
Conductividad hidráulica bajo bosques una clave para el manejo hídrico

Hydraulic conductivity under forests one key for water management

Carlos Francisco García Olmos¹
Rafael Augusto García Olmos²

Fecha de recepción: 23 de agosto 2018
Fecha de aprobación: 10 de diciembre 2018

Para citar este artículo: García olmos, C., & García olmos, R., (2019). Conductividad hidráulica bajo bosques una clave para el manejo hídrico. *Tecnogestion*, 16 (1).

Resumen

La conductividad hidráulica bajo el suelo de los bosques se relaciona con los flujos sub superficiales. Se buscó conocer estos comportamientos y sus diferencias, con enfoque al manejo hídrico de cuencas. Se caracterizaron áreas experimentales en bosques de *Cupressus lusitanica*, *Eucalytus globulus* y bosque natural en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá, y se realizaron ensayos de pozo barrenado invertido. Se determinaron las curvas características de la velocidad de infiltración y según ellas se obtuvieron las curvas de conductividad hidráulica. Se verificó que no se presentaron diferencias significativas en la conductividad hidráulica saturada. Se desprende de esta investigación que los sistemas radiculares sub superficiales de las especies del sotobosque pueden llegar a disminuir la conductividad hidráulica en el sub suelo por el efecto del atrapamiento de aire que impide la saturación total de los poros del suelo,

hecho que podría influir sobre el flujo de las aguas subterráneas y los procesos de erosión entre otros.

Palabras clave: flujos sub superficiales, bajo bosques, infiltración, manejo hídrico.

Abstract

Hydraulic conductivity under the forest soil is a process that is related to the occurrence of sub-surface flows in the hydrological cycle, with different flows under each type of forest. It is study how this behavior is in each case, what differences there are between them and the water response of a basin. Hydraulic conductivity curves were found under mature forests of *Cupressus lusitanica*, *Eucalytus globulus* and natural forest in the San Cristobal river basin southeast of the city of Bogotá. The characterization the experimental areas were made and the hydraulic conductivity measurements were made. With the infiltration experimental curves, it obtain

1 Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia, doctor Tecnologías del Medio Ambiente, MSc Recursos Hidráulicos, Esp. Gerencia de Recursos Naturales, Profesor Titular Universidad Distrital Francisco José de Bogotá D.C., cfgarciao@gmail.com.

2 Ingeniero Forestal, Universidad del Tolima (Colombia), Msc Ciencias Financieras y de Sistemas, Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ragolmos@gmail.com

the infiltration characteristic curves. With these curves was calculate saturate hydraulic conductivity. It was established that these did not show significant differences in the saturate hydraulic conductivity.

Key words: sub-surface flows, under forests, infiltration, and water management

Introducción

Justificación

La conductividad hidráulica es de un indicador de la medida de la movilidad de agua dentro del suelo que sirve en el conocimiento de la hidrodinámica de acuíferos para su explotación y gestión en el abastecimiento de agua potable o de riego. Es útil para saber de la interacción agua superficial – agua subterránea, la valoración y estimación de las recargas y en estudios de calidad de las aguas subterráneas. (Donado, 2004).

El conocimiento de la conductividad hidráulica aporta en el estudio de los modelos precipitación–infiltración–recarga, como de los flujos en la zona parcialmente saturada, y el saber acerca de sus flujos sub superficiales es importante en la dinámica de hidráulica subterránea y el transporte de contaminantes.

Dadas las implicaciones que tiene la conductividad hidráulica en el proceso de los flujos en el sub suelo se requiere precisar como es este comportamiento bajo cada uno de los tipos de bosques en estudio, qué diferencias hay entre ellos, y cómo aportarían al manejo hídrico de una cuenca.

Objetivos

El objetivo principal fue estudiar el comportamiento de la conductividad hidráulica bajo los bosques de *Cupressus lusitanica*, *Eucalytus globulus* y bosque natural en la cuenca del río San Cristóbal y las

variables que llegan a diferenciarlos, considerando que este conocimiento permitirá posteriormente en otra fase investigativa identificar la relación de la conductividad hidráulica con el manejo hídrico que se le puede dar a una cuenca.

Los objetivos específicos fueron determinar curvas características de la velocidad de infiltración bajo los bosques en estudio, obtener las curvas características de conductividad hidráulica correspondientes y analizar su comportamiento.

Marco teórico

En esta investigación se particulariza en los flujos sub-superficiales que se suceden bajo las coberturas vegetales, y que se relacionan con la conductividad hidráulica, los cuales están afectados, además del tipo de suelo, por las características de los sistemas radiculares sub-superficiales, el contenido de materia orgánica sobre el terreno, la pendiente y configuración del mismo entre otros. También se asocian al comportamiento de la conductividad hidráulica aspectos tales como la transmisión del agua dentro de suelo, su capacidad de almacenamiento, las características del medio permeable y del flujo de agua a través del perfil del suelo (Philip, 2006); (Lal y Shukla, 2004) y (Terlien, 1998).

Darcy formuló la ley física sobre el movimiento del agua a través del suelo, donde señala que la velocidad del agua “v” que fluye en un medio poroso es directamente proporcional al gradiente hidráulico ∇h . El agua que se mueve en un medio poroso lo hace en dirección contraria a este gradiente y a una velocidad “v” proporcional a él. El factor de proporcionalidad es la conductividad hidráulica “K” y depende de la naturaleza del medio y de su grado de saturación (Lambe y Whitman, 1997).

$$v = -K \nabla h \quad (1)$$

El agua se mueve a través del suelo dependiendo de la resistencia de la matriz del suelo al flujo de agua, y de las fuerzas del agua sobre el suelo; estos factores son los que tiene en cuenta la ley de Darcy. Se presenta flujo en condiciones de saturación si el potencial matricial del suelo es nulo, que corresponde al 95% de los poros llenos de agua y el resto con el aire atrapado.

En suelos no saturados la ley de Darcy se cumple al considerar que la conductividad hidráulica es función del contenido de humedad volumétrica del suelo θ ; Childs y Collis – George lo comprobaron experimentalmente. Se fundamentaron en la consideración de que el arrastre de fluido en la interfase aire – agua es despreciable, (Luna *et al*, 2005). El comportamiento general de la conductividad hidráulica fue estudiado por Richards, Moore, Childs y Collis-George, (Luna *et al*, 2005). Determinaron que la conductividad hidráulica disminuye en el mismo sentido que lo hace el contenido de humedad del suelo pero en con siguiente proporción:

La sección transversal de flujo se reduce al disminuir la humedad del suelo, θ , y se aumenta el tamaño de los poros grandes. La conductividad hidráulica del suelo varía en forma directamente proporcional cuadrado del radio de los poros, mientras la humedad del suelo varía en proporción directa a dicho radio pero con su primera potencia, y en consecuencia la conductividad hidráulica disminuirá más rápido que la humedad del suelo, θ .

