductividad hidráulica saturada, la cual se empleó como insumo para la curva de conductividad hidráulica no saturada.

2.3.3 Curva de Conductividad Hidráulica No Saturada

La cuantificación de la curva de conductividad hidráulica no saturada, se llevó a cabo mediante el método de difusividad térmica o método del aire caliente (Ecuación 2-4) propuesto por Arya, et al., (1975). En la ejecución de este método, se analizaron muestras por triplicado para el horizonte A (0 – 30 cm), el horizonte B (30 – 70 cm) y el horizonte C (70 – 100 cm), para un total de 9 ensayos (3 por horizonte). Posteriormente, se determinó la conductividad hidráulica no saturada considerando la analogía existente entre el flujo de calor y la difusión del flujo de agua a través de medios porosos

$$K(\theta) = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial h} = -\frac{1}{2t} * \left[\frac{\partial x}{\partial \theta} \right]_{\theta_x} * \int_{\theta_i}^{\theta_x} x \, d\theta * \frac{\partial \theta}{\partial h}$$

Ecuación 2-4. Conductividad Hidráulica No Saturada con base en la difusividad térmica – Método Aire Caliente.

Donde la $K(\theta)$ [LT^{-1}] es la conductividad hidráulica no saturada en función del contenido de humedad. $D(\theta)$ es la difusividad del agua en el suelo a un contenido de humedad θ_x , $\partial\theta/\partial h$ es la capacidad específica del agua o también la pendiente de la curva de retención de Humedad. θ_i es la humedad volumétrica inicial del ensayo [L^3*L^{-3}] y t es el tiempo de ejecución del ensayo del aire caliente [T].

En el desarrollo experimental del método del aire caliente, se sometieron las muestras de suelo saturadas, a una corriente de aire caliente con una temperatura promedio de 50°C durante 12 minutos. Posteriormente, se seccionaron las muestras de suelo y se midió el cambio de humedad gravimétrica, cuantificando la diferencia de peso entre la condición de saturación y la condición final del secado. Producto de los resultados experimentales, se evaluaron los parámetros óptimos de la curva de conductividad hidráulica no saturada, empleando procesos de optimización no lineal con el software RETC® (Van Genuchten, et al., 1991). Se evaluaron los modelos de Mualem (1976) (Ecuación 2-5) y Burdine (1953) (Ecuación 2-6), expresados con base en la función de retención de humedad de Van Genuchten: a) Mualem - Van Genuchten (Ecuación 2-7) y b) Burdine – Van Genuchten (Ecuación 2-8).

$$K(Se) = KsS_e^l \left[\frac{f(Se)}{f(1)} \right]^2 \text{ y } f(Se) = \int_0^{Se} \frac{1}{h(x)} dx$$

Ecuación 2-5. Modelo de Mualem.

$$K(Se) = KsS_e^l \left[\frac{g(Se)}{g(1)} \right]^2 \text{ y } g(Se) = \int_0^{Se} \frac{1}{h(x)^2} dx$$

Ecuación 2-6. Modelo de Burdine.

$$K(h) = \frac{Ks \{1 - [(\alpha h)^{nm} * [1 + (\alpha h)^n]^{-m}] \}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{Lm}}$$

Ecuación 2-7. Modelo de Mualem - Van Genuchten

$$K(h) = \frac{Ks (1 - (\alpha h)^{n-2} * [1 + (\alpha h)^n]^{-m})}{[1 + (\alpha h)^n]^{Lm}}$$

Ecuación 2-8. Modelo de Burdine - Van Genuchten

Donde Ks Conductividad hidráulica saturada [LT^{-1}]. Se es el grado específico de saturación del suelo, dado por $Se = (\theta_x - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ [$L^{-3}*L^{-3}$]. El parámetro θ es la humedad volumétrica [L^3*L^{-3}]. θ_r es el contenido de humedad residual [L^3*L^{-3}]. θ_s es el contenido máximo de humedad o humedad del suelo saturado en [L^3*L^{-3}]. $f(Se)$ y $g(Se)$ son las funciones características de la saturación efectiva de los métodos de Mualem y Burdine respectivamente. h es la presión capilar [L], el parámetro α es un parámetro empírico (L^{-1}) cuyo inverso a menudo se define como la presión de entrada de aire o la presión de burbujeo. Los parámetros m y n son parámetros de ajuste del modelo de la curva de retención de humedad (característicos de cada tipo de suelo). Y L es el parámetro de conectividad de poros.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Curva de Retención de Humedad

Los valores de la curva o función de retención de humedad para cada uno de los tres (3) horizontes de suelo estudiados se presentan en la figura 2-1. En términos generales el contenido de humedad en saturación (θ_s) vario de $54,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ hasta $69,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. El Horizonte A, presentó los valores más bajos de humedad en Saturación con respecto a los otros dos horizontes y por el contrario el horizonte B reportó los mayores contenidos de saturación inicial en el análisis de los tres horizontes de suelo. Con respecto al contenido de humedad residual (θ_r), se obtuvieron valores en el intervalo de $19,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $32,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, siendo el horizonte C el suelo con mayor contenido de humedad residual (θ_r) y el horizonte más superficial (horizonte A) el que presenta menores valores de humedad residual.

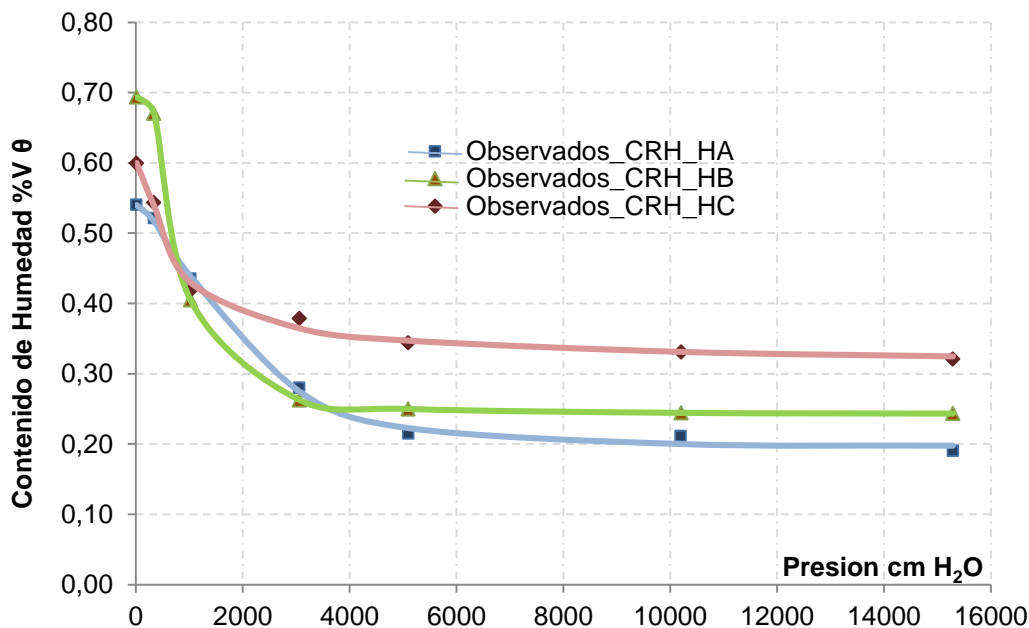


Figura 2-1. Resultados experimentales de la curva de retención de humedad de los tres horizontes de suelo.

Los resultados de las curvas de retención de humedad, se evaluaron bajo los modelos de ajuste de Van Genuchten (1980) y Brooks and Corey (1964). Dichos resultados se presentan en la figura 2-2 y se consolidan en las Tablas 2-1 y 2-2. En los resultados consolidados, se presentan los parámetros θ_s , θ_r , α , L , n y m obtenidos en el proceso de optimización no lineal con el software RETC (van Genuchten, et al., 1991) junto con los valores calculados del coeficiente de determinación R^2 .

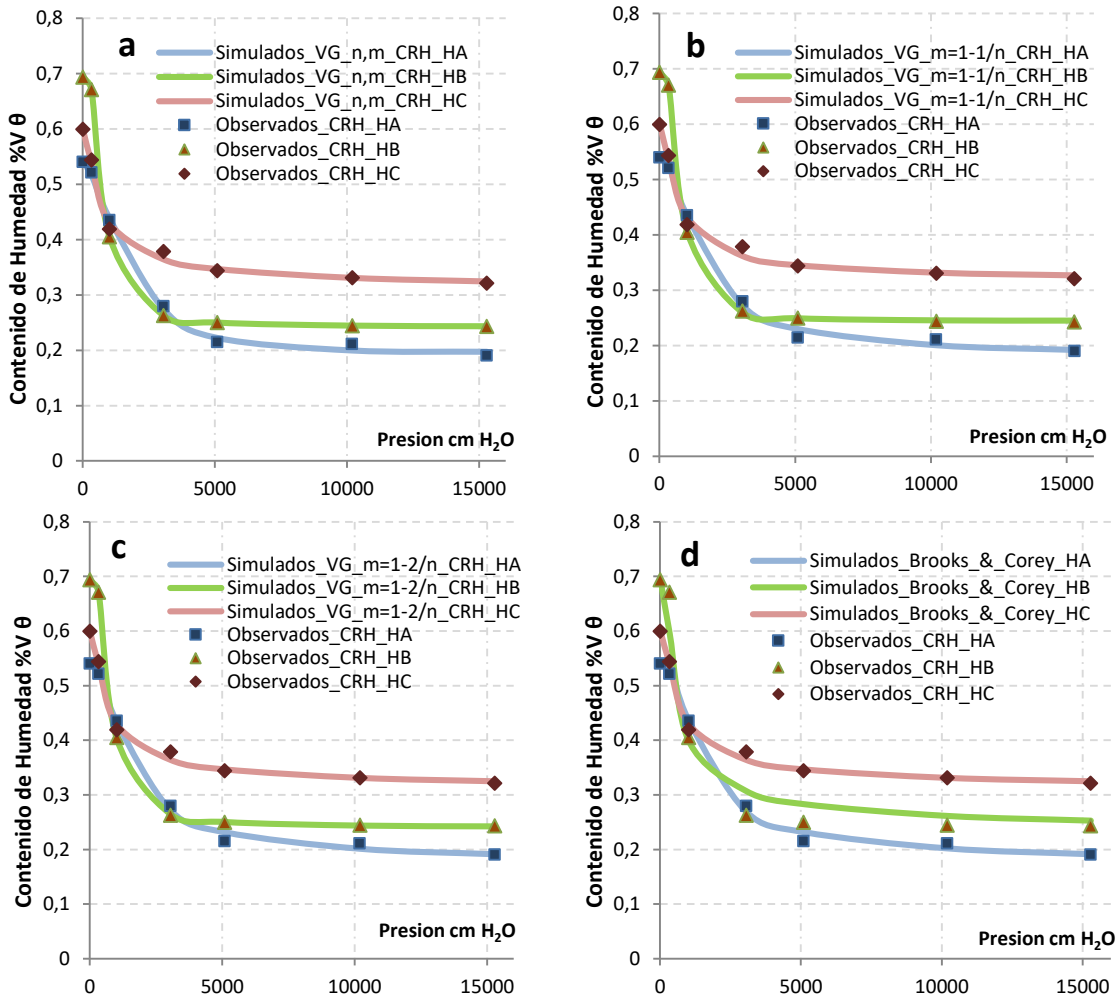


Figura 2-2. Resultados de los valores de optimización no lineal obtenidos para la Curva de Retención de Humedad en los tres horizontes de suelo. Modelos: a) Van Genuchten (m,n), b) Van Genuchten (m=1-1/n), c) Van Genuchten (m=1-2/n) y d) Brooks and Corey.

El contenido de humedad volumétrica promedio en condiciones de capacidad de campo (300 cm H₂O) fue de 43,53% en el Horizonte A, de 40,49% en el Horizonte B y de 41,89% en el Horizonte C. Valores que a la luz de los resultados reportados en la literatura por Allen et al., en 2006 y Malagón, en 2016, se encuentran dentro de los contenidos de humedad reportados por dichos autores para suelos de textura fina. Al igual que con los datos de capacidad de campo, los valores de humedad volumétrica asociados al punto de marchitez permanente se encuentran en sincronía con los valores obtenidos por Allen et al., (2006) en su estudio de requerimientos de agua en el cultivo en donde para suelos con altos contenidos de arcilla, sobre los cuales se esperan valores de agua aprovechable cercanos o superiores al 20%.

Tabla 2-1. Consolidado de los parámetros optimizados de los modelos Van Genuchten (α , n , m , θ_s y θ_r) en los Horizontes de suelo A, B y C.

MODELO VAN GENUCHTEN								
Horizonte	Profundidad	Modelo	θ_r	θ_s	α	n	m	R^2
A	0-30 (cm)	n,m	0,1968	0,5403	0,00024	1,4939	3,0009	0,9979
		$m=1-1/n$	0,1795	0,5403	0,00092	2,2637	0,5582	0,9969
		$m=1-2/n$	0,1713	0,5403	0,00118	3,0086	0,3352	0,9958
B	31-70	n,m	0,2424	0,6936	0,00157	3,6022	0,5497	0,9999
		$m=1-1/n$	0,3160	0,6936	0,00245	1,8980	0,4731	0,9930
		$m=1-2/n$	0,3058	0,6936	0,00341	2,6905	0,2566	0,9989
C	>70	n,m	0,3039	0,5995	0,00348	2,7178	0,2469	0,9952
		$m=1-1/n$	0,3160	0,5995	0,00245	1,8980	0,4731	0,9930
		$m=1-2/n$	0,3058	0,5995	0,00341	2,6905	0,2566	0,9951

Tabla 2-2. Consolidado de los parámetros optimizados del modelo Brooks and Corey (α , λ , θ_s y θ_r) en los Horizontes de suelo A, B y C.

MODELO BROOKS AND COREY						
Horizonte	Profundidad	θ_r	θ_s	α	λ	R^2
A	0-30	0,1663	0,5403	0,0014	0,8764	0,9939
B	31-70	0,2266	0,6301	0,0042	0,6898	0,9858
C	>70	0,3058	0,5995	0,0034	2,6905	0,9951

En términos generales los resultados del proceso de optimización no lineal presentados en las tablas 2-1 y 2-2, muestran coeficientes de determinación R^2 superiores a 0,97 tanto para el modelo de Van Genuchten como para el modelo de Brooks and Corey. Así las cosas, los dos modelos evaluados logran describir los valores experimentales de la curva de retención de humedad con un porcentaje de error inferior al 5%. Sin embargo, el modelo de Van Genuchten (n,m), es el modelo que mejor representa los datos experimentales obtenidos para los tres horizontes de suelo analizados, reportando valores de R^2 superiores a 0,9952 en cada uno de los tres horizontes de suelo.

En los valores de ajuste de los parámetros para el modelo de Van Genuchten, se observa que el parámetro n oscila entre 1,49 y 3,60. Resultados que contrastan con los valores promedio de n de 1,34, encontrados por García y Cabana (2014) quienes estudiaron el movimiento de agua en suelos arcillosos consolidados en el occidente de la sabana de Bogotá y Varón V. (2016), quien en su estudio de caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM, encontró valores en media de 1,34 pero con coeficientes de determinación R^2 (entendidos como la proporción de la varianza total de los parámetros de flujo minimizados en el proceso de optimización no lineal), en un amplio intervalo entre 0,35 y 1,0.

Estas diferencias de los valores de n encontradas entre las muestras de suelo evaluadas por Varón V. (2016) y el presente estudio, se pueden explicar debido al problema de equifinalidad, en donde múltiples conjuntos de parámetros pueden dar solución al proceso de descripción del modelo de Van Genuchten. Aclarando que si bien existen diferencias en los valores de n entre la presente investigación y los estudios de Varón V. (2016) y García y Cabana (2014), los valores experimentales de este estudio guardan correlación tanto para las condiciones hidrofísicas en los tres horizontes de suelo estudiados, como para los contenidos de humedad en saturación (θ_s) y residual (θ_r) reportados por estos autores. Evidenciándose así, que a pesar de que las propiedades físicas de los suelos guardan sincronía entre esta investigación y los estudios de Varón V. (2016) y García y Cabana (2014), la obtención del parámetro n del modelo de retención e humedad de Van Genuchten, pueden variar dependiendo del proceso de optimización.

2.4.2 Ensayo de infiltración – determinación conductividad hidráulica saturada

En la Figura 2-3 se presentan los resultados para cada uno de los horizontes del perfil de suelo estudiado, con valores de conductividad hidráulica saturada (K_s) inferiores a $0,45 \text{ cm h}^{-1}$ para los horizontes de suelo estudiados. Los datos más altos de conductividad hidráulica saturada se encontraron en el horizonte más superficial u horizonte A, sobre el cual suceden la mayoría de los procesos biológicos como por ejemplo los asociados a la actividad de macroorganismos (lombrices) o a la instauración de zonas radicales de las plantas, las cuales pueden llegar a generar grietas, fisuras o agujeros que aumentan la proporción de macroporos del suelo. (Green y Corey, 1971; Miyazaki, 1993; Hillel, 1998).

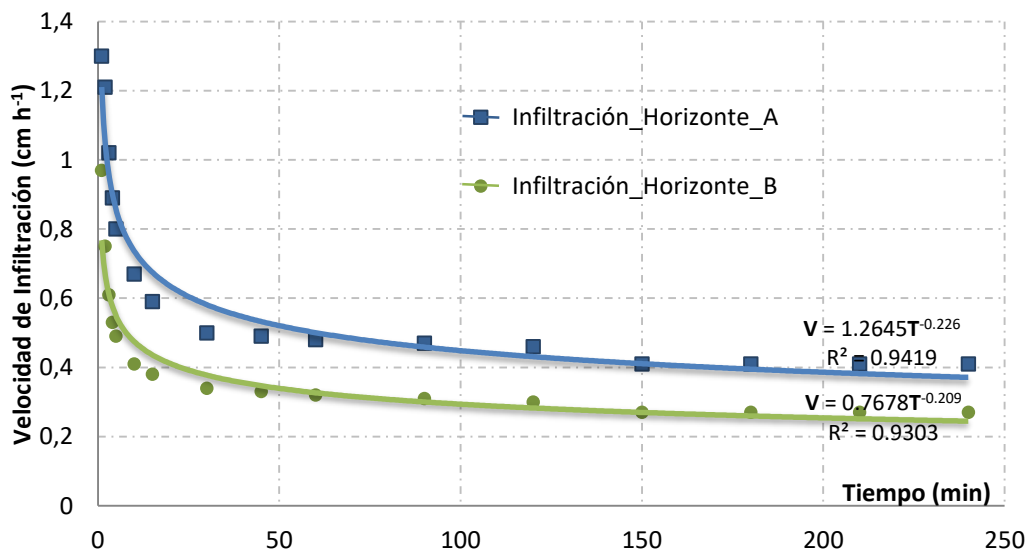


Figura 2-3. Resultados experimentales de la curva de retención de humedad.

Con respecto a los valores de conductividad hidráulica saturada para el horizonte C, no se presentan valores de K_s , debido a que no fue posible medirla en campo. Principalmente, debido a que la lámina de agua no percoló el estrato en cuestión ni aumentando los volúmenes de riego a condiciones de sobresaturación. Posiblemente, este fenómeno se explica por el alto contenido de arcillas 78,84% de este horizonte de suelo, las cuales a medida que se aumenta la humedad volumétrica, presentan fenómenos de ensanchamiento que disminuyen el volumen de poros efectivos generando un efecto de impermeabilidad. De acuerdo con lo definido por Green y Ampt (1911), los valores de K_s presentados en la figura 2-3 se encuentran en consonancia con los datos de la infiltración básica. Al observar los datos de la curva de conductividad hidráulica, se identifican valores de K_s de $0,41 \text{ cm h}^{-1}$ (Horizonte A) y $0,27 \text{ cm h}^{-1}$ (Horizonte B). Estos resultados indican suelos con coeficientes de permeabilidad moderados a lentos, de acuerdo con la clasificación de la conductividad hidráulica saturada propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (en inglés, *United States Department of Agriculture*, USDA (1981)). El análisis de los resultados de la gráfica anterior, vistos a la luz del modelo de Kostiakov (1932), describen coeficientes de ajuste de R^2 superiores a 0,84 para el modelo potencial de tipo: $V = aT^b$. Los valores de las constantes a oscilan entre 0,76 a 1,26 y entre 0,20 a 0,22 para los parámetros a y b respectivamente. En la Tabla 2-3 se presenta el consolidado de las constantes del modelo de Kostiakov

Tabla 2-3. Consolidado de Conductividad Hidráulica Saturada (K_s).

Horizonte	Profundidad (cm)	Conductividad Hidráulica Saturada, (cm h^{-1})	% Arena	% Limo	% Arcilla
A	0-30	0,41	4,25	56,27	39,48
B	31-70	0,27	9,31	34,01	56,68
C	<70	--	0,43	20,73	78,84

Al contrastar los resultados de la conductividad hidráulica (K_s) de los horizontes con respecto a los contenidos de arcilla, se observa una tendencia a la disminución de la conductividad hidráulica con respecto al aumento del porcentaje de arcillas. Esto se puede explicar debido al efecto causado en la alteración de la distribución de los poros por los procesos de expansión de las arcillas, las cuales a medida que se aumenta la humedad volumétrica del suelo presentan fenómenos de ensanchamiento. Investigaciones como la de Castiglioni, M. et al. (2007) establecen que algunos parámetros pertenecientes al tipo y contenido de arcillas, están vinculados con el movimiento de agua edáfica de suelos argílicos.

No obstante, si bien existe una relación de causalidad entre los efectos que generan las arcillas sobre la distribución de los poros y por ende sobre la conductividad hidráulica, no es posible establecer los cambios en la conductividad hidráulica del suelo tan solo con la información del contenido de arcillas, toda vez que la conductividad hidráulica saturada se ve afectada por la presencia de múltiples factores tales como, las capas endurecidas, las acciones de macro y micro organismos y los contenidos de materia orgánica del suelo; por estas razones no es posible establecer una relación única entre la porosidad y la permeabilidad intrínseca del medio poroso (Khan 1989). Además, la porosidad edáfica se reconfigura constantemente mediante la instauración de diversos factores antrópicos y propios del ecosistema tales como, actividades de labranza manual o mecánica, procesos de contracción y expansión del suelo, crecimiento de raíces y la creación de canales por lombrices (Kay. Et al., 2002).

2.4.3 Curva de Conductividad Hidráulica No Saturada

Los resultados de la curva o función de Conductividad Hidráulica No Saturada se presentan en la figura 2-4. Para definir la curva de conductividad hidráulica no saturada, se tomó como punto de partida, los valores de K_s (conductividad hidráulica saturada) calculados en el numeral 2.4.2 del presente documento.

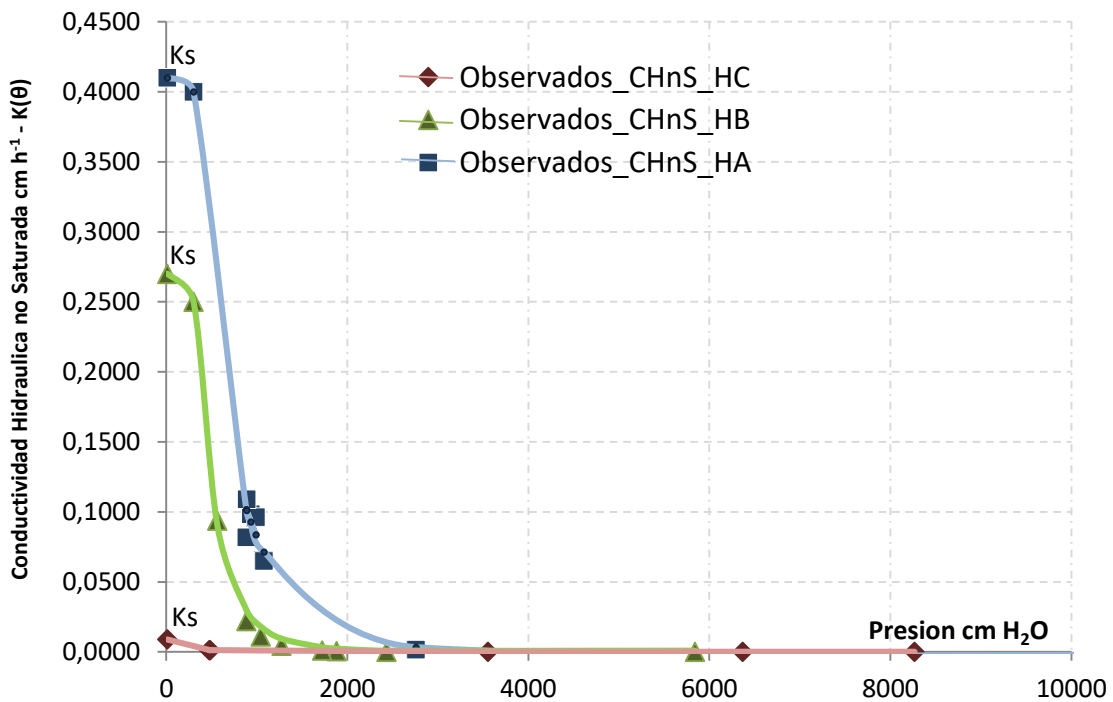


Figura 2-4. Curvas de conductividad hidráulicas no Saturada de los tres horizontes de suelo.

De los tres (3) horizontes de suelo evaluados, se observa que el horizonte más superficial u horizonte A presenta las mayores fluctuaciones en la conductividad hidráulica no saturada, pasando de $0,41 \text{ cm h}^{-1}$ a $0,0015 \text{ cm h}^{-1}$. En contraposición el horizonte C, muestra las menores fluctuaciones de conductividad hidráulica no saturada desde $0,01 \text{ cm h}^{-1}$ a $0,0010 \text{ cm h}^{-1}$. Sin embargo, los suelos pueden llegar a compactarse naturalmente (adensamiento) como consecuencia de procesos genéticos principalmente de translocación de arcillas (iluviación) de un horizonte superior a uno adyacente (USDA, 2014). Lo cual puede llegar a explicar parte de las diferencias en los resultados de conductividad encontrados en este perfil de suelo. A continuación en la figura 2-5 se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos del proceso de optimización para la curva de Conductividad Hidráulica no Saturada, en los tres horizontes de suelo.

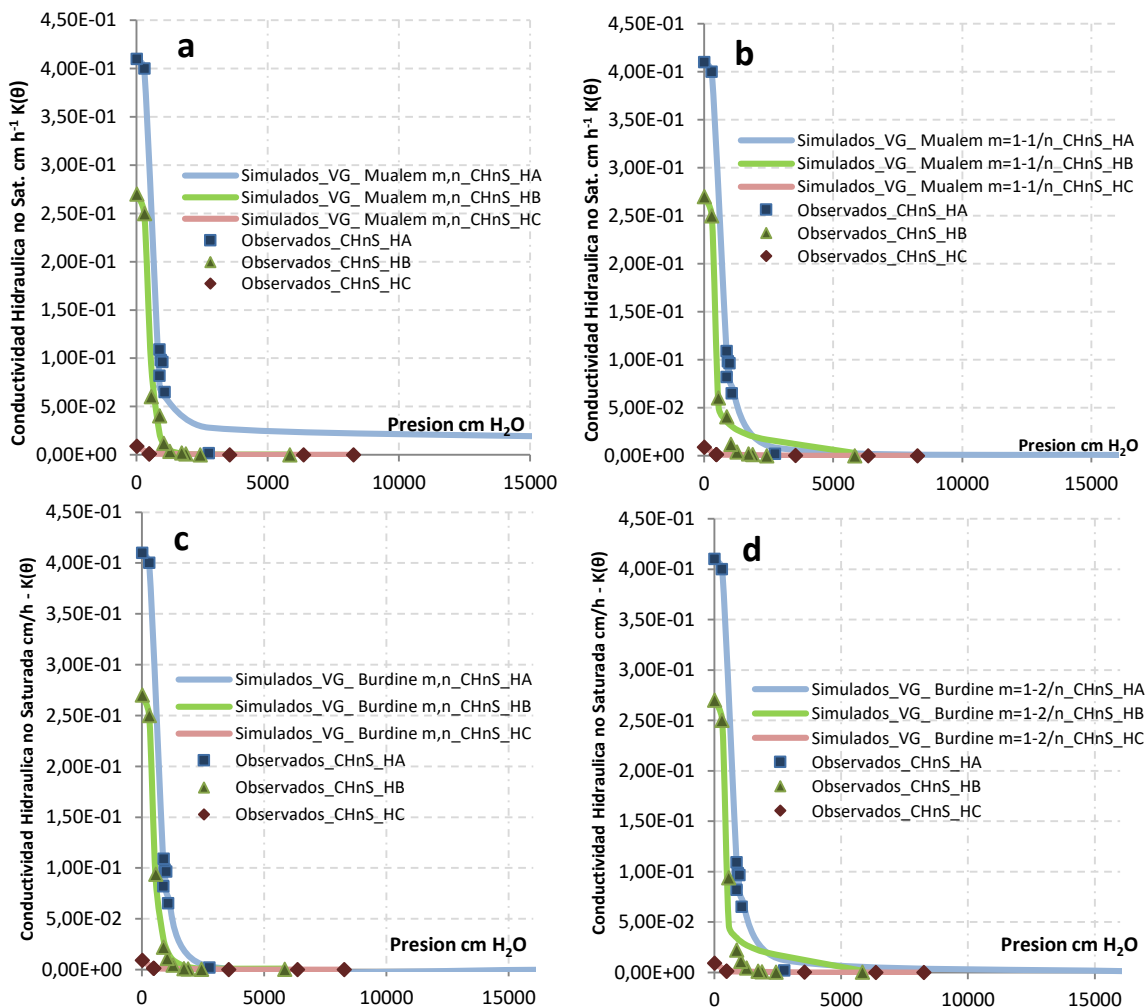


Figura 2-5. Curvas de Conductividad Hidráulica No Saturada obtenidas en los tres horizontes de suelo con los modelos: a) Van Genuchten (n,m) – Mualem, b) Van Genuchten ($m=1-1/n$) – Mualem, c) Van Genuchten (m,n) – Burdine y d) Van Genuchten ($m=1-2/n$) – Burdine.

En términos generales, todos los horizontes de suelo evaluados experimentan la disminución de los valores de conductividad hidráulica no saturada a medida que se aumenta el intervalo de tensión. Particularmente estos cambios se observan de manera más contundente en los Horizontes de suelo A y B, sobre intervalos de tensión de 0 a 3000 cm H₂O. En dicho intervalo, el Horizonte A presenta cambios en la Conductividad Hidráulica de 0,41 cm h⁻¹ a 0,0018 cm h⁻¹ y el Horizonte B muestra variaciones de 0,27 cm h⁻¹ hasta alcanzar valores de 1,00E⁻⁰⁵ cm h⁻¹. De acuerdo con los resultados obtenidos de la curva de conductividad hidráulica No Saturada, se logró establecer el valor de la conductividad hidráulica saturada del Horizonte C, la cual apoyado en el proceso de optimización no lineal se estableció con un valor de 0,01 cm h⁻¹. A continuación en la tabla 2-4 y 2-5 se muestra el resultado de los parámetros óptimos que describen los datos de la curva de conductividad hidráulica no saturada considerando los modelos propuestos por Mualem (1976) y Burdine (1953).

Tabla 2-4. Consolidado de parámetros optimizados (Ks, α, n, m y L) del modelo Van Genuchten - Mualem - Conductividad Hidráulica No Saturada.

MODELO VAN GENUCHTEN - MUALEM									
Horizonte	Profundidad (cm)	Modelo	θ _r	θ _s	α	n	m	L	R ²
A	0-30	n,m	0,1968	0,5403	0,0002	1,4939	3,0009	-2,5250	0,8574
		m=1-1/n	0,1795	0,5403	0,0009	2,2637	0,5582	-1,3411	0,9813
B	31-70	n,m	0,2424	0,6936	0,0015	3,6022	0,5497	-0,4936	0,9526
		m=1-1/n	0,3160	0,6936	0,0024	1,8980	0,4731	-3,4177	0,7114
C	>70	n,m	0,3039	0,5995	0,0034	2,7178	0,2469	-3,0081	0,9952
		m=1-1/n	0,3160	0,5995	0,0024	1,8980	0,4731	-2,7137	0,9961

Tabla 2-5. Consolidado de parámetros optimizados (Ks, α, n, m y L) del modelo Van Genuchten – Burdine - Conductividad Hidráulica No Saturada.

MODELO VAN GENUCHTEN - BURDINE									
Horizonte	Profundidad (cm)	Modelo	θ _r	θ _s	α	n	m	L	R ²
A	0-30	n,m	0,1968	0,5403	0,0002	1,4939	3,0009	-0,5628	0,7983
		m=1-2/n	0,1713	0,5403	0,0011	3,0086	0,3352	-0,9510	0,9790
B	31-70	n,m	0,2424	0,6936	0,0015	3,6022	0,5497	-0,2337	0,9415
		m=1-2/n	0,3058	0,6936	0,0034	2,6905	0,2566	-2,9636	0,5766
C	>70	n,m	0,3039	0,5995	0,0034	2,7178	0,2469	-2,0209	0,9752
		m=1-2/n	0,3058	0,5995	0,0034	2,6905	0,2566	-1,9910	0,9752

Desde un panorama general, los diferentes modelos de Van Genuchten – Mualem y Van Genuchten - Burdine, permiten reproducir los valores de la curva de conductividad hidráulica no saturada obtenidos de manera experimental por el método del aire caliente (Arya, et al., 1975). Con excepción de los modelos de Van Genuchten – Mualem (n,m) y Van Genuchten – Burdine (n,m) en el horizonte A y los modelos de Van Genuchten – Mualem ($m=1-1/n$) y Van Genuchten – Burdine ($m=1-2/n$) en el horizonte B, los cuales evidenciaron valores del coeficiente de determinación inferiores a 0,86 en el horizonte A y 0,62 en el Horizonte B. Con respecto al Horizonte C estos valores de R^2 , se mantienen en órdenes de magnitud superiores a 0,99 para los dos modelos de conductividad hidráulica no saturada estudiados.

En el Horizonte A, el modelo de Van Genuchten – Mualem ($m=1-1/n$), es que mejor representa el ajuste de los datos simulados con respecto a los valores experimentales observados, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9813. De forma paralela, en el Horizonte B los mejores valores de R^2 del orden de 0,9500 se obtuvieron con el modelo de Van Genuchten – Mualem (n,m). La heterogeneidad de estos resultados, con respecto a los coeficientes de determinación R^2 entre los diferentes modelos evaluados, demuestran que no existe una generalidad o una tendencia que predomine para la selección de uno u otro modelo, por lo menos para los tres horizontes de suelo estudiados. Es necesario aclarar que independientemente de los valores del coeficiente de determinación R^2 , los procesos de optimización no lineal tendrán mejores resultados en la medida que se le suministre mayor información del fenómeno de flujo estudiado, dentro de dicha información es de vital importancia los valores de K_s o conductividad hidráulica saturada, y los valores de θ_s entendidos como el contenido de humedad volumétrica en saturación.

