

**Evaluación de un sistema de recolección de agua lluvia para uso doméstico
en la zona rural del municipio de Sopó, Cundinamarca, a través de
modelación matemática**



Laura Carolina Correa Rodríguez

Trabajo de grado para optar por el título de Ecóloga

Alberto Ramírez González

Director del trabajo de grado

**Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Estudios Ambientales y Rurales
Carrera de Ecología
Bogotá
2017**

Tabla de contenido

Introducción.....	2
Objetivos	5
Marco teórico y conceptos de referencia.....	5
Antecedentes	10
Área de estudio	12
Metodología.....	13
Resultados y análisis.....	19
Estadística descriptiva e Histogramas de Frecuencias de la Precipitación del área de estudio	19
Confiabilidad de los sistemas de recolección de agua lluvia modelados	24
Rango y promedio de la oferta y demanda de agua lluvia	26
Modelo Determinístico sin separación de primeras lluvias (códigos 1 y 2) para demanda básica OMS y demanda óptima OMS	27
Modelo Estocástico sin separación de primeras lluvias (códigos 3 y 4) para demanda básica OMS, demanda óptima OMS y demanda para consumo básico en Colombia	30
Modelo Determinístico con separación de primeras lluvias (códigos 5 y 6) para demanda básica OMS y demanda óptima OMS	34
Modelo Estocástico con separación de primeras lluvias (códigos 7 y 8) para demanda básica OMS, demanda óptima OMS y demanda para consumo básico en Colombia	37
Análisis de costos de los sistemas de recolección de agua lluvia modelados ...	42
Conclusiones.....	47
Recomendaciones.....	48
Referencias	48
Anexos	54

Introducción

El acceso al territorio y a los recursos naturales tiene una relación directa con el empoderamiento de las comunidades humanas y mientras más dependa una comunidad de los recursos suministrados desde agentes externos, menos autónoma va a ser con respecto a su propio desarrollo social y económico (Correa, 2016).

Si, por lo demás, numerosos agentes requieren del mismo recurso natural, la explotación intensa y sostenida conducirá a su agotamiento, de tratarse de un recurso no renovable; o puede llegar a ser insuficiente para suplir las demandas, si se trata de un recurso renovable. En este último caso puede conducir, por un lado, a conflictos sociales, a la imposibilidad de desarrollar las actividades regulares en las que se empleaba tal recurso o simplemente a la insostenibilidad de la actividad antrópica por incremento de los costos al adquirir el recurso de fuentes lejanas o alternativas.

El agua es un ejemplo tangible de la situación enunciada, pues es fundamental tanto para los ecosistemas naturales como para la vida humana y sus actividades productivas. Además, los problemas en torno a su demanda se recrudecen ante el crecimiento de la población.

Ante esta situación, las demandas antrópicas vienen poniendo en peligro a las especies acuáticas, al no reconocerse ni respetarse los caudales ecológicos bajo los cuales las especies realizan sus funciones biológicas (Acosta, 2008). Esto lleva a que su acceso esté determinado solo por la capacidad adquisitiva de las personas y las industrias y a que genere riesgos de consumo y de uso sobre las poblaciones más pobres y vulnerables (Correa, 2016).

No hay que pasar por alto que el planeta se encuentra ante cambios globales derivados de la acumulación de gases de invernadero, entre los que cabe destacar el cambio climático alrededor del cual se manifiestan alteraciones de la temperatura, la precipitación e incluso la manifestación de huracanes y ciclones. Este factor adicional pone en alto riesgo “la productividad de algunos cultivos importantes, y con ella la productividad pecuaria, con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria” (IPCC, 2007, pág.11).

En otro orden de ideas, tal y como se ha reconocido en la Declaración Universal de los Derechos Humanos y la Conferencia de Dublín de 1992, el agua como derecho está conectado a la vida, la dignidad humana y la salud (Díaz Pulido et al., 2009; FCAS, 2015).

De igual modo, la Organización de las Naciones Unidas (2003) reconoció que “estos Objetivos (del Milenio), que se centran en la pobreza, la educación y la salud, no pueden lograrse sin un acceso equitativo y suficiente a los recursos, los más fundamentales de los cuales son el agua y la energía”.