Con relación a la velocidad de infiltración hay modelos de base física (teóricos) como el de Philip, que tienen en cuenta las leyes de conservación de la masa y la ley de Darcy; modelos semiempíricos como el de Horton, que utilizan formas sencillas de la ecuación de continuidad y la hipótesis de relación velocidad de infiltración-infiltración acumulada y los modelos empíricos que se basan en datos medi-

dos en campo o laboratorio como los de Kostiakov y Kostiakov modificado (Guevara y Márquez, 2010).

Hay una gran incertidumbre sobre los diferentes métodos de cálculo y medida de la conductividad hidráulica (Donado, 2004). Esta puede ser determinada en campo para la zona no saturada o vadosa por medio del método del pozo barrenado invertido, en el cual en vez de medir la velocidad de recuperación del nivel freático se mide la rapidez de descenso del nivel del agua en el pozo (Luna *et al*, 2005). A diferencia de la velocidad de infiltración medida y evaluada en campo con los anillos infiltrómetros, donde el flujo en el anillo interior es restrictivo en el sentido horizontal, en el pozo barrenado el flujo no tiene restricción en ese mismo sentido.

Estudios sobre conductividad hidráulica en Japón, (Morikawa-Sakura, Yoshitakaba, 2014), hallaron que esta disminuye gradualmente a medida que se incrementa la profundidad del suelo, y no se encontraron correlaciones significativas entre la conductividad hidráulica y la velocidad máxima de la infiltración. El valor de correlación fue bajo, y estos mismos resultados se obtuvieron en estudios similares previos. Lo anterior puede ser atribuido a las diferencias entre las especies y la variabilidad del sitio. Este tipo de estudios permite ubicar los sitios donde se pueden producir erosiones gravitacionales en zonas de montaña.

Hipótesis

Esta investigación parte de la hipótesis de que la conductividad hidráulica bajo el suelo de los bosques es un proceso que es diferente bajo cada tipo de bosque e incide sobre la dinámica de las aguas en el sub suelo de una cuenca hidrográfica. Los flujos sub-superficiales ayudan a la regulación hídrica en las cuencas hidrográficas, fomentando la sostenibilidad de sus caudales.

Resultados esperados

Se busca hacer un aporte al conocimiento del comportamiento de los flujos sub-superficiales en presencia de las especies arbóreas de la cuenca del río San Cristóbal, como son *C. lusitanica* (ciprés) y *E. globulus* (eucalipto) y el bosque natural y de sus sotobosques, mediante el estudio de la conductividad hidráulica en cada uno de ellos, teniendo en cuenta las principales aspectos que inciden en ella. Para las condiciones en que se desarrolló este estudio, permitirá saber qué tipo de bosque y en qué condiciones, favorece en mayor medida un mejor comportamiento de la conductividad hidráulica, hacia un mejor manejo de las cuencas hidrográficas.

Se pretende explicar a través de la relación que se establezca entre el comportamiento del medio poroso por el que discurren los flujos sub superficiales, con las características de los bosques y sotobosques para comprender los resultados que se obtengan de la conductividad hidráulica.

Los resultados de esta investigación permitirán posteriormente relacionar el conocimiento obtenido con la simulación hidrológica del proceso lluvia-escorrentía, como también para proyectar el mejoramiento del balance y planeación hídrica de las cuencas hidrográficas, en búsqueda de mayores beneficios que se pueden derivar de cada uno de los tipos de bosque frente a los procesos del ciclo hidrológico.

Metodología

Área de Estudio

La cuenca del río San Cristóbal se encuentra localizada en el sur este de la ciudad de Bogotá sobre la cordillera oriental del sistema andino, dentro de una

zona rural, establecida como reserva forestal con altitudes entre los 2850 y los 3450 m.s.n.m. Figura 1. Está compuesta por tres microcuencas, donde en todas se presentan bosques de *C. lusitanica* (ciprés), *E. globulus* (eucalipto) y bosque natural, los cuales están en diferentes porcentajes en cada una de ellas. Para cada especie arbórea se estableció una parcela experimental, y en total tres, repartidas de tal forma que a cada microcuenca le correspondió una parcela de diferente especie, pero con características de suelos y climatológicas semejantes.

La precipitación media anual es de 1220 mm. (Estación pluviométrica-pluviográfica El Delirio a los 3.000 m.s.n.m., periodo 1933-2017), con una temperatura media de 13.3 °C (estación climatológica de Vitelma, a los 2800 m.s.n.m., periodo 1981-2017). Ambas estaciones pertenecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. “EAAB” (EAAB, 2016).



Figura 1. Localización de la ciudad de Bogotá, D.C.
Fuente. (Pasado en perspectiva, 2010)

En el bosque de *C. lusitanica* (ciprés), gran parte del área se encuentra libre de sotobosque o con especies de porte muy bajo, pero a cambio se encuentra una capa orgánica importante sobre el suelo, con abundante aporte de acículas, dado que es un bosque muy maduro, plantado sin ningún diseño ni manejo posterior, pero que se encuentra en buen estado. El bosque con la cobertura de *E. globulus* (eucalipto) está muy poblado de *Chusquea* sp. (chusque). Es un bosque plantado tan antiguo como el de *C. lusitanica* (ciprés).

El bosque natural, tiene la mayor variedad de especies en comparación con los otros bosques y es de tal densidad que entre el chusque, que también predomina, y las otras especies, quedan pocos espacios libres. Allí se utilizó como árbol de referencia *Weinmannia tomentosa* (encenillo). (Tabla 1).

En la Tabla 2 se presentan las especies más frecuentes en los sotobosques, donde además se detalla el número total de especies diferentes que hay en cada bosque, y el número de plantas en total por hectárea de bosque.