Los resultados del parámetro conectividad de poros (L), presentados en la tabla 2-3 y 2-4, mostraron valores negativos que van desde -3,00 a -0,49 para el modelo de Mualem - Van Genuchten y de -2,96 hasta -0,23 para el modelo Van Genuchten - Burdine. Estos valores, se encuentran en sincronía con los reportados por Schaap, M. G., & Leij, F. J. (2000), quienes en su investigación de predicción mejorada de conductividad hidráulica insaturada con el modelo Mualem-van Genuchten, encontraron que los mejores valores de ajuste de L para diferentes tipos de suelo se obtienen con valores negativos, en especial para suelos de texturas finas.

Al respecto es necesario precisar que los valores obtenidos en el proceso de optimización del parámetro L , obedecen a una solución numérica iterativa calculada mediante el algoritmo de Marquardt (1963), que refleja el valor óptimo del parámetro L mediante la minimización del coeficiente de determinación R^2 . En este proceso matemático se determina una solución numérica, con base en los mejores valores de la función objetivo, pero que no necesariamente reflejan la física del proceso simulado. Argumento que fue previamente visualizado por estudios como el de Hoffmann-Riem et al., (1999), los cuales concluyeron que los resultados de optimización para valores del parámetro L inferiores a cero, calculados a partir del modelo Van Genuchten - Mualem, no deben interpretarse como una base física. Lo que implica que los valores de L se interpretan como valores empíricos que representan la solución numérica del modelo de conductividad hidráulica analizado. Es necesario acotar que dichos resultados son posibles si se presupone que el parámetro L es un parámetro empírico que intenta representar la interconectividad de los poros y no obedece necesariamente a la física que describe las estructuras de interconexión existentes en el medio poroso.

Desde el punto de vista del modelo de propuesto por Van Genuchten y Mualem (1976), el hecho de que en la interpretación de la Saturación efectiva S_e , el valor del parámetro L es mayor a 0, un valor negativo de L hace imposible interpretar saturación efectiva como un factor de reducción simple que explica la conectividad de los poros y la tortuosidad del medio (Mualem y Dagan, 1978). Debido a que K_s es constante para toda la saturación efectiva (S_e) de una muestra, un valor negativo del parámetro L parece ser genera un efecto de compensación en el denominador de la ecuación 2-8 y 2-9.

Los valores encontrados en la presente investigación distan del valor recomendado por Mualem (1976), para definir la interconectividad de los poros en el medio poroso de $L=0,5$. Este valor ha sido ampliamente empleado en la literatura, por citar algunos ejemplos investigaciones como las de Hincapié (2011) y Becerra (2009), emplearon estos valores para simular el movimiento del agua en diferentes tipos de suelos, con muy buenos factores de ajuste entre los datos simulados y los observados en el modelo de flujo de agua objeto de estudio. Es válido precisar, que si bien los valores de L , difieren del valor de 0,5 sugerido en la literatura, Mualem (1976) establece que dicho parámetro debe ser ajustado a cada tipo de suelo en particular, principalmente debido a que las condiciones de heterogeneidad del suelo hacen que estos valores de ajuste puedan presentar diversos valores que pueden reflejar en mejor medida la estimación del flujo de agua en el suelo.

• **Análisis comparativo de los parámetros de la Curva de Conductividad Hidráulica no Saturada, considerando diferentes técnicas para su determinación.**

El objetivo de este apartado, es dar a conocer las diferencias obtenidas en los valores de la curva de conductividad hidráulica no saturada, comparando diferentes técnicas usadas para la determinación de los parámetros efectivos K_s , α , n , m y L . En términos generales, se contrastan los resultados experimentales de conductividad hidráulica no saturada, obtenidos por el método del aire caliente, contra cuatro diferentes técnicas empleadas usualmente para la determinación de los parámetros efectivos que describen los modelos Van Genuchten – Mualem (m, n) y Van Genuchten – Mualem ($m=1-(1/n)$).

La primera técnica está ligada a los valores teóricos de los parámetros que tiene incluidos el software RETC (van Genuchten, et al., 1991), los cuales se determinan a partir de la textura de suelo, la segunda técnica basada en los valores de los parámetros calculados a partir del módulo Rosetta (Schaap, et al., 2001) que emplea un algoritmo de redes neuronales, la tercera y cuarta técnica, usando los valores de los parámetros K_s , α , n y m obtenidos de la curva de retención de humedad y curva de conductividad hidráulica saturada con valores del parámetro de conectividad de poros constante $L=0,5$ y optimizado con $L \neq 0,5$. En las tablas y figuras 2-6 y 2-7 se presentan los resultados obtenidos, con el fin de evidenciar las diferencias entre las técnicas usadas para calcular los parámetros óptimos que describen el modelo de flujo de agua en el suelo.

Tabla 2-6. Consolidado de parámetros: K_s , α , n , m y L , determinados con diferentes técnicas de optimización en el modelo Van Genuchten-Mualem (n, m) - Conductividad Hidráulica No Saturada.

MODELO VAN GENUCHTEN - MUALEM (n, m)										
Hor	Prof,	Modelo o Técnica Simulada	θ_r	θ_s	α	n	m	λ	K_s	R^2
A	0-30 (cm)	$L \neq 0,5$	0,1968	0,5403	0,0002	1,4939	3,0009	-2,5251	0,4100	0,8574
		$L=0,5$ Con_CRH (α, n y m)	0,1968	0,5403	0,0002	1,4939	3,0009	0,5000	0,4100	0,7124
		RETC_Rosetta	0,0993	0,5375	0,0114	1,4277	0,2996	0,5000	1,1446	0,7192
		RETC_Datos_Textura	0,0670	0,4500	0,0200	1,4100	0,2908	0,5000	0,4500	0,6893
B	31-70 (cm)	$L \neq 0,5$	0,1795	0,5403	0,0009	2,2638	0,5583	-1,3411	0,2700	0,9526
		$L=0,5$ Con_CRH (α, n y m)	0,2424	0,6936	0,0016	3,6023	0,5497	0,5000	0,2700	0,7629
		RETC_Rosetta	0,1105	0,5919	0,0222	1,2859	0,2223	0,5000	2,1933	0,6808
		RETC_Datos_Textura	0,0950	0,4100	0,0190	1,3100	0,2366	0,5000	0,2600	0,6345
C	>70 (cm)	$L \neq 0,5$	0,2424	0,6936	0,0016	3,6023	0,5498	-0,4937	0,0200	0,9952
		$L=0,5$ Con_CRH (α, n y m)	0,3039	0,5995	0,0035	2,7178	0,2469	0,5000	0,0200	0,1892
		RETC_Rosetta	0,1131	0,5480	0,0221	1,2237	0,1828	0,5000	0,6062	0,1941
		RETC_Datos_Textura	0,0680	0,3800	0,0080	1,0900	0,0826	0,5000	0,2000	0,3182

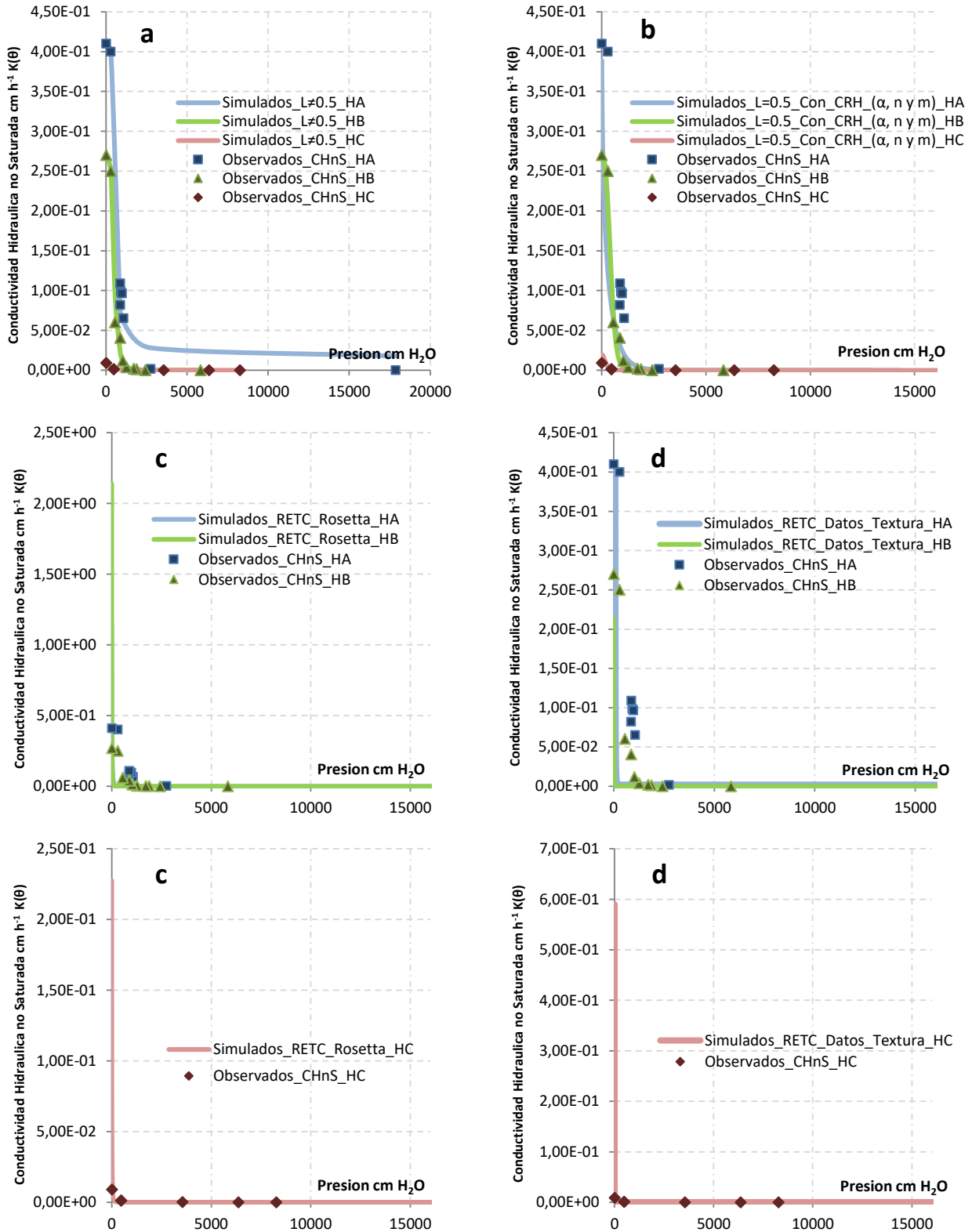


Figura 2-6. Curvas de Conductividad Hidráulica No Saturada obtenidas con el modelo Van Genuchten – Mualem (n,m), usando diferentes técnicas de optimización: a) Simulados_L≠0,5, b) Simulados_L=0,5_Con_CRH(α,n y m), c) Simulados_RETc_Rosetta, d) Simulados_RETc_Datos_Textura.

Tabla 2-7. Consolidado de parámetros: Ks, α, n, m y L, determinados con diferentes técnicas de optimización en el modelo Van Genuchten-Mualem (m=1-1/n) - Conductividad Hidráulica No Sat.

MODELO VAN GENUCHTEN - MUALEM (m=1-1/n)										
Hor	Prof,	Modelo o Técnica Simulada	θ _r	θ _s	α	n	m	λ	K _s	R ²
A	0-30 (cm)	L≠0,5	0,3160	0,6936	0,0025	1,8980	0,4731	-3,4178	0,4100	0,9813
		L=0,5_Con_CRH_(α, n y m)	0,1795	0,5403	0,0009	2,2638	0,5583	0,5000	0,4100	0,7431
		RETC_Rosetta	0,0993	0,5375	0,0114	1,4277	0,2996	0,5000	1,1446	0,7192
		RETC_Datos_Textura	0,0670	0,4500	0,0200	1,4100	0,2908	0,5000	0,4500	0,6893
B	31-70 (cm)	L≠0,5	0,3040	0,5995	0,0035	2,7178	0,2469	-3,0082	0,2700	0,7114
		L=0,5_Con_CRH_(α, n y m)	0,3160	0,6936	0,0024	1,8980	0,4731	0,5000	0,2700	0,6820
		RETC_Rosetta	0,1105	0,5919	0,0222	1,2859	0,2223	0,5000	2,1933	0,6808
		RETC_Datos_Textura	0,0950	0,4100	0,0190	1,3100	0,2366	0,5000	0,2600	0,6345
C	>70 (cm)	L≠0,5	0,3160	0,5995	0,0025	1,8980	0,4731	-2,7137	0,0200	0,9961
		L=0,5_Con_CRH_(α, n y m)	0,3160	0,5995	0,0024	1,8980	0,4731	0,5000	0,0200	0,1915
		RETC_Rosetta	0,1131	0,5480	0,0221	1,2237	0,1828	0,5000	0,6062	0,1904
		RETC_Datos_Textura	0,0680	0,3800	0,0080	1,0900	0,0826	0,5000	0,2000	0,3182

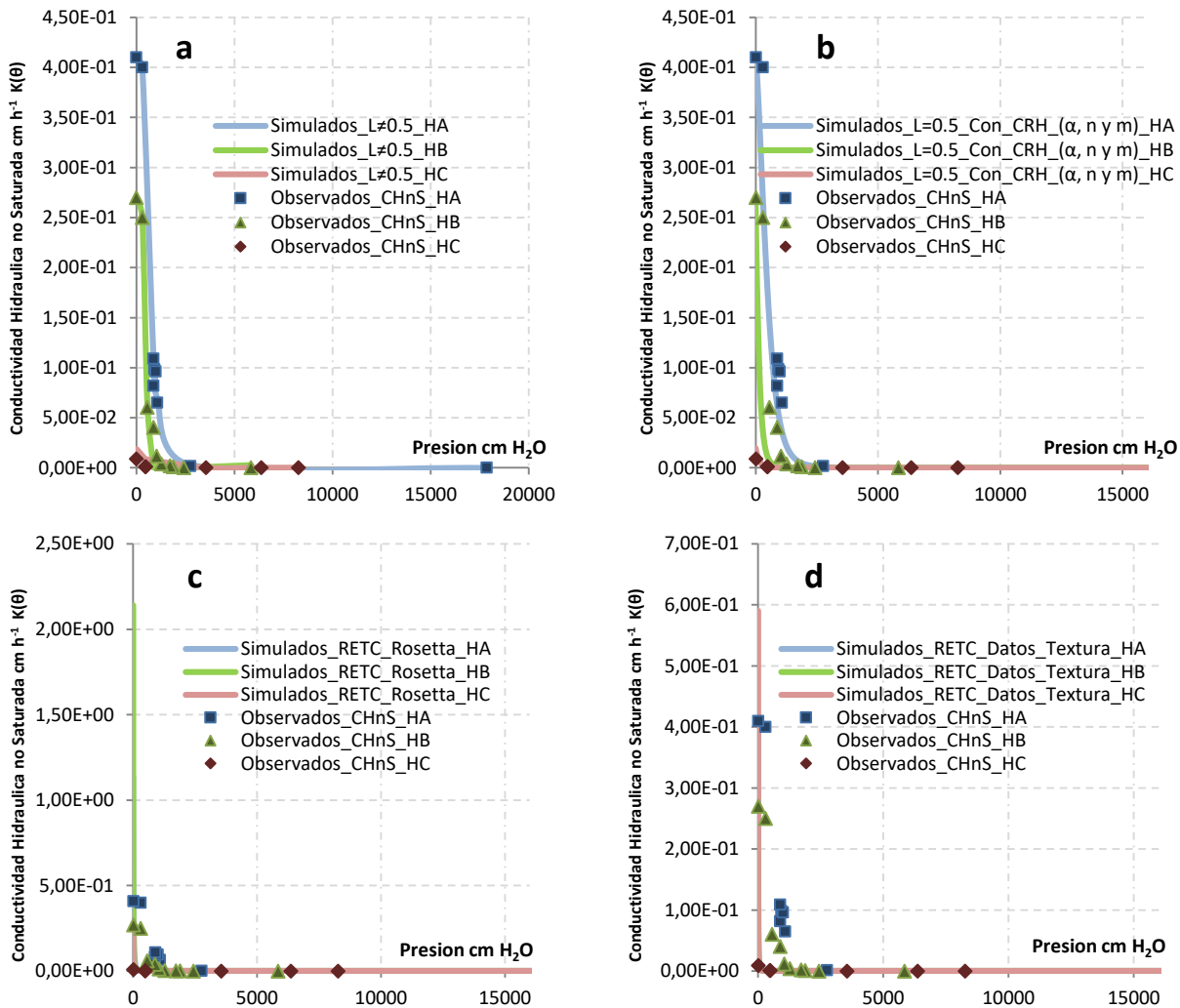


Figura 2-7. Curvas de Conductividad Hidráulica No Saturada obtenidas con el modelo Van Genuchten – Mualem (m=1-1/n), usando diferentes técnicas de optimización: a) Simulados_L≠0,5, b) Simulados_L=0,5_Con_CRH_(α, n y m), c) Simulados_RETC_Rosetta, d) Simulados_RETC_Datos_Textura.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que los mejores valores del coeficiente de determinación R^2 , se obtienen con la técnica de optimización del parámetro L ($L \neq 0,5$), tanto en el modelo de Van Genuchten – Mualem (n,m) como en el modelo Van Genuchten – Mualem ($m=1-1/n$), en los tres horizontes de suelo estudiados. Con respecto a los horizontes A y C, el modelo de Conductividad Hidráulica No Saturada de Van Genuchten – Mualem ($m=1-1/n$) con $L \neq 0,5$, presenta mejores valores de ajuste de los datos simulados con respecto a los datos obtenidos por el método del aire caliente, con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0,85. En contraposición, en el horizonte B el modelo Van Genuchten – Mualem (n,m) con $L \neq 0,5$, es el que presenta los mejores valores del coeficiente de determinación R^2 encontrándose en el orden de 0,95.

En cuanto a los valores del coeficiente de determinación R^2 obtenidos a partir de los valores teóricos de los parámetros que tiene incluidos el software RETC (van Genuchten, et al., 1991) y los calculados a partir del módulo Rosetta (Schaap, et al., 2001) que emplea un algoritmo de redes neuronales dentro de este mismo programa, se observa en términos generales la subestimación de los valores de la curva de conductividad hidráulica no saturada, con valores del coeficiente de determinación R^2 que no superan el 0,72 en el Horizonte A, 0,69 en el Horizonte B y 0,32 en el Horizonte C. Estos resultados del coeficiente de determinación R^2 se justifican en primer lugar, debido a que la base de datos de suelos con la que cuenta el software RETC (van Genuchten, et al., 1991) usa valores de Conductividad Hidráulica Saturada K_s diferentes a los determinados experimentalmente para este tipo de suelos. Esto hace que el proceso de optimización tenga condiciones iniciales diferentes para el parámetro K_s , las cuales tendrán incidencia sobre el proceso de optimización y sobre la respuesta obtenida para los demás parámetros de los modelos Mualem – Van Genuchten (n,m) y ($m=1-1/n$).

En consecuencia, el análisis experimental para la determinación de la conductividad hidráulica saturada del suelo K_s , debe ser tomado como uno de los parámetros de mayor incidencia sobre el análisis del flujo de agua en la zona no saturada. En especial si se considera que el suelo tiene un alto grado de heterogeneidad que puede generar condiciones diferenciales de porosidad sobre las cuales un suelo con una misma textura, presente valores de conductividad hidráulica saturada, lo anterior aunado al efecto de la permeabilidad intrínseca que es uno de los fenómenos físicos asociados al medio que también influyen en los valores de este parámetro.

Complementariamente, hay que resaltar que si bien es cierto que mediante la implementación del módulo Rosetta (Schaap, et al., 2001), que emplea el algoritmo de redes neuronales, es posible tener una aproximación de los valores de los parámetros que describen el modelo de Van Genuchten Mualem, no en todos los casos este mecanismo de cálculo representa de manera acorde el flujo de agua con base en los porcentajes de arenas, limos y arcillas del suelo. De allí es válido precisar, que si bien el mecanismo de cálculo de los parámetros efectivos con el módulo Rosetta, posee una base de datos de suelos norteamericanos sobre los cuales se definen intervalos físicamente válidos para cada una de las condiciones hidrofísicas del suelo. Para el perfil de suelo de la Sabana de Bogotá estudiado, estos valores distan de las condiciones hidrofísicas identificadas, dejando en claro que si bien es posible desde una perspectiva de la textura del suelo establecer una aproximación del comportamiento del flujo de agua, en algunos suelos esta premisa no logra describir dicho fenómeno, ya que el flujo del agua en el medio poroso es una dinámica de múltiples factores está influido por un conjunto de diversos factores físicos, biológicos y químicos, en consecuencia no es posible establecer una relación única entre el flujo de agua y la textura del suelo (Khan 1989).

Tal y como se demostró en el presente documento, en donde los valores de conductividad hidráulica no saturada obtenidos con este algoritmo, distan de los valores experimentales obtenidos para el suelo de la sabana de Bogotá. En términos generales, se observó una subestimación tanto de los parámetros que describen el modelo de Mualem – Van Genuchten como de los valores de conductividad hidráulica no saturada en los tres horizontes de suelo. Esta situación da a conocer que el uso de este tipo de herramientas requiere de la articulación de estrategias complementarias que permitan establecer el intervalo de aplicación y la oportunidad de los valores de los parámetros que suministra este mecanismo. Por ejemplo, verificar las condiciones del contenido volumétrico en saturación θ_s , pueden dar un primer acercamiento a la definición de los parámetros efectivos de los modelos de conductividad hidráulica no saturada, que sean consistentes con la hidrofísica del suelo estudiado y sobre las cuales se puedan realizar predicciones del flujo de agua lo más aterrizadas posibles a la realidad del entorno estudiado. A continuación, en la figura 2-8 se da a conocer el resultado del análisis comparativo de los parámetros obtenidos bajo las cuatro técnicas de optimización empleadas.

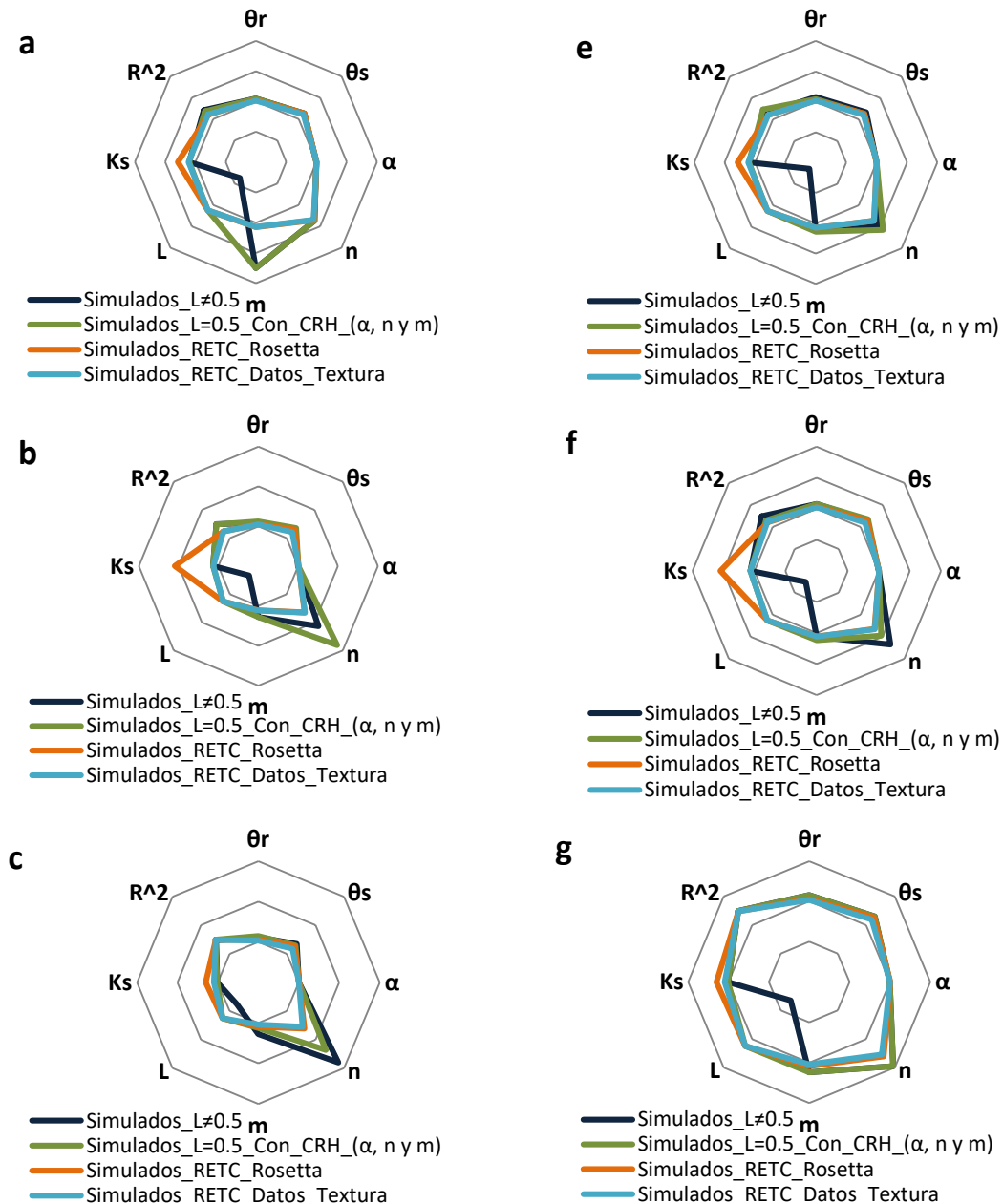


Figura 2-8. Análisis consolidado de los parámetros efectivos obtenidos a partir de los modelos de Conductividad Hidráulica No Saturada Van Genuchten – Mualem (n, m): a) Horizonte A, b) Horizonte B y c) Horizonte C. y Van Genuchten – Mualem ($m=1-1/n$): e) Horizonte A, f) Horizonte B y g) Horizonte C.

El análisis de la variación de estos parámetros presentados en la figura 2-8 indican una clara evolución del modelo Mualem – Van Genuchten hacia las variables K_s , L , m y n . A la luz de las diferentes técnicas implementadas para calcular los parámetros que describen el modelo de Conductividad Hidráulica de Mualem – Van Genuchten, se evidencia que todos los parámetros presentan diferentes grados de variación entre los métodos de Van Genuchten – Mualem (n, m) y Genuchten – Mualem ($m=1-1/n$).

3 Determinación de los parámetros de transporte de nitratos (NO_3^-) en un perfil de suelo perteneciente al agroecosistema de la sabana de Bogotá.

3.1 Resumen

En este estudio se definen y simulan las características del transporte de los nitratos en un perfil de suelo compuesto por tres horizontes perteneciente al agroecosistema de la Sabana de Bogotá. El objetivo es caracterizar los parámetros de transporte que definen el movimiento de los nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada y de forma paralela dar a conocer una primera visión de los riesgos potenciales de contaminación del agua por parte del sector floricultor. La metodología empleada se fundamenta en un análisis descriptivo que usa resultados experimentales para caracterizar los procesos dominantes inmersos en el transporte de los nitratos. La experimentación se basó en la obtención de las curvas de elución, en columnas de suelo sin disturbar bajo condiciones de laboratorio para una sustancia conservativa preparada a partir de una sal de bromuro de potasio (KBr) y la molécula de nitrato (NO_3^-) obtenida mediante una sal de nitrato de potasio (KNO_3), junto con la determinación de las isothermas de adsorción de nitratos (NO_3^-) empleando el método Batch. Posteriormente, se estudiaron los parámetros de transporte de la ecuación de Convección-Dispersión, bajo los modelos Clásico De Equilibrio (CDE) y No Equilibrio Físico (PNE), utilizando el código CXTFIT dentro del programa STANMOD (solución del problema inverso). De los resultados obtenidos se destaca, que el mejor modelo de ajuste para la representación de los parámetros de transporte tanto del trazador como el de los nitratos es el PNE. Dentro del modelo PNE se observa un alto de movilidad de los nitratos asociado a bajos coeficientes de retardo R muy cercanos a 1,0 y coeficientes de Difusión Hidrodinámicos de 0,26 a 0,74 $\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$.

Palabras clave: Contaminación difusa, Nitratos, Dispersión Hidrodinámica, adsorción, simulación matemática y suelos.

3.2 Abstract

This study defines and simulates the transport characteristics of nitrates in a soil profile composed of three horizons belonging to the agroecosystem of the Bogotá savanna. The aim is to characterize the transport parameters that define the movement of nitrates (NO_3^-) in the unsaturated zone and to provide a first overview of the potential risks of water contamination by the flower growing sector. The methodology used is based on a descriptive analysis that uses experimental results to characterize the dominant processes involved in the transport of nitrates. The experimentation was based on the elution or effluent curves obtained in undisturbed soil columns under laboratory conditions for a preservative prepared from a potassium bromide salt (KBr) and the nitrate molecule (NO_3^-) obtained by a potassium nitrate salt (KNO_3) together with the determination of nitrate adsorption isotherms (NO_3^-) using the Batch method. Subsequently, the transport parameters of the Convection-Dispersion equation were studied, under the Classic Equilibrium (CDE) and No Physical Equilibrium (PNE) models, using the CXTFIT code within the STANMOD software (inverse problem solution). From the obtained results, it is highlighted that the best adjustment model for the representation of the transport parameters of both tracer and nitrate is the PNE. Within the PNE model, a high degree of nitrate mobility is observed associated with low R delay coefficients close to 1.0 and Hydrodynamic Diffusion coefficients of 0,26 to 0,74 $\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$.

Keywords: *Diffuse pollution, nitrates, hydrodynamic dispersion, adsorption, mathematical simulation and soils.*

3.3 Materiales y métodos

La metodología empleada para la determinación de los parámetros de transporte, se llevó a cabo a partir de ensayos experimentales de lixiviación en columnas de suelo sin disturbar (OCDE, 2004). En estos ensayos, se obtuvieron las curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*) tanto para el trazador (Br^-) y como para el soluto de estudio (NO_3^-), representando la concentración relativa (C/C_0) como variable dependiente y el tiempo del ensayo como variable independiente. La variable independiente, también se representó usando el criterio adimensional volumen de poros (VP), calculado con la velocidad real de poros⁴ (V_r) [L T^{-1}], el tiempo (t) [T] y la longitud de la columna de suelo (L) [L]. Inicialmente las columnas de suelo sin disturbar de 8" de diámetro y 20 cm de longitud, se saturaron por capilaridad, posteriormente siguiendo los lineamientos de metodológicos de Rossi, et al. (2007) y Chen, et al., (2007), se lavaron las columnas con agua destilada hasta que los nitratos presentes en el suelo se eludieron por completo de las columnas, verificando que la concentración del lixiviado fuera menor a $0,1 \text{ mg L}^{-1}$. Lo anterior con el fin de evitar interferencias en el ensayo de lixiviación por concentraciones de fondo de Nitratos.

Seguidamente, se realizaron los ensayos de lixiviación mediante la inyección de un flujo continuo de agua (*Step Input*) con un simulador de lluvia acoplado a una bomba peristáltica. En el desarrollo de estos ensayos se mantuvieron condiciones de insaturación del suelo con contenidos de humedad volumétricos inferiores a $0,6000 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y con velocidades inferiores a la de saturación para cada uno de los horizontes de suelo: horizonte A: $0,3965 \text{ cm h}^{-1}$ y b) horizonte B: $0,2613 \text{ cm h}^{-1}$. De forma paralela, el flujo de agua aplicado, contenía una solución de CaCl_2 0,01M con una concentración de $151,05 \text{ mg L}^{-1}$ de Bromuro (Br^-) y una concentración de $200,35 \text{ mg L}^{-1}$ de Nitrato (NO_3^-). Las concentraciones de Bromuro (Br^-) y de Nitrato (NO_3^-) fueron preparadas a partir de sales de Bromuro de Potasio (KBr) y Nitrato de Potasio (KNO_3). Para cada uno de los horizontes de suelo, se recolectaron muestras del lixiviado en viales con un volumen de 5 ml, en intervalos de tiempo de 1 hora entre muestra y muestra. Luego estos lixiviados, fueron medidos por cromatografía iónica en el laboratorio de ingeniería ambiental de la universidad Nacional de Colombia APHA, (2017).

⁴ La velocidad real de poros se define como el cociente entre la velocidad de Darcy y el contenido de humedad volumétrica del suelo.

La descripción de la dinámica del transporte de solutos en la zona no saturada del suelo, se realizó a partir de la ecuación de Convección Dispersión (Lapidus y Amundson, 1952). Bajo los modelos: a) Clásico de Equilibrio (CDE) Ecuación 3-1 y b) No equilibrio de origen físico (PNE) en donde la transferencia del soluto entre las dos regiones puede ocurrir por difusión, mediante un proceso cinético de primer orden Ecuación 3-2.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \mu_{liq} C \quad R = 1 + \frac{\rho K d}{\theta}$$

Ecuación 3-1. Modelo de clásico de Equilibrio – CDE.

Donde R es el coeficiente de retardo, adimensional t es el tiempo [T], x es la profundidad [L], θ el contenido volumétrico en agua [$L^3 L^{-3}$], C es la concentración de la fase líquida [$M T^{-1}$], v la velocidad media de poro [$L T^{-1}$], D el coeficiente de dispersión hidrodinámico [$L^2 T^{-1}$] y μ_{liq} el coeficiente de degradación de primer orden para la fase líquida [T^{-1}] el coeficiente de adsorción [$M L^{-1}$] y ρ es la densidad del suelo [$M L^{-3}$].

$$\begin{aligned} \theta_m R \frac{\partial C_m}{\partial t} &= \theta_m D \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial C_m}{\partial x} - \mu_{liq} C_m - \alpha (C_m - C_{im}) \\ \theta_{im} R_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} &= \alpha (C_m - C_{im}) - \mu_{liq} \theta_{im} C_m \\ \beta &= \frac{\theta_m + f \rho K d}{\theta + \rho K d} \quad \omega = \frac{\alpha L}{\theta v} \end{aligned}$$

Ecuación 3-2. Modelo de no Equilibrio de origen físico – PNE.

Donde θ_m y θ_{im} es el contenido volumétrico en agua de la fase móvil e inmóvil [$L^3 L^{-3}$]. C_m y C_{im} son las concentraciones de soluto para la región móvil e inmóvil [$M L^{-3}$], R_m y R_{im} los coeficientes de retardo para la fase móvil e inmóvil, y α sería el coeficiente de transferencia de masa entre la fase móvil e inmóvil (T^{-1}). β es el porcentaje de la fracción móvil respecto a la fracción total: $0 < \beta < 1$, cuando $\beta = 1$, no existen diferencias entre la región móvil e inmóvil, es decir estamos en el caso de CDE. f es la fracción de sitios de adsorción en contacto con la región móvil. ω es un parámetro relacionado con la difusión entre la fase móvil e inmóvil: $0 < \omega < 100$, cuando los valores de α son muy elevados, no existen diferencias entre la fase móvil e inmóvil y el modelo de transporte sería CDE. Por último, el término μ_{liq} es el coeficiente relacionado con la degradación en la fase móvil.