Cabe referir que Colombia se suscribió a tales objetivos (Caicedo, 2008); sin embargo, estos están aún lejos de la realidad nacional, pues el acceso al agua está

muy por debajo de las metas planteadas. Esta situación está ligada a la capacidad institucional y a las políticas de gestión del recurso hídrico, que contrastan en gran medida con el potencial hidrológico del territorio, por lo que el problema esencial no es de escasez, pues el país cuenta en la mayor parte de su territorio con fuentes de agua suficientes, sino del registro de altas tasas de deforestación y destrucción de los ecosistemas que las soportan (Samper Pizano, 2008; Acosta, 2008).

A lo anterior se suma la actividad agrícola que es el mayor demandante de agua del país, lo que ocasiona problemáticas socioambientales por conflictos en torno a la disponibilidad del recurso hídrico que, si bien debe destinarse principalmente para consumo humano, no se puede restringir su uso para otra necesidad vital como el alimento (Díaz Pulido, 2009). No hay que olvidar que el hombre actual es un gran demandante de energía exosomática, por lo que, en algunos países como Colombia, la principal producción de energía proviene de centrales hidroeléctricas, factor que se suma a las demandas ya referidas.

Ante la problemática descrita, la FAO (1998) considera de gran importancia el diseño de mecanismos de aprovechamiento adaptables a las condiciones locales (climática, socioeconómica y política), la inclusión de las comunidades como gestoras de la conservación y uso del recurso en la agricultura y el mejoramiento de los mecanismos de acceso y uso del recurso.

Para la Región Andina, y de forma particular la sabana de Bogotá, se adicionan dos factores que complejizan aún más la gestión del recurso hídrico como la intensa actividad agropecuaria y la condición Bogotá-región. En relación con el primero, cabe advertir que la mayoría de las fuentes hídricas del país se encuentran en el área Andina, donde se concentra gran parte de la población y del sector primario. Y, en referencia al segundo, esta región se convierte en un gran sumidero de materia orgánica, en razón a su alto consumo, pero no cuenta con mecanismos para reincorporarla de forma adecuada dentro del ciclo natural. A partir de ello, la ciudad consume materia de los municipios circundantes, modifica sus dinámicas socioeconómicas y genera una presión y demanda constantes sobre este entorno periurbano, lo que da lugar a altos niveles de contaminación de los suelos, el aire y el agua (Acevedo & Peláez, 2014).

Si bien los municipios de la sabana de Bogotá disponen de buenas fuentes hídricas para suplir la demanda asociada a su creciente urbanización, también es cierto que tienen un acceso limitado a ellas por lo que deben asumir un proceso de negociación con el Distrito Capital, que provee agua en bloque a municipios como Sopó y Madrid, lo que genera impactos negativos sobre los costos que deben asumir los usuarios por este servicio¹ (Caicedo, 2008; Lora Gómez, 2009).

Tal como se advirtió previamente, la mayor importancia en la distribución del recurso dentro de las actividades antrópicas debe recaer en el agua de consumo; no obstante, por causa de la topografía del territorio nacional, por la inadecuada gestión

¹ El municipio de Madrid compra agua en bloque a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), lo que le lleva a duplicar su Costo Medio de Operación y por tanto las tarifas a sus usuarios (Lora, 2009).

de los recursos económicos y la implementación de políticas públicas, se dificulta la adecuada prestación de los servicios de agua potable y saneamiento básico (Díaz Pulido et al., 2009).

Ahora bien, en el país se han implementado estrategias como la expuesta en la Ley 142 de 1992² de la cual Escobar (2008) afirma que, aunque ha generado mejoras en la cobertura de estos servicios en los últimos años, estas se han dado de manera muy desigual entre las regiones del país y han beneficiado casi únicamente a las zonas urbanas. Escobar (2008) y el Conpes 3810 del 2014 (FCAS, 2015) afirman que la situación no ha mejorado substancialmente en municipios pequeños que presentan una baja capacidad institucional y financiera y en donde no se ha logrado estructurar bien el sector.

Por otro lado, la misma ley hizo de este un servicio ineficiente al desaprovechar posibles economías de escala, dado que surgieron múltiples prestadores del servicio que solo proveían a pocos usuarios. A partir de esta situación, se crearon los Planes Departamentales de Agua y Saneamiento, pero a estos se les puso fin en el 2011 porque se consideraron poco efectivos y se remplazaron, entonces, por el programa “Agua para la prosperidad”, cuyo propósito fue incentivar la inversión y participación del sector privado, para crear una estructura descentralizada y desburocratizada (Torres & Carvajal, 2014).