Tabla 1. Dimensiones de las especies arbóreas de referencia

Especie de Referencia	h(m)	DAP(m)	D copa(m)	Densidad(No./ha)	Principales Especies Sotobosque
<i>Cupressus lusitanica</i>	25-32	0.92	2.5	1166	<i>Chusquea</i> sp,
<i>Weinmannia tomentosa</i>	12-17	0.08-0.27	6.0	2672	<i>Chusquea</i> sp, <i>Myrcianthes leucoxylla</i> (arrayán grande), <i>Myrsine</i> sp. (hayuelo), <i>Alnus acuminata</i> (aliso)
<i>Eucalyptus globulos</i>	20-30	0.70	3.0	1000	<i>Chusquea</i> sp

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

Tabla 2. Especies de los sotobosques

Bosque	Especies en mayor No.	No. total de especies	No. total/Ha.
<i>Cupressus lusitanica</i>	<i>Pennisetum</i> _sp. <i>Elaphoglossum</i> _sp. <i>Syzygium_paniculatum</i> _Gaertn. Geraniaceae_Juss.	16	96667
<i>Eucalytus globulus</i>	<i>Munnozia_cf_Senecionidis</i> _Benth. <i>Drimys_granadensis</i> _L.F. <i>Begonia</i> _sp. <i>Chusquea_scandens</i> _Kunth	8	86667
Bosque natural	<i>Polystichum</i> _sp. <i>Phenax</i> _sp <i>Peperomia</i> _sp. <i>Symplocos</i> _sp.	18	153333

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

La zona es de areniscas y arcillas con variados estados de compactación. Las formaciones geológicas en el área de estudio pertenecen a la edad cretácica superior. Son la Formación Guadalupe con calizas y areniscas duras, la Formación Guaduas con arcillolitas y limolitas, la Formación Cacho con areniscas y la Formación Cuaternario que es de acumulaciones aluviales y fluvio-glaciales (Van der Hammen, 1963).

La morfología y orientación de las estructuras rocosas presentes en los Cerros Orientales de la sabana de Bogotá inducen la recarga de las aguas subterráneas, mejorando la sostenibilidad de las corrientes de agua en la sabana de Bogotá. En los Cerros Orientales se estima una infiltración de 200 a 300 mm/año (Patiño y Osorio, 2011).

Los suelos tienen contenidos materiales minerales amorfos provenientes de cenizas volcánicas, en acumulaciones coluviales, aluviales y fluvio-glaciares (De las Salas y García, 2000). A partir de la obtención de nueve muestras cilíndricas tomadas a 0.60 metros de profundidad en cada área representativa de 254 m² para cada tipo de bosque, a razón de una muestra por cada punto donde se realizaron los ensayos; se evaluó la textura, identificando estos suelos como francos arcillosos a francos arenosos, con permeabilidades de 13 a 25 mm/h. Se pudo constatar la similitud de texturas en las áreas experimentales.

La densidad relativa de los suelos bajo las coberturas vegetales en cuestión es baja, con valores de 0.3 a 0.7 y sus porosidades van del 60 al 75 % con un volumen de vacíos del 55 al 65 %, según mediciones hasta un metro de profundidad (García, 2007). Sobre los suelos bajo las coberturas vegetales en estudio existe una capa orgánica espesa que actúa como una esponja que capta parte del agua que llega al suelo, denominada el piso del bosque (Tobón et al, 2000).

Según las características identificadas de los suelos en las áreas experimentales, se clasificaron taxonómicamente, de acuerdo con el United States Department of Agriculture -USDA, en el Orden de los Inseptisoles, de origen volcánico reciente, con características poco definidas. Son suelos de bajas temperaturas que se pueden desarrollar en climas húmedos, con tasas bajas de descomposición orgánica, tienen acumulaciones de arcillas amorfas y un pH ácido (De las Salas y García, 2000).

Diseño Experimental

En este proyecto las áreas experimentales fueron bien definidas y caracterizadas pero no se puede generalizar los resultados que se derivan de este estudio, dada que variabilidad que se puede presentar en el comportamiento de la conductividad hidráulica en superficies más grandes, pero se puede hacer una precisión sobre las diferencias que se encuentran bajo los bosques estudiados en razón de las condiciones propias de cada especie, y la similitud de los suelos de las áreas experimentales.

En cada tipo de bosque se identificó un árbol representativo en un sitio central alrededor del cual se delimitó una parcela circular de 18 metros de diámetro. Alrededor de cada árbol representativo se trazaron líneas radiales cada 120 grados, y sobre ellas se ubicaron los sitios de los ensayos de pozo barrenado, a distancias de los 3 metros, 6 metros y 9 metros desde el árbol representativo. En cada sitio se hicieron dos repeticiones por ensayo, para diez y ocho ensayos por bosque, para un total de cincuenta y cuatro ensayos experimentales. (Figura 2).

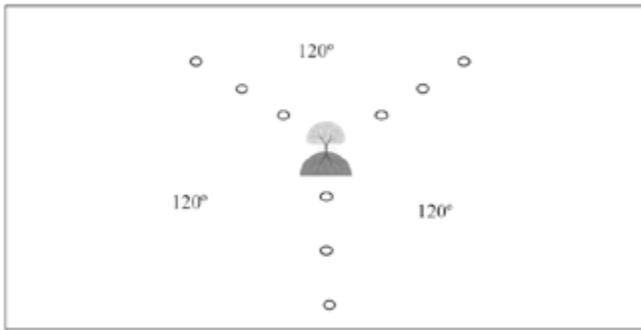


Figura 2. Disposición de los ensayos según diseño experimental, en cada bosque.

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

A pesar de partir de la referencia de un árbol representativo, allí no existe un diseño ordenado de los bosques sino que los árboles están plantados al azar, de tal manera que hay diversas interferencias que hacen que sea difícil definir tendencias sobre su afectación en los resultados, por lo cual se intentó identificarlas según varios criterios que fueron: tener en cuenta todos los experimentos de cada bosque alrededor de su árbol representativo, distancia al árbol representativo, línea de cada radiación a partir del árbol representativo y el contenido inicial de humedad del suelo.

Experimentación

El grado de humedad inicial del suelo de cada ensayo se estableció con el medidor TDR-100. Se utilizó el método del pozo barrenado invertido, el cual se excavo con barreno hasta una profundidad de 0,50 metros y 0,15 metros de diámetro en cada uno de los sitios, según el diseño experimental, alrededor del árbol representativo de cada bosque.