3.3.1 Determinación de los parámetros de transporte

La determinación de los parámetros de transporte, se realizó a partir de un proceso de optimización no lineal con base en los resultados experimentales capturados en los ensayos de lixiviación para condiciones de flujo continuo (*Step Input*), definidos para las curvas de elución tanto el trazador de bromuros (Br^-) como para el anión de la molécula de Nitratos (NO_3^-). Para tal fin se usó el algoritmo CXTFIT (Toride et al., 1995) del software STANMOD®. Este algoritmo resuelve el problema inverso minimizando la función objetivo SSQ y ajustando las soluciones matemáticas de los modelos teóricos de transporte: Clásico de Equilibrio CDE y de No Equilibrio de origen Físico PNE a los resultados experimentales. El algoritmo CXTFIT se fundamenta en un proceso iterativo de convergencia que encuentra los parámetros de los modelos de transporte, usando la técnica de los mínimos cuadrados ponderados que se fundamenta en los lineamientos del algoritmo Marquardt (1963).

El algoritmo linealiza las ecuaciones de los modelos de transporte, mediante la aplicación de los principios de superposición y linealidad, conceptualizados sobre las condiciones de borde, condiciones iniciales y condiciones de producción del soluto. Los pasos mencionados anteriormente conducen a que el proceso de iteración sea estable y la solución de la función objetivo tenga un valor óptimo y único. Las condiciones iniciales, el desarrollo del algoritmo y las soluciones analíticas están detalladas en el manual del programa CXTFIT (Toride et al., 1995). En dicho proceso, se evaluaron los parámetros de ajuste de los modelos: a) clásico de equilibrio – CDE y b) Modelo de no equilibrio de origen físico – PNE, considerando una inyección de flujo continuo (step input), condiciones de sistema semi-infinito y el proceso de degradación solo en la fase líquida.

3.3.2 Isotermas de Adsorción:

El análisis experimental de la dinámica de adsorción de nitratos, se realizó empleando las técnicas de adsorción “Batch method”, sugerida por el protocolo propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2000), junto con los lineamientos sugeridos para la elaboración de ensayos multiconcentración por Langeron, et al., (2014) y Mosquera, et al., (2016). Estos ensayos, se realizaron por triplicado para los tres horizontes identificados en el perfil de suelo. Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas en malla de 2mm.

Para la determinación de las isotermas de adsorción, se prepararon cinco concentraciones de prueba con una sal de Nitrato de Potasio (KNO_3), en una solución de CaCl_2 0,01M. El intervalo de concentración fue de 65 mg L^{-1} a 185 mg L^{-1} , de acuerdo con la dosis de fertirriego aplicada al cultivo (130 mg L^{-1} de NO_3^-), con el fin de obtener un análisis lo más aproximado a las condiciones reales del proceso productivo. Todos los experimentos se ejecutaron con muestras de nitratos (NO_3^-) y blancos con suelo en CaCl_2 0,01 M. La agitación de las muestras se realizó de manera mecánica a 150 rpm con el Agitador Orbital: Lab-Line Orbit Environt Shaker, durante 24 horas (Adauto, 2017. Y, Kondracki y Camargo, 2005) a una temperatura constante de 20°C hasta alcanzar el equilibrio entre la solución y el suelo. Las ecuaciones 3-3 y 3-4 muestran los modelos de Langmuir y Freundlich.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{\max} K_{\text{ads}}} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_{\max}}$$

Ecuación 3-3. Modelo de Langmuir

Donde K_{ads} es la Constante de equilibrio, C es la Concentración en el equilibrio de adsorción y q_{\max} es la concentración máxima de adsorción del soluto.

$$\text{Log}(q) = \text{Log}(k) + n\text{Log}(C)$$

Ecuación 3-4. Modelo de Freundlich

Donde K y n son constantes de Freundlich las cuales representan la capacidad de adsorción y la intensidad de adsorción respectivamente y C es la solución acuosa del adsorbato y la concentración adsorbida.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Curvas de Elución

Los resultados experimentales obtenidos para las curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*) son acordes con las curvas tipo S definidas para ensayos de infiltración de flujo continuo (*Step Input*). En las figuras 3-1 y 3-3 se presentan, tanto los resultados para el transporte no reactivo (trazador de bromuro) como para el transporte del nitrato. En la figura 3-1, se relacionan los resultados de la curva de elución del ion bromuro (Br), que permiten determinar el coeficiente de dispersión hidrodinámico D, usando el algoritmo CXTFIT del software STANMOD. Luego en la figura 3-3, se muestran los resultados de la curva de elución para el ion nitrato (NO_3^-), empleados para calcular el coeficiente de retardo R. Con base en los valores de R se determinaron los Kd del ensayo de lixiviación y estos se compararon con los Kd obtenidos en las isotermas de adsorción del método Batch.

- **Curvas de elución bromuro (Br) (*Breakthrough Curves - BTC*) transporte No reactivo**

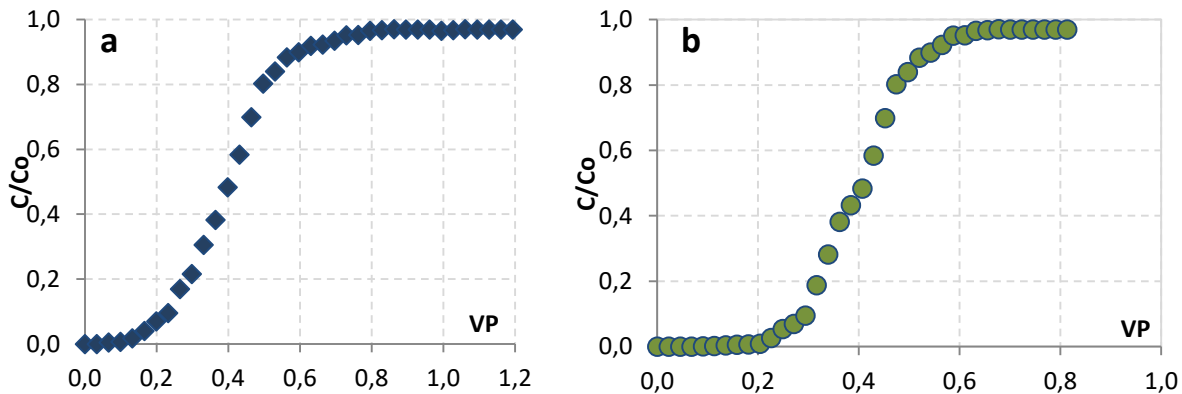
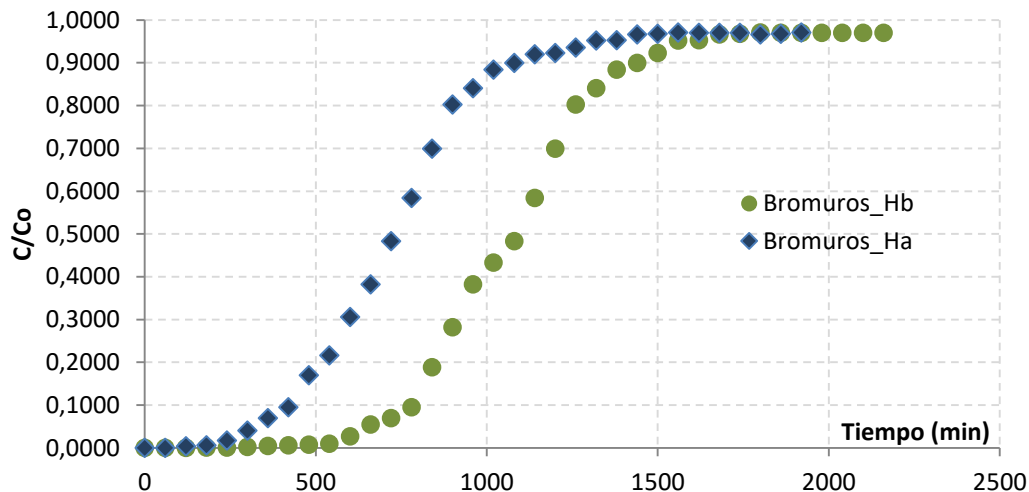


Figura 3-1. Resultados experimentales de la curva de elución (BTC) para el ion bromuro (Br) en los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.

El balance de masa de bromuro dio un porcentaje de recuperación cercano al 97,0% tanto en el Horizonte A como en el Horizonte B, este resultado se encuentra en sincronía con lo esperado ya que el bromuro es un elemento traza no reactivo (Köhne et al., 2011). El tiempo pico de elución en el primer horizonte, se alcanzó a 1,2 VP y en el segundo horizonte a 0,82 VP. Esta diferencia en el pico de elución entre los dos horizontes, se puede asociar a las diferencias en el contenido de arcillas los cuales tienen un alto nivel de incidencia sobre la el componente advectivo y por ende limitando el flujo del agua en la zona no saturada.

- **Optimización de parámetros curvas de elución bromuro (Br) (*Breakthrough Curves - BTC*) transporte No reactivo.**

Con base en estos resultados experimentales, a continuación en la tabla 4-2 se presentan los resultados de estimación de los parámetros de transporte para el elemento trazador, considerando los modelos: a) Clásico De Equilibrio (CDE) y b) No Físico de Equilibrio (PNE). En cada uno de estos modelos, se determinó el coeficiente de dispersión hidrodinámico D, mediante el proceso de optimización no lineal del algoritmo CXTFIT (Toride et al., 1995). El valor de la velocidad media de agua en los poros V, se calculó a partir de la velocidad de Darcy y el contenido de humedad volumétrica del ensayo de lixiviación para cada uno de los dos horizontes de suelo: $0,59 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y $0,57 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para los horizontes A y B respectivamente. Los valores del coeficiente de retardo R, se asignaron con un valor de 1 tomando en consideración la premisa de conservación del trazador tal cual y como lo establecen Stephenson, G. et, al. (2007) y Huertas, J. (2014).

Tabla 3-1. Resultados del proceso de optimización no lineal de las curvas de lixiviación de Bromuros (Br) en los horizontes de suelo.

Parámetro	Unidad	Horizonte A		Horizonte B	
		CDE	PNE	CDE	PNE
D*	$\text{cm}^2 \text{ h}^{-1}$	28,77	0,74	14,83	0,2646
v**	cm min^{-1}	0,0110		0,00728	
R***	--	1		1	
β	--	--	0,4081	--	0,4060
ω	--	--	0,02556	--	0,01792
MSE	--	0,439E-02	4,78E-04	6,13E-02	3,54E-04
R ²	--	0,7203	0,9971	0,6620	0,9981

*Valor Estimado por Programa. **Valor Calculado a partir del contenido de Humedad Volumétrica.

***Valor Establecido.

Al revisar los coeficientes obtenidos del MSE, definidos en el software STANMOD, se observa que el modelo que mejor se ajustó en la descripción del transporte del bromuro es el PNE tal y como se observa en la figura 3-2. Gráficamente es posible apreciar que el modelo CDE subestima el pico máximo de concentración en los dos horizontes de suelo estudiados. En el caso del horizonte A se observa una subestimación del pico en un 0,17 C/Co y en el Horizonte B de cerca 0,27 C/Co , con respecto a los valores de concentración encontrados en el ensayo de lixiviación. Desde el punto de vista del coeficiente R^2 , el modelo PNE presenta valores de ajuste del orden de 0,99 para los dos horizontes de suelo, contrastando con los valores de R^2 definidos para el modelo CDE, los cuales se encuentran en el orden de 0,7203 y 0,6620 para el horizonte A y B respectivamente.

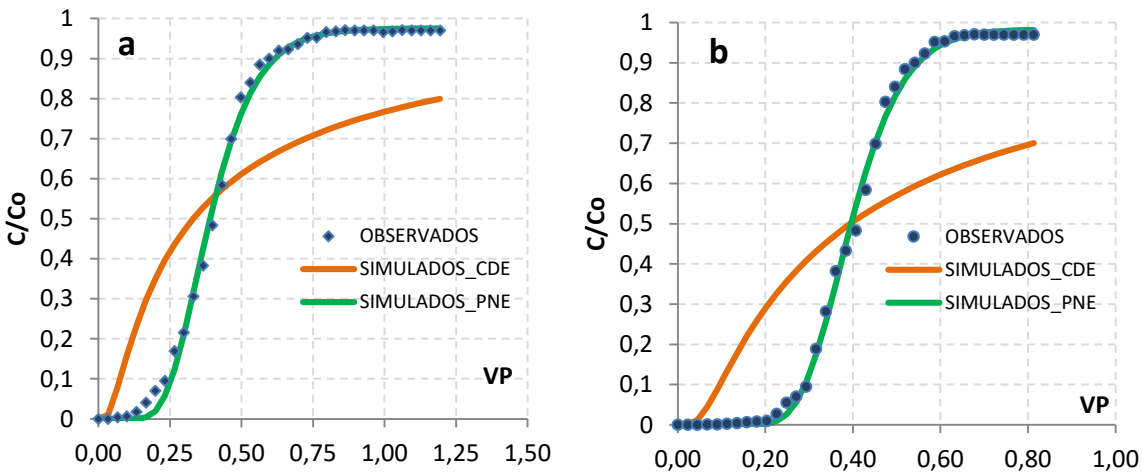


Figura 3-2. Comparación de los datos experimentales obtenidos en las curvas de elución del ion bromuro (Br^-) (*Breakthrough Curves - BTC*) con los datos de las curvas obtenidas con los métodos CDE y PNE para los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.

Los resultados presentados en la tabla 3-1 y la figura 3-2, evidencian que en el transporte del bromuro se tiene la existencia dos regiones de agua en las columnas de suelo: móvil e inmóvil, las cuales interactúan entre si y definen la dinámica del transporte del trazador. El análisis de flujo mediante la zona móvil, asociada a los macroporos del suelo, explica la diferencia entre el modelo CDE y PNE. Principalmente debido a que el modelo CDE contempla desde su conceptualización solo el flujo de agua en la zona inmóvil (microporos), lo cual no permite representar los tiempos de respuesta obtenidos en las curvas de elución. Los resultados del coeficiente β , indican para los dos horizontes, que tan solo cerca del 40% del agua está inmersa en el movimiento transversal del trazador, junto con bajas tasas de transferencia de masa entre las regiones móvil e inmóvil asociadas a coeficientes ω en el orden de 0,025 (Horizonte A) y 0,017 (Horizonte B).

• **Curvas de elución Nitrato (NO_3^-) (Breakthrough Curves - BTC) transporte del Solute**

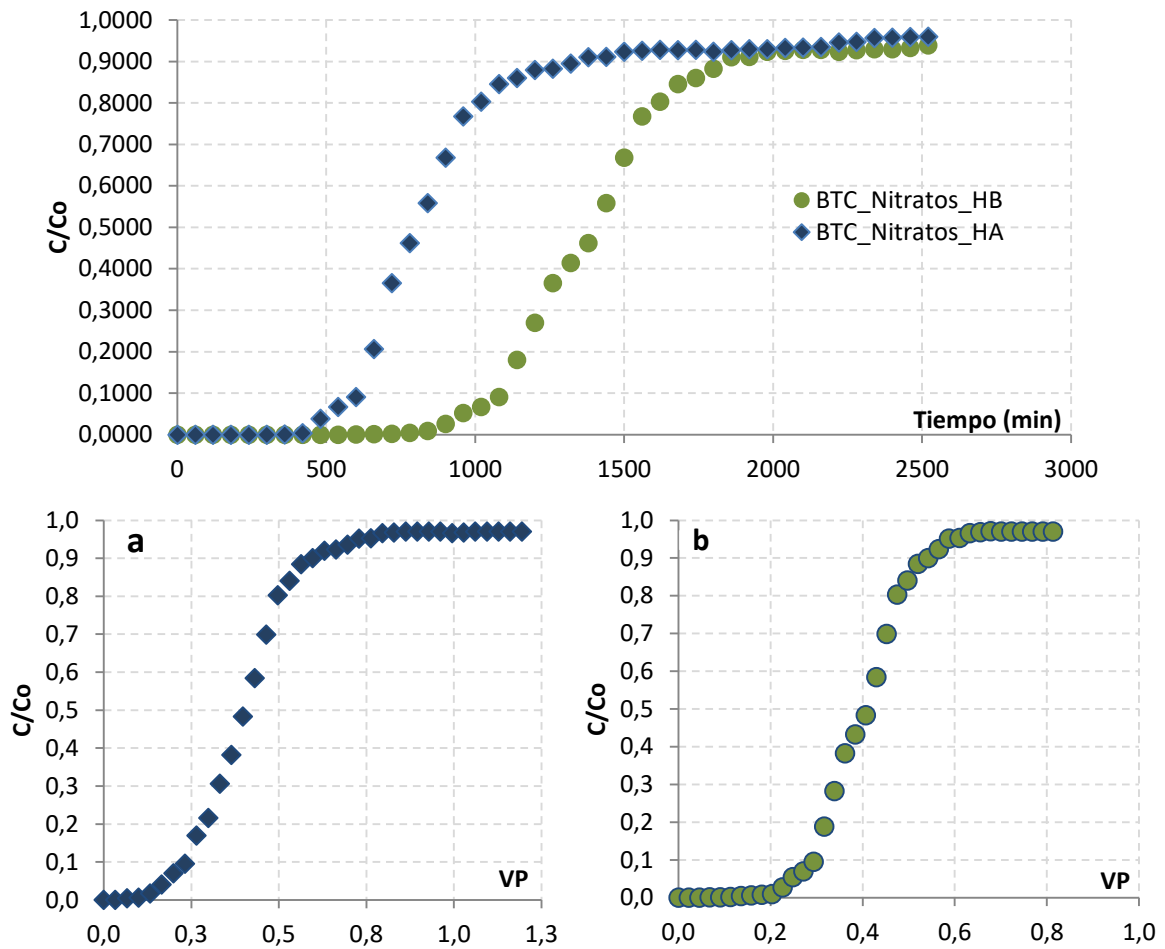


Figura 3-3. Resultados experimentales de la curva de elución para el ion Nitrato (NO_3^-) (Breakthrough Curves - BTC) en los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.

El balance de masa de nitrato dio un porcentaje de recuperación cercano al 93,5% en el Horizonte A, con un pico de elución 1,4 VP. Para el segundo horizonte u horizonte B el porcentaje de recuperación de nitratos fue del orden de 92.8% y un pico de elución de 0,8 VP. Estos resultados que indican el alto grado de movilidad de los nitratos (NO_3^-) en los dos horizontes objeto de estudio, a tal punto que tan solo cerca del 7% de la masa total de nitrato (NO_3^-) es retenida por procesos fisicoquímicos al interior del suelo. Es posible que la interacción de este tipo de compuestos con los contenidos de materia orgánica, la actividad microbológica, la capacidad de intercambio catiónico y el pH entre otros (Khan, 1989), expliquen estos porcentajes de retención del soluto, toda vez que las propiedades de cada suelo en particular pueden limitar o potenciar la disponibilidad de los nitratos y por ende el movimiento de los mismos en la zona no saturada.

- **Optimización de parámetros curvas de elución Nitratos (NO_3^-) (*Breakthrough Curves - BTC*).**

En la tabla 3-2 se presentan los resultados de estimación de los parámetros de transporte para la molécula de nitrato, considerando los modelos CDE y PNE. En el desarrollo de este proceso de optimización no lineal con el algoritmo CXTFIT, se calcularon los coeficientes de retardo (R) para los dos horizontes de suelo. Para tal fin, se tomó como precedente la información de los valores de los parámetros de dispersión hidrodinámica (D) y velocidad media de agua en los poros (V) obtenidos en la curva de elución del trazador de bromuros (Br^-) (*Breakthrough Curves - BTC*). De forma paralela para el modelo PNE adicionalmente se tomaron los valores de los parámetros β y ω .

Tabla 3-2. Resultados del proceso de optimización no lineal de las curvas de lixiviación de Nitratos (NO_3^-) en los horizontes de suelo.

Parámetro	Unidad	Horizonte A		Horizonte B	
		CDE	PNE	CDE	PNE
D***	$\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$	28,77	0,74	14,83	0,2646
v**	cm h^{-1}	0,0110		0,00728	
R*	--	1,08	1,14	1,44	1,31
B	--	--	0,4081	--	0,4060
ω	--	--	0,0255	--	0,0179
f	--	--	0,5748	--	0,5698
α	día^{-1}	--	0,0122	--	0,0056
Kd****	--	0,0409	0,0613	0,2418	0,1680
MSE	--	4,74E-02	1,35E-03	5,82E-02	7,60E-04
R ²	--	0,7103	0,9917	0,4793	0,9950

*Valor Estimado por Programa. **Valor Calculado por condiciones de Humedad Volumétrica.

Valor Establecido *Valor calculado bajo la condición de humedad volumétrica del ensayo.

Al revisar los resultados obtenidos por los métodos CDE y PNE, aplicados a la determinación de los parámetros de transporte de nitrato (NO_3^-), se observa que al igual que el trazador de bromuros (Br^-) el mejor modelo de ajuste es el PNE con valores de R^2 superiores a 0,99 y con resultados del MSE en el orden de $1,35\text{E}^{-03}$ y $7,60\text{E}^{-04}$ para el horizonte A y B respectivamente. De los resultados de la tabla 4-3, se observa que los valores del coeficiente de retardo R determinados en el modelo PNE, muestran valores muy cercanos a 1,0 con resultados de 1,14 para el horizonte A y 1,34 para el horizonte B, evidenciando una débil adsorción de las moléculas de Nitratos (NO_3^-) en los horizontes objeto de estudio.

Al contrastar los resultados obtenidos para el coeficiente de dispersión hidrodinámica (D) del modelo PNE, con estudios preexistentes como los de Mishra B.K. et al. (1989), Rossi, et al. (2007) y Chen, X. et al. (2007), se observa que los valores encontrados en esta investigación difieren con los reportados por dichos autores. Estas diferencias, se pueden asociar a la heterogeneidad de los suelos evaluados, principalmente a las diferentes condiciones de las propiedades físico químicas de los suelos, las cuales hacen que se potencie o limite el transporte de los solutos a través de la zona no saturada. Generando así que los resultados discrepen entre uno y otro estudio debido a los efectos particulares que pueden causar este tipo de propiedades del suelo. Trabajos como los desarrollados por Guymon, (1994), Stephens, (1996) y Doménico, et al. (1998) despliegan hipótesis similares, en donde el análisis del suelo requiere de un múltiple conjunto de factores o fenómenos físicos específicos que, en ocasiones no son posibles de representar bajo las simplificaciones que tienen los algoritmos o los modelos de simulación. A continuación en la figura 3-4 se presenta de manera gráfica los resultados de los modelos CDE y PNE con base en los resultados experimentales.

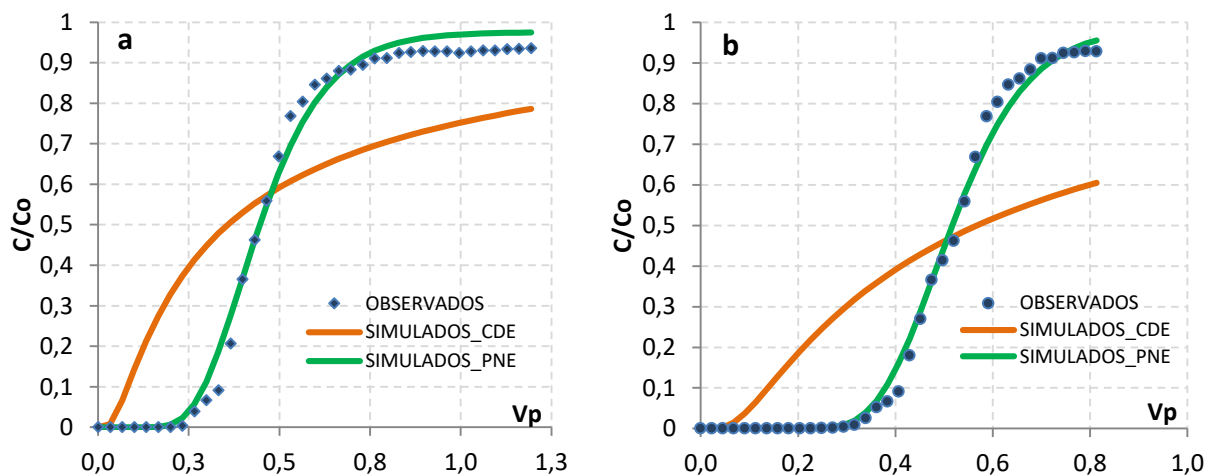


Figura 3-4. Comparación de los datos experimentales obtenidos en las curvas de elución del ion nitrato (NO_3^-) (*Breakthrough Curves - BTC*) con los datos de las curvas obtenidas con los métodos CDE y PNE para los dos horizontes de suelo. a) Horizonte A y b) Horizonte B.

Las curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*) presentadas en la figura 3-4, muestran que para el horizonte A el pico máximo de concentración se encuentra a los 1,25 VP, mientras que para el horizonte B el pico de máxima concentración ocurrió por debajo de 1,0 VP, a los 0,8 VP. Con respecto a los modelos de transporte evaluados: CDE Y PNE, se aprecia que el modelo CDE subestima el pico máximo de concentración en los dos horizontes de suelo estudiados.

Esta subestimación del pico de elución en el modelo CDE se nota de manera más marcada en el horizonte B, en donde el pico máximo tan solo logra alcanzar valores de hasta 0,6 C/Co, aun cuando los datos observados se encuentran en el orden de 0,92 C/Co. Al igual que en el horizonte B, el horizonte A también presenta esta misma tendencia de subestimación del pico de elución, sin embargo esta diferencia es menos marcada con respecto a los datos observados, toda vez que el modelo CDE alcanza valores del pico máximo en el orden de 0,8 C/Co. Estas diferencias en la estimación de los picos de elución por el modelo CDE, se encuentra acordes con los bajos coeficientes de correlación de R^2 de 0,71 en el horizonte A y 0,47 en el horizonte B.

En contraposición a lo anterior, el modelo PNE presentó mejores valores de ajuste del coeficiente R^2 superiores a 0,99 para los dos horizontes de suelo asociados a valores más bajos de la función objetivo MSE de $1,35\text{E}^{-03}$ en el horizonte A y $7,60\text{E}^{-04}$ en el horizonte B. En este orden de ideas, al igual que con los resultados del trazador de bromuros (Br^-) el modelo PNE es el mejor modelo que describe el transporte de los nitratos (NO_3^-) en los suelos objeto de estudio. De los parámetros efectivos que describen el modelo PNE, los valores del parámetro β en el orden de 0,40, para los dos horizontes de suelo, indican que en el transporte del ion nitrato existe una fuerte interacción del flujo entre la zona móvil e inmóvil, prevaleciendo el movimiento del fluido en esta última zona. Estos resultados coinciden con los obtenidos en ión bromuro y se encuentran claramente en sincronía con el alto contenido de microporos de los horizontes de suelo estudiados (Tabla 1-3) y sobre los cuales está definido el flujo en la zona inmóvil. Al analizar los valores de f se encuentra que el transporte del ion nitrato tanto en el horizonte A como en el horizonte B, está influenciado por la fracción de adsorción de dominios instantáneos de acuerdo con los valores de $f > 0,5$ encontrados en los dos horizontes de suelo.

Los bajos valores de α obtenidos denotan una baja tasa de cinética de adsorción de sitio de adsorción Tipo II, en la que predomina la adsorción instantánea con tiempos de residencia hidrodinámica ω relativamente bajos y coeficientes de retardo muy cercanos a 1,0. Este último aspecto, denota el alto grado de movilidad del ion nitrato y la poca incidencia de los fenómenos de adsorción entre la interfaz suelo agua, en donde sumado a los procesos de exclusión aniónica por la carga negativa de las partículas del suelo (Schulin et al., 1987), hacen que los nitratos tengan una alta movilidad.

3.4.2 Isotermas De Adsorción

En las figuras 3-5 a 3-7, se presenta de manera gráfica los resultados de las isotermas de adsorción, ajustados a los modelos de Langmuir y Freundlich, para los tres horizontes que componen el perfil de suelo estudiado. En términos generales, los niveles de adsorción hallados fueron muy bajos, observándose que el nitrato (NO_3^-) tuvo una mayor adsorción en el más profundo: horizonte C, mientras que en el horizonte más superficial la adsorción de esta molécula fue menor.

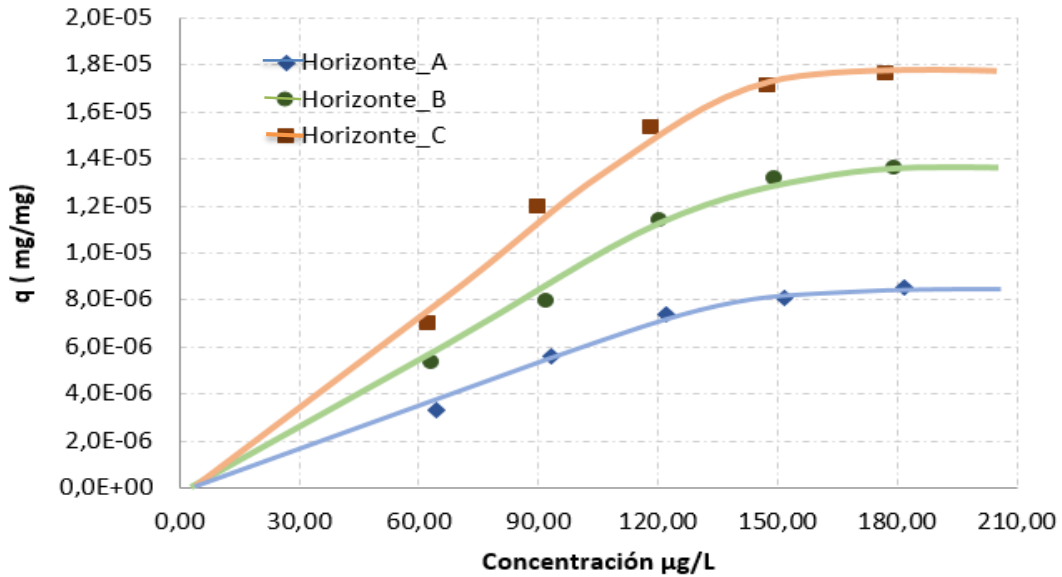


Figura 3-5. Resultados experimentales de las isotermas de adsorción para los horizontes de suelo estudiados.

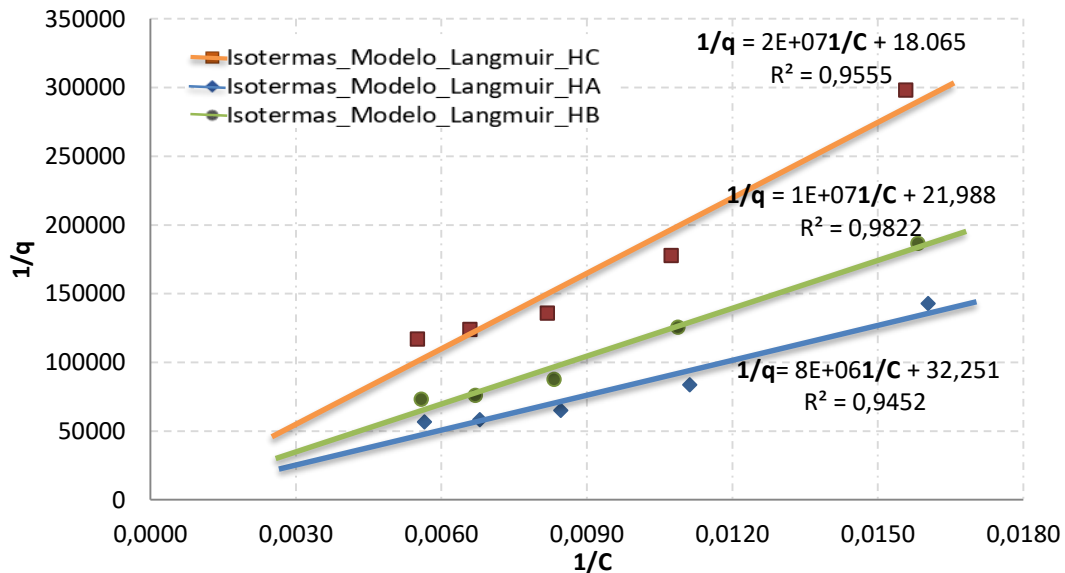


Figura 3-6. Resultados experimentales de las isotermas de adsorción para los horizontes de suelo estudiados - Modelo de Langmuir

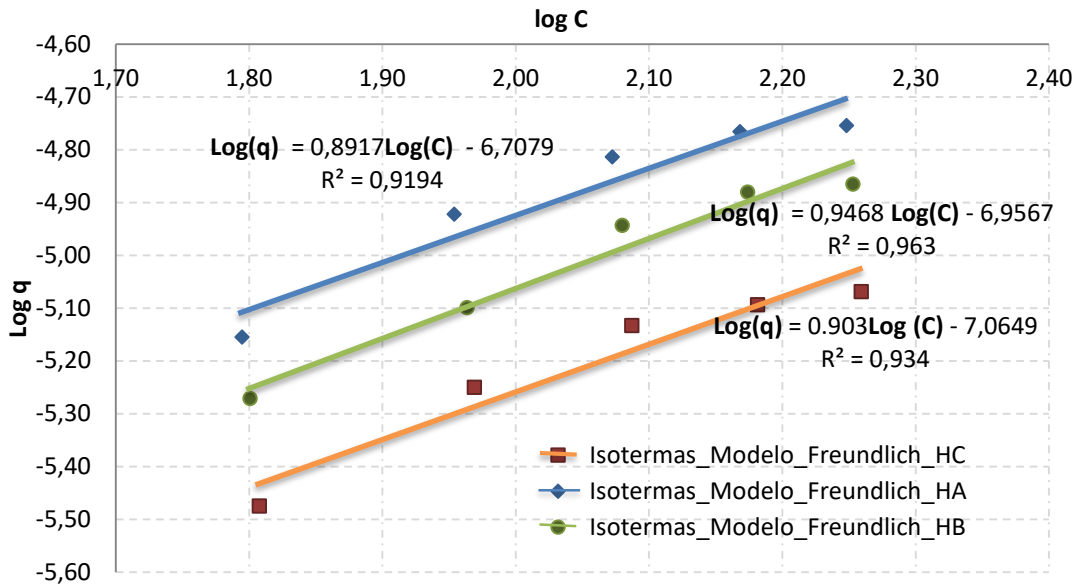


Figura 3-7. Resultados experimentales de las isotermas de adsorción para los horizontes de suelo estudiados - Modelo de Freundlich.

El análisis de las isotermas bajo los modelos de Langmuir y Freundlich, indican que el mejor modelo de ajuste, de acuerdo con los valores del coeficiente de correlación R^2 , es el modelo de Langmuir, tal y como se evidencia en los resultados presentados en la tabla 3-3. Esto significa que la proporción del compuesto remanente en la solución y la adsorbida en el sólido, cambia a medida que aumenta la concentración hasta alcanzar una capacidad máxima de absorción. La no linealidad de las isotermas indica que los sitios de adsorción disponibles se van saturando a medida que aumenta la disponibilidad del soluto absorbido hasta la saturación (Weber y Miller, 1989).

Tabla 3-3. Resultados de los coeficientes de adsorción de nitratos (NO_3^-) K_d y K_n calculados bajo los modelos de Langmuir y Freundlich.