Ahora bien, las ineficiencias en el sector se traducen en problemas de acceso al agua para la población colombiana y la situación es más grave en las zonas rurales que cuentan con menor cobertura o formas de acceso al líquido. Según la Subdirección de Agua y Saneamiento (SAS, 2014) “la cobertura de acueducto (en el 2013) en el área urbana fue de 97,16 % y de 73,34 % en el área rural, incluyendo soluciones alternativas.³

Es importante destacar que la falta de acceso al agua potable es un referente directo de las tasas de morbilidad y mortalidad de la población humana en muchas regiones del mundo y, de forma particular, de la población infantil más pobre (OMS, 2013). En Colombia tanto la reducción de las tasas de mortalidad asociadas a este factor como el aumento de cobertura de acueducto y alcantarillado han sido comparativamente más lentas que la de otros países de Latinoamérica (Torres & Carvajal, 2014).

En razón a la problemática expuesta, se considera importante abordar el tema del acceso al agua en el entorno rural, con un enfoque que busque brindar soluciones accesibles y en el corto plazo a la población vulnerable, pero con beneficios que se prolonguen a largo plazo.

² La Ley 142 de Servicios Públicos Domiciliarios se creó para descentralizar el sector de estos servicios. Así, al Gobierno nacional le asignó labores de regulación, control y seguimiento mientras que a los municipios la responsabilidad de asegurar la prestación del servicio (Torres & Carvajal, 2014).

³ Como soluciones alternativas de acueducto para el área rural, se considera el suministro de agua mediante otra fuente por tubería, pozo con bomba y pila pública, y de alcantarillado inodoro conectado a pozo séptico y letrina (SAS, 2014).

En este sentido, se debe pensar en tecnologías alternativas, adaptables y prácticas que respondan a las condiciones locales, que le otorguen a la población mayor autonomía respecto al recurso hídrico de uso común, como un mecanismo de resiliencia y adaptación, que asegure su abastecimiento hídrico y su seguridad alimentaria.

Para tal propósito, este estudio aborda la modelación y valoración económica de la implementación de un sistema de recolección de agua lluvia, como vía alterna de abastecimiento de las poblaciones rurales y sobre la base de un caso de estudio en el Municipio de Sopó, Cundinamarca.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la funcionabilidad y viabilidad económica de la implementación de un sistema de recolección de agua lluvia para uso doméstico en la zona rural del municipio de Sopó, Cundinamarca, sobre una base de modelación matemática.

Objetivos específicos

1. Analizar los datos históricos de precipitación diaria multianual del municipio de Sopó, Cundinamarca.
2. Construir un modelo matemático, basado en la precipitación diaria multianual local, que permita evaluar la implementación de un sistema de recolección de agua lluvia para consumo doméstico vital, tomando como base estándares nacionales e internacionales de demanda hídrica.
3. Realizar un análisis de costos del modelo construido.

Marco teórico y conceptos de referencia

La presente investigación se enmarca en el campo de la *economía ecológica* que estudia las interacciones existentes entre los sistemas económicos y el medio ambiente. En su enfoque de estudio, la sostenibilidad estructural y funcional de los ecosistemas naturales y su permanencia libre de contaminación, antecede las decisiones tecnológicas y económicas y las demandas antrópicas (Castiblanco, 2007). A su vez, se enmarca en la *modelación matemática* como herramienta de generación de conocimiento y de proyección de situaciones o procesos futuros.

En este sentido y para el desarrollo de la investigación se partirá de los siguientes conceptos:

1. Hidroclimatología

Disciplina entendida como el estudio de los procesos y mecanismos, asociados al clima, mediante los cuales se da el movimiento del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera y se generan las variaciones espaciotemporales del ciclo hidrológico (WRC, 2014). Actualmente, dentro de esta disciplina ha tomado importancia la inclusión de la influencia antrópica sobre los cambios que se dan en la distribución del recurso hídrico en el planeta y, por esto mismo, esta disciplina ha tomado gran

relevancia en el diseño de políticas públicas frente a la gestión del recurso hídrico (Hirschboeck, 2009; WRC, 2014).