Cada ensayo se hizo en la zona no saturada del suelo, llenando de agua el pozo abierto con el barreno, dejando un borde libre de 0,10 metros, y mediante un sistema de una regla de madera graduada en centímetros y soportada en su parte inferior por

un flotador de balsa, donde este dispositivo flota sobre el agua del pozo, se leían en la parte superior fuera del hueco las variaciones en la lectura de la escala señaladas por una aguja. Se leyeron las variaciones en los niveles del agua, y se cronometraron los tiempos, registrándolos cada minuto durante los primeros cinco minutos, y luego cada 5 minutos hasta los 30. Posteriormente cada 15 minutos, hasta los 135 minutos, o más hasta que se estabilizaba el flujo.

Determinación de curvas características de la velocidad de infiltración

A partir de los datos obtenidos en campo de los experimentos de pozo invertido, para el procesamiento de los datos se realizó primero un pre procesamiento a fin de obtener la velocidad de infiltración en cada uno de los intervalos de tiempo de cada ensayo. Posteriormente se realizó el procesamiento consistiendo en regresiones no lineales correspondientes a distintos modelos existentes que explican estos fenómenos. El tratamiento de los datos se realizó con MATLAB R2012b (Moler, 2012).

Pre procesamiento: Cálculo de la velocidad de infiltración para cada intervalo de tiempo:

Se digitalizaron los datos que corresponden al nivel de agua en milímetros y el tiempo en minutos. Se realizó el cálculo de la velocidad de infiltración “f” con base en la definición de la diferenciación, siendo:

$$f[\text{mm}/\text{min}] = \frac{L_{\text{minadeagua}}(t_{i+1}) - L_{\text{minadeagua}}(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

Procesamiento: Cálculo de parámetros de las expresiones matemáticas elegidas mediante regresión no lineal para el ajuste de parámetros de las ecuaciones.

El ajuste de los parámetros se optimizó mediante la técnica de mínimos cuadrados. Sin embargo la herramienta que se empleó en MATLAB es la clase `nonlinearmodel.fit` la cual realiza el ajuste por medio de mínimos cuadrados a menos que se le indique otra técnica. El valor inicial que se le asignó a los parámetros fue empírico, basándose en la forma de la curva obtenida y la ecuación con la que se pretende representar.

Para estudiar la velocidad de infiltración se consideró que las expresiones matemáticas de Horton, Philip, Kostiakov y Kostiakov modificado, corresponden a las que de acuerdo con la información de campo obtenida son las que mejor siguen los comportamientos observados, cuyas fórmulas se presentan a continuación:

Según Horton:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

Según Philip:

$$f(t) = st^{-0.5} + C \quad (4)$$

Según Kostiakov:

$$f(t) = abt^{b-1} \quad (5)$$

Según Kostiakov modificado:

$$f(t) = f_c + \alpha t^{-\beta} \quad (6)$$

En donde:

t = tiempo pasado desde la saturación superficial del suelo, en minutos

k = constante de decaimiento

$f(t)$ = velocidad de infiltración en el tiempo t , en mm/h

f_0 = tasa de infiltración inicial ($t = 0$), en mm/h

f_c = tasa mínima de infiltración, (asintótica), en mm/h

s = sortividad en el modelo de Philip, obtenido mediante regresión.

C = transmisividad en el modelo de Philip, obtenido mediante regresión.

a, b = parámetros del modelo de Kostiakov, obtenidos mediante regresión.

α, β = parámetros del modelo de Kostiakov modificado, obtenidos mediante regresión.

La identificación de curvas características para cada especie arbórea se hizo teniendo en cuenta los criterios de grado de humedad inicial del suelo, que se definió como alta (60 a 80 %), media (40 a 60 %) y baja (20 a 40 %) y la distancia al árbol representativo y con base en las curvas experimentales de pozo invertido; primero se asociaron a nivel general incluyendo todos los ensayos de cada especie, y luego según los demás criterios establecidos en el apartado del diseño experimental.

Determinación de la conductividad hidráulica saturada

Se halló a partir de las curvas características de la velocidad de infiltración identificadas bajo cada tipo de bosque según los grados de humedad inicial alta, media y baja definidos.

La ecuación utilizada fue la que corresponde al método de pozo de nivel variable: (Kessler, Oosterbaan, 1977);(Reynolds, 1983):

$$K_{is} = \frac{R}{2[t_2 - t_1]} \ln \left[\frac{2H_1 + R}{2H_2 + R} \right] \quad (7)$$

Donde,

K_{is} = conductividad hidráulica saturada, de campo (cm.s^{-1})

R= Radio del pozo (cm)

H_1 = altura de la columna de agua dentro del pozo en el tiempo t_1 , en segundos.

H_2 = altura de la columna de agua dentro del pozo en el tiempo " t_2 ", en segundos.

Resultados y discusión

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los grados de ajuste a las ecuaciones de la velocidad de infiltración de acuerdo a los criterios establecidos, según el indicador R^2 .

Tabla 3. Valores de R^2 a las ecuaciones de la velocidad de infiltración, según experimentos de pozo invertido bajo las áreas experimentales de los bosques de la cuenca del río San Cristóbal.

Descripción modelización	Especie	R^2 mejor	Modelo
General			
	<i>E. globulus</i>	0,3916	Kostiakov
	<i>C. lusitanica</i>	0,6058	Horton
	Bosque Natural	0,5347	Horton
Según la línea o radiación			
	<i>E. globulus</i>		
	Línea 1	0,8349	Horton
	Línea 2	0,2972	Kostiakov
	Línea 3	0,2192	Horton
Según la distancia al árbol representativo			
A 3 metros			
	<i>E. globulus</i>	0,4418	Philip
	<i>C. lusitanica</i>	0,8753	Horton
	Bosque Natural	0,5641	Horton
A 6 metros			
	<i>E. globulus</i>	0,4529	Kostiakov Mod.
	<i>C. lusitanica</i>	0,4800	Horton
	Bosque Natural	0,6578	Horton
A 9 metros			
	<i>E. globulus</i>	0,5063	Horton
	<i>C. lusitanica</i>	0,5533	Horton
	Bosque Natural	0,7279	Horton
Según la humedad inicial del suelo			
Humedad inicial baja			
	<i>E. globulus</i>	0,6230	Philip
	<i>C. lusitanica</i>	0,7622	Horton
	Bosque Natural	0,7808	Horton
Humedad inicial media			
	<i>E. globulus</i>	0,8096	Horton
	<i>C. lusitanica</i>	0,8915	Horton
Humedad inicial alta			
	<i>E. globulus</i>	0,3398	Horton
	<i>C. lusitanica</i>	0,7677	Horton
	Bosque Natural	0,7873	Horton

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

De acuerdo a la Tabla 3, el criterio que permitió hallar las curvas características de la velocidad de infiltración según los ensayos de pozo invertido realizados, fue el del contenido inicial de humedad del suelo, al utilizar la ecuación de Horton, donde el 87,5 % de los experimentos cumplió con un ajuste mínimo del 76,2 % del R^2 , que fue para el caso del *C. lusitanica* cuando la humedad inicial del suelo fue del 20 al 40 %.