Parámetro	Notación	Unidad	Horizonte		
			A (0-30 cm)	B (31-70 cm)	C (>70cm)
Materia Orgánica	MO	%	5,70	2,40	0,34
Contenido de Arcillas	CA	%	39,48	56,68	78,84
Potencial de Hidrogeno	pH	--	5,4	5,2	4,6
Método Langmuir	K_d	L kg^{-1}	0,9	2,19	4,03
	R^2	--	0,9952	0,9822	0,9452
	q_{max}^*	$\frac{\text{mg NO}_3}{\text{mg Suelo}^{-1}}$	0,0553	0,0454	0,0310
Método Freundlich	K_d	L kg^{-1}	0,08	0,11	0,19
	R^2	--	0,9343	0,963	0,9154

* q_{max} es la capacidad máxima de adsorción del suelo con respecto al ion nitrato.

El ajuste del modelo de Langmuir fue el que mejor explicó la relación existente entre las concentraciones de nitratos en la solución de equilibrio y la adsorbida por el suelo con coeficientes R^2 superiores con respecto al modelo de Freundlich. Esta relación en los tres horizontes de suelo presenta bajos coeficientes de adsorción K_d que oscilan entre 0,90 y 4,03 L kg⁻¹. Considerando los resultados obtenidos en la figura 3-5, las isothermas se clasificaron como tipo-L (Giles et al., 1974). Investigaciones del proceso de adsorción de nitratos sobre suelos de la provincia de Almería (Castillo, 1994), encontraron que el mejor modelo que describe el proceso de adsorción de este tipo de compuestos es el modelo de Langmuir con valores de R^2 superiores a 0,99 y asociando las tasas de adsorción a la fracción orgánica que es la principal responsable de este proceso, producto de la interacción de las cargas positivas de los coloides con las cargas negativas del anión de NO_3^- .

Al visualizar los resultados de adsorción relacionados en la tabla 3-3 con respecto a los valores de q_{max} , se observa que los tres horizontes del perfil de suelo estudiado presentan bajas capacidades máximas de adsorción inferiores a 0,0553 mg NO_3^- mg suelo⁻¹. Estas bajas tasas de adsorción del anión de nitratos en los horizontes de suelo estudiados, se pueden explicar a la luz de diferentes factores: en primer lugar, considerando que a condiciones de $\text{pH} > 4,0$: 5,4 (HA), 5,2 (HB) y 4,6 (HC), predominan en los suelos las cargas iónicas negativas, lo cual hace que se repelan las moléculas iónicas de esta misma carga, en este caso la molécula de Nitratos (NO_3^-). En segundo lugar, de acuerdo con la información química y mineralógica reportada en el Levantamiento agrológico del Centro Agropecuario Marengo, IGAC et al., (2014), se puede inferir que la presencia de óxidos de hierro y caolinita, pueden explicar la adsorción de este tipo de iones en los tres horizontes del perfil de suelo estudiado, toda vez que estos compuestos pueden generar diferentes interacciones iónicas sobre los aniones presentes en solución, tal cual y como lo establecen investigaciones como la de Gatti, et al., (2015) en las que se encontraron diferentes porcentajes de remoción de nitratos (NO_3^-) en agua, a partir de fracciones mineralógicas de arcillas modificadas. Es válido aclarar que este argumento, es tan solo una posible relación de causalidad que explique el fenómeno de adsorción de nitratos, ya que tal y como establece Khan, (1989), los porcentajes de retención del soluto, dependerán de propiedades fisicoquímicas del suelo tales como los contenidos de materia orgánica, la actividad microbiológica, la capacidad de intercambio catiónico y el pH entre otros.

- **Análisis de los resultados de Kd obtenidos por el método Langmuir y la Optimización de parámetros de las curvas de elución de Nitratos (*Breakthrough Curves - BTC*)**

El objetivo de este apartado es dar a conocer un breve análisis de los resultados de los coeficientes Kd obtenidos por el modelo de Langmuir (método Batch) y los calculados con el proceso de optimización no lineal, empleado para el ajuste de los parámetros de transporte del modelo físico de no equilibrio PNE.

En dicho análisis, se resaltan las diferencias conceptuales existentes entre uno y cada método, y posteriormente se presentan un conjunto de argumentos que explican la variabilidad de los resultados de acuerdo con las características de los métodos experimentales empleados. En la tabla 3-4 se presenta el consolidado de estos resultados.

Tabla 3-4. Consolidado de resultados Kd obtenidos por el modelo Langmuir (método Batch) y el método de optimización no lineal del modelo PNE de las curvas de elución – (BTC).

Horizonte	Profundidad (cm)	Método Batch Modelo Langmuir	Optimización algoritmo CXTFIT Modelo PNE*
		Kd (L kg^{-1})	Kd (L kg^{-1})
A	0-30	0,90	0,06
B	31-70	2,19	0,16
C	<70	4,03	--

* Valores Calculados a partir de la ecuación 3-1, donde $K_d = (R-1) \theta \rho^{-1}$

En primer lugar, es necesario aclarar que los resultados de Kd obtenidos por el método Batch y el método de optimización No lineal de la curva de elución de nitratos (BTC) con el modelo PNE, no son comparables. Esto se debe a las diferencias conceptuales entre uno y otro método empleado, en donde el modelo CXTFIT asume adsorción lineal, que presupone que los sitios de adsorción disponibles permanecen constantes en todas las concentraciones hasta la saturación y el modelo de Langmuir cita que dichos sitios se van saturando a medida que aumenta la disponibilidad del soluto absorbido hasta la saturación (Weber y Miller, 1989). Estas diferencias conceptuales se traducen en los diversos órdenes de magnitud de Kd obtenidos mediante uno y otro método.

En segundo lugar, en lo que respecta a las características de los métodos Batch y curva de elución (*Breakthrough Curves - BTC*), es necesario acotar que los análisis de isotermas bajo el método Batch, a pesar de ser uno de los métodos más empleados en la literatura para evaluar la dinámica de adsorción de un compuesto, presentan una limitación al no representar totalmente las condiciones naturales del sistema de estudio, en este caso el componente suelo. Ya que las consideraciones del método Batch implican un contacto directo y permanente del soluto con el suelo, el cual ofrece una gran superficie disponible para interactuar con el soluto y por ende una mayor posibilidad de adsorción. Esto hace que los valores de adsorción obtenidos por el método Batch sean superiores que cuando se presenta una condición de flujo en la cual se limita el tiempo y el área de efectiva de interacción del soluto con el suelo Porfiri, C., (2012).

En contraposición a lo anterior, las experiencias en columnas reflejan mejor las condiciones de campo, ya que permiten controlar la velocidad de flujo y obtener de este modo coeficientes de distribución más realistas (Morell y Candela, 1998). Además las curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*), permiten vincular en el análisis de la adsorción del suelo, aspectos como la heterogeneidad del mismo, a partir de lo cual se logra representar la hidrodinámica del medio poroso y la presencia de condiciones que están ínfimamente relacionadas con la adsorción como por ejemplo: la presencia de flujos preferenciales asociados a condiciones de macro porosidad, raíces o micro fauna existente en el suelo, a partir de los cuales se logra una mejor comprensión de los procesos predominantes en el suelo y se establecen conceptualizaciones más asertivas en la instauración de estrategias de simulación del transporte de solutos en la zona no saturada.

En tercer lugar se aclara, que más allá de los limitantes o potencialidades que refieren las diferencias del método Batch y el método de adsorción dinámica en columnas de suelo sin disturbar (Curva de elución -BTC), se puede establecer que la dinámica de adsorción de los nitratos en los horizontes de suelo objeto de estudio, es muy baja. Toda vez que el mayor coeficiente de adsorción K_d con el método Batch, se observó en el horizonte C con un valor de $4,03 \text{ L kg}^{-1}$. En términos generales, si bien no son comparables los valores de K_d obtenidos por el método Batch (Isotermas de Langmuir) y los valores obtenidos por el ensayo de columnas ajustados al método PNE del algoritmo CXTFIT (Isotermas Lineales), si es posible evidenciar una clara tendencia a la disminución de la magnitud de los coeficientes K_d en condiciones de flujo.

Este argumento es apreciable en los horizontes de suelo A y B estudiados, en donde para este último, el valor de K_d por el método Batch es de $2,19 \text{ L kg}^{-1}$ y en el método de adsorción dinámica con columnas de suelo el K_d obtenido es de $0,16 \text{ L kg}^{-1}$. Este comportamiento evidenciado en el presente estudio, fue también descrito por Porfiri, C., (2012), en donde en el marco de la investigación del proceso de transporte de imazapir en dos tipos de suelo, se analizó la dinámica de adsorción de esta molécula bajo el método Batch y el método de adsorción con columnas de suelo, encontrándose la disminución de K_d (Batch) de $0,8 \text{ L kg}^{-1}$ a un valor casi despreciable en condiciones de flujo con un K_d (columna) de $0,06 \text{ L kg}^{-1}$.

En sincronía con los argumentos citados en el párrafo anterior, queda claro que la implementación de uno u otro método para el análisis del proceso de adsorción refiere conceptualizaciones distintas que deben ser valoradas a la hora de establecer las simplificaciones o el control de las hipótesis empleadas en los diferentes procesos de simulación del transporte de solutos en la zona no saturada. Particularmente, se debe considerar que el efecto del flujo en los procesos de sorción del suelo, tiene una incidencia importante con respecto a la forma y el tiempo de contacto del soluto con el medio, efectos que por lo general son mejor descritos en experimentos de adsorción dinámica en columnas que en experimentos tipo Batch (Raymundo-Raymundo et al., 2011).

Finalmente, es posible concluir que independientemente del método de empleado para representar el proceso de adsorción de nitratos (NO_3^-), se observa que los órdenes de magnitud de los K_d hallados indican una débil adsorción y por lo tanto un elevado potencial de lixiviación hacia niveles más profundos del perfil del suelo. Resultados que son lo esperado cuando en el suelo se presenta baja disponibilidad de óxidos de hierro y potenciales de hidrogeno superiores a 4,0.

4 Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) procedentes de procesos de floricultura en un suelo de la Sabana de Bogotá.

4.1 Resumen

En este capítulo se simula el movimiento de los Nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada, mediante la implementación del software Hydrus 1D (Simunek et al., 1998). El objetivo de este apartado es evaluar la evolución de las curvas de avance de los nitratos en el perfil de suelo estudiado. Para tal fin el esquema metodológico, se llevó a cabo de acuerdo con la implementación de las etapas de los protocolos de modelación propuestos por Camacho *et al.*, (2003), el IDEAM, (2018) y el MADS, (2018). En este orden de ideas, en primer lugar se consideró un modelo conceptual que aborda un método numérico de elementos finitos, para la solución de las ecuaciones diferenciales de Richard's (1931) y Convección Dispersión (Lapidus y Amundson, 1952). La representación del flujo de agua y transporte de nitratos (NO_3^-), se determinó de acuerdo con el modelo de Van Genuchten – Mualem (1976) y el modelo de no equilibrio de origen físico (PNE). En segundo lugar para definir los parámetros óptimos del modelo, de acuerdo con la etapa de calibración, se llevó a cabo el consolidado de los parámetros de flujo y transporte previamente identificados en el capítulo 2 y 3 del presente documento. En tercer lugar, se realizó el proceso de validación del comportamiento de los parámetros óptimos, a partir del contraste de los perfiles de concentración determinados experimentalmente en una columna de suelo de 1,0 m de profundidad con tres puntos de control a 20, 50 y 100 cm de distancia con respecto a la superficie. En cuarto lugar, se ejecutó el análisis de sensibilidad paramétrica empleando MCAT (*Monte Carlo Analysis Toolbox*) - (Wagener et al., 2001). Para los parámetros de los modelos de flujo y transporte empleados. Y en último lugar se ejecutó el software Hydrus 1D bajo dos escenarios de simulación. Los resultados reflejan que los nitratos tienen un alto grado de movilidad en el perfil de suelo, llegando a alcanzar valores de concentración de $13,72 \text{ mg L}^{-1}$ en la parte más profunda del perfil de suelo. Indicando así que existe un alto grado de vulnerabilidad para el recurso hídrico subterráneo en el acuífero de la Sabana de Bogotá sobre el cual se encuentra este tipo de suelo.

4.2 Abstract

In this chapter, the movement of nitrates (NO_3^-) in the unsaturated zone is simulated by the implementation of Hydrus 1D software (Simunek et al., 1998). The objective of this section is to evaluate the evolution of nitrate progression curves in the soil profile studied. To do this, the methodological scheme was carried out in accordance with modeling protocols proposed by Camacho et al., (2003), IDEAM, (2018) and MADS, (2018). In this order of ideas, we first considered a conceptual model that addresses a numerical method of finite elements, for the solution of the Richard's (1931) and Convection Dispersion (Lapidus and Amundson, 1952) differential equations. The representation of water flow and nitrate transport (NO_3^-) was determined according to the Van Genuchten - Mualem model (1976) and the physical non-equilibrium model (PNE). Secondly, in order to define the optimal parameters of the model, according to the calibration stage, the consolidation of the flow and transport parameters previously identified in chapter 2 and 3 of this document was carried out. Third, the validation of the behavior of the optimal parameters was carried out from the contrast of the concentration profiles determined experimentally in a soil column 1,0 m of deepness with three control points at 20, 50 and 100 cm away from the surface. Fourth, parametric sensitivity analysis was performed using MCAT code (Monte Carlo Analysis Toolbox) - (Wagener et al., 2001).), for the parameters of the flow and transport models implemented. Finally, the Hydrus 1D software was run under two simulation scenarios. The results show that nitrates have a high degree of mobility in the soil profile, reaching concentrations of $13,72 \text{ mg L}^{-1}$ in the deepest part of the soil profile. Which indicates that there is a high degree of vulnerability for the underground water resource in the aquifer of the Savanna of Bogota where this type of soil is located.

4.3 Materiales y métodos

El desarrollo del modelo de simulación del transporte de nitratos en la zona no saturada se fundamenta en los resultados obtenidos en el proceso de caracterización de: a) las condiciones iniciales de aporte de nitratos por el proceso de floricultura (Capítulo 2), b) los parámetros hidrofísicos del suelo (Capítulo 2) y c) parámetros de transporte del perfil de suelo estudiado (Capítulo 3). En la tabla 4-1 se relaciona de manera unificada el compendio de métodos empleados como insumo base para la modelación.

Tabla 4-1. Consolidado de métodos empleados para el proceso de construcción del modelo de transporte de nitratos en la zona no saturada.

MODULO	PARAMETROS OBTENIDOS	MÉTODO
Condiciones Iniciales - Proceso de Floricultura	Concentración de Nitratos	APHA, (2017)
	Caudal de Lixiviación de Nitratos	Balance Hídrico – Metodología Hargreaves – Esmeral en 2011
Flujo – Parámetros Hidrofísicos	Parámetros de la Curva de Retención de Humedad (θ_r , θ_s , n , m y α).	Curva de retención de humedad - placas de Richard's Klute (1986).
	Conductividad Hidráulica Saturada (Ks)	Curva conductividad hidráulica saturada - (Luna et al. 2005).
	Conductividad Hidráulica No saturada (L).	Curva conductividad hidráulica No saturada - Arya, et al. (1975).
Transporte – Parámetros de Transporte	Coefficiente Dispersión Hidrodinámico (D). Velocidad Real de Poros (v) Coefficiente de Retardo (R)	Curvas de elución Breakthrough curve - BTC. OCDE, (2004).
	Coefficiente de Adsorción (Kd)	Curvas de elución (OCDE, 2004). * Isotermas de Adsorción - OCDE, (2000).**

* Método empleado para calcular los coeficientes de adsorción empleados para el Horizonte A y B.

** Método empleado para calcular el coeficiente de adsorción empleado para el Horizonte C.

Apoyado en esta información, se llevó a cabo la simulación del transporte de nitratos (NO_3^-) siguiendo las etapas recomendadas en los protocolos de modelación propuestos por Camacho *et al.*, (2003), el IDEAM, (2018) y el MADS, (2018). En el marco de las etapas de calibración validación y análisis de sensibilidad e incertidumbre paramétrica, se usaron los software RETC (Van Genuchten et al., 1991), STANMOD (Simunek et al., 1999), MCAT (Wagener et al., 2001). (2004) y HyDrus 1D (Simunek et al., 1998). Para comprobar el rendimiento de la estructura del modelo propuesto con respecto a la realidad. En la formulación matemática para la simulación del movimiento de nitratos en el suelo se implementaron las ecuaciones de Richard's (1931) y Convección Dispersión de no equilibrio físico (PNE). En los siguientes numerales se detallan cada una de las etapas implementadas en la modelación de los nitratos en la zona no saturada.

4.3.1 Modelo conceptual

El modelo conceptual aborda la descripción de todos los procesos empleados en la simulación y cada una de las simplificaciones o presunciones que articulan en la implementación del modelo. En este orden de ideas, las conceptualizaciones empleadas en el desarrollo del modelo se presentan seguidamente y se condensan de forma gráfica en la figura 4-1.

- **Simplificaciones/Presunciones:** Flujo vertical o en 1D, suelo isotrópico, procesos isoterms y sin histéresis en el flujo: una sola fase para el proceso de secado y humedecimiento del suelo.
- **Método numérico:** Se empleó una solución basada en elementos finitos para solucionar las ecuaciones diferenciales de Richard's y de convección dispersión de no equilibrio físico (PNE). Empleando los esquemas de ponderación de Crank – Nicholson para el tiempo y de Garlekin para el espacio.
- **Módulo de flujo:** Se usó el modelo de Mualem Van Genuchten para hacer la descripción de la curva de retención de humedad y la conductividad hidráulica.
- **Módulo de Transporte:** Modelo de no equilibrio Físico.

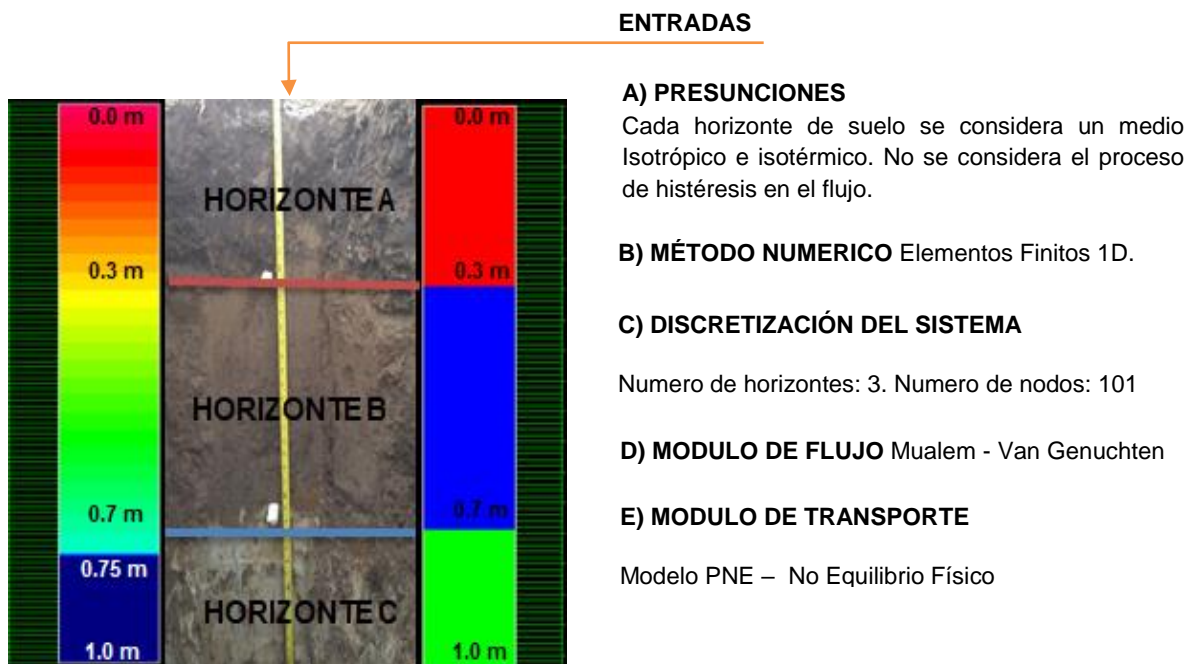


Figura 4-1. Modelo Conceptual definido para la modelación del transporte de Nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada.

4.3.2 Calibración y validación

El proceso de calibración se realizó empleando los métodos de optimización no lineal, propuestos en los algoritmos del CXTFIT, Toride et al., (1995) y el desarrollado por Marquardt (1963), presentes en los programas STANMOD ® y RETC ® respectivamente. En este proceso se obtuvieron los parámetros óptimos para el flujo de acuerdo con el modelo de Mualem Van Genuchten y de transporte con base en el modelo de no equilibrio físico (PNE). La selección del mejor conjunto de parámetros que representa los fenómenos de advección y dispersión de los nitratos se definió a partir de los resultados de los coeficientes R^2 y MSE.

La información para la etapa de validación, se obtuvo a escala de laboratorio mediante la valoración de la curva de avance del ion nitrato a diferentes profundidades, siguiendo los lineamientos metodológicos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2004), para ensayos de lixiviación. Se empleó una columna de suelo sin disturbar de 1,0 m de longitud, 15,0 cm de diámetro y tres puntos de control ubicados a una distancia (Z) de 20, 50 y 100 cm con respecto a la superficie. El ensayo para la validación de los parámetros efectivos de flujo y transporte, se desarrolló en condiciones de estado estacionario, aplicando un volumen de agua $0,89 \text{ L día}^{-1}$ y un flujo de agua de $0,21 \text{ cm h}^{-1}$. La inyección del ion nitrato (NO_3^-) se realizó a partir de una concentración de $112,5 \text{ mg L}^{-1}$ de NO_3^- , en una solución de $\text{CaCl}_2 0,01 \text{ M}$. La recolección de las muestras del ensayo de elución (*Breakthrough Curves - BTC*), se realizó en recipientes de 5 mL, con una frecuencia de recolección de 24 horas durante un intervalo de tiempo de 60 días. Las concentraciones de nitratos (NO_3^-) se analizaron por cromatografía iónica de acuerdo con el método APHA, (2017).

Posteriormente, se contrastaron los valores experimentales del ensayo de lixiviación, con los perfiles de concentración simulados a partir de los parámetros efectivos obtenidos en el proceso de calibración (tabla 4-3), empleando el software HyDRUS 1D (Simunek et al., 1998). El rendimiento de dichos parámetros para predecir el movimiento del ion nitrato (NO_3^-) en el suelo, se valoró con la función objetivo SSQ (Sumatoria de Cuadrados). En la determinación de los valores simulados de la curva de avance, con el software Hydrus 1D, se empleó el modelo de Van Genuchten- Mualem para describir la conductividad hidráulica y el modelo No físico de Equilibrio (PNE) para caracterizar el transporte del ion nitrato en el suelo.

4.3.3 Análisis de Sensibilidad e incertidumbre

El análisis de este numeral, se hizo con la herramienta MCAT (*Monte Carlo Analysis Toolbox*) - (Wagener et al., 2001) la cual emplea la técnica de muestreo Montecarlo. Se analizaron tanto los parámetros de flujo del modelo de Van Genuchten – Mualem como los parámetros de transporte del modelo de no equilibrio físico (PNE). Cada parámetro de flujo o transporte se le asignó un intervalo de muestreo, considerando: a) información de la literatura, b) Los valores de los parámetros obtenidos y c) Valores físicos posibles para los parámetros físicamente basados. Dichos parámetros se muestrearon mediante simulaciones de Monte Carlo, a partir de un muestreo aleatorio uniforme en intervalos específicos. Para cada parámetro se implementaron múltiples simulaciones, empleando las subrutinas del RETC y del CXTFIT en el software STANMOD. Cada una de estas simulaciones, se compararon con los valores de las curvas de conductividad hidráulica obtenidas por el método del aire caliente (Arya et al., 1975) y las concentraciones medidas en las curvas de elución (*Breakthrough Curves – BTC*), OCDE, (2004).

4.3.4 Escenarios de simulación

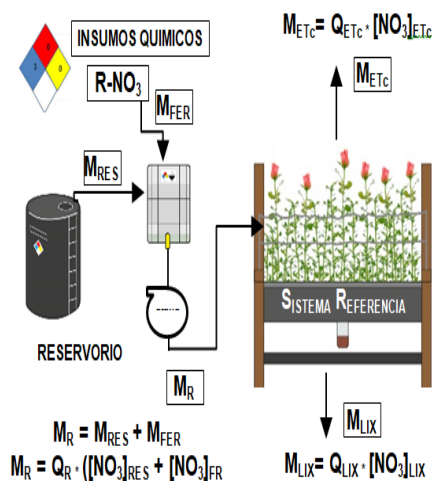
Como última etapa dentro del proceso de simulación del movimiento de nitratos en la zona no saturada, se ejecutaron tres escenarios de simulación para un periodo de tiempo de 365 días en cada escenario. La finalidad de estos escenarios, es evaluar mediante diferentes condiciones de precipitación y temperatura. la incidencia de las variables hidroclimatológicas en el transporte de los nitratos en el suelo. Considerando que los aportes de precipitación y los cambios de temperatura en la zona de estudio, repercuten directamente sobre la humedad del suelo y los procesos de evapotranspiración, a partir de lo cual dichos procesos pueden limitar o potenciar el movimiento de los nitratos en la zona no saturada. En estos escenarios de simulación, se determinan los valores de la curva de avance de nitratos (NO_3^-), mediante el uso del software Hydrus 1D, considerando: Un primer escenario que obedece a las condiciones promedio de precipitación y temperatura en la zona de estudio. Y dos escenarios adicionales que contemplan la variabilidad de las condiciones de precipitación y temperatura en función del fenómeno niño y niña que se describen con base la condición fría y cálida del fenómeno ENSO 2009-2011 (IDEAM, 2011). Empleando para tal fin, la información los cambios registrados para estas variables en la estación Tibaitata que pertenece a la red de monitoreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Condiciones iniciales y de frontera.

La solución de las ecuaciones de flujo y transporte, se llevó a cabo mediante el método de elementos finitos. El límite atmosférico se ubicó a lo largo de la parte superior del perfil de suelo para permitir las interacciones entre el suelo y la atmósfera. En el límite atmosférico o superior, se usó una condición de borde o frontera tipo Dirichlet (primer tipo) (Simunek et al., 1998), que se definió en función de los volúmenes de agua lixiviados del proceso de floricultura. Para el límite inferior, se utilizó una condición de límite de drenaje libre para el movimiento del agua del suelo y la condición de frontera de tipo Neuman (segundo tipo) (Simunek et al., 1998).

Para definir las condiciones iniciales de concentración y flujo de nitratos, procedentes del proceso de floricultura, se realizó un análisis de flujos másicos que involucran un balance hídrico y los resultados de concentración de nitratos medidos en los lixiviados a lo largo un pico de producción de rosa en sustrato. En el balance hídrico, se calculó la evapotranspiración empleando el modelo propuesto por Hargreaves – Esmeral (Esmeral, 2010) y las concentraciones de nitratos se analizaron de acuerdo con el procedimiento 4110 B: APHA, (2017) siguiendo el protocolo del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia APHA, (2017). En la figura 4-2 se presenta el análisis de entradas y salidas empleados para el balance de masa.



$$M_R = (M_{RES} + M_{FER}) = M_{LIX} + M_{ETC}^*$$

Ecuación 4-1. Balance de Masa

$$Q_R * [NO_3]_{FER} = Q_{LIX} * [NO_3]_{LIX} + Q_{ETC} * [NO_3]_{ETC}$$

Ecuación 4-2. Balance de Masa - NO_3^-

$$Q_R = Q_{LIX} + Q_{ETC} + \Delta S^{**}$$

Ecuación 4-3. Balance Hídrico

$$Q_{ETC} = G_j * Q_{ETO}$$

Ecuación 4-4. Cálculo Evapotranspiración Real.

$$Q_{ETO} = 0,00983 * R_s * T_{Med}$$

Ecuación 4-5. Cálculo Evapotranspiración Potencial.
(Esmeral et al., 2011)

$$R_s = 0,0265 * R_a * (T_{max} - T_{min})$$

Ecuación 4-6. Cálculo Radiación solar neta

Figura 4-2. Esquema general del sistema de referencia y ecuaciones del balance de masa planteado para realizar el análisis de lixiviación de Nitratos.

Donde M_R es la Masa total del riego [M], M_{RES} y M_{FER} son los valores de masa aportados por el reservorio y la formula de fertirriego [M]. M_{LIX} es la masa presente en el lixiviado [M] y M_{ETC} es la Masa Evapotranspirada por el cultivo [M]. Q_R es el caudal de riego [L^3T^{-1}], Q_{LIX} y Q_{ETC} son los caudales lixiviados y evapotranspirados [L^3T^{-1}]. $[\text{NO}_3]_{FER}$ es la concentración de Nitratos en la fórmula de fertirriego [M L^{-3}], $[\text{NO}_3]_{LIX}$ y $[\text{NO}_3]_{ETC}$ son las concentraciones de Nitratos en el lixiviado y evapotranspiradas [M L^{-3}]. ΔS Delta de Contenido Humedad, G_j el Coeficiente de Cultivo, R_s la Radiación Solar Neta [MT^{-3}], T es la Temperatura.

De acuerdo con las condiciones del sistema de referencia para el análisis de lixiviación de nitratos (NO_3^-) que se relaciona en la figura 4-2, a continuación en la tabla 4-2 se presentan los valores obtenidos para el flujo y la concentración de nitratos procedentes del proceso de floricultura. Estos valores son el resultado del seguimiento efectuado a los flujos de agua y concentraciones de los lixiviados, durante un pico de producción de rosas variedad Charlotte (11 semanas) tomando como unidad experimental una cama elevada de 5 x 0,8 m, sobre el cual se efectuó el análisis másico de entradas y salidas.

Tabla 4-2. Consolidado de las variables de entrada: caudal de lixiviación y concentración de Nitratos (NO_3^-) empleadas en el proceso de simulación de Nitratos (NO_3^-) en el suelo.

TIEMPO		ESTADIO	CONDICIONES INICIALES DE FLUJO Y CONCENTRACIÓN DE NITRATOS	
Semanas	Días		Q_{LIX} (L H^{-1})	$[\text{NO}_3]_{LIX}$ (mg L^{-1})
1	7	Pinch	12,36	31,85
3	14	Vegetativo	10,78	28,27
5	14		8,37	26,01
6	42	Primordio	4,81	42,70
7	7	Arroz	2,24	80,38
8	7	Arveja	3,22	98,09
9	7	Garbanzo	5,04	112,02
10	7	Rayar Color	4,96	45,80
11	7	Cosecha	10,74	44,75

Es válido aclarar que el flujo de salida o de lixiviación de nitratos en el sistema de cultivo con sustrato (figura 4-2), es el flujo de entrada al suelo estudiado. Además, en la conceptualización de la figura 4-2, no se incluyen efectos de acumulación ni generación de masa, debido a que se consideran poco significativas las interacciones del medio de soporte con los nutrientes. De igual manera, se establecen condiciones de flujo estacionario y condiciones de saturación del sustrato a partir de lo cual los cambios de Humedad ΔS son considerados nulos. El proceso de modelación para los 365 días, se subdividió de la siguiente manera: 144 días correspondientes a dos picos de producción con las condiciones de caudal y concentración que presenta la tabla 4-2 y los 121 días restantes con las condiciones de caudal y concentración definidos para el estadio vegetativo.

4.4.2 Calibración

En la fase de calibración se usó el algoritmo de Marquardt (1963) dentro del software RETC, para determinar los parámetros de flujo del modelo Van Genuchten – Mualem. Los parámetros de flujo optimizados: θ_r , θ_s , α , n , m , L , se obtuvieron a partir de la información de las curvas de retención de humedad y de conductividad hidráulica. Con respecto a los parámetros de transporte se implementó el algoritmo del CXTFIT, Toride et al., (1995) inmerso en el software STANMOD ®. Optimizando los parámetros: D y R , de acuerdo con las curvas de elución del trazador y el ion nitrato. En la tabla 5-2 se presenta el consolidado de los parámetros óptimos definidos para el proceso de modelación de nitratos en el suelo.

Tabla 4-3. Consolidado de parámetros obtenidos en el proceso de calibración para la implementación del modelo de transporte de nitratos en la zona no saturada.

MODULO	PARÁMETRO	UNIDAD	PARAMETROS EFECTIVOS		
			Horizonte A	Horizonte B	Horizonte C
Flujo Parámetros Hidrofísicos Mualem – Van Genuchten	θ_r	cm ³ cm ⁻³	0,1968	0,2424	0,3160
	θ_s	cm ³ cm ⁻³	0,5403	0,6936	0,5995
	α	--	0,0009	0,0015	0,0024
	n	--	2,2637	3,6022	1,8980
	m	--	0,5582	0,5497	0,4731
	K_s	cm día ⁻¹	9,84	6,48	0,48
	L	--	-1,3411	-0,4936	-2,7137
Transporte Parámetros Transporte Modelo PNE	D	cm ² h ⁻¹	0,74	0,2646	0,0007*
	R	--	1,14	1,31	9,20**
	K_d	L kg ⁻¹	0,06***	0,16***	4,03****

* Valor Calculado a partir de $D=D_{mec} + D_{mol}$, donde D_{mec} es la dispersión mecánica asociada al flujo advectivo $D_{mec}=V\alpha$, considerando un α de 0,007 cm (Veizaga et, al. (2016)) y una velocidad de 0,01 cm h⁻¹. Y D_{mol} es la difusión molecular del agua en el suelo.

** Valor calculado a partir de la ecuación 3-1, donde $R = 1 + (K_d \rho \theta^{-1})$

*** Valor experimental obtenido de los ensayos de lixiviación de la curva de elución.

**** Valor experimental obtenido de los ensayos de adsorción del método Batch

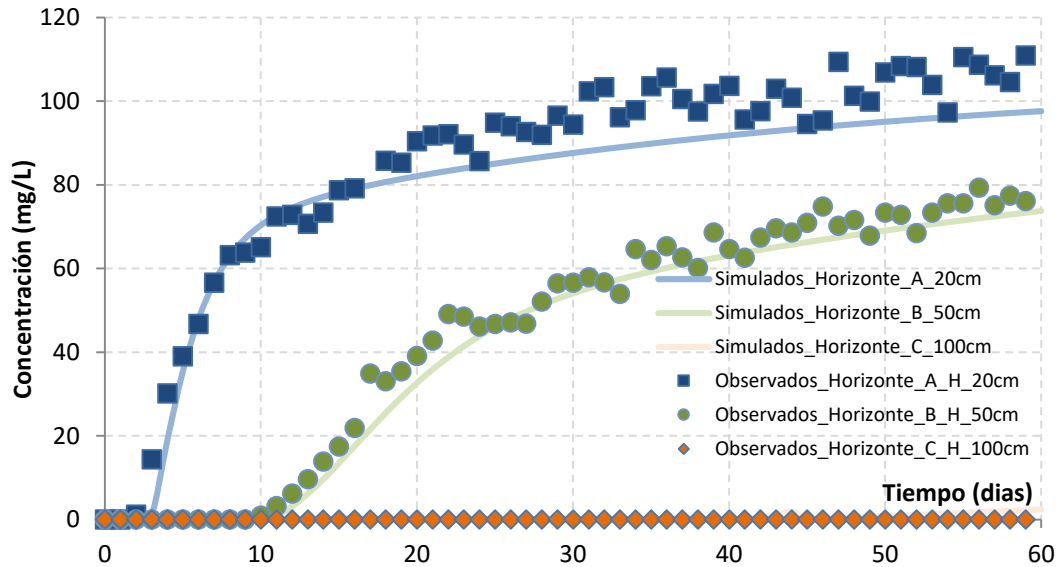
Dónde: θ_r es el contenido de humedad residual [L³*L⁻³]. θ_s es el contenido máximo de humedad o humedad del suelo saturado en [L³*L⁻³]. h es la presión capilar [L], el parámetro α es un parámetro empírico (L⁻¹) cuyo inverso a menudo se define como la presión de entrada de aire o la presión de burbujeo. Los parámetros m y n son parámetros de ajuste del modelo de la curva de retención de humedad (característicos de cada tipo de suelo). L es el parámetro de conectividad de poros. K_s Conductividad hidráulica saturada [LT⁻¹]. R es el coeficiente de retardo, adimensional t es el tiempo [T], D coeficiente de dispersión hidrodinámico [L² T⁻¹] y K_d es la Constante de equilibrio del proceso de adsorción.