Con respecto a la distancia al árbol representativo no se pudo identificar tendencias definidas, ni tampoco según la línea de radiación, dado que no se encontraron efectos definidos de los árboles adyacentes a los sitios de experimentación.

Las curvas de las Figuras 4,5, 6 son las obtenidas en los sitios experimentales y las expresiones matemáticas utilizadas, y las Tablas 3,4 y 5, muestran los coeficientes de las ecuaciones hallados y los R^2 alcanzados para humedades del suelo iniciales del 20 al 40 %.

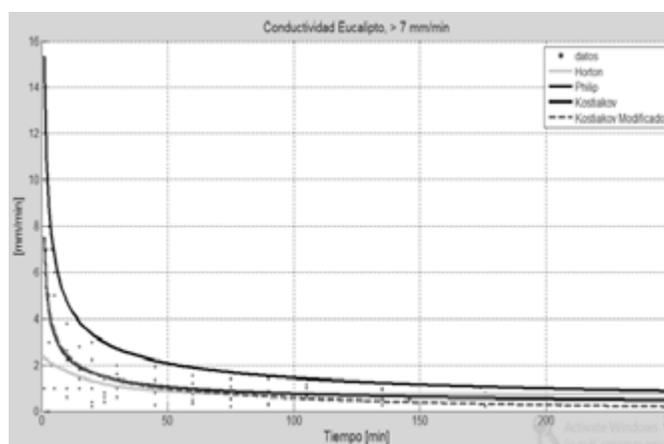


Figura 3. Curvas de la velocidad de infiltración bajo *E. globulus*, según información de los experimentos con un contenido bajo de humedad, entre 20 y 40 %.
Fuente. (Elaboración propia, 2018)

Tabla 4. Resultados del ajuste a las ecuaciones para la velocidad de infiltración utilizando las curvas experimentales bajo *E. globulus*, que corresponden los ensayos con un contenido de humedad, inicial entre 20 y 40 %.

Modelo	Coeff. Estimados R			MSE	R^2	R^2 Corregido
Horton	$f_c = 0.7139$	$f_0 = 2.4016$	$k = 0.0510$	0.8224	0.3925	0.3771
Philip	$s = 15.4489$		$C = -0.1138$	1.4903	0.6277	0.6230
Kostiakov	$a = 15.1513$		$b = 0.4965$	1.4921	0.6267	0.6221
Kostiakov Modificado	$f_c = -0.6332$	$\alpha = 7.9986$	$\beta = 0.4121$	1.4939	0.6305	0.6212

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

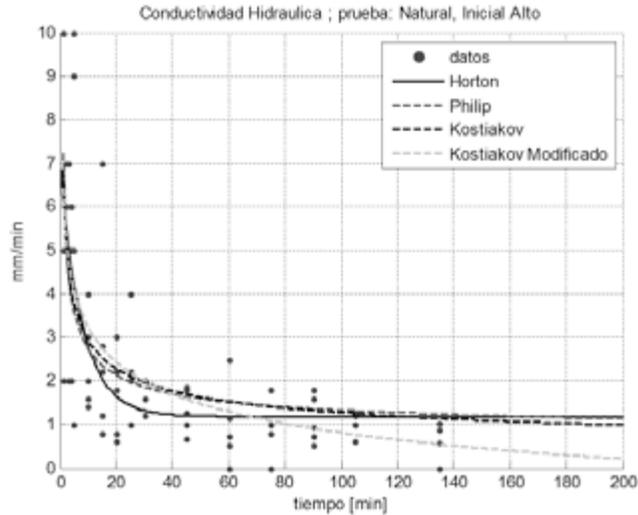


Figura 4. Curvas de la velocidad de infiltración bajo bosque natural. Según información de los experimentos con un contenido de humedad inicial del 20 al 40 %. Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

Tabla 5. Resultados del ajuste a las ecuaciones para la velocidad de infiltración con las curvas experimentales bajo bosque natural, que corresponden a los contenidos de humedad inicial del 20 al 40 %.

Modelo	Coeff. Estimados			RMSE	R ²	R ² Corregido
Horton	$f_c = 1.1810$	$f_o = 6.8570$	$k = 0.1247$	1.1108	0.7866	0.7808
Philip	$s = 13.1445$		$C = 0.6647$	1.8023	0.4709	0.4639
Kostiakov	$a = 10.8252$		$b = 0.6331$	1.7683	0.4907	0.4839
Kostiakov Modificado	$f_{c\bar{e}} = -6.7285$	$\alpha = 13.1599$	$\beta = 0.1209$	1.7480	0.5089	0.4957

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

De las Tablas 4, 5 y 6 se encuentra que los ajustes de la ecuación de Horton son por lo menos de un 76.2 % excepto para el *E. globulus*, caso en el cual las otras ecuaciones dieron ajustes del orden del 62 %.

Para tener una visión comparativa completa del comportamiento de la velocidad de infiltración, se presentan las curvas características de la Figura 7, obtenidas

aplicando los coeficientes hallados de la ecuación de Horton, utilizada para representar la velocidad de infiltración según ensayos de pozo invertido, por haber sido la de mejor ajuste según el indicador R².

La velocidad de infiltración representada según Horton para los tres tipos de bosques, según experimentos de pozo invertido, agrupados de acuerdo

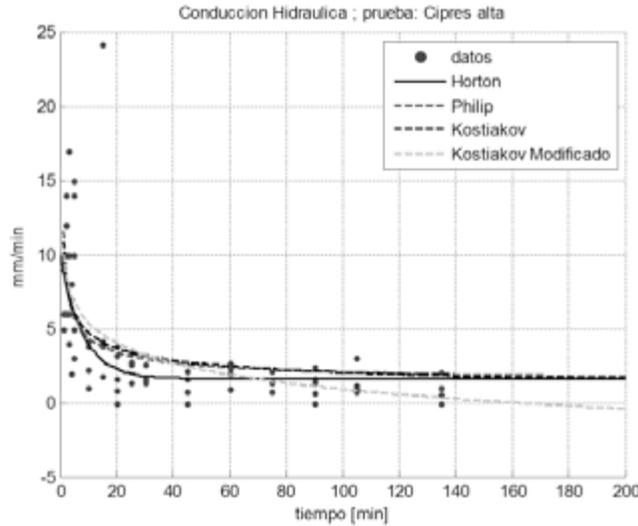


Figura 5. Curvas de la velocidad de infiltración bajo *C. lusitánica*, según información de los experimentos con un contenido bajo de humedad, de 20 a 40 %. Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

Tabla 6. Resultados del ajuste a las ecuaciones para la velocidad de infiltración con las curvas experimentales en *C. lusitánica*, que corresponden a contenidos de humedad, de 20 a 40 %.

Modelo	Coeff. Estimados			RMSE	R ²	R ² Corregido
Horton	$f_c = 1.6296$	$f_o = 9.8980$	$k = 0.1269$	1.9193	0.7687	0.7622
Philip	$s = 38.9682$	$C = -0.7824$		3.6664	0.3628	0.3540
Kostiakov	$a = 17.1179$	$b = 0.6385$		3.6013	0.3853	0.3767
Kostiakov Modificado	$f_c = -141.4272$	$\alpha = 151.4897$	$\beta = 0.0.135$	3.5309	0.4173	0.4008

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

al contenido de humedad inicial del suelo, no presentó diferencias a destacar, Figura 7, de tal manera que teniendo en cuenta una similitud en las características de los suelos de las áreas experimentales, las diferencias entre los sistemas radiculares de los bosques y sus sotobosques no denotaron diferencias importantes en la velocidad de infiltración, implicando que la tasa con que se mueve el agua en tra-

yectorias más horizontales de flujo, como es lo que sucede en el experimento del pozo invertido se hace de manera similar para los casos en consideración.

A pesar de lo anterior, si se observa, cuando el contenido de humedad inicial en el suelo es menor al 40 %, Figura 7.c., la velocidad de infiltración se hace mayor bajo el bosque natural y luego bajo el bosque de

E. globulus, hecho que se puede explicar por la mayor densidad y diversidad de sistemas radiculares sub superficiales en el bosque natural y abundancia más no diversidad en el bosque de *E. globulus*, que

facilitan el flujo del agua en trayectorias preferentemente horizontales, en comparación con la vegetación de sotobosque en el *C. lusitánica* (Tablas 1 y 2), mientras que bajo *C. lusitánica*, donde es menor

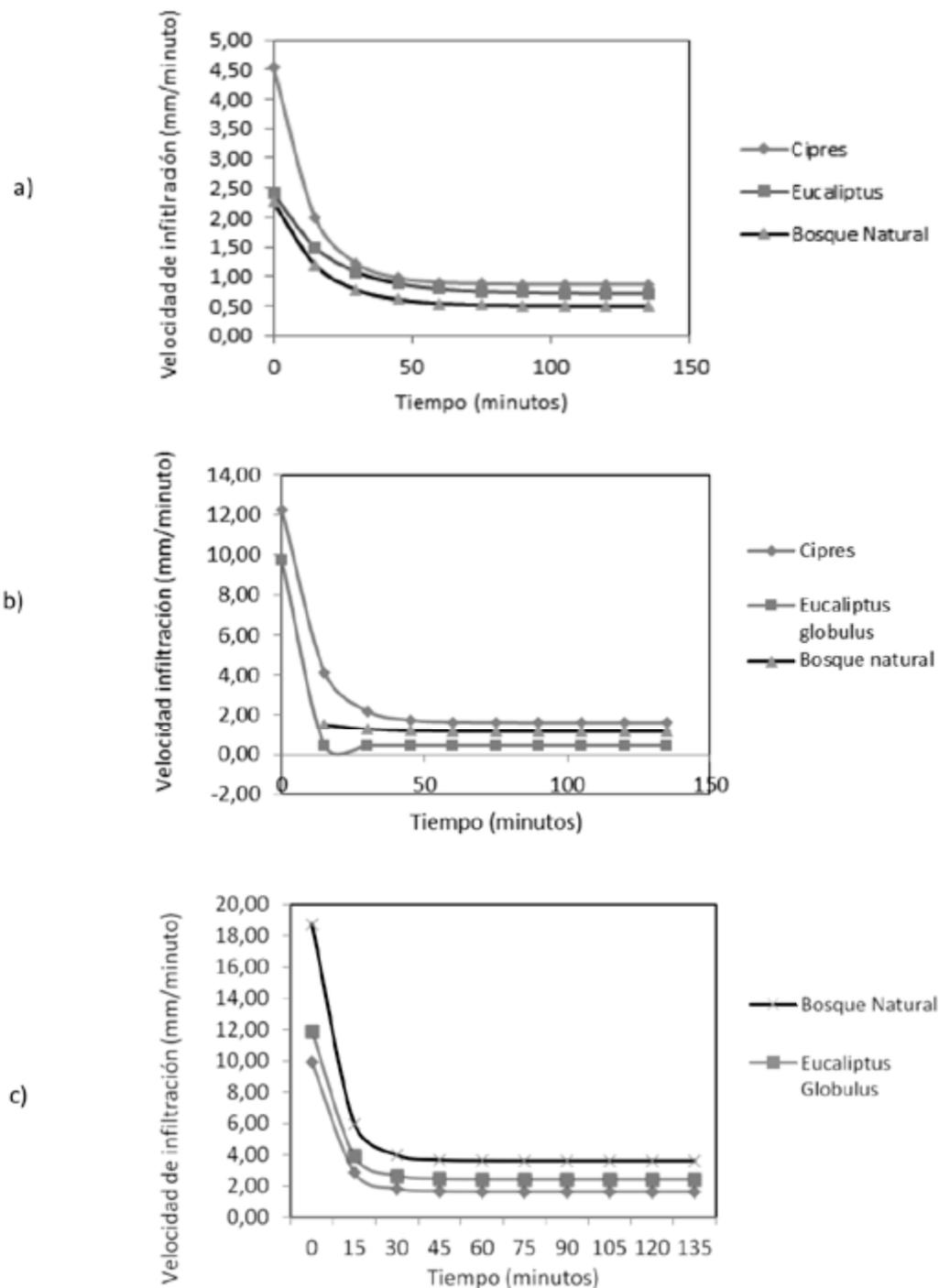


Figura 6. Curvas Características de la velocidad de infiltración según Horton, para ensayos de pozo invertido que tuvieron un contenido de humedad volumétrica de: a) 60 a 80 %, b) 40 a 60 %, c) 20 a 40 %.