4.4.3 Validación

La validación del modelo de la dinámica del transporte de nitratos en la zona no saturada, se realizó con los datos obtenidos en los ensayos de lixiviación a escala de laboratorio en una columna de suelo de 1,0 m. Mediante el uso del software HyDrus 1D, se simuló el proceso de la curva de avance de nitratos a lo largo del perfil de suelo y se contrastó el resultado de estas simulaciones con los resultados de concentración obtenidos a las profundidades (Z) de 20, 50 y 100 cm. Las funciones objetivo aplicadas para analizar la precisión y capacidad de simulación del modelo fueron: Coeficiente de determinación, R² y la función objetivo SSQ. En la figura 4-3 y la tabla 4-4 se presentan los resultados obtenidos en el proceso de validación.

Tabla 4-4. Resultados del coeficiente de determinación R^2 y SSQ determinados en el proceso de validación para simular la dinámica de transporte de Nitratos (NO_3^-)

Profundidad	Horizonte	SSQ	R^2
20 cm	A	0,2620	0,90
50 cm	B	0,1275	0,94
100 cm	C	0,0027	0,99

**Figura 4-3.** Resultados de los perfiles de concentración de Nitratos (NO_3^-) obtenidos experimentalmente en el ensayo de lixiviación y simulados en el software Hydrus 1D.

Los resultados del proceso de validación con respecto a los valores de las funciones objetivo muestran como el comportamiento de los parámetros efectivos definidos en el proceso de calibración logran predecir con un grado de error menor al 10% las concentraciones de nitratos a lo largo del perfil de suelo. Sin embargo, las predicciones de la concentración de nitratos, muestran una tendencia a la sub estimación de la concentración de los picos de elución, a partir de lo cual las concentraciones finales presentan el mayor grado de disparidad entre los valores observados y los simulados por el modelo. Investigaciones como las realizadas por Yang et al., (2017) y Jiménez (2020), han reportado resultados similares, en donde, se han evidenciado dificultades de los modelos para predecir los picos de las curvas de elución. Este fenómeno se puede asociar al alto grado de heterogeneidad que presenta el suelo, sobre el cual se puede presentar la incidencia de flujos preferenciales asociados a la interconectividad de los macroporos. Si bien es cierto que este fenómeno físico se incluye en el análisis del modelo PNE, se debe precisar que la conceptualización del modelo se hace bajo la premisa de un medio isótropo lo cual es aplicable para describir el movimiento de los solutos en el suelo, pero implica sesgos en las predicciones del modelo.

4.4.4 Sensibilidad e incertidumbre

En las figuras 4-4 y 4-5 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad paramétrica para el modelo de flujo de Van Genuchten – Mualem y el modelo de transporte de no equilibrio físico (PNE).

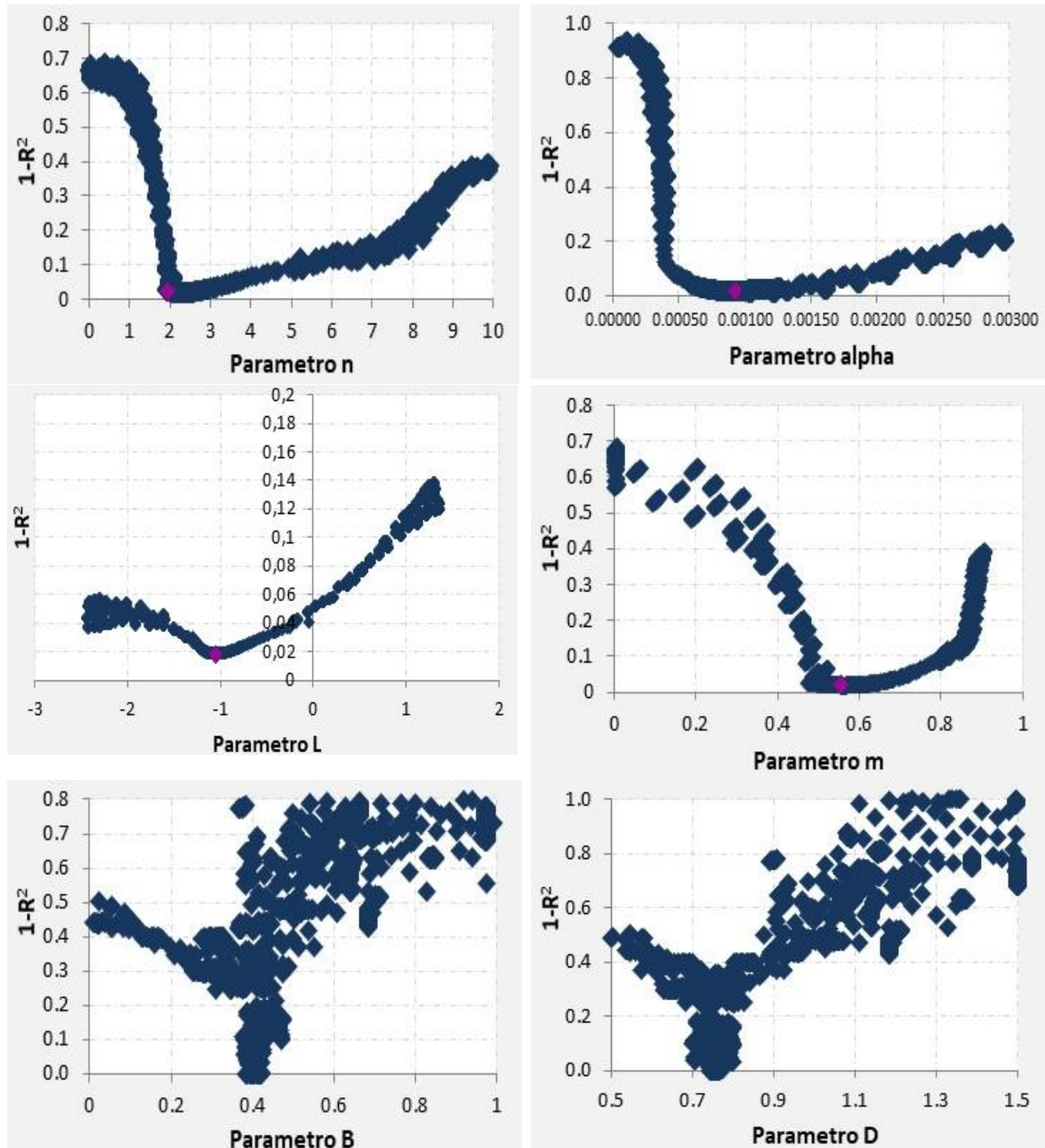


Figura 4-4. Resultados del análisis de sensibilidad paramétrica del modelo de flujo Van Genuchten – Mualem ($n=1-1/n$) y de transporte de no equilibrio físico – Horizonte A.

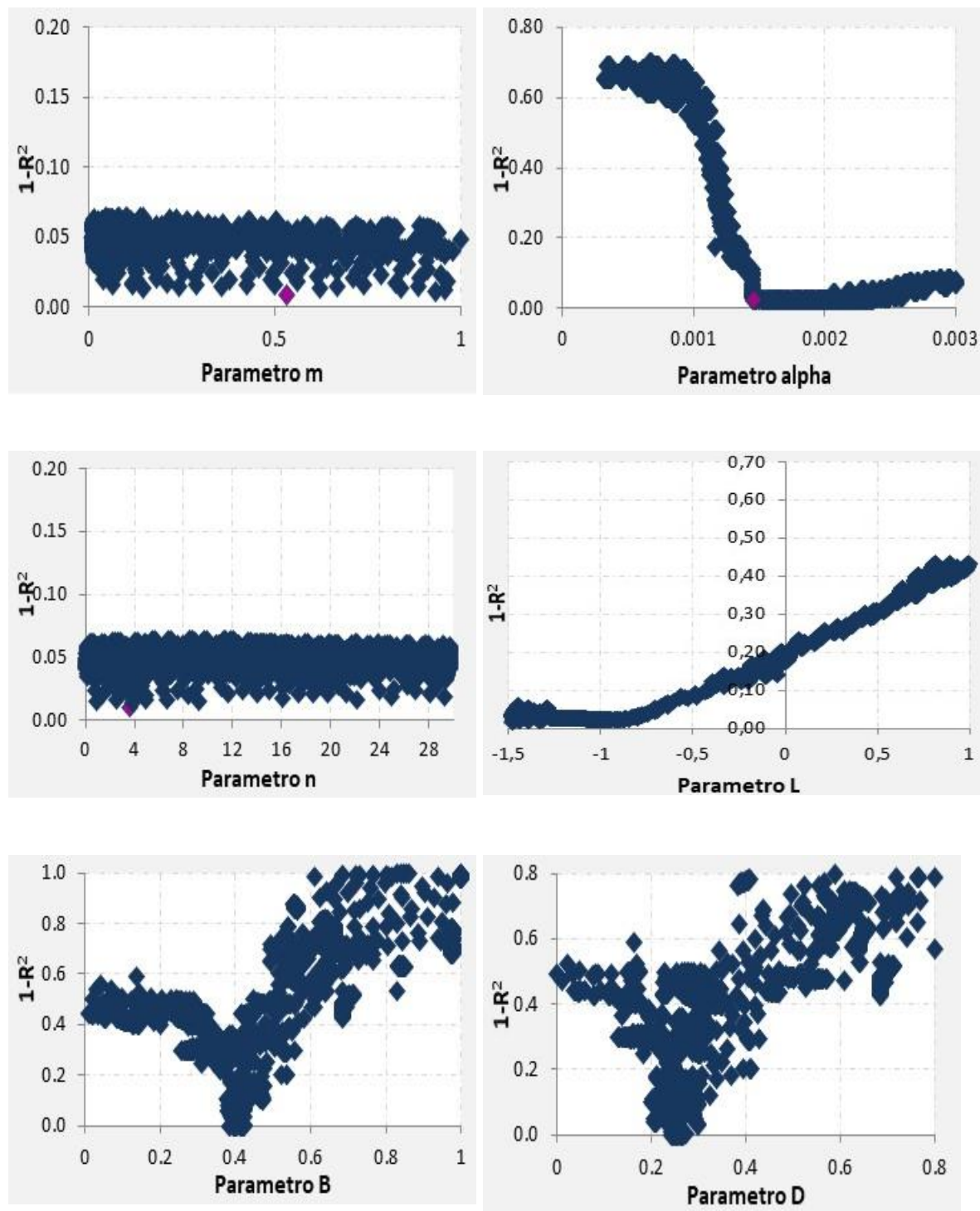


Figura 4-5. Resultados del análisis de sensibilidad paramétrica del modelo de flujo Van Genuchten – Mualem (n,m) y de transporte de no equilibrio físico – Horizonte B.

En términos generales el análisis de sensibilidad paramétrica muestra que tanto los parámetros del modelo de Van Genuchten – Mualem como los del modelo de transporte de no equilibrio físico son identificables. Es decir que para estos parámetros se determina un óptimo global. No obstante, en lo que concierne a los parámetros n y m en el modelo Van Genuchten-Mualem m,n variable (Horizonte B), se observa una clara interdependencia entre estos parámetros, lo cual dificulta la estimación de un óptimo global. Este efecto de interdependencia o interacción paramétrica, genera varios conjuntos de parámetros óptimos asociados a un efecto de compensación entre los valores de los parámetros n y m , los cuales se traducen en respuestas del coeficiente de determinación mayores a 0,95.

4.4.5 Escenarios de Simulación

La simulación de la dinámica del movimiento de nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada, se llevó a cabo mediante el modelo HYDRUS-1D (Šimunek, 2000). Se formularon tres escenarios de simulación, con diferentes condiciones de precipitación y temperatura. El escenario 1 obedece a las condiciones promedio del régimen hidroclimatológico de la zona de estudio y los otros dos escenarios obedecen a la variabilidad de las condiciones de precipitación y temperatura en función del fenómeno niño y niña que se describen con base la condición fría y cálida del fenómeno ENSO 2009-2011 (IDEAM, 2011). Considerando que tanto los aportes de precipitación y como los cambios de temperatura, son factores que influyen en la humedad del suelo y los procesos de evapotranspiración, a partir de lo cual dichos procesos pueden limitar o potenciar el movimiento de los nitratos en la zona no saturada.

La modelación se realizó a partir de una configuración unidimensional que comprende una profundidad de 1,0 m y el perfil de suelo fue representado mediante 3 horizontes, discretizados con 101 nodos de cálculo. El flujo de agua se simuló con la ecuación de Richard's resuelta mediante los parámetros del modelo de conductividad hidráulica de Van Genuchten – Mualem (1976) y el transporte de nitratos se simuló con la ecuación de convección dispersión resuelta a partir del modelo de no equilibrio físico (PNE). En las figura 4-6 a figura 4-10, se presentan los resultados obtenidos para los tres escenarios de simulación anteriormente descritos, con respecto del tiempo y la profundidad del perfil de suelo estudiado.

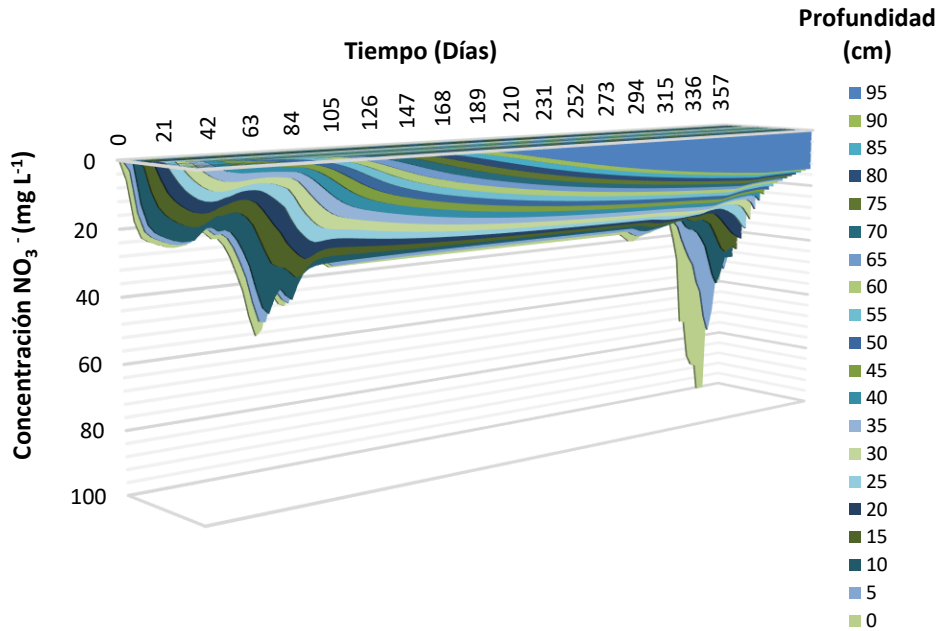


Figura 4-6. Resultados HyDrus 1D Escenario 1 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) en el tiempo en condiciones normales.

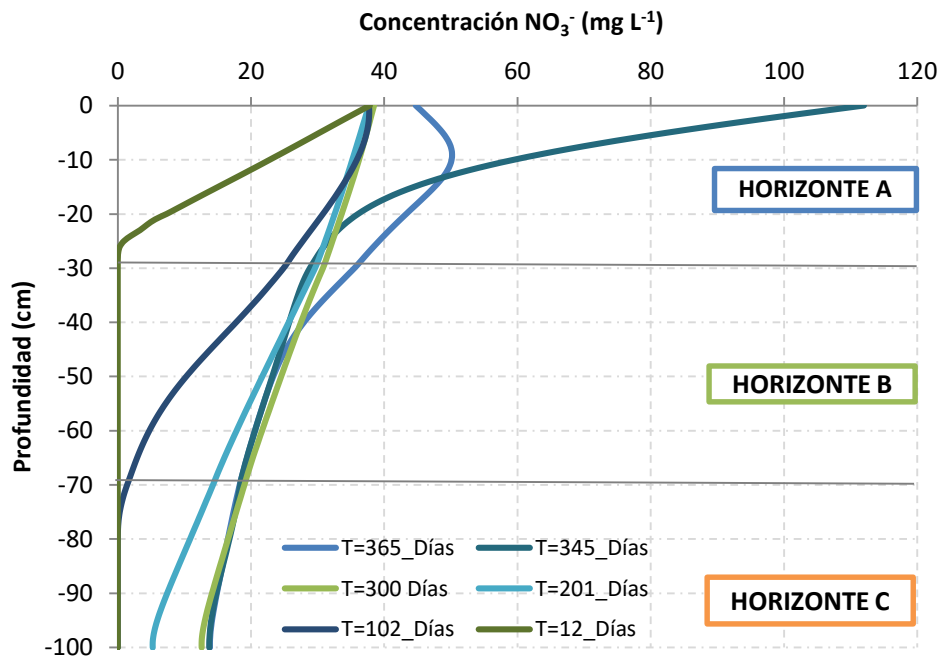


Figura 4-7. Resultados HyDrus 1D Escenario 1 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) a lo largo del perfil de suelo estudiado en condiciones normales.

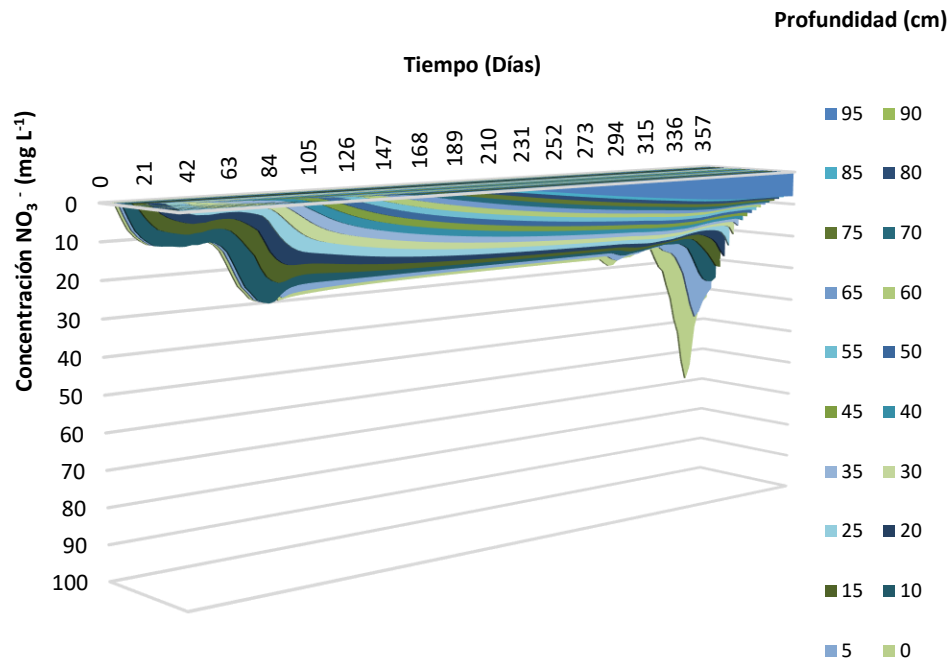


Figura 4-8. Resultados HyDrus 1D Escenario 2 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) en el tiempo en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niño.

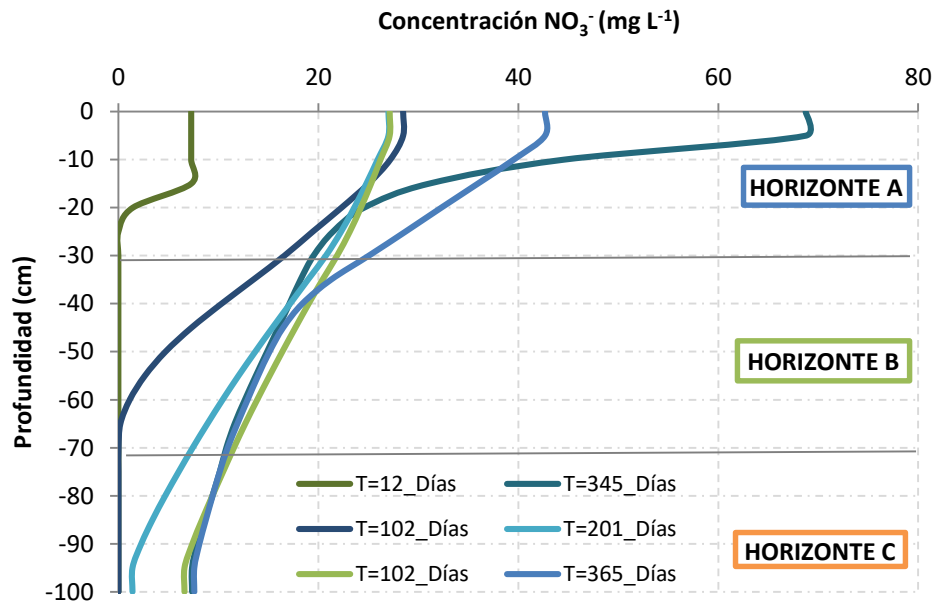


Figura 4-9. Resultados HyDrus 1D Escenario 2 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) a lo largo del perfil de suelo estudiado en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niño.

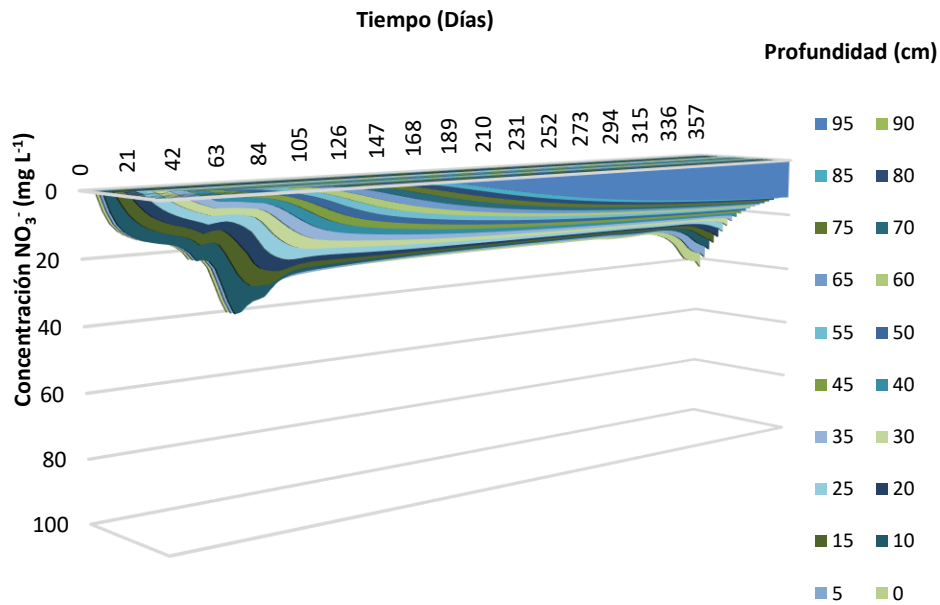


Figura 4-10. Resultados HyDrus 1D Escenario 3 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) en el tiempo en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niña.

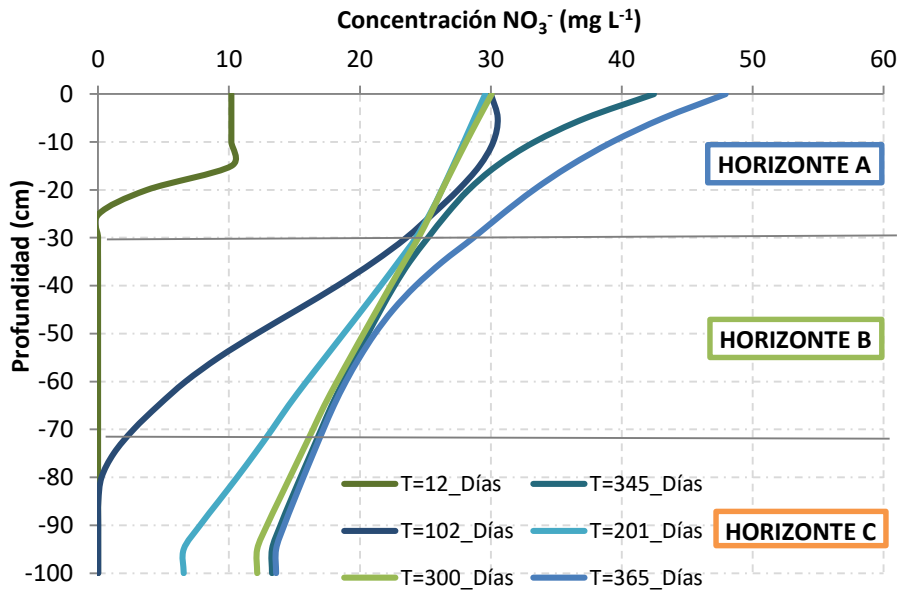


Figura 4-11. Resultados HyDrus 1D Escenario 3 - Simulación de la curva de avance de Nitratos (NO_3^-) a lo largo del perfil de suelo estudiado en condiciones de precipitación y temperatura del fenómeno ENSO: Niña.

En los resultados de los perfiles de concentración obtenidos en las figuras 4-6 y 4-7, se observa que:

En términos generales, al analizar las concentraciones de nitratos obtenidas, se observa que en todos y cada uno de los tres escenarios de simulación valorados, al cabo del transcurso de los 365 días, las moléculas de nitrato alcanzan la profundidad de un metro. En el marco de este análisis a esta profundidad, el escenario 1 (condiciones normales), presenta las mayores concentraciones de nitratos, con un valor de $13,26 \text{ mg L}^{-1}$ superando el límite de 10 mg L^{-1} que refiere la resolución 2115 de 2007 MAVDT (2007) para agua potable. Lo cual indica un factor de riesgo para los acuíferos ubicados en la Sabana de Bogotá en especial si estos se llegan a emplear para consumo directo.

El horizonte A que comprende una profundidad de 0 a 30 cm, es el que presenta mayores fluctuaciones de la concentración de nitratos (NO_3^-) para todos y cada uno de los escenarios de simulación analizados. De los tres escenarios simulados, el escenario 1 (condiciones normales), es el que presenta el pico más alto de concentración de nitratos con un valor de 112 mg L^{-1} , seguido por el escenario 2 (fenómeno del niño) con un valor de $68,73 \text{ mg L}^{-1}$ y finalmente el escenario 3 (fenómeno de la niña) con un valor de concentración máximo de $47,94 \text{ mg L}^{-1}$. De allí se evidencia que la presencia de las condiciones hidroclimatológicas del fenómeno de la niña, para el primer horizonte de suelo generan un factor de dilución que disminuye la concentración de nitratos en los primeros 30 cm de profundidad del suelo. Esto se debe principalmente a que bajo este escenario, se encuentran mayores condiciones de precipitación las cuales hacen que aumente el contenido de humedad volumétrica del suelo, traduciéndose en una mayor cantidad de agua disponible en el medio poroso, lo que permite la instauración de procesos de dilución de las concentraciones de la molécula de nitratos.

Al igual que en el horizonte A en el Horizonte B (profundidad de 30 a 70 cm), la mayor concentración de $35,54 \text{ mg L}^{-1}$ de nitratos se da en el escenario 1 definido para condiciones normales. De forma paralela en los escenarios 2 y 3, se presentan concentraciones de $28,03$ y $25,66 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Para el horizonte B, en los tres escenarios de simulación evaluados, se evidencian fluctuaciones de la concentración de nitratos que oscilan en el orden de 35 a 26 mg L^{-1} entre el límite superior e inferior de este horizonte. Particularmente estas fluctuaciones son menos marcadas que las presenciadas en el horizonte más superficial (Horizonte A), el cual alcanza diferencias entre sus límites inferior y superior entre 37 y 80 mg L^{-1} en los tres escenarios planteados.

Lo anterior con base en lo descrito por Morales (2013), se puede explicar debido a que los suelos con texturas más gruesas presentan mayores niveles de conductividad hidráulica, los cuales condicionan los procesos de retención de humedad. De acuerdo con la disponibilidad de humedad en el suelo, se pueden llegar a presentar fenómenos de dilución o concentración de los nitratos, que limiten o potencien la disponibilidad de los mismos en el suelo.

Al analizar las concentraciones de nitratos a la profundidad de un metro ($Z=100$ cm), se observan concentraciones en el orden de $13,72 \text{ mg L}^{-1}$, $7,36 \text{ mg L}^{-1}$ y $13,28 \text{ mg L}^{-1}$, para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. A partir de estos resultados, es posible apreciar que las condiciones del escenario 2 (fenómeno del niño) caracterizado por bajas precipitaciones, tiene incidencia sobre el transporte de nitratos a través de la zona no saturada del perfil de suelo estudiado. Lo anterior debido a que la incidencia de este fenómeno altera la disponibilidad de agua en el suelo, haciendo que se limite la condición advectiva sobre la cual se transporta el soluto y además promoviendo la interacción de fenómenos de retención del nitrato mediante procesos como la adsorción. En contraposición el escenario 3 (fenómeno de la niña), con respecto al escenario 2 (fenómeno de la niña), potencian el movimiento de los nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada del suelo de acuerdo con la variabilidad de la precipitación y la temperatura.

5 Conclusiones

En este trabajo se modeló la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en un suelo empleado para proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá. Los resultados obtenidos del proceso de simulación empleando la herramienta computacional HyDrus 1D, indican que los aportes de nitratos procedentes de los procesos de floricultura, independientemente de las condiciones hidroclimatólogicas planteadas en los escenarios de simulación, alcanzan los niveles freáticos definidos a la profundidad de 100 cm, con concentraciones que oscilan entre los $7,36 \text{ mg L}^{-1}$ y $13,76 \text{ mg L}^{-1}$. Esto implica que los nitratos tienen un alto grado de lixiviación a través del perfil de suelo estudiado, lo cual se traduce en un factor de riesgo de potencial afectación para los acuíferos y las unidades hidrogeológicas que constituye el agroecosistema de la Sabana de Bogotá, especialmente si se destina el recurso hídrico para usos de consumo humano.

En la caracterización y análisis de las propiedades hidrofísicas de los horizontes que componen el perfil de suelo ubicado en la Sabana de Bogotá, se evidencia que para suelos de textura fina (franca y arcillosa) y catalogados con coeficientes de permeabilidad moderados a lentos de acuerdo con la clasificación de la USDA (1981), el modelo propuesto por Mualem - Van Genuchten es el que mejor permite reproducir las condiciones de retención de humedad y conductividad hidráulica. En los tres horizontes de suelo estudiados, los resultados de la valoración de los parámetros hidrofísicos mediante procesos de optimización no lineal, indican valores del coeficiente de determinación R^2 superiores a 0,95, estableciendo que dicho modelo logra reproducir con un porcentaje de error inferior al 5% el flujo de agua en suelos con este tipo de características.

En cuanto a la determinación de los parámetros de transporte, en el suelo usado en procesos de floricultura en la Sabana de Bogotá. Se concluye que de la evaluación realizada para los dos modelos de transporte: Clásico De Equilibrio (CDE) y de no equilibrio físico (PNE), el modelo PNE es el que mejor representa el proceso de transporte en los horizontes de suelo estudiados. Este argumento se evidencia tanto para el trazador de Bromuros (Br^-) como para la molécula de nitratos (NO_3^-). En términos generales, el modelo PNE muestra valores de MSE inferiores a $1,35\text{E}-03$ y coeficientes de determinación R^2 superiores a 0,99. Lo cual indica una alta eficiencia de este modelo para predecir las concentraciones de nitratos y de sustancias conservativas, a la luz de los resultados experimentales obtenidos en ensayos de lixiviación con columnas de suelo sin disturbar.

El proceso de simulación realizado para definir el flujo y transporte de Nitratos (NO_3^-) en la zona no saturada del suelo mediante la implementación de las rutinas de cálculo del programa computacional HyDrus 1D. Establecen que para lograr, predecir el comportamiento de este tipo de moléculas en la zona no saturada, con niveles de certeza superiores al 90% ($\text{SSQ} < 0,26$ y $\text{R}^2 > 0,9$), es necesario suministrar el mayor volumen de información posible de los procesos de flujo y transporte que definen el movimiento de los nitratos en el suelo. Dentro de estos procesos, es de vital importancia definir experimentalmente las condiciones de los parámetros hidrofísicos y de transporte, a partir de lo cual se limite la incertidumbre asociada con valores teóricos de la literatura que pueden arrojar resultados diferenciales con respecto a las condiciones reales del medio poroso que se desee estudiar. Finalmente, aunado a lo anterior para lograr predecir resultados del movimiento de solutos en el suelo, con niveles de confianza superiores al 90%, es necesario considerar en la simulación la instauración de las etapas que constituyen los protocolos de modelación. En especial los procesos de validación, sobre los cuales se pone a prueba el desempeño de los parámetros óptimos del modelo y sobre los cuales se realizan la evaluación de los escenarios de modelación.

6 Referencias

- APHA. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA/AWWA/WPCF. 4110 Determination of Anions by Ion Chromatography.
- Adauto, A. E., (2017). Evaluación de la capacidad de adsorción de las arcillas organofílicas para la adsorción de nitratos y nitritos en soluciones acuosas.
- Álvarez, C., Álvarez, R., & SteinBatch, H. (2000). "Predictions of Available Nitrogen Content in Soil Profile Depth Using Available Nitrogen Concentration in Surface Layer Commun. *Soil Science.*, 759-769 p.
- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. (2006). FAO. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en el cultivo. Organización de las naciones Unidad para la Agricultura y la alimentación. Roma.
- Arya, L. M., Farrell, D. A., & Blake, G. R. (1975). Field Study of Soil Water Depletion Patterns in Presence of Growing Soybean Roots - 1. Determination of Hydraulic Properties of the Soil. *Proc Soil Sci Soc Am*, 39(3), 424–430. <https://doi.org/10.2136/sssaj1975.03615995003900030021x>.
- Becerra, C. G. (2009). Estudio preliminar del transporte de la vinaza en un suelo representativo del Valle del Cauca.
- Bouwer, H., (1986). Intake rate: Cylinder infiltrometer. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Monograph No 9, Madison, 825-844 p.
- Brooks, R. H., & Corey, a T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers, Colorado State University. Fort Collins CO*, 3(3), 27 p. <https://doi.org/citeulike-article-id:711012>
- Bowie, L. G., Mills, W. B., Porcella, D. B., Campbell, C. L., Pagenkopf, J. R., & Rupp, G. L. (1985). Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality. Athens, Georgia: U.S. Environmental Protection Agency.
- Burdine, N. (1953.). *Relative permeability from pore size distribution data. Trans. Am. Inst. Min. Metall.*
- Burdine, T. (1953). Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data. *Journal of Petroleum Technology - J PETROL TECHNOL*, 5, 71–78 p.
- Calvachi, G. L., & Sanchez, I. A. (2013). Nitrogen in wastewater: origins, effects and removal mechanisms to preserve the environment and public health. *Universidad y Salud*.
- Centro Agropeguario Mareno - CAM. (2010). Generalidades Centro Agropecuario Marengo.

- Camacho, L. & Díaz-Granados, M. (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de soluto y de la calidad de agua en ríos- Caso río Bogotá. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos Universidad del Valle/Instituto Cinara.
- Camacho, L., Rodríguez, E., & Hernández, S. (2012). Metodología y resultados de la modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá - Colombia. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.
- Chapra, S. C. (1997). Surface water-quality modeling. Long Grove: Waveland Press, Inc.
- Castiglioni, M. G., María H. J., Santanatoglia O. J., Altinier, M. V. & Tessier, D. (2007) Movimiento Del Agua En Argiudoles De La Pampa Ondulada Con Diferente Mineralogía De Arcillas.
- Castillo S. (1994), Adsorción de iones nitrato en suelos de la provincia de Almería.
- Chen, X., Wu, H. y Wo, F. (2007). Nitrate vertical transport in the main paddy soils of Tai Lake region, China.
- Dagan, G., (1985). Stochastic modelling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities: the inverse problem. *Water Resources Research*, 21 (1), 65-72 p.
- Departamento Nacional de Estadística DANE. (2009). *Censo de fincas productoras de flores*.
- Domenico, P.A. and Schwartz F.W (1998). Physical and chemical hydrogeology. John Wiley and Sons, Inc. New York. 506 p.
- Esmeral, Y. R. (2011). Análisis de la Evapotranspiración real en el cultivo de la Rosa. Bogotá: UNC, 94p. Tesis Maestría.
- Fischer, H., List, E., Koh, R., Imberger, J., & Brooks, N. (1979). Mixing in inland and coastal waters. London: Academic Press, Inc.
- Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C. Green, P.A., Holland, E.A., Karl, D.M., Michaels, D.M., Porter, J.H., Townsend, A.R. and Vörösmarty, C.J. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, And Future. *Biogeochemistry* 70: 153–226.
- Galloway JN, Raghuram N, Abrol YP (2008). A perspective on reactive nitrogen in a global, Asian and Indian context. *Current Sci*, 94: 1375-1381.
- García, D.; Cabana, M. (2014). Tesis de grado. Propiedades de retención de arcillas sobreconsolidadas por desecación del occidente de la sabana de Bogotá. Bogotá – Colombia. Universidad Santo Tomás.

- Gatti, N. M., Sanchez, M. P. y Fernández, L. G. (2015). Proceso Discontinuo De Adsorción De Ion Nitrato Empleando Una Montmorillonita Modificada Por Silanización. Neuquén – Argentina.
- Giles, C.H., Smith, D. and Huitson, A. (1974). A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I: Theoretical . J. Colloid Interface Sci. 47: 755-765 p.
- Green, W. y Ampt, G. (1911). Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soil. Journal of Agricultural Sciences 4:1-24 p.
- Green, R. E., Corey, J. C. (1971). Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods. Soil Science Society of American Proceeding 35, 3-8.
- Green, W. y Ampt, G. (1911). Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soil. Journal of Agricultural Sciences 4:1-24 p.
- Gómez, C., Moreno, J. y Vega, J. (2014). Perfil logístico de Colombia una visión hacia el mejoramiento estratégico de las operaciones nacionales e internacionales; sector floricultor. Proyecto de Línea de Investigación. Universidad del Rosario. Bogotá. 52 p.
- González Murillo, C. A., Quintero M. F. y Meneses V. (2006). Determinación de algunas propiedades hidrofísicas de los sustratos utilizados en cultivos de flores en la Sabana de Bogotá. Bogotá D.C.
- Guarín, R. (2013). Impacto del régimen cambiario actual en la economía del sector floricultor colombiano. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ciencias Económicas. Especialización en Finanzas y Administración Pública. Bogotá.
- Gupta, H., Beven, K., & Wagener, T. (2005). Model Calibration and Uncertainty Estimation. In M. G. Anderson, & J. J. McDonnell, Encyclopedia of Hydrological Sciences (2015-2031 p). John Wiley & Sons Ltd.
- Guymon, G. (1994) Unsaturated zone hydrology, Prentice Hall Inc, New Jersey, 212 p.
- Hammond A, & Mathews E (1999). Critical consumption trends and implications. Degrading Earth's ecosystems. World Resource Intitute, Washington, 72 p.
- Hernández, J. y Camacho L. (2014) Revisiting the Relationship of Transient-Storage and Aggregated Dead Zone Models of Longitudinal Solute Transport. ICHE 2014, Hamburg. Lehfeldt & Kopmann (eds) Bundesanstalt für Wasserbau.
- Hillel, D. (1998). Environmental soil physics Academic Press Inc. 413 p.
- Hincapié E. G. (2011). Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera.

- Hoffmann-Riem, M. Th. van Genuchten and H. Flüher. (1999). A general model of the hydraulic conductivity of unsaturated soils. p.31-42. In M. Th. van Genuchten et al., (ed.) Proc. Intl. Workshop, Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of unsaturated porous media, Riverside, CA. 22-24. University of California, Riverside.
- Huertas, J. (2014). Lixiviación En Columna De Suelo De Los Herbicidas Metsulfurón Metilo Y 2,4-D En Suelos Arroceros De Los Municipios De Espinal Y Prado (Tolima).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2006). Métodos Analíticos del Laboratorio – IGAC, Sexta Edición.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Universidad Nacional de Colombia UNAL, (2014), Levantamiento agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2011). Análisis Del Impacto Del Fenómeno “La Niña” 2010-2011 En La Hidroclimatología Del País, 32 páginas. Bogotá, D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua - ENA. 436 páginas. Bogotá, D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica, 59 páginas. Bogotá, D.C.
- Jacques, D., J. Šimůnek, D. Mallants, and M. Th. van Genuchten, (2006). Operator-splitting errors in coupled reactive transport codes for transient variably saturated flow and contaminant transport in layered soil profiles, J. Contam. Hydrology, 88, 197-218.
- Jarvis, N.J. (1994). The MACRO model (Version 3.1). Technical description and sample simulations. Reports and Dissert, 19, Dept. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden, 51 p.
- Jimenez, D. C. (2020). Evaluación de la retención flujo y transporte de cloruros en un suelo aplicando un biocarbonizado. Universidad Nacional de Colombia.
- Jury, W. A., L. H. Stolzy, and P. Shouse, (1982). A field test of a transfer function model for predicting solute transport, Water Resour. Res., 18, 369-375 p.
- Jury, W. A. (1982). Simulation of Solute transport using a transfer function model. Water Resour. Res., 18:363-368.
- Kay, BD & AJ Vanden Bygaart. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. Soil & Tillage Research 66: 107-118.

- Khan, S. (1980). Physicochemical processes affecting pesticides in soil. Chapter 3. In: Pesticides in the Soil Environment. Elsevier Scientific Publ.Co.
- Khan, Muhammad Nasir. (1989). Introduction to Wireline Log Interpretation. Islamabad: Oil and Gas Development Corporation. Lunne, Tom, Peter Kay Robertson y John J. M. Powell. 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Nueva York: Blackie Academic, Spon Press.
- Klute, A. (1986). Methods of Soil analysis. Part 1-Physical and y mineralogical methods. Madison: ASA and SSSA Publisher.
- Kostiakov, A. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and necessity for studying it from a dynamic view for purposes of amelioration. International Committee Society of Soil Science 61th A:17-21.
- Kondracki, M. A., y Camargo, O. A., (2005). Adsorção de nitrato em solos com cargas variáveis. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.40, n.4, p.369-376,
- Kosugi. K., (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resour. Res., 32(9), 2697-2703.
- Köhne, J. M.; Schlüter, S.; Vogel, H. J. (2011). Predicting solute transport in structured soil using pore network models. Vadose Zone Journal, v. 10, n. 3, p. 1082-1096, <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2010.0158>.
- Kutilek, M., & Nielsen, D. R. (1994). *Soil Hydrology*. Catena - Verlag.
- Lappala, E.G., R.W. Healy, and E.P. Weeks. (1987). Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. Water-Resour. Invest. Rep. 83-4099. USGS, Reston, VA.
- Lapidus, L. and Amundson, N. R. (1952). Mathematics of adsorption beds: VI. *The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns*. J. Phys. Chem. Vol. 56. 984–988 p.
- Langeron J., A. Blondel, S. Sayen, E. Hénon, M. Couderchet, and E.Guillon. (2014). Molecular properties affecting the adsorption coefficient of pesticides from various chemical families. Environ. Sci. Pollut.Res. 21(16):9727–9741.
- Leij, F. J., and S. A. Bradford, (1994). 3DADE: A computer program for evaluating three-dimensional equilibrium solute transport in porous media, Research Report No. 134, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
- Leij, F. J., and N. Toride, (1997). N3DADE: A computer program for evaluating nonequilibrium threedimensional equilibrium solute transport in porous media, Research Report No. 143, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.

- Luna S. D., Sánchez. R. C. y Muñoz P. J. (2005). Métodos para medir la conductividad hidráulica saturada de campo. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XX, núm. 2, abril-junio de 2005, 95-107 p.
- Nielsen, D. R., Th. Van Genuchten, M., & Biggar, J. W. (1986). Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 22(9S), 89S-108S. <https://doi.org/10.1029/WR022i09Sp0089S>.
- Malagón, D. (2016). Suelos y Tierras de Colombia. Tomo 2. Subdirección de Agrología. Bogotá, Colombia. 2016. IGAC.
- Marinho H. Valente A., Correa L. y Marques P. (2016). Accuracy of the Hydrus Model to Predict Nitrate Leaching as a Result of Applying Treated Sewage Sludge to Soils of Different Textures. *RBRH vol.21 no.1 Porto Alegre Jan./Mar.*
- Marquardt, D. W. (1963), An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of The Society For Industrial and Applied Mathematics* 2, 431,441.
- Madsen, H., Van Griensven, A., & Højbjerg, A. (2007). Model Calibration Guideline. Harmonised modeling tools for integrated basin management (Harmoni-CA).
- Merriam. W. (1963). *Seventh New Collegiate Dictionary*. Springfield, MA.
- McIntyre, N., Wheeler, H., & Lees, M. (2002). Estimation and propagation of parametric uncertainty in environmental models. *Journal of Hydroinformatics*, 4, 177-198.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS., (2018). "Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuenca (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones". Bogotá, D.C.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT, (2007). Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá D.C.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS., (2018). Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales Bogotá, D.C.
- Miyazaki, T. (1993). *Water flow in soils*. Marcel Dekker, Inc. New York. 296 p.
- Mishra, B.K. and Misra, C., (1990). Simulation of nitrate nitrogen breakthrough curves stemming from leaching of ammonium nitrate through soil. *J. Hydrol.*, 115: 377-384.

- Morales, L. A. (2013). Modelo De La Zona No Saturada De La Vega Altoandina De Jachucoposa, I Región. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento ingeniería civil.
- Morell, L. y Candela, L. (1998). Comportamiento de los plaguicidas en Suelos y Aguas. En: I. Morell and L. Candela eds. Plaguicidas, aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos. Editores: Morrel I y Candela L. Castelló de la Plana: Publicacions de la Universitat Jaume I, cop. 9-23 p.
- Mosquera, C. S., Hansen, E. W., García Santos, G., Obregón Neira, N., Celis Ossa, R. E., & González Murillo, C. A. (2016). The Effect of the Soil Properties on Adsorption, Single-Point Desorption, and Degradation of Chlorpyrifos in Two Agricultural Soil Profiles From Colombia. *Soil Science*.
- Mualem, Y. (1976). New Model for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous-Media. *Water Resources Res.*, 12, 513–522.
- Mualem, Y., and Dagan G. (1978). Hydraulic conductivity of soils: unified approach to the statical models, *Soils Sci. Soc. Am. J.* 42:392-395.
- Muñoz-Carpena R., Parsons J.E. y Ducheyne S. (1999). Simulación con el modelo numérico WAVE del transporte de agua y nitrógeno a través de la zona no saturada en un cultivo de platanera. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD/ OCDE). (2000) Guidelines for testing chemicals, Guideline 106: Soil adsorption/desorption, using a Batch equilibrium method.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD/OCDE) (2004). Guidelines for the Testing of Chemicals: Leaching in Soil Columns, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Pachepsky, Ya A; WJ Rawls; D Gimenez & JPC Watt. 1998. Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil Till. Res.* 49: 117-128.
- Poch R., Mailhol J., Candela L., y Ramírez de Cartagena F. (2005). Estimación de los riesgos de lixiviación de nitratos en suelos agrícolas: ¿enfoque numérico o funcional?. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol.VII*.
- Porfiri, C., (2012) Transporte De Imazapir En Dos Tipos De Suelos Bajo Labranza Convencional Y Siembra Directa. Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Raymundo-Raymundo, E., Prado Pano., B.L., Nikolskii-Gravrilov; I. y Mendoza-Hernandez J.H.R. (2011). Sorción, degradación y lixiviación de imazapir en un suelo volcánico de México. *Tecnologías y ciencias del agua*, vol II, Nº 3, July-September : 61-75 p.
- Richard's, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>.

- Rojas, A. (2011). Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Rossi, P., Jarbas, H., y Duarte, S. (2007). Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de Solo deformadas e indeformadas. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.27, n.3, p.675-682, set./dez.
- Sanchez, J.C. (1994). Adsorción de iones nitrato en suelos de la provincia de Almería. Universidad de la Rioja. España.
- Sánchez-Pérez JM, Antigüedad I, Arrate I, García-Linares C, Morell I (2003). The influence of nitrogen leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country. Sci Total Environ, 317: 173-187.
- Sánchez-Pérez JM, Antigüedad I, Arrate I, García-Linares C, Morell I (2003). The influence of nitrogen leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country. Sci Total Environ, 317: 173-187.
- Sánchez L (2004). Dinámica y balances de nitrógeno en suelos desarrollados sobre terrazas bajas del río Jarama y su aplicación a la optimización de la fertilización nitrogenada. Tesis doctoral. 256 p.
- Sánchez, F. (2012). *Transporte de contaminantes*. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca (España). Recuperado en mayo de 2017 de <http://hidrologia.usal.es>
- Samper Calvete, F. Y. (2005). Estimación del drenaje y lavado de nitratos en un sistema de cultivo de cereal de invierno en condiciones de secano y clima mediterráneo.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, and M. Th. van Genuchten. (2001). Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology. 251:163-176.
- Schaap, M. G., & Leij, F. J. (2000). Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. U.S. Salinity Lab., USDA-ARS, 450 W. Big Springs Road, Riverside, CA 92507. Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 64:843-851.
- Schulin, R., Wierenga, P.J., Flüher, H. And Leuenberger, J. (1987). Solute transport through a stony soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:36-42.
- Šimůnek, J., D. L. Suarez, and M. Šejna, (1996). The UNSATCHEM software package for simulating one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, Version 2.0, Research Report No. 141, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 186 p.

- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M., Toride, N., and J.F. Leij. (1999). The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solution of convection-dispersion equation. U.S. Salinity Laboratory – U.S. Department of Agriculture.
- Šimůnek, J., Seina, M., Satio, H., Sakai, M., and Th. van Genuchten. (2013). The HYDRUS-1d software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside. Riverside – California.
- Simunek, J., K. Huang, M. Sejna, and M. Th. van Genuchten (1998). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 1.0, IGWMC - TPS - 70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 186 p.
- Stephenson, G.R., K.R. Solomon, and L. Ritter. (2007). Environmental persistence and human exposure studies with 2,4-D and other turfgrass pesticides. [cited <http://www.envbio.uoguelph.ca/pdf/persistence.pdf> 2013/01/02]
- Stephens, D. B. (1996) Vadose Zones Hydrology. Lewis Publishers. Boca de Raton, Florida. 339 p.
- Thorburn PJ, Biggs JS, Weier KL, Keating BA (2003). Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia. *Agr Eco Env*, 94: 49–58.
- Townsend AR, Howarth RW, Bazzaz FA, Booth MS, Cleveland CC, Collinge SK, Dobson AP, Epstein PR, Holland EA, Keeney DR, Mallin MA, Rogers CA, Wayne P, Wolfe AH (2003). Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Front Ecol Environ*, 2003: 240-246.
- Toride, N., F. J. Leij, and M. Th. van Genuchten. (1995). The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. Version 2.0, Research Report No. 137, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
- Thomann, R. & Mueller, J. (1987). Principles of surface water quality modeling and control. New York: Harper & Row, Publishers, Inc.
- Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Van Genuchten, M. T. (1981). Non-Equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. Riverside, California: United States Department of Agriculture (USDA).
- Van Genuchten, M. Th., (1980). Determining transport parameters from solute displacement experiments, Research Report No. 118, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.

- Van Genuchten, M. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Oil Science Society of America Journal*.
- Van Genuchten, M. Th., (1985). Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions, *Computers & Geosciences*, 11(2), 129-147.
- Van Genuchten, M. F. Leij, and S. Yates. (1991). RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Environmental Protection Agency. Oklahoma.
- Vanclooster, M., Christiaens, K, Viane, P. and S. Ducheine. (1994). Water and agrochemicals in soil and vadose environment. WAVE model. Reference and user's manual. Institute for land and water management, Katholieke Universiteit, Leuven Vital Decosterstraat, 102 B-30 Leuven, Belgium.
- Vanderborght, J., Vanclooster, M., Mallants, D., Feyen, J., & Gonzalez, C. (1997). Effects of Soil Type and Water Flux on Solute Transport. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2).
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk, and C.A. van Diepen. (1997). Theory of SWAP version 2.0. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
- Varón, V. (2016). Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva. Universidad Nacional de Colombia. p 39.
- Veizaga. E. y Rodriguez, L. (2016). Estudio de la dinámica del nitrato en el suelo proveniente de la actividad ganadera intensiva. *Asociacion Argentina de mecánica computacional – Mecanica computacional Vol XXXIV p 2239 – 2258*.
- Wagener, T., D. P. Boyle, M. J. Lees, H. S. Wheeler, H. V. (2001), MONTE-CARLO ANALYSIS TOOLBOX - USER MANUAL. Civil and Environmental Engineering Department, Imperial College of Science Technology and Medicine. London, SW7 2BU, UK.
- Weber, J.B. and Miller, C.T. (1989). Organic chemical movement over and through soil. In: Sawney, B.L. and Brown, K. eds. *Reactions and movement of organic chemicals in soils*. Soil Sci. Society of America, Madison, Wisconsin, 305-334 p.
- Yang, R., Tong J., Hu B., Jiayun L. & Wenshuo W. (2017). Simulating water and nitrogen loss from an irrigated paddy field under continuously flooded condition with Hydrus-1D model. *Environ Sci Pollut Res* (2017) 24:15089–15106.

Anexo A: Consolidado de datos experimentales parámetros hidrofísicos y de transporte.

Tabla A-1. Datos de Curvas de retención de humedad – Horizonte A.


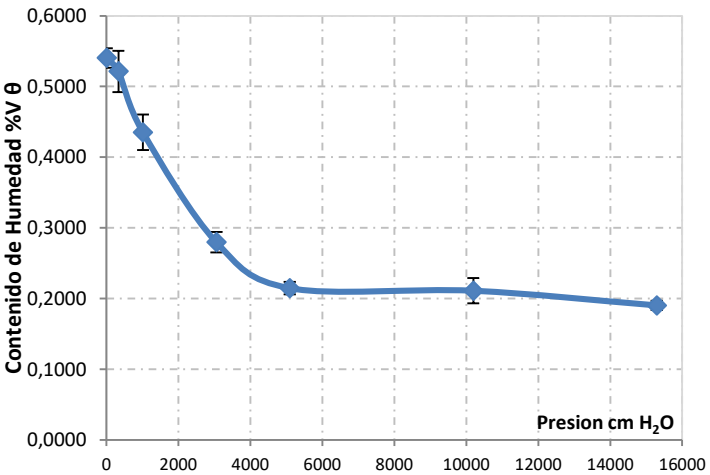
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA																							
DATOS CURVA RETENCIÓN HUMEDAD - HORIZONTE A																							
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,																							
DATOS DE CARACTERIZACION DEL SUELO – HORIZONTE A																							
Textura	Franco Limoso	Densidad Aparente (g/ml)	1,17	Porosidad Total (%)	62,73																		
Pesos muestras de suelo Horizonte A																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)	Peso Seco 24H - 104°C															
A1 (g)	128,08	125,70	118,83	107,60	102,92	102,19	101,46	87,21															
A2 (g)	109,55	110,00	104,34	93,52	88,88	89,46	87,02	74,44															
A3 (g)	115,44	113,24	107,98	98,04	93,99	93,28	92,33	79,89															
CONTENIDOS DE AGUA (g)																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																
A1 (g)	40,87	38,49	31,62	20,39	15,71	14,98	14,25																
A2 (g)	35,11	35,56	29,90	19,09	14,44	15,03	12,58																
A3 (g)	35,55	33,35	28,09	18,15	14,10	13,39	12,44																
CONTENIDO DE HUMEDAD GRAVIMETRICO (g/g)																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																
A1 (g)	0,63	0,47	0,44	0,36	0,23	0,18	0,17																
A2 (g)	0,66	0,47	0,48	0,40	0,26	0,19	0,20																
A3 (g)	0,62	0,44	0,42	0,35	0,23	0,18	0,17																
CONTENIDO DE HUMEDAD VOLUMETRICO (cm³/cm³)																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																
A1 (g)	54,83%	51,64%	42,42%	27,36%	21,07%	20,09%	19,11%																
A2 (g)	55,19%	55,90%	47,00%	30,00%	22,70%	23,62%	19,77%																
A3 (g)	52,06%	48,84%	41,14%	26,58%	20,65%	19,61%	18,21%																
A_{MED}	54,03%	52,13%	43,52%	27,98%	21,47%	21,11%	19,03%																
σ	0,014	0,029	0,025	0,015	0,009	0,018	0,006																
CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD – HORIZONTE A																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PRESION (cm)</th> <th>θ_w (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>0,5403</td> </tr> <tr> <td>336</td> <td>0,5213</td> </tr> <tr> <td>1019</td> <td>0,4352</td> </tr> <tr> <td>3058</td> <td>0,2798</td> </tr> <tr> <td>5097</td> <td>0,2147</td> </tr> <tr> <td>10195</td> <td>0,2111</td> </tr> <tr> <td>15292</td> <td>0,1903</td> </tr> </tbody> </table>		PRESION (cm)	θ_w (%)	10	0,5403	336	0,5213	1019	0,4352	3058	0,2798	5097	0,2147	10195	0,2111	15292	0,1903						
PRESION (cm)	θ_w (%)																						
10	0,5403																						
336	0,5213																						
1019	0,4352																						
3058	0,2798																						
5097	0,2147																						
10195	0,2111																						
15292	0,1903																						

Tabla A-2. Datos de Curvas de retención de humedad – Horizonte B.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA																		
DATOS CURVA RETENCIÓN HUMEDAD - HORIZONTE B																								
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,																								
DATOS DE CARACTERIZACION DEL SUELO – HORIZONTE B																								
Textura	Franco - Arcilloso	Densidad Aparente (g/ml)	1,05	Porosidad Total (%)	74,35																			
Pesos muestras de suelo Horizonte B																								
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)	Peso Seco 24H - 104°C																
B1 (g)	119,85	118,22	98,60	89,23	89,16	88,46	87,73	71,65																
B2 (g)	116,85	115,27	98,35	88,30	87,06	86,77	86,98	70,35																
B3 (g)	116,75	115,34	97,96	88,58	87,13	87,40	87,20	70,84																
CONTENIDOS DE AGUA (g)																								
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																	
B1 (g)	48,20	46,57	26,95	17,58	17,51	16,81	16,08																	
B2 (g)	46,50	44,92	28,00	17,95	16,71	16,42	16,63																	
B3 (g)	45,91	44,50	27,12	17,74	16,29	16,56	16,36																	
CONTENIDO DE HUMEDAD GRAVIMETRICO (g/g)																								
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																	
B1 (g)	0,67	0,65	0,38	0,25	0,24	0,23	0,22																	
B2 (g)	0,66	0,64	0,40	0,26	0,24	0,23	0,24																	
B3 (g)	0,65	0,63	0,38	0,25	0,23	0,23	0,23																	
CONTENIDO DE HUMEDAD VOLUMETRICO (cm ³ /cm ³)																								
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																	
B1 (g)	70,64%	68,25%	39,49%	25,76%	25,66%	24,63%	23,56%																	
B2 (g)	69,40%	67,05%	41,79%	26,78%	24,93%	24,51%	24,81%																	
B3 (g)	68,05%	65,95%	40,20%	26,29%	24,14%	24,54%	24,24%																	
B_{MED}	69,36%	67,08%	40,49%	26,28%	24,91%	24,56%	24,20%																	
σ	0,011	0,009	0,010	0,004	0,006	0,000	0,005																	
CURVA DE RETENCION DE HUMEDAD – HORIZONTE B																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PRESION (cm)</th> <th>θ_w (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>0,6936</td> </tr> <tr> <td>336</td> <td>0,6707</td> </tr> <tr> <td>1019</td> <td>0,4049</td> </tr> <tr> <td>3058</td> <td>0,2628</td> </tr> <tr> <td>5097</td> <td>0,2491</td> </tr> <tr> <td>10195</td> <td>0,2456</td> </tr> <tr> <td>15292</td> <td>0,2424</td> </tr> </tbody> </table>		PRESION (cm)	θ_w (%)	10	0,6936	336	0,6707	1019	0,4049	3058	0,2628	5097	0,2491	10195	0,2456	15292	0,2424							
PRESION (cm)	θ_w (%)																							
10	0,6936																							
336	0,6707																							
1019	0,4049																							
3058	0,2628																							
5097	0,2491																							
10195	0,2456																							
15292	0,2424																							

Tabla A-3. Datos de Curvas de retención de humedad – Horizonte C.


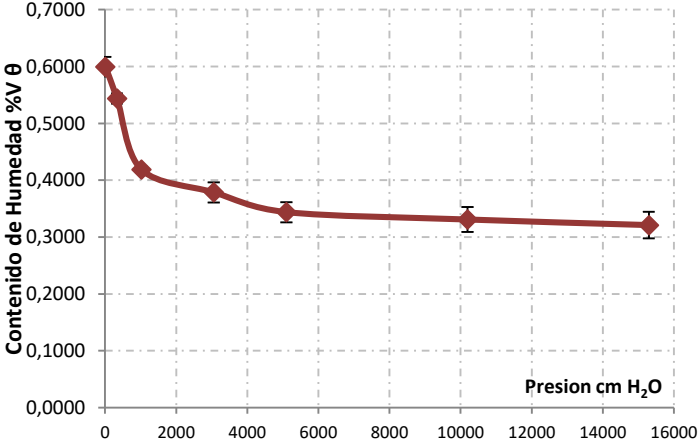
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA																							
DATOS CURVA RETENCIÓN HUMEDAD - HORIZONTE C																							
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,																							
DATOS DE CARACTERIZACION DEL SUELO – HORIZONTE C																							
Textura	Arcilloso	Densidad Aparente (g/ml)	1,22	Porosidad Total (%)	50,49																		
Pesos muestras de suelo Horizonte C																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)	Peso Seco 24H - 104°C															
C1 (g)	97,35	89,38	86,21	80,37	78,67	76,67	76,22	75,59															
C2 (g)	95,01	81,18	77,98	72,55	71,42	69,98	69,57	69,27															
C3 (g)	98,88	87,56	86,07	79,63	76,68	75,18	74,18	73,71															
CONTENIDOS DE AGUA (g)																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																
C1 (g)	37,28	29,31	26,13	20,30	18,59	16,60	16,14																
C2 (g)	41,26	27,42	24,23	18,80	17,67	16,22	15,82																
C3 (g)	39,56	28,24	26,75	20,31	17,36	15,87	14,86																
CONTENIDO DE HUMEDAD GRAVIMETRICO (g/g)																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																
C1 (g)	0,49	0,44	0,34	0,31	0,28	0,27	0,26																
C2 (g)	0,51	0,45	0,35	0,33	0,30	0,29	0,29																
C3 (g)	0,48	0,45	0,34	0,29	0,27	0,25	0,24																
CONTENIDO DE HUMEDAD VOLUMETRICO (cm^3/cm^3)																							
ID	Muestra Saturada	0,3 (Bar)	1,0 (Bar)	3,0 (Bar)	5,0 (Bar)	10 (Bar)	15 (Bar)																
C1 (g)	59,52%	53,08%	41,23%	37,76%	33,70%	32,79%	59,52%																
C2 (g)	62,24%	54,98%	42,66%	40,09%	36,82%	35,89%	62,24%																
C3 (g)	58,09%	55,02%	41,78%	35,70%	32,63%	30,57%	58,09%																
C_{MED}	59,95%	54,36%	41,89%	37,85%	34,38%	33,08%	59,95%																
σ	0,017	0,009	0,006	0,018	0,018	0,022	0,017																
CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD – HORIZONTE C																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PRESION (cm)</th> <th>θ_w (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>0,5995</td> </tr> <tr> <td>336</td> <td>0,5436</td> </tr> <tr> <td>1019</td> <td>0,4189</td> </tr> <tr> <td>3058</td> <td>0,3785</td> </tr> <tr> <td>5097</td> <td>0,3438</td> </tr> <tr> <td>10195</td> <td>0,3308</td> </tr> <tr> <td>5292</td> <td>0,3210</td> </tr> </tbody> </table>		PRESION (cm)	θ_w (%)	10	0,5995	336	0,5436	1019	0,4189	3058	0,3785	5097	0,3438	10195	0,3308	5292	0,3210						
PRESION (cm)	θ_w (%)																						
10	0,5995																						
336	0,5436																						
1019	0,4189																						
3058	0,3785																						
5097	0,3438																						
10195	0,3308																						
5292	0,3210																						

Tabla A-4. Consolidado de resultados del proceso de optimización de las Curvas de Retención de Humedad de los tres horizontes de suelo. Modelo Van Genuchten y Brooks and Corey.