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

la vegetación que acompaña el bosque, es menor este valor de velocidad de infiltración, hecho que muestra un efecto de estas especies más superficiales. Finalmente, cuando el tiempo va transcurriendo, las velocidades de infiltración se reducen hasta alcanzar el suelo su saturación, y las diferencias de estas tasas se hacen mucho menores.

A partir de las curvas características de la velocidad de infiltración se obtuvieron los valores de conductividad hidráulica y sus curvas características para los tres tipos de bosques, con la ecuación 6, que se aplica para el método del pozo invertido, Figuras 7, 8 y 9 y en Tabla 7 se presentan los valores de la conductividad hidráulica seudo saturada, por el tiempo de duración de los experimentos.

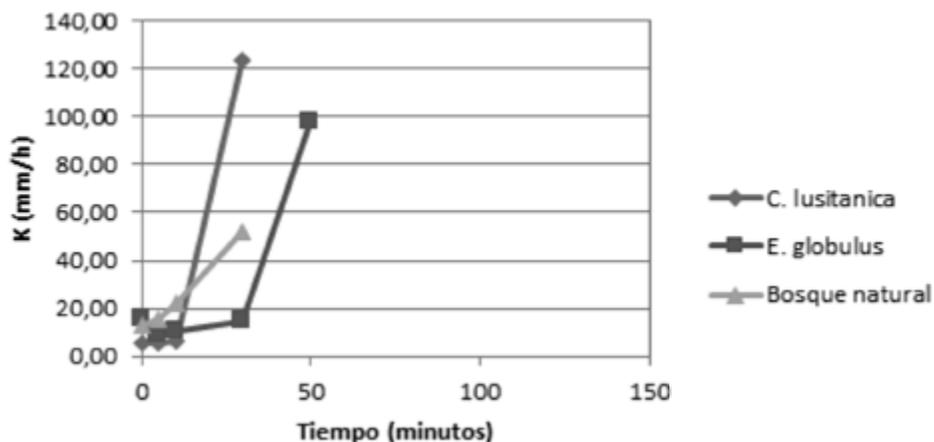


Figura 7. Curvas características de la conductividad hidráulica a partir de humedades iniciales del suelo de 20 a 40 %, bajo los bosques de *C. lusitánica*, *E. globulus* y bosque natural en áreas experimentales de la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

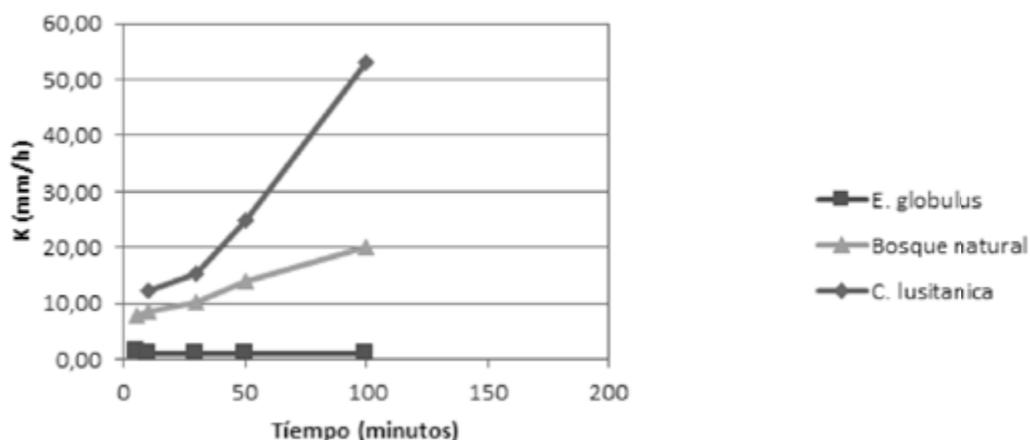


Figura 8. Curvas características de la conductividad hidráulica a partir de humedades iniciales del suelo de 40 a 60 %, bajo los bosques de *C. lusitánica*, *E. globulus* y bosque natural en áreas experimentales de la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

Las curvas características de la variación de la conductividad hidráulica con el estado de saturación del suelo, Figuras 8, 9 y 10 muestran que las tasas con que se incrementa son mayores en todos los casos para el *C. lusitánica*, especie que se caracteriza por su baja densidad de árboles como también de especies de su sotobosque, además de que están últimas son de un porte muy bajo respecto a los otros sotobosques. Se podría decir que a una mayor densidad de especies en el sotobosque y altos contenidos de humedad se la conductividad hidráulica no alcanza al estado de saturación completa por efecto del aire que va quedando a presión entre los poros del suelo.

Los valores de conductividad hidráulica pseudo saturada calculados están entre 1 y 22 mm/h, con una desviación media del 7.4 %, Tabla 7, se pueden considerar representativos del comportamiento real. De acuerdo a la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (fao, 2016) para estos suelos franco arenosos a arenosos de las áreas experimentales les corresponden valores de conductividad hidráulica de 25 a 50 mm/h, aunque la conductividad hidráulica también depende entre otros factores de la estructura del suelo. Se explica que para los valores en campo y con presencia de bosques y sotobosques

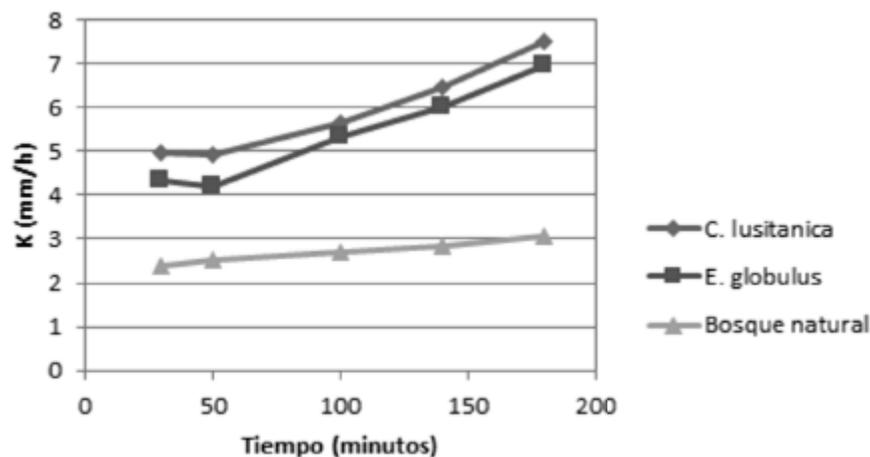


Figura 9. Curvas características de la conductividad hidráulica a partir de humedades iniciales del suelo de 60 a 80 %, bajo los bosques de *C. lusitánica*, *E. globulus* y bosque natural en áreas experimentales de la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

Tabla 7. Valores, (mm./h), de la conductividad hidráulica saturada para los bosques de referencia, a partir de las curvas características de la velocidad de infiltración.