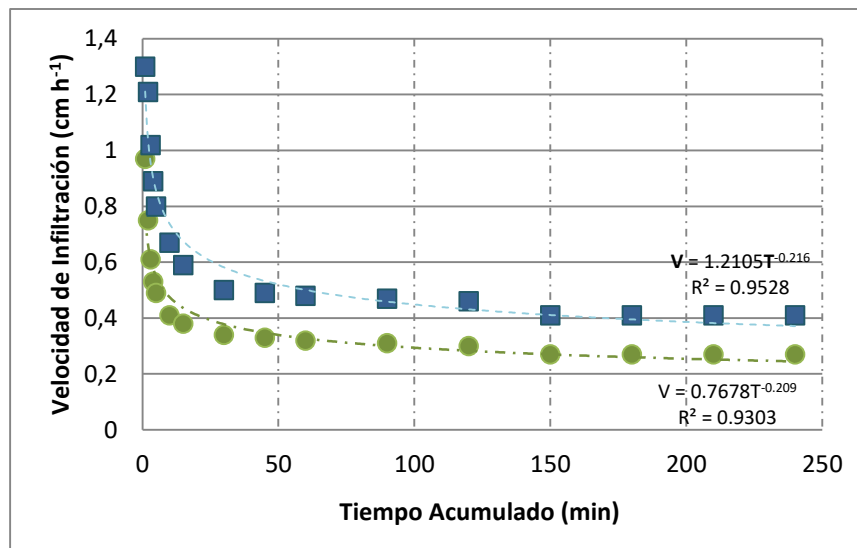
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AGRICOLA			UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA -			UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO₃⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,					
PRESION (cm)	HORIZONTE A				
	OBSERVADOS	Van-Genuchten m,n	Van-Genuchten m=1-1/n	Van-Genuchten m=1-2/n	Brooks & Corey
10	0,5403	0,5402	0,5403	0,5403	0,5403
336	0,5213	0,5171	0,527	0,5329	0,5403
1019	0,4352	0,4387	0,4347	0,4341	0,436
3058	0,2798	0,2747	0,2725	0,2716	0,2693
5097	0,2147	0,2225	0,23	0,2316	0,2321
10200	0,2111	0,1998	0,2008	0,2013	0,2022
15290	0,1903	0,1975	0,1923	0,1913	0,1915
PRESION (cm)	HORIZONTE B				
	OBSERVADOS	Van-Genuchten m,n	Van-Genuchten m=1-1/n	Van-Genuchten m=1-2/n	Brooks & Corey
10	0,6936	0,6936	0,6936	0,6936	0,6936
336	0,6707	0,6707	0,6691	0,672	0,5966
1019	0,4049	0,4049	0,4057	0,4042	0,3987
3058	0,2628	0,2626	0,2596	0,2643	0,3072
5097	0,2491	0,2498	0,2492	0,2502	0,2833
10200	0,2456	0,2443	0,2455	0,2436	0,2617
15290	0,2424	0,2432	0,245	0,2422	0,2531
PRESION (cm)	HORIZONTE C				
	OBSERVADOS	Van-Genuchten m,n	Van-Genuchten m=1-1/n	Van-Genuchten m=1-2/n	Brooks & Corey
10	0,5995	0,5995	0,5994	0,5995	0,5995
336	0,5436	0,5391	0,537	0,5394	0,5394
1019	0,4189	0,4295	0,4313	0,4291	0,4291
3058	0,3785	0,3644	0,362	0,364	0,364
5097	0,3438	0,3469	0,3452	0,3467	0,3467
10200	0,3308	0,3309	0,3318	0,3312	0,3312
15290	0,3210	0,3245	0,327	0,325	0,325

Tabla A-5. Curvas de infiltración o conductividad hidráulica Saturada – Horizonte A y B.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AGRICOLA CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA -	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
		Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,
		DATOS DE ENTRADA - ENSAYO INFILTRACIÓN

Tiempo (Min)	Delta Tiempo (Min)	Infiltración Instantánea (cm/h)	
		Horizonte A	Horizonte B
1	1	1,30	0,97
2	1	1,21	0,75
3	1	1,02	0,61
4	1	0,89	0,53
5	1	0,80	0,49
10	5	0,67	0,41
15	5	0,59	0,38
30	15	0,50	0,34
45	15	0,49	0,33
60	15	0,48	0,32
90	30	0,47	0,31
120	30	0,46	0,30
150	30	0,41	0,27
180	30	0,41	0,27
210	30	0,41	0,27
240	30	0,41	0,27

**CONSOLIDADO DE PARAMETROS - ENSAYO DE INFILTRACIÓN**

PARAMETRO	NOTACION	Horizonte A	Horizonte B
Coefficiente K	K	1,2105	0,7678
Coefficiente n	n	0,216	0,209
Coef. Correlación	R ²	0,9528	0,9303
Conductividad Hidráulica Sat,	Ks	0,41 cm/h	0,27 cm/h

Tabla A-6. Curvas de conductividad hidráulica NO Saturada – Horizonte A.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA				
DATOS CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA NO SATURADA - MÉTODO DEL AIRE CALIENTE									
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,									
TRANSFORMADA DE BOLZTMAN – HORIZONTE A									
ID	Tiempo t (s)	Peso: W (g)	Evap, E (g)	Tiempo: t ^{1/2} (s)	ID	Tiempo t (s)	Peso: W (g)	Evap, E (g)	Tiempo: t ^{1/2} (s)
A1-1	0	446,4	0	0,0000	A1-17	160	443,9	2,5	12,6491
A1-2	10	445,9	0,5	3,1623	A1-18	170	443,8	2,6	13,0384
A1-3	20	445,8	0,6	4,4721	A1-19	180	443,7	2,7	13,4164
A1-4	30	445,6	0,8	5,4772	A1-20	190	443,6	2,8	13,7840
A1-5	40	445,5	0,9	6,3246	A1-21	200	443,4	3	14,1421
A1-6	50	445,3	1,1	7,0711	A1-22	210	443,3	3,1	14,4914
A1-7	60	445,2	1,2	7,7460	A1-23	220	443,2	3,2	14,8324
A1-8	70	445,0	1,4	8,3666	A1-24	230	443,1	3,3	15,1658
A1-9	80	444,9	1,5	8,9443	A1-25	240	443,1	3,3	15,4919
A1-10	90	444,8	1,6	9,4868	A1-26	300	442,7	3,7	17,3205
A1-11	100	444,6	1,8	10,0000	A1-27	360	442,2	4,2	18,9737
A1-12	110	444,5	1,9	10,4881	A1-28	420	441,7	4,7	20,4939
A1-13	120	444,3	2,1	10,9545	A1-29	480	441,2	5,2	21,9089
A1-14	130	444,2	2,2	11,4018	A1-30	540	440,7	5,7	23,2379
A1-15	140	444,1	2,3	11,8322	A1-31	600	440,3	6,1	24,4949
A1-16	150	444	2,4	12,2474	A1-32	660	440,0	6,4	25,6905

GRAFICA EVAPORACIÓN E vs t^{1/2}

$y = 0.2771x - 0.8954$
 $R^2 = 0.9919$


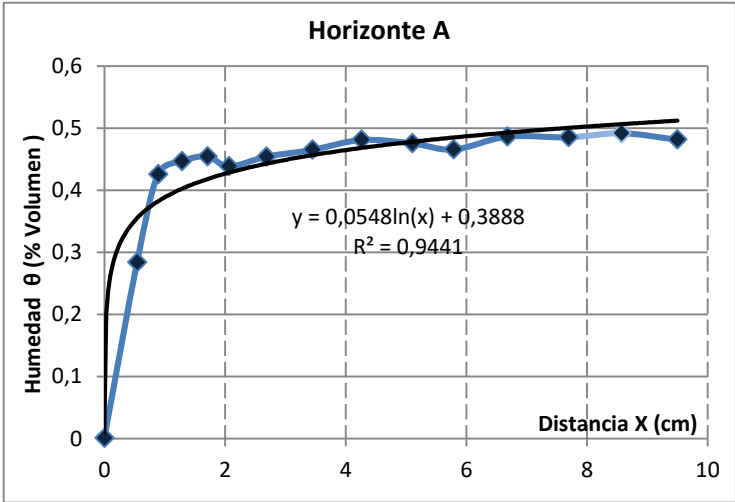
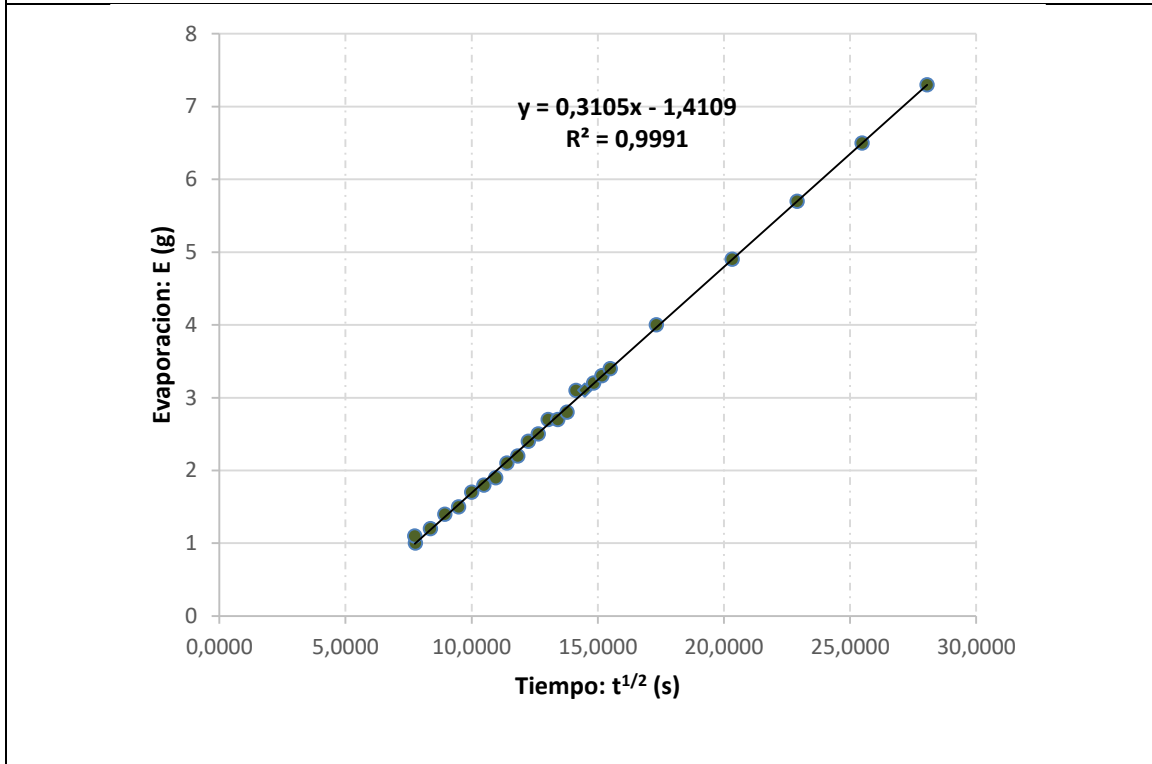
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA				
DATOS CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA NO SATURADA - MÉTODO DEL AIRE CALIENTE				
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá				
TRANSFORMADA DE BOLZTMAN – HORIZONTE A				
Humedad θ	Distancia x			
0,001	0,001			
0,2840	0,5436			
0,4259	0,8914			
0,4472	1,2834			
0,4550	1,7096			
0,4386	2,0676			
0,4544	2,6863			
0,4655	3,4517			
0,4814	4,2613			
0,4759	5,1063			
0,4660	5,7917			
0,4868	6,6809			
0,4856	7,6949			
0,4923	8,5750			
0,4819	9,5000			
Función F(θ,X)		$\theta = \beta(X) + \alpha$		
Teta (θ) vs Distancia (x)	Alfa (α)	0,388	Beta (β)	0,0548
$K(\theta) = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial h} = K(\theta) = -\frac{1}{2t} * \left[\frac{\partial x}{\partial \theta} \right]_{\theta x} * \int_{\theta_i}^{\theta x} x d\theta * \frac{\partial \theta}{\partial h}$				
<p>Considerando la función F(θ,X) = θ= β(X) + α donde $x = e^{\frac{\theta-\alpha}{\beta}}$ y el modelo de retención de humedad de Van Genuchten , La difusividad D(θ) y la $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ son expresadas como:</p>				
D(θ)		∂θ/∂h		
$-\frac{1}{2t} * \left[e^{2\left[\frac{\theta x - \alpha}{\beta}\right]} - e^{\frac{\theta_i + \theta x - 2\alpha}{\beta}} \right]$		$-[\theta_s - \theta_r] * m * n * \alpha * [1 + [\alpha h]^n]^{-m-1} * [\alpha h]^{n-1}$		
H	D(q)	∂θ/∂h	K(Q) cm/h	
2782,75	6,8449E-02	3,6755E-05	1,51E-03	
1477,39	6,8449E-02	1,3651E-04	5,61E-03	
837,69	7,5798E-01	3,4436E-04	1,57E-01	
778,60	1,0910E+00	3,8719E-04	2,53E-01	
801,70	1,0847E+00	3,8639E-04	2,51E-01	
759,56	1,1990E+00	3,3713E-04	2,43E-01	
731,41	1,2713E+00	5,1101E-04	3,90E-01	
693,07	1,2030E+00	5,5418E-04	4,00E-01	

Tabla A-7. Curvas de conductividad hidráulica NO Saturada – Horizonte B.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA				
DATOS CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA NO SATURADA - MÉTODO DEL AIRE CALIENTE									
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá									
TRANSFORMADA DE BOLZTMAN – HORIZONTE B									
ID	Tiempo t (s)	Peso: W (g)	Evap, E (g)	Tiempo: t ^{1/2} (s)	ID	Tiempo t (s)	Peso: W (g)	Evap, E (g)	Tiempo: t ^{1/2} (s)
B1-1	0	411,5	0,0	0,0000	B1-17	160	409	2,5	12,6491
B1-2	27	411,3	0,2	5,1903	B1-18	170	408,8	2,7	13,0384
B1-3	38	411	0,5	6,1565	B1-19	180	408,8	2,7	13,4164
B1-4	46	410,8	0,7	6,8006	B1-20	190	408,7	2,8	13,7840
B1-5	55	410,6	0,9	7,4448	B1-21	200	408,4	3,1	14,1421
B1-6	59	410,5	1,0	7,7668	B1-22	210	408,4	3,1	14,4914
B1-7	60	410,4	1,1	7,7460	B1-23	220	408,3	3,2	14,8324
B1-8	70	410,3	1,2	8,3666	B1-24	230	408,2	3,3	15,1658
B1-9	80	410,1	1,4	8,9443	B1-25	240	408,1	3,4	15,4919
B1-10	90	410,0	1,5	9,4868	B1-26	300	407,5	4,0	17,3205
B1-11	100	409,8	1,7	10,0000	B1-27	360	406,6	4,9	20,3272
B1-12	110	409,7	1,8	10,4881	B1-28	420	405,8	5,7	22,9037
B1-13	120	409,6	1,9	10,9545	B1-29	480	405,0	6,5	25,4802
B1-14	130	409,4	2,1	11,4018	B1-30	500	404,2	7,3	28,0567
B1-15	140	409,3	2,2	11,8322	B1-31	580	403,5	8,0	24,0832
B1-16	150	409,1	2,4	12,2474	B1-32	660	402,7	8,8	25,6905

GRAFICA EVAPORACIÓN E vs t^{1/2}




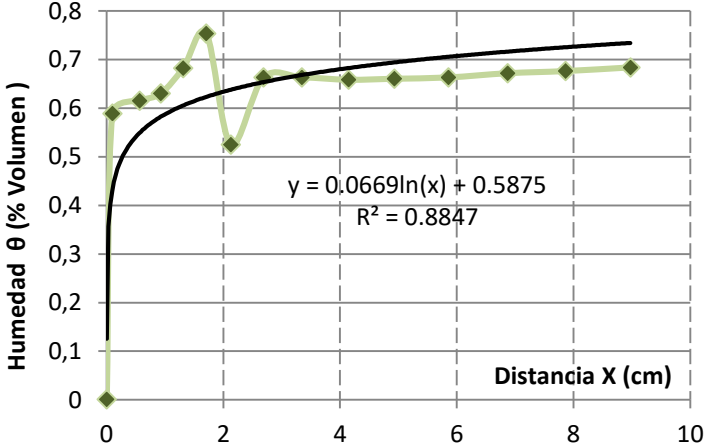
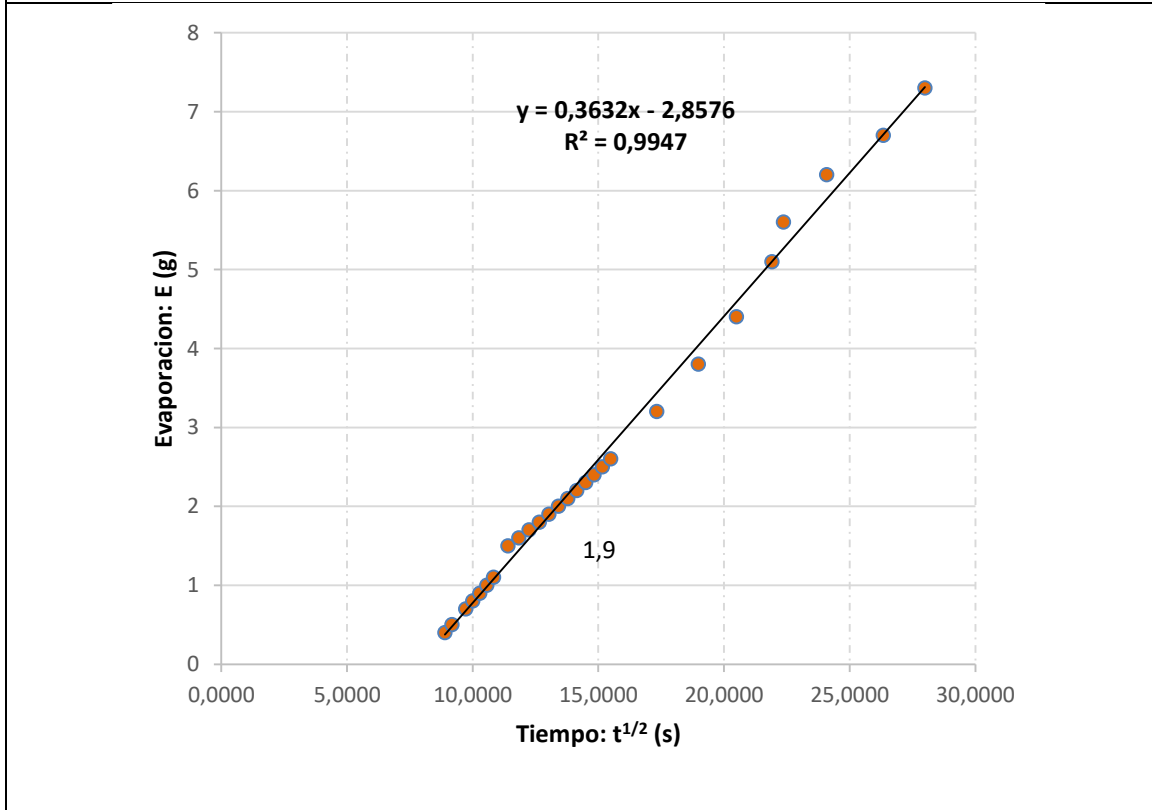
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA			
DATOS CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA NO SATURADA - MÉTODO DEL AIRE CALIENTE			
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,			
TRANSFORMADA DE BOLZTMAN – HORIZONTE B			
Humedad θ	Distancia x	<div style="text-align: center;"> <h3>Horizonte B</h3>  </div>	
0,001	0,001		
0,5888	0,0978		
0,6150	0,5636		
0,6305	0,9288		
0,6827	1,3126		
0,7537	1,7059		
0,5252	2,1262		
0,6634	2,6892		
0,6634	3,3471		
0,6584	4,1478		
0,6604	4,9288		
0,6631	5,8537		
0,6718	6,8718		
0,6762	7,8619		
Función F(θ,X)		$\theta = \beta(X) + \alpha$	
Teta (θ) vs Distancia (x)		Alfa (α)	Beta (β)
		0,5875	0,0669
$K(\theta) = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial h} = K(\theta) = -\frac{1}{2t} * \left[\frac{\partial x}{\partial \theta} \right]_{\theta x} * \int_{\theta_i}^{\theta x} x d\theta * \frac{\partial \theta}{\partial h}$			
<p>Considerando la función F(θ,X) = θ= β(X) + α donde $x = e^{\frac{\theta-\alpha}{\beta}}$ y el modelo de retención de humedad de Van Genuchten , La difusividad D(θ) y la $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ son expresadas como:</p>			
D(θ)		$\frac{\partial \theta}{\partial h}$	
$-\frac{1}{2t} * \left[e^{2\left[\frac{\theta x - \alpha}{\beta}\right]} - e^{\frac{\theta i + \theta x - 2\alpha}{\beta}} \right]$		$-[\theta_s - \theta_r] * m * n * \alpha * [1 + [\alpha h]^n]^{-m-1} * [\alpha h]^{n-1}$	
H	D(q)	$\frac{\partial \theta}{\partial h}$	K(Q) cm/h
5472,91	7,17E-02	2,47E-06	1,06E-02
4480,82	9,17E-02	3,00E-06	1,65E-02
1558,37	1,12E-01	7,77E-06	5,21E-02
1149,12	1,12E-01	9,65E-06	6,47E-02
891,289	1,12E-01	1,11E-05	7,41E-02
709,721	1,32E-01	1,19E-05	9,39E-02
380,915	3,14E-01	1,03E-05	1,94E-01
331,748	4,34E-01	9,24E-06	2,40E-01
303,234	5,15E-01	8,48E-06	2,62E-01
204,425	7,34E-01	5,16E-06	2,27E-01

Tabla A-8. Curvas de conductividad hidráulica NO Saturada – Horizonte C.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA				
DATOS CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA NO SATURADA - MÉTODO DEL AIRE CALIENTE									
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,									
TRANSFORMADA DE BOLZTMAN – HORIZONTE C									
ID	Tiempo t (s)	Peso: W (g)	Evap, E (g)	Tiempo: t ^{1/2} (s)	ID	Tiempo t (s)	Peso: W (g)	Evap, E (g)	Tiempo: t ^{1/2} (s)
C1-1	0	281,7	0,0	0,0000	C1-15	190	279,6	2,1	13,7840
C1-2	79	281,3	0,4	8,8976	C1-16	200	279,5	2,2	14,1421
C1-3	84	281,2	0,5	9,1744	C1-17	210	279,4	2,3	14,4914
C1-4	95	281	0,7	9,7281	C1-18	220	279,3	2,4	14,8324
C1-5	100	280,9	0,8	10,0050	C1-19	230	279,2	2,5	15,1658
C1-6	106	280,8	0,9	10,2818	C1-20	240	279,1	2,6	15,4919
C1-7	111	280,7	1,0	10,5587	C1-21	300	278,5	3,2	17,3205
C1-8	117	280,6	1,1	10,8355	C1-22	360	277,9	3,8	18,9737
C1-9	130	280,2	1,5	11,4018	C1-23	420	277,3	4,4	20,4939
C1-10	140	280,1	1,6	11,8322	C1-24	480	276,6	5,1	21,9089
C1-11	150	280,0	1,7	12,2474	C1-25	500	276,1	5,6	22,3607
C1-12	160	279,9	1,8	12,6491	C1-26	580	275,5	6,2	24,0832
C1-13	170	279,8	1,9	13,0384	C1-27	694	275,0	6,7	26,3394
C1-14	180	279,7	2,0	13,4164	C1-28	784	274,4	7,3	28,0006

GRAFICA EVAPORACIÓN E vs t^{1/2}




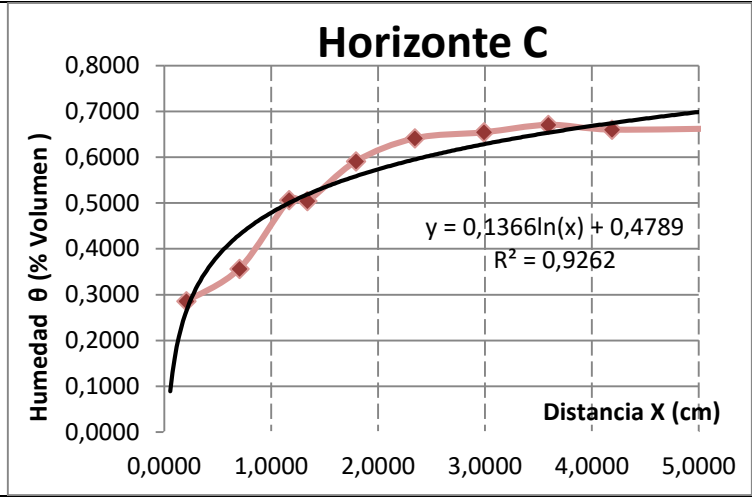

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA			
DATOS CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA NO SATURADA - MÉTODO DEL AIRE CALIENTE			
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO ₃ ⁻) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,			
TRANSFORMADA DE BOLZTMAN – HORIZONTE C			
Humedad θ	Distancia x		
0,001	0,001		
0,2857	0,2077		
0,3563	0,7038		
0,5064	1,1692		
0,5042	1,3403		
0,5910	1,7933		
0,6413	2,3453		
0,6544	2,9905		
0,6707	3,5943		
0,6603	4,1884		
0,6634	5,3900		
Función F(θ,X)		θ = β(X) + α	
Teta (θ) vs Distancia (x)		Alfa (α)	Beta (β)
		0,4789	0,1366
$K(\theta) = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial h} = K(\theta) = -\frac{1}{2t} * \left[\frac{\partial x}{\partial \theta} \right]_{\theta_x} * \int_{\theta_i}^{\theta_x} x d\theta * \frac{\partial \theta}{\partial h}$			
<p>Considerando la función F(θ,X) = θ = β(X) + α donde $x = e^{\frac{\theta-\alpha}{\beta}}$ y el modelo de retención de humedad de Van Genuchten, La difusividad D(θ) y la $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ son expresadas como:</p>			
D(θ)		$\frac{\partial \theta}{\partial h}$	
$-\frac{1}{2t} * \left[e^{2\left[\frac{\theta x - \alpha}{\beta}\right]} - e^{\frac{\theta i + \theta x - 2\alpha}{\beta}} \right]$		$-[\theta_s - \theta_r] * m * n * \alpha * [1 + [\alpha h]^n]^{-m-1} * [\alpha h]^{n-1}$	
H	D(q)	$\frac{\partial \theta}{\partial h}$	K(Q) cm/h
2917,23	1,0051E-01	2,1718E-07	1,31E-05
1623,26	1,0051E-01	3,1054E-07	1,87E-05
1047,77	1,6568E-01	3,7282E-06	3,71E-04
549,974	4,5542E-01	3,4525E-06	9,43E-04
554,831	4,4909E-01	3,4710E-06	9,35E-04
385,744	7,4617E-01	2,4642E-06	1,10E-03

Tabla A-9. Curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte A – Trazador Bromuros.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Curva de elución (BTC) - Transporte No Reactivo - Bromuros	

HORIZONTE A - BROMUROS**CONDICIONES INICIALES DEL ENSAYO**

<i>Datos de la columna experimental de suelo</i>			<i>Datos del Ensayo</i>		
Parámetro	Magnitud	Unidad	Parámetro	Magnitud	Unidad
Diámetro	8	pulg	Caudal	0,12859	L h ⁻¹
	20,32	cm		128,59	mL h ⁻¹
Área	324,29	cm ²	Concentración Inicial	151,05	mg L ⁻¹
Altura	20	cm	Velocidad	0,0066	cm min ⁻¹
Volumen Columna	6485,85	cm ³		0,0039	m h ⁻¹
Tiempo del Ensayo	2100	min		0,3965	cm h ⁻¹
Humedad Volumétrica	0,59784	cm ³ cm ⁻³	Velocidad Real de Poros	0,0110	cm min ⁻¹

RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES

TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA	TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA
0	0,0000	0,0000	1080	135,9215	0,8998
60	0,0000	0,0000	1140	138,9034	0,9196
120	0,6073	0,0040	1200	139,4014	0,9229
180	0,9376	0,0062	1260	141,3084	0,9355
240	2,5784	0,0171	1320	143,7376	0,9516
300	6,0913	0,0403	1380	143,9137	0,9528
360	10,5429	0,0698	1440	145,8996	0,9659
420	14,3507	0,0950	1500	146,1911	0,9678
480	25,5881	0,1694	1560	146,5980	0,9705
540	32,5881	0,2157	1620	146,5251	0,9700
600	46,1953	0,3058	1680	146,5312	0,9701
660	57,7307	0,3822	1740	146,5130	0,9700
720	72,9862	0,4832	1800	145,8996	0,9659
780	88,2418	0,5842	1860	146,1911	0,9678
840	105,5501	0,6988	1920	146,5980	0,9705
900	121,2368	0,8026	1980	146,5312	0,9701
960	126,9030	0,8401	2040	146,5130	0,9700
1020	133,5409	0,8841	2100	146,5130	0,9700

Tabla A-10. Curvas elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte A – Nitratos (NO_3^-).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Curva de elución (BTC) - Transporte de Solute – Nitratos (NO_3^-).	


HORIZONTE A – NITRATOS (NO_3^-).**CONDICIONES INICIALES DEL ENSAYO**

<i>Datos de la columna experimental de suelo</i>			<i>Datos del Ensayo</i>		
Parámetro	Magnitud	Unidad	Parámetro	Magnitud	Unidad
Diámetro	8	pulg	Caudal	0,12859	L h ⁻¹
	20,32	cm		128,59	mL h ⁻¹
Área	324,29	cm ²	Concentración Inicial	200,35	mg L ⁻¹
Altura	20	cm	Velocidad	0,0066	cm min ⁻¹
Volumen Columna	6485,85	cm ³		0,0039	m h ⁻¹
Tiempo del Ensayo	2100	min		0,3965	cm h ⁻¹
Humedad Volumétrica	0,5978	cm ³ cm ⁻³	Velocidad Real de Poros	0,0110	cm min ⁻¹

RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES

TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA	TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA
0	0,0000	0,0000	1080	169,4422	0,8457
60	0,0000	0,0000	1140	172,4628	0,8608
120	0,0000	0,0000	1200	176,2464	0,8797
180	0,0000	0,0000	1260	176,8782	0,8828
240	0,0000	0,0000	1320	179,2978	0,8949
300	0,0000	0,0000	1380	182,3801	0,9103
360	0,1002	0,0005	1440	182,6036	0,9114
420	0,7706	0,0038	1500	185,1234	0,9240
480	7,7289	0,0386	1560	185,4933	0,9258
540	13,3772	0,0668	1620	186,0096	0,9284
600	18,2087	0,0909	1680	185,9171	0,9280
660	41,3492	0,2064	1740	185,9248	0,9280
720	73,2510	0,3656	1800	185,1234	0,9240
780	92,6079	0,4622	1860	185,9017	0,9279
840	111,9648	0,5588	1920	186,3055	0,9299
900	133,9263	0,6685	1980	186,3385	0,9301
960	153,8303	0,7678	2040	186,9892	0,9333
1020	161,0198	0,8037	2100	187,1066	0,9339

Tabla A-11. Curvas elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte B – Trazador Bromuros (Br).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Curva de elución (BTC) - Transporte No Reactivo – Bromuros (Br).	

HORIZONTE B – BROMUROS (Br).**CONDICIONES INICIALES DEL ENSAYO**

<i>Datos de la columna experimental de suelo</i>			<i>Datos del Ensayo</i>		
Parámetro	Magnitud	Unidad	Parámetro	Magnitud	Unidad
Diámetro	8	pulg	Caudal	0,08474	L h ⁻¹
	20,32	cm		84,74	mL h ⁻¹
Área	324,29	cm ²	Concentración Inicial	151,05	mg L ⁻¹
Altura	20	cm	Velocidad	0,0043	cm min ⁻¹
Volumen Columna	6485,85	cm ³		0,0026	m h ⁻¹
Tiempo del Ensayo	2160	min		0,2613	cm h ⁻¹
Humedad Volumétrica	0,5784	cm ³ cm ⁻³	Velocidad Real de Poros	0,0075	cm min ⁻¹

RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES

TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA	TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA
0	0,0000	0,0000	1080	72,9862	0,4832
60	0,0000	0,0000	1140	88,2418	0,5842
120	0,0000	0,0000	1200	105,5501	0,6988
180	0,1000	0,0007	1260	121,2368	0,8026
240	0,1500	0,0010	1320	126,9030	0,8401
300	0,3186	0,0021	1380	133,5409	0,8841
360	0,6372	0,0042	1440	135,9215	0,8998
420	0,9465	0,0063	1500	139,4014	0,9229
480	1,1416	0,0076	1560	143,7376	0,9516
540	1,4491	0,0096	1620	143,9137	0,9528
600	4,0473	0,0268	1680	145,8996	0,9659
660	8,2432	0,0546	1740	146,1911	0,9678
720	10,5400	0,0698	1800	146,5980	0,9705
780	14,3507	0,0950	1860	146,5312	0,9701
840	28,4694	0,1885	1920	146,5130	0,9700
900	42,5881	0,2819	1980	146,5130	0,9700
960	57,7307	0,3822	2040	146,5130	0,9700
1020	65,3585	0,4327	2100	146,5130	0,9700

Tabla A-12. Curvas elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte B – Nitratos (NO_3^-).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Curva de elución (BTC) - Transporte de Solute – Nitratos (NO_3^-),	

HORIZONTE B – NITRATOS (NO_3^-),
CONDICIONES INICIALES DEL ENSAYO

<i>Datos de la columna experimental de suelo</i>			<i>Datos del Ensayo</i>		
Parámetro	Magnitud	Unidad	Parámetro	Magnitud	Unidad
Diámetro	8	pulg	Caudal	0,08474	L h ⁻¹
	20,32	cm		84,74	mL h ⁻¹
Área	324,29	cm ²	Concentración Inicial	200,35	mg L ⁻¹
Altura	20	cm	Velocidad	0,0043	cm min ⁻¹
Volumen Columna	6485,85	cm ³		0,0026	m h ⁻¹
Tiempo del Ensayo	2160	min		0,2613	cm h ⁻¹
Humedad Volumétrica	0,5784	cm ³ cm ⁻³	Velocidad Real de Poros	0,0075	cm min ⁻¹

RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES

TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA	TIEMPO (min)	CONCENTRACION (mg L ⁻¹)	CONCENTRACION RELATIVA
0	0,0000	0,0000	1080	18,2087	0,0909
60	0,0000	0,0000	1140	36,1232	0,1803
120	0,0000	0,0000	1200	54,0376	0,2697
180	0,0000	0,0000	1260	73,2510	0,3656
240	0,0000	0,0000	1320	82,9295	0,4139
300	0,0000	0,0000	1380	92,6079	0,4622
360	0,0000	0,0000	1440	111,9648	0,5588
420	0,0000	0,0000	1500	133,9263	0,6685
480	0,0000	0,0000	1560	153,8303	0,7678
540	0,0000	0,0000	1620	161,0198	0,8037
600	0,1269	0,0006	1680	169,4422	0,8457
660	0,1903	0,0009	1740	172,4628	0,8608
720	0,4042	0,0020	1800	176,8782	0,8828
780	0,8085	0,0040	1860	182,3801	0,9103
840	1,8387	0,0092	1920	182,6036	0,9114
900	5,1354	0,0256	1980	185,1234	0,9240
960	10,4593	0,0522	2040	185,4933	0,9258
1020	13,3736	0,0668	2100	186,0096	0,9284

Tabla A-13. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte A – Trazador Bromuros (Br).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS					
Curva de elución (BTC) - Transporte No Reactivo – Bromuros (Br),					
Tiempo	OBSERVADOS	SIMULADOS _CDE	ERROR _CDE	SIMULADOS _PNE	ERROR_PNE
0	0	0	0,0000	0	0
60	0	0,0105	-0,0105	0	0
120	0,004	0,078	-0,0740	0	0,0040
180	0,0062	0,1599	-0,1537	0	0,0062
240	0,0171	0,2338	-0,2167	0,0003	0,0168
300	0,0403	0,2969	-0,2566	0,0038	0,0365
360	0,0698	0,3504	-0,2806	0,0193	0,0505
420	0,095	0,3961	-0,3011	0,0573	0,0377
480	0,1694	0,4356	-0,2662	0,1226	0,0468
540	0,2157	0,4700	-0,2543	0,2115	0,0042
600	0,3058	0,5003	-0,1945	0,3148	-0,0090
660	0,3822	0,5272	-0,1450	0,4220	-0,0398
720	0,4832	0,5512	-0,0680	0,5245	-0,0413
780	0,5842	0,5729	0,0113	0,6166	-0,0324
840	0,6988	0,5925	0,1063	0,6956	0,0032
900	0,8026	0,6104	0,1922	0,7609	0,0417
960	0,8401	0,6267	0,2134	0,8133	0,0268
1020	0,8841	0,6418	0,2423	0,8544	0,0297
1080	0,8998	0,6556	0,2442	0,886	0,0138
1140	0,9196	0,6685	0,2511	0,9099	0,0097
1200	0,9229	0,6804	0,2425	0,9278	-0,0049
1260	0,9355	0,6916	0,2439	0,941	-0,0055
1320	0,9516	0,702	0,2496	0,9507	0,0009
1380	0,9528	0,7118	0,2410	0,9577	-0,0049
1440	0,9659	0,7209	0,2450	0,9628	0,0031
1500	0,9678	0,7296	0,2382	0,9664	0,0014
1560	0,9705	0,7377	0,2328	0,969	0,0015
1620	0,9700	0,7454	0,2246	0,9709	-0,0009
1680	0,9701	0,7527	0,2174	0,9723	-0,0022
1740	0,9700	0,7596	0,2104	0,9732	-0,0032
1800	0,9659	0,7662	0,1997	0,9739	-0,008
1860	0,9678	0,7724	0,1954	0,9744	-0,0066
1920	0,9705	0,7784	0,1921	0,9747	-0,0042
1980	0,9701	0,784	0,1861	0,975	-0,0049
2040	0,9700	0,7894	0,1806	0,9752	-0,0052
2100	0,9700	0,7946	0,1754	0,9753	-0,0053
2160	0,9700	0,7996	0,1704	0,9754	-0,0054

Tabla A-14. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte A – Nitratos (NO₃⁻).


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA						UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS						
Curva de elución (BTC) - Transporte de Soluto – Nitratos (NO₃⁻).						
Tiempo	OBSERVADOS	SIMULADOS _CDE	ERROR _CDE	SIMULADOS _PNE	ERROR_PNE	
0	0	0	0	0	0	
60	0	0,0077	-0,0077	0	0	
120	0	0,0661	-0,0661	0	0	
180	0	0,1422	-0,1422	0	0	
240	0	0,2132	-0,2132	0	0	
300	0	0,2748	-0,2748	0,0009	-0,0009	
360	0,0005	0,3278	-0,3273	0,0061	-0,0056	
420	0,0038	0,3734	-0,3696	0,0225	-0,0187	
480	0,0386	0,413	-0,3744	0,0569	-0,0183	
540	0,0668	0,4477	-0,3809	0,1124	-0,0456	
600	0,0909	0,4784	-0,3875	0,1867	-0,0958	
660	0,2064	0,5056	-0,2992	0,2741	-0,0677	
720	0,3656	0,5301	-0,1645	0,3674	-0,0018	
780	0,4622	0,5522	-0,09	0,4602	0,002	
840	0,5588	0,5722	-0,0134	0,5476	0,0112	
900	0,6685	0,5905	0,078	0,6262	0,0423	
960	0,7678	0,6073	0,1605	0,6947	0,0731	
1020	0,8037	0,6227	0,181	0,7527	0,051	
1080	0,8457	0,6370	0,2087	0,8006	0,0451	
1140	0,8608	0,6502	0,2106	0,8396	0,0212	
1200	0,8797	0,6625	0,2172	0,8708	0,0089	
1260	0,8828	0,6740	0,2088	0,8953	-0,0125	
1320	0,8949	0,6848	0,2101	0,9145	-0,0196	
1380	0,9103	0,6948	0,2155	0,9294	-0,0191	
1440	0,9114	0,7043	0,2071	0,9408	-0,0294	
1500	0,924	0,7132	0,2108	0,9494	-0,0254	
1560	0,9258	0,7217	0,2041	0,956	-0,0302	
1620	0,9284	0,7296	0,1988	0,961	-0,0326	
1680	0,928	0,7372	0,1908	0,9647	-0,0367	
1740	0,928	0,7444	0,1836	0,9675	-0,0395	
1800	0,924	0,7512	0,1728	0,9695	-0,0455	
1860	0,9279	0,7577	0,1702	0,9711	-0,0432	
1920	0,9299	0,7638	0,1661	0,9722	-0,0423	
1980	0,9301	0,7697	0,1604	0,9731	-0,043	
2040	0,9333	0,7754	0,1579	0,9737	-0,0404	
2100	0,9339	0,7808	0,1531	0,9742	-0,0403	
2160	0,9353	0,7859	0,1494	0,9745	-0,0392	

Tabla A-15. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte B – Trazador Bromuros (Br).