No.	hi(20-40 %)	hi(40-60 %)	hi(60-80 %)	Media	Desviación Estandar
Bosque natural	22.32	13.83	2.53	12.89	9.93
<i>E. globulus</i>	14.41	1.01	5.32	6.91	6.84
<i>C. lusitánica</i>	7.07	24.84	5.64	12.52	10.70

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

Tabla 8. Análisis de varianza para los resultados de la conductividad hidráulica saturada (mm/h), bajo los bosques de *E. globulus*, *C. lusitánica* y bosque natural, en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá, D.C.

Fuente de variación	Suma Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Ratio	Fo	Valor P	% Contrib.
Tratamiento	67	2	34	0.39	Fo=3.463	<0,01	11.0
Error	520	6	87				89.0
Total	587	8	73				100.0

Fuente. (Elaboración Propia, 2018).

no se llegó a alcanzar el estado de saturación completa por el aire atrapado entre los poros de suelo que oponen resistencia al flujo. (Luna et al, 2005).

De acuerdo a los resultados de la Tabla 7, se hizo el análisis de varianza que permitió determinar que las diferencias de la conductividad hidráulica saturada no son significativas, Tabla 8, pudiendo establecerse que bajo condiciones de saturación los bosques en estudio junto con sus sotobosques no generan diferencias significativas en el comportamiento de la conductividad hidráulica saturada.

Conclusiones

En general no se encontraron diferencias significativas de la conductividad hidráulica saturada para los bosques de *C. lusitánica*, *E. globulus* y bosque natural.

A pesar de las diferencias poco significativas, se encontró mayores tasas de conductividad hidráulica bajo el bosque de *C. lusitánica*, el cual cuenta con una baja densidad de especies de sotobosque.

Los valores de conductividad hidráulica saturada hallados con el método del pozo invertido bajo los bosques y sotobosques en estudio resultaron ser

menores a los obtenidos en laboratorio, en razón del aire atrapado que queda en los poros del suelo y que es propiciado por los sistemas radiculares, que ofrecen resistencia al flujo, cuando discurre el agua por el sub suelo.

Se desprende de esta investigación que los sistemas radiculares sub superficiales de las especies del sotobosque pueden llegar a disminuir la conductividad hidráulica en el sub suelo por el efecto del atrapamiento de aire que impide la saturación total de los poros del suelo, hecho que podría afectar el flujo de las aguas subterráneas y los procesos de erosión entre otros.

Reconocimientos

Los autores agradecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá “EAAB” por permitirnos investigar en la Reserva Forestal del río San Cristóbal, especialmente a los doctores Mauricio A. Velástegui Torres, y Carlos A. Bello Blanco, al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital que hizo posible el proyecto, a la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales por su apoyo institucional. A los doctores Miguel E. Cadena Romero y Néstor Bernal por sus orientaciones.

Referencias

- De las Salas, G. y García-Olmos, C.F.(2000). Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá, D.C.*Revista de la Academia Colombiana de las Ciencias Exactas*, 24 (91), 205-218.
- Donado, L. D.(2004).*Modelo de conductividad hidráulica en suelos*. Tesis de maestría en recursos hidráulicos sin publicación, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C.
- EAAB, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2016)Archivos de la información meteorológica e hidrológica de las estaciones en la cuenca del río San Cristóbal, Oficina de hidrología, Bogotá, D.C.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016).Permeabilidad del suelo.Disponible en Web: ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm
- García-Olmos, C. F. (2007).Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá D.C. *Colombia Forestal*,10 (20), 127-147.
- Guevara, E., Marquez, A. (2010)“Parametrización de modelos de infiltración basada en pruebas de campo en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Venezuela”. Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Universidad de Carabobo,. 11 p.
- Keesser, J., Oosterbaan, R. (1977).“Principios y Aplicaciones del Drenaje”, Estudios e Investigaciones, , vol.. III. Holanda.
- Klute, A. (1986).*Methods of soils analysis*. Part I-Physical and mineralogical methods. Madison: ASSA and SSSA publisher,
- Lal, R. y Shukla, M.K. (2004).*Principles of soil physics*. New York, Marcel Dekker Inc.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1997). *Mecánica de suelos*, México, Editorial Limusa, 510 pp.
- Luna, D., Sánchez, C., Muñoz, J. (2005). Métodos para medir la conductividad hidráulica saturada en campo. *Ingeniería Hidráulica en México*, XX (2), 95-107.
- Moler, C. (2012).Matlab R2012a. Massachusetts. MathWorks.
- Morikawa Sakura, M. y Yoshitaka, K. (2014). El vínculo de la conductividad hidráulica saturada con la velocidad de infiltración sub-superficial del suelo del bosque, *Revista de investigación de la Universidad Norbert Wiener*, 3(41), 1- 12.
- Patiño, O. y Osorio, I. (2011). Estudio físico-químico de la quebrada padre Jesús desde la vereda Fátima hasta su canalización en la avenida circunvalar de la ciudad de Bogotá. *UD y la Geomática* 5, 1-16.
- Philip.J.R. (2006). Theory of infiltration. *Soil Science*, 171 (6), S34- S46.

- Terlien M. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide triggering thresholds, *Environmental Geology*, 35 (273), 124-130.
- Tobón, C., Sevink, J. y Bouten, W. (2000). Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal Of Hydrology* 237, 40-57.
- Van der Hammen, T. y González, E. (1963). Historia del clima y vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá”. *Boletín Geológico* V XI 1-3, 189-266.