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS					
Curva de elución (BTC) - Transporte No Reactivo – Bromuros (Br).					
Tiempo	OBSERVADOS	SIMULADOS _CDE	ERROR _CDE	SIMULADOS _PNE	ERROR_PNE
0	0	0	0	0,0000	0,0000
60	0	0,0003	-0,0003	0,0000	0,0000
120	0	0,0127	-0,0127	0,0000	0,0000
180	0,0007	0,0457	-0,045	0,0000	0,0007
240	0,001	0,0891	-0,0881	0,0000	0,001
300	0,0021	0,1347	-0,1326	0,0000	0,0021
360	0,0042	0,179	-0,1748	0,0000	0,0042
420	0,0063	0,2206	-0,2143	0,0000	0,0063
480	0,0076	0,2589	-0,2513	0,0004	0,0072
540	0,0096	0,2942	-0,2846	0,0024	0,0072
600	0,0268	0,3265	-0,2997	0,0092	0,0176
660	0,0546	0,3561	-0,3015	0,0257	0,0289
720	0,0698	0,3834	-0,3136	0,0573	0,0125
780	0,095	0,4085	-0,3135	0,1074	-0,0124
840	0,1885	0,4317	-0,2432	0,176	0,0125
900	0,2819	0,4532	-0,1713	0,2599	0,022
960	0,3822	0,4732	-0,0910	0,3531	0,0291
1020	0,4327	0,4918	-0,0591	0,4492	-0,0165
1080	0,4832	0,5092	-0,026	0,5423	-0,0591
1140	0,5842	0,5255	0,0587	0,6278	-0,0436
1200	0,6988	0,5407	0,1581	0,7029	-0,0041
1260	0,8026	0,5551	0,2475	0,7665	0,0361
1320	0,8401	0,5686	0,2715	0,8186	0,0215
1380	0,8841	0,5814	0,3027	0,8602	0,0239
1440	0,8998	0,5935	0,3063	0,8926	0,0072
1500	0,9229	0,6049	0,318	0,9172	0,0057
1560	0,9516	0,6158	0,3358	0,9357	0,0159
1620	0,9528	0,6261	0,3267	0,9493	0,0035
1680	0,9659	0,6359	0,33	0,9592	0,0067
1740	0,9678	0,6452	0,3226	0,9662	0,0016
1800	0,9705	0,6541	0,3164	0,9713	-0,0008
1860	0,9701	0,6627	0,3074	0,9748	-0,0047
1920	0,97	0,6708	0,2992	0,9772	-0,0072
1980	0,97	0,6786	0,2914	0,9789	-0,0089
2040	0,97	0,6861	0,2839	0,9801	-0,0101
2100	0,97	0,6932	0,2768	0,9809	-0,0109
2160	0,97	0,7001	0,2699	0,9814	-0,0114

Tabla A-16. Consolidado de resultados modelos CDE y PNE curvas de elución (*Breakthrough Curves - BTC*). Horizonte B – Nitratos (NO₃).

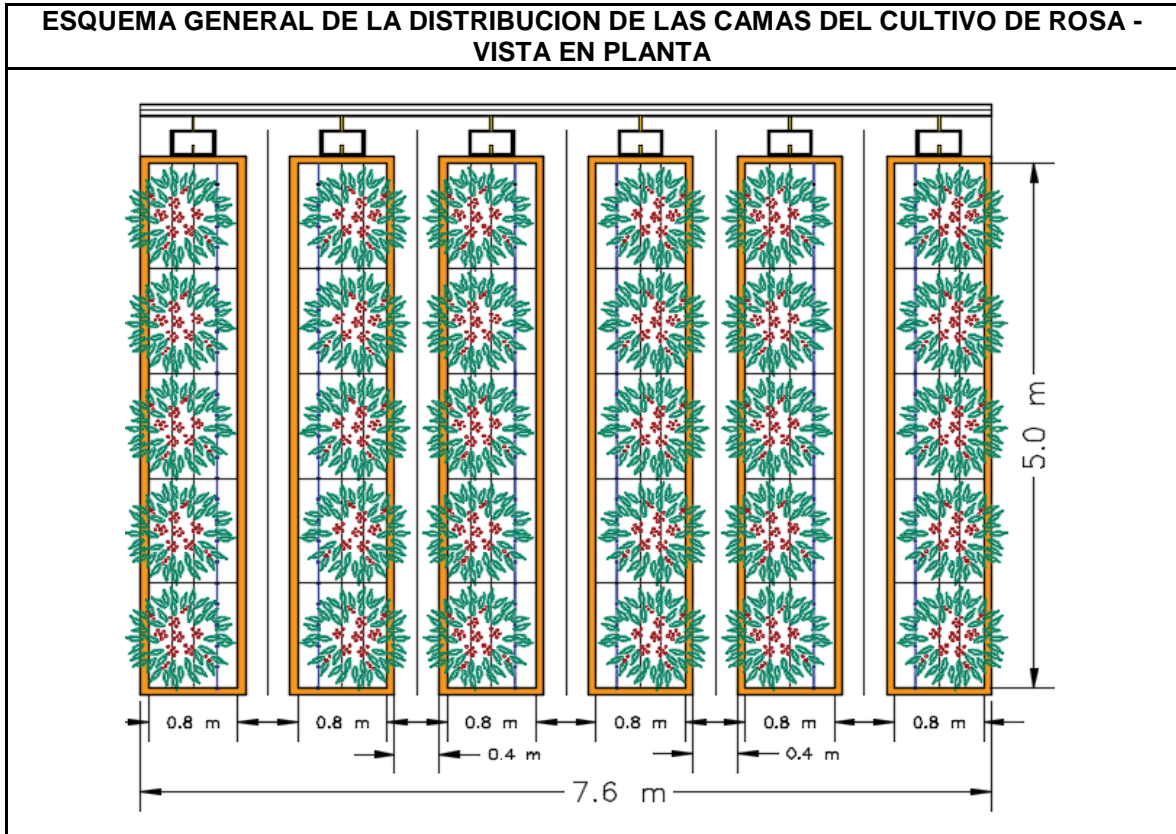
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA					 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS					
Curva de elución (BTC) - Transporte de Soluto – Nitratos (NO₃).					
Tiempo	OBSERVADOS	SIMULADOS _CDE	ERROR _CDE	SIMULADOS _PNE	ERROR_PNE
0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0
120	0	0,0025	-0,0025	0	0
180	0	0,0148	-0,0148	0	0
240	0	0,0371	-0,0371	0	0
300	0	0,0655	-0,0655	0	0
360	0	0,0966	-0,0966	0	0
420	0	0,1284	-0,1284	0	0
480	0	0,1596	-0,1596	0	0
540	0	0,1897	-0,1897	0	0
600	0,0006	0,2183	-0,2177	0,0002	0,0004
660	0,0009	0,2454	-0,2445	0,0009	0
720	0,002	0,271	-0,269	0,0032	-0,0012
780	0,004	0,2951	-0,2911	0,0088	-0,0048
840	0,0092	0,3178	-0,3086	0,0199	-0,0107
900	0,0256	0,3391	-0,3135	0,0392	-0,0136
960	0,0522	0,3592	-0,307	0,0685	-0,0163
1020	0,0668	0,3782	-0,3114	0,1091	-0,0423
1080	0,0909	0,3962	-0,3053	0,1605	-0,0696
1140	0,1803	0,4131	-0,2328	0,2215	-0,0412
1200	0,2697	0,4292	-0,1595	0,2897	-0,02
1260	0,3656	0,4444	-0,0788	0,3621	0,0035
1320	0,4139	0,4589	-0,045	0,4359	-0,022
1380	0,4622	0,4727	-0,0105	0,5082	-0,046
1440	0,5588	0,4858	0,073	0,577	-0,0182
1500	0,6685	0,4982	0,1703	0,6405	0,028
1560	0,7678	0,5101	0,2577	0,6977	0,0701
1620	0,8037	0,5215	0,2822	0,7482	0,0555
1680	0,8457	0,5324	0,3133	0,7918	0,0539
1740	0,8608	0,5428	0,318	0,8289	0,0319
1800	0,8828	0,5528	0,33	0,8599	0,0229
1860	0,9103	0,5624	0,3479	0,8855	0,0248
1920	0,9114	0,5716	0,3398	0,9064	0,005
1980	0,924	0,5804	0,3436	0,9232	0,0008
2040	0,9258	0,5889	0,3369	0,9366	-0,0108
2100	0,9284	0,5971	0,3313	0,9472	-0,0188
2160	0,928	0,6049	0,3231	0,9555	-0,0275

Anexo B: Análisis de flujos máxicos de nitratos (NO_3^-) y balance hídrico.

Tabla B- 1. Consolidado de resultados del flujo másico de NO_3^-

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		
VARIABLES DE PROCESO - FLORICULTURA DE ROSA		
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,		

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR	NOT,	PARAMETRO	UNIDAD	VALOR	NOT,
Longitud Cama	m	5	Lc	Caudal Riego por Gotero	L h ⁻¹	1,2	QRg
Ancho Cama	m	0,8	Bc		mm día ⁻¹	0,3	
Área Cama	m ²	4	Ac		L m ⁻²		
Distancia Entre Goteros	cm	20	Dg	Caudal Total por Cama	L h ⁻¹	27,6	QRTc
	m	0,2			mm día ⁻¹	6,9	
# Goteros Cama	--	23	N		L/m ²		
Pulsos Riego por día	--	5	PRd	Volumen de Riego	L	27,6	VR
Tiempo pulso de Riego	min	12	TPR		m ³	0,0276	
Tiempo Total de Riego	min	60	TTR	Tiempo Total producción	Días	77	TTPp
	Horas	1,00			Semanas	11	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
VARIABLES DE PROCESO - FLORICULTURA DE ROSA	
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,	

FECHA	SEMANA	ESTADIO	HIDROCLIMATOLOGIA					
			TEMPERATURA			RADIACIÓN SOLAR AMBIENTAL (Ra)		
			MAX	MED	MIN	Cal/cm ²	KW/m ² -Día	MJ/m ² -h
			°C	°C	°C			
06/06/2017	1	Pinch	20,0	14,5	9,0	278,52	3,22	11,60
16/06/2017	3	Transición	20,4	15,7	11,0	332,28	3,85	13,84
30/06/2017	5		20,6	15,1	9,6	337,58	3,91	14,07
07/07/2017	6	Primordio	19,4	13,0	6,6	399,35	4,62	16,64
16/07/2017	7	Arroz	22,4	14,2	6	317,47	3,67	13,23
22/07/2017	8	Arveja	19,0	14,7	10,4	296,12	3,43	12,34
31/07/2017	9	Garbanzo	18,4	13,3	8,2	303,98	3,52	12,67
05/08/2017	10	Rayar Color	19,2	14,7	10,2	398,11	4,61	16,59
10/08/2017	11	Cosecha	20,0	13,9	7,8	241,12	2,79	10,05

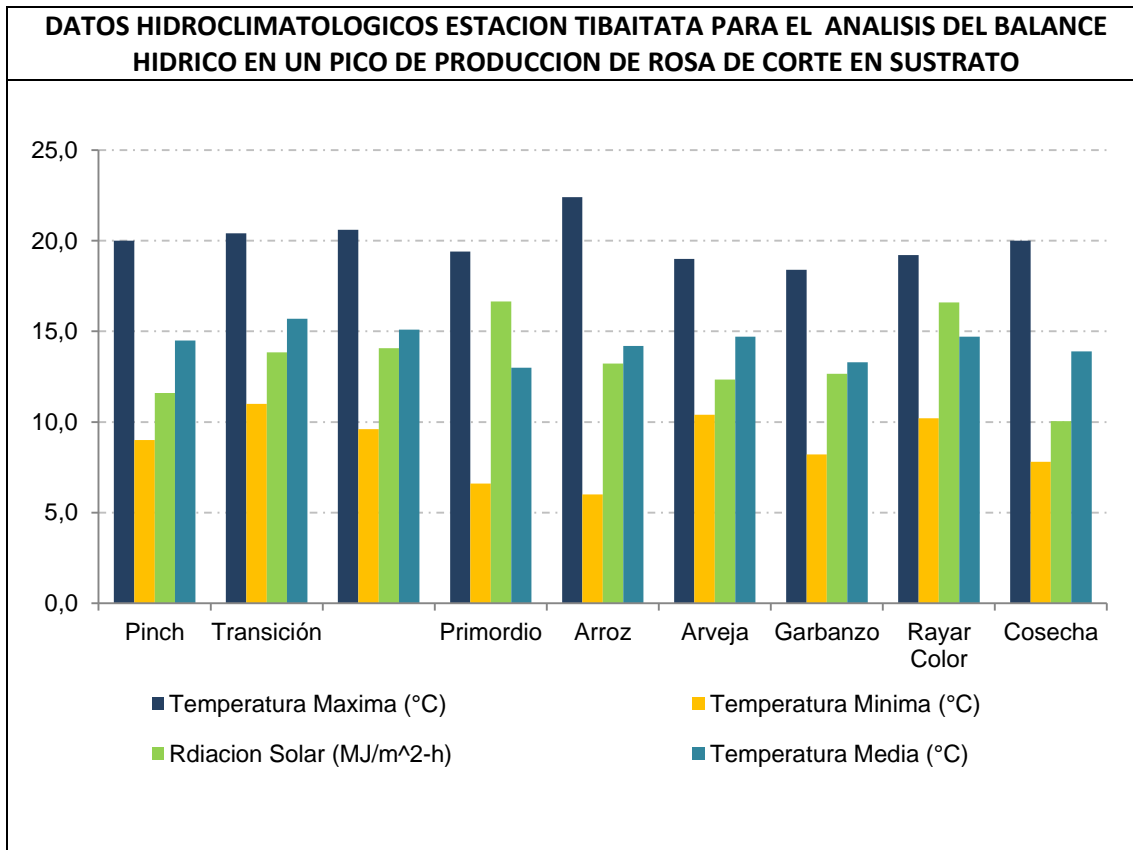


Tabla B-2. Consolidado de resultados de la concentración de Nitratos (NO_3^-) en las dos repeticiones para los sustratos cascarilla de arroz y fibra de coco.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA						
DATOS DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS - FLORICULTURA DE ROSA						
Proyecto: Modelación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) en suelo de un proceso de floricultura, ubicado en la Sabana de Bogotá,						
CONCENTRACIÓN DE NITRATOS (NO_3) TRATAMIENTOS 1 Y 2,						
Estadio	Tratamiento	Repetición	CASCARILLA ARROZ		FIBRA DE COCO	
			pH Unidad pH	NO_3 mg L^{-1} NO_3	pH Unidad pH	NO_3 mg L^{-1} NO_3
Pinch	1	1	6,71	34,65	6,89	28,76
Pinch	1	2	6,8	29,04	6,81	31,33
Vegetativo	1	1	6,96	29,69	6,96	27,81
Vegetativo	1	2	6,91	26,52	6,81	25,49
Vegetativo	4	1	7,21	27,84	7,03	22,58
Vegetativo	4	2	7,02	24,19	6,81	24,72
Primordio	1	2	7,11	43,45	6,96	43,10
Primordio	1	3	7,28	41,95	6,89	46,37
Arroz	7	1	6,56	82,33	6,5	69,52
Arroz	7	3	6,71	78,44	6,79	69,45
Arveja	1	1	6,57	93,98	6,54	87,28
Arveja	1	3	6,57	102,21	6,59	88,74
Garbanzo	1	1	6,73	114,93	6,61	109,23
Garbanzo	1	2	6,33	109,11	6,59	101,08
Rayar color	1	1	6,49	44,67	6,97	41,05
Rayar color	1	3	6,75	46,92	6,82	43,70
Cosecha	1	1	6,79	45,21	7,01	45,78
Cosecha	1	3	6,84	44,29	7,00	38,36

CONSOLIDADO VALORES PROMEDIO NITRATOS (NO_3) TRATAMIENTOS 1 Y 2,		
Estadio Fenológico	CASCARILLA ARROZ	
	pH	NO_3
	Unidad pH	$\text{mg L}^{-1} \text{NO}_3$
SEMANA_1 Pinch	6,76	31,85
SEMANA_3 Vegetativa	6,94	28,27
SEMANA_5 Vegetativa	7,12	26,01
SEMANA_6 Primordio	6,94	42,70
SEMANA_7 Arroz	7,06	80,38
SEMANA_8 Arveja	7,12	98,09
SEMANA_9 Garbanzo	7,12	112,02
SEMANA_10 rayar Color	7,02	45,80
SEMANA_11 Cosecha	7,11	44,75

Tabla B-3. Consolidado de variables climatológicas y el balance hídrico para cada estadio fenológico del agroecosistema de cultivo de rosa sin suelo.

VARIABLE	UNIDAD	SEMANAS Y ESTADIO FENOLOGICO									
		1	3	5	6	7	8	9	10	11	
		Pinch	Vegetativo		Primordio	Arroz	Arveja	Garbanzo	Rayar Color	Corte	
DATOS CLIMATICOS	Temperatura Mínima (Tmin)	°C	20	20,4	20,6	19,4	22,4	19	18,4	19,2	20
	Temperatura Media (Tmed)	°C	14,5	15,7	15,1	13	14,2	14,7	13,3	14,7	13,9
	Temperatura Máxima (Tmax)	°C	9	11	9,6	6,6	6	10,4	8,2	10,2	7,8
	Radiación Solar Ambiental (Ra)	Cal /cm ²	278,5	332,2	337,5	399,3	317,4	296,1	303,9	398,1	241,1
	Radiación Solar Neta (Rs)	MJ /m ² -h	3,38	3,45	4,1	5,64	5,75	2,81	3,42	3,96	3,25
BALANCE HIDRICO	Caudal de Riego (QR)	mm día ⁻¹	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
	Evapotranspiración Potencial (ETo)	mm día ⁻¹	4,82	5,32	6,09	7,21	8,02	4,06	4,48	5,72	4,44
	Coefficiente de Cultivo (Kc)	--	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	1,5	1,26	0,99	0,95
	Evapotranspiración Real (ETc)	mm día ⁻¹	3,81	4,2	4,81	5,7	6,34	6,09	5,64	5,66	4,22
	Porcentaje Evapotranspiración (%ETc)	%	55,2%	60,9%	69,6%	82,5%	91,8%	88,3%	81,7%	82,0%	61,1%
	Caudal de Lixiviación (QLIX)	mm día ⁻¹	3,09	2,7	2,09	1,2	0,56	0,81	1,26	1,24	2,68
	Porcentaje Lixiviación (%LIX)	%	44,8%	39,0%	30,3%	17,4%	8,1%	11,6%	18,2%	17,9%	38,9%

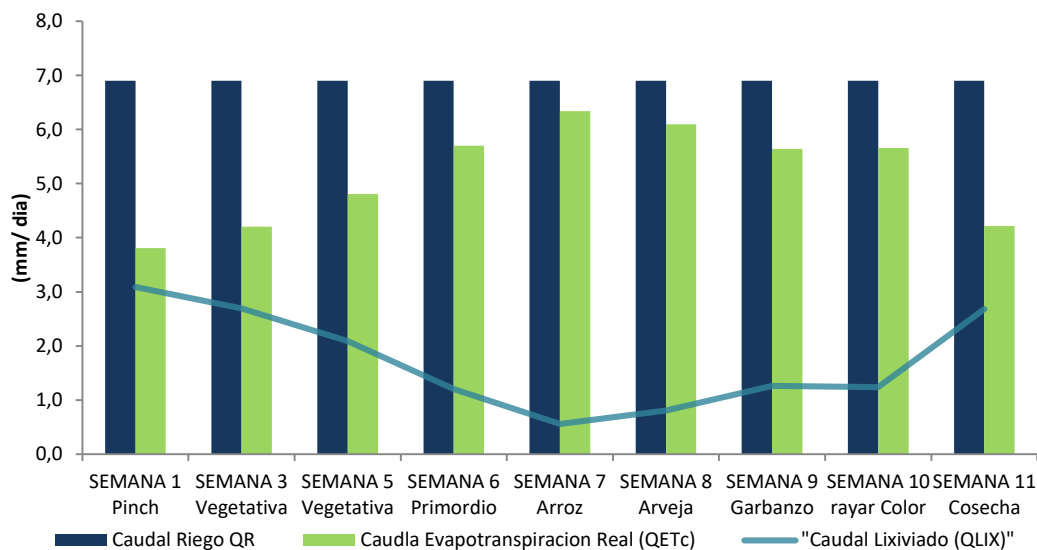
GRAFICA DEL BALANCE HIDRICO

Tabla B-4. Consolidado de las concentraciones y flujo másico de nitratos cuantificados para cada estado fenológico del agroecosistema de cultivo de rosa sin suelo.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA													
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS													
Resultados Flujos másicos y concentraciones Nitratos (NO ₃ ⁻),													
VARIABLE		UNIDAD	SEMANAS Y ESTADIO FENOLOGICO										
			1	3	5	6	7	8	9	10	11		
			Pinch	Vegetativo		Primordio	Arroz	Arveja	Garbanzo	Rayar Color	Corte		
CARACTERISTICAS FISIQUIMICAS	Reservorio (RES)	mg L ⁻¹	1,3	1,5	0,6	1,6	11,6	11,5	19,3	20,3	17,6		
		Fertirriego (FER)	mg L ⁻¹	136	136	136	136	136	136	136	136	136	
		Riego (R)	mg L ⁻¹	137,3	137,5	136,6	137,6	147,6	147,5	155,3	156,3	153,6	
	Cascarilla Arroz (CA)	Masa en Riego (MR)	pH	Unidad pH	6,71	6,96	7,21	7,11	6,56	6,57	6,73	6,49	6,79
			NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	34,65	29,69	27,84	43,45	82,33	93,98	114,93	44,67	45,21
		Unidad Experimental 2	pH	Unidad pH	6,80	6,91	7,02	7,28	6,71	6,57	6,33	6,75	6,84
			NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	29,04	26,52	24,19	41,95	78,44	102,21	109,11	46,92	44,29
			Masa en Riego (M _R)	g día ⁻¹	90,95	90,95	91,08	90,48	91,15	97,77	97,7	102,87	103,53
FLUJO MASICO DE NITRATOS	Cascarilla Arroz (CA)	Masa Evapotranspirada (M _{ETc})	g día ⁻¹	9,45	9,45	7,32	5,22	4,93	4,33	7,58	13,55	5,45	
		Masa Lixiviado (M _{LIX})	g día ⁻¹	81,5	81,5	83,76	85,26	86,22	93,44	90,12	89,32	98,08	
		Porcentaje Lixiviación (% _{LIX})	--	0,1	0,1	0,08	0,06	0,05	0,04	0,08	0,13	0,05	
		Coef, de Ocupación Hectárea*	--	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
		Aporte por fuente de Área (AFA)	g día ⁻¹ – m ²	29,11	29,11	29,92	30,45	30,79	33,37	32,19	31,9	35,03	

* Las consideraciones del coeficiente de ocupación por área, se realizan de acuerdo con una relación promedio entre el área dispuesta para las camas de cultivo y el área de libre entre camas (pasillos) para la ejecución de las labores propias del cultivo

Anexo C: Consolidado de resultados de simulación de la dinámica del transporte de NO_3^- - Hydrus 1D.

Tabla C-1. Consolidado de resultados de la simulación de la dinámica del transporte de nitratos (NO_3^-) – Hydrus 1D – Escenario 1 Condiciones Normales.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Resultados simulación transporte– Nitratos (NO_3^-) Hydrus 1D – Escenario 1 Condiciones Normales.	

Prof, (cm)	Concentración de nitratos en el Tiempo (Días)					
	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (102 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (201 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (300 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (345 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (365 Días)
95	0,00E+00	2,65E-08	5,71E+00	1,29E+01	1,39E+01	1,37E+01
90	0,00E+00	2,32E-06	7,11E+00	1,39E+01	1,46E+01	1,47E+01
85	0,00E+00	1,88E-04	8,78E+00	1,51E+01	1,55E+01	1,55E+01
80	0,00E+00	1,34E-02	1,05E+01	1,63E+01	1,65E+01	1,64E+01
75	0,00E+00	3,58E-01	1,22E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,72E+01
70	0,00E+00	1,50E+00	1,40E+01	1,88E+01	1,82E+01	1,81E+01
65	0,00E+00	3,14E+00	1,57E+01	2,00E+01	1,91E+01	1,92E+01
60	3,47E-28	5,05E+00	1,75E+01	2,14E+01	2,03E+01	2,04E+01
55	6,39E-24	7,50E+00	1,94E+01	2,28E+01	2,16E+01	2,16E+01
50	9,61E-20	1,05E+01	2,13E+01	2,42E+01	2,29E+01	2,30E+01
45	1,14E-15	1,40E+01	2,33E+01	2,57E+01	2,42E+01	2,48E+01
40	1,02E-11	1,76E+01	2,53E+01	2,72E+01	2,55E+01	2,73E+01
35	6,32E-08	2,11E+01	2,73E+01	2,88E+01	2,68E+01	3,08E+01
30	2,53E-04	2,44E+01	2,92E+01	3,05E+01	2,84E+01	3,47E+01
25	3,26E-01	2,73E+01	3,09E+01	3,20E+01	3,09E+01	3,85E+01
20	5,63E+00	3,03E+01	3,23E+01	3,33E+01	3,49E+01	4,25E+01
15	1,35E+01	3,31E+01	3,37E+01	3,47E+01	4,24E+01	4,68E+01
10	2,13E+01	3,54E+01	3,50E+01	3,60E+01	5,58E+01	4,99E+01
5	2,28E+01	3,71E+01	3,62E+01	3,72E+01	7,73E+01	4,94E+01
0	2,43E+01	3,77E+01	3,75E+01	3,83E+01	1,06E+02	4,56E+01

GRAFICA CURVA DE AVANCE DE NO_3^-

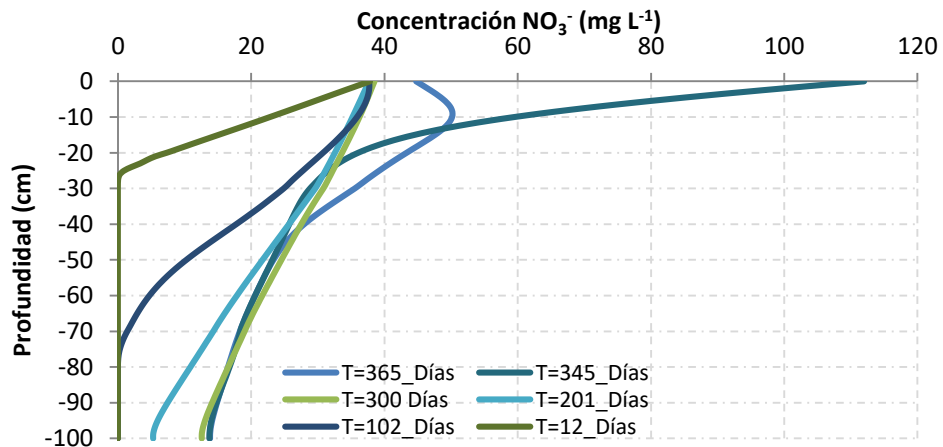


Tabla C-2. Consolidado de resultados de la simulación de la dinámica del transporte de nitratos (NO₃⁻) – Hydrus 1D – Escenario 2 - Fenómeno Niño.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Resultados simulación transporte– Nitratos (NO ₃ ⁻) Hydrus 1D – Escenario 2 - Fenómeno Niño.	

Prof, (cm)	Concentración de nitratos en el Tiempo (Días)					
	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (102 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (201 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (300 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (345 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (365 Días)
95	0,00E+00	1,56E-12	1,42E+00	6,61E+00	7,36E+00	7,58E+00
90	0,00E+00	1,56E-12	1,42E+00	6,61E+00	7,36E+00	7,58E+00
85	0,00E+00	1,86E-10	2,29E+00	7,40E+00	7,88E+00	8,09E+00
80	0,00E+00	1,70E-08	3,42E+00	8,37E+00	8,61E+00	8,74E+00
75	0,00E+00	1,19E-06	4,69E+00	9,41E+00	9,40E+00	9,41E+00
70	0,00E+00	7,02E-05	6,04E+00	1,05E+01	1,01E+01	1,01E+01
65	0,00E+00	4,38E-03	7,44E+00	1,16E+01	1,08E+01	1,09E+01
60	0,00E+00	1,88E-01	8,91E+00	1,27E+01	1,16E+01	1,19E+01
55	1,01E-30	1,13E+00	1,04E+01	1,39E+01	1,27E+01	1,29E+01
50	3,15E-26	2,64E+00	1,20E+01	1,51E+01	1,37E+01	1,40E+01
45	5,63E-22	4,70E+00	1,37E+01	1,64E+01	1,49E+01	1,51E+01
40	7,66E-18	7,30E+00	1,54E+01	1,77E+01	1,60E+01	1,65E+01
35	7,61E-14	1,03E+01	1,72E+01	1,90E+01	1,71E+01	1,84E+01
30	5,28E-10	1,35E+01	1,90E+01	2,04E+01	1,82E+01	2,13E+01
25	2,36E-06	1,66E+01	2,08E+01	2,19E+01	1,95E+01	2,50E+01
20	3,88E-03	1,94E+01	2,23E+01	2,31E+01	2,15E+01	2,87E+01
15	1,44E+00	2,23E+01	2,36E+01	2,42E+01	2,46E+01	3,23E+01
10	7,29E+00	2,50E+01	2,48E+01	2,53E+01	3,10E+01	3,59E+01
5	7,29E+00	2,72E+01	2,59E+01	2,62E+01	4,45E+01	3,95E+01
0	2,43E+01	2,85E+01	2,70E+01	2,71E+01	6,87E+01	4,27E+01

GRAFICA CURVA DE AVANCE DE NO₃⁻

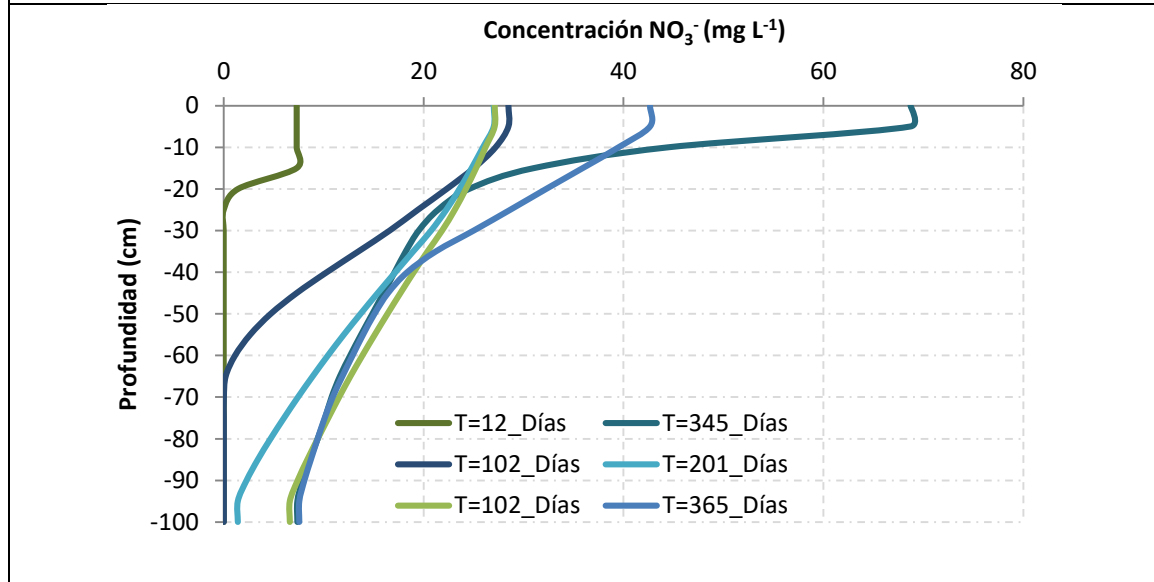


Tabla C-3. Consolidado de resultados de la simulación de la dinámica del transporte de nitratos (NO₃⁻) – Hydrus 1D – Escenario 3 - Fenómeno Niña.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FORMATO DE RECOLECCION DE DATOS	
Resultados simulación transporte– Nitratos (NO ₃ ⁻) Hydrus 1D – Escenario 3 - Fenómeno Niña.	

Prof, (cm)	Concentración de nitratos en el Tiempo (Días)					
	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)	mg L ⁻¹ NO ₃ ⁻ (12 Días)
95	0,00E+00	1,60E-06	6,55E+00	1,22E+01	1,33E+01	1,37E+01
90	0,00E+00	1,25E-04	7,80E+00	1,29E+01	1,39E+01	1,42E+01
85	0,00E+00	8,32E-03	9,22E+00	1,38E+01	1,47E+01	1,49E+01
80	0,00E+00	2,52E-01	1,06E+01	1,47E+01	1,55E+01	1,57E+01
75	0,00E+00	1,19E+00	1,20E+01	1,55E+01	1,63E+01	1,64E+01
70	0,00E+00	2,70E+00	1,33E+01	1,64E+01	1,70E+01	1,72E+01
65	0,00E+00	4,59E+00	1,46E+01	1,73E+01	1,78E+01	1,80E+01
60	2,12E-28	6,67E+00	1,59E+01	1,83E+01	1,87E+01	1,89E+01
55	3,33E-24	9,19E+00	1,74E+01	1,93E+01	1,97E+01	2,00E+01
50	4,22E-20	1,21E+01	1,88E+01	2,03E+01	2,06E+01	2,11E+01
45	4,18E-16	1,52E+01	2,02E+01	2,13E+01	2,16E+01	2,25E+01
40	3,09E-12	1,83E+01	2,16E+01	2,24E+01	2,26E+01	2,43E+01
35	1,60E-08	2,11E+01	2,30E+01	2,34E+01	2,38E+01	2,63E+01
30	5,43E-05	2,35E+01	2,43E+01	2,45E+01	2,52E+01	2,87E+01
25	6,37E-02	2,56E+01	2,54E+01	2,54E+01	2,66E+01	3,09E+01
20	3,73E+00	2,75E+01	2,63E+01	2,63E+01	2,83E+01	3,33E+01
15	1,02E+01	2,91E+01	2,71E+01	2,72E+01	3,04E+01	3,60E+01
10	1,02E+01	3,02E+01	2,80E+01	2,81E+01	3,33E+01	3,93E+01
5	1,02E+01	3,05E+01	2,88E+01	2,91E+01	3,73E+01	4,32E+01
0	1,02 E+01	3,00 E+01	2,95 E+01	3,00 E+01	4,24 E+01	4,79 E+01

GRAFICA CURVA DE AVANCE DE NO₃⁻