2. Ciclo hidrológico y precipitación

El ciclo hidrológico consiste en el movimiento de las masas de agua a través de los suelos, la atmósfera y los océanos y el cambio en sus propiedades físicas, químicas y biológicas al pasar por cada uno de estos medios (Morell & Hernández, 2000; Breña-Puyol & Jacobo-Villa, 2006). El movimiento y la transformación del agua se dan mediante procesos de precipitación, evapotranspiración, intercepción, infiltración y escorrentía. La precipitación, proceso fundamental para los sistemas de recolección de agua lluvia, consiste en la condensación del vapor presente en la atmósfera y su caída hacia la superficie terrestre u oceánica, en sus formas líquida (lluvia) o sólida (granizo o nieve) (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

3. Sistemas convencionales y no convencionales de suministro de agua

El abastecimiento de agua a la población urbana mediante acueductos es visto como un sistema convencional de suministro; sin embargo, en zonas rurales este no suele ser el sistema más común por diversas causas como la presencia de población dispersa y la baja capacidad institucional y financiera, entre otros (OPS, 2009; FCAS, 2015). Para estas zonas la Organización Panamericana de la Salud (2009) presenta una clasificación, cuya implementación se da en función de la accesibilidad a los tipos de fuente: subterráneas (pozos, manantiales), superficiales (lagos, ríos, canales) o pluviales (agua lluvia). Estas son:

- Sistemas convencionales: están contruidos bajo criterios de ingeniería que proporcionan mayor certeza sobre el nivel de servicio que van a proporcionar. El suministro se hace mediante sistemas por gravedad o por bombeo y con tratamiento o sin tratamiento.
- Sistemas no convencionales: son soluciones individuales o multifamiliares que buscan aprovechar pequeñas fuentes de agua. Esta categoría abarca la captación de agua lluvia, los pozos con bombas manuales y los manantiales con protección de vertiente.

4. Sistemas de recolección de agua lluvia

Los sistemas de recolección de agua lluvia buscan captar el agua proveniente de la precipitación, bien sea en forma de lluvia o nieve, para que los seres humanos la aprovechen. Estos sistemas se usan tanto para suministro de agua a escala doméstica como para abastecimiento de industrias y edificaciones mayores. También son muy utilizados en el sector agropecuario (MARN, n. d.). Así, el uso que se le quiera dar a la lluvia colectada determina en gran medida el diseño que va a tener el sistema, dependiendo principalmente de la cantidad y calidad del agua que se va a suministrar y de la oferta local del líquido.

Civilizaciones de todo el mundo han venido aplicando desde hace miles de años estos sistemas, pero su uso se ha visto limitado por la alta disponibilidad de otras

fuentes hídricas como los ríos. Pero, actualmente su uso está aumentando por las facilidades que presentan (Palacio, 2010) y por la escasez misma del recurso ante el incremento de sus demandantes. Esto se debe a que, en comparación con otros sistemas, este es un mecanismo muy práctico y de bajo costo, tanto en su implementación como en su operación y así mismo es altamente adaptable a las condiciones sociales y ambientales locales (Martínez & Peláez, 2016).

El principal problema que presentan estos sistemas, no obstante, es la disponibilidad de agua lluvia, de la cual son muy dependientes. Adicionalmente, es importante tener en cuenta precauciones básicas de higiene del agua colectada para garantizar una calidad suficiente en función del uso para el que esté destinada.

En este sentido, cabe resaltar que las principales y casi únicas fuentes de contaminación del agua lluvia son, por un lado, la contaminación atmosférica que, especialmente en zonas urbanas puede involucrar nitrógeno y otros gases producto de la actividad humana. Por otro lado, se encuentran las superficies de escurrimiento del agua, por las que esta puede entrar en contacto con metales pesados, provenientes de los materiales de la superficie y elementos externos a esta como polvo, hojas y excremento de animales como roedores y aves. A pesar de ello, el agua de lluvia es una fuente hídrica de muy alta calidad, que no requiere tratamientos muy complejos para el efecto (MARN, n. d.). Estos problemas se pueden abordar con el diseño del sistema, teniendo en cuenta factores como la eliminación de las primeras lluvias, implementación de filtros y aplicación de cloro.

Ahora bien, en el diseño para sistemas aplicados a consumo doméstico los módulos básicos suelen ser captación, conducción y almacenamiento y otros adicionales pueden ser el interceptor de primeras aguas, el sistema de distribución y el tratamiento, como se describe en la Figura 1 (Palacio, 2010):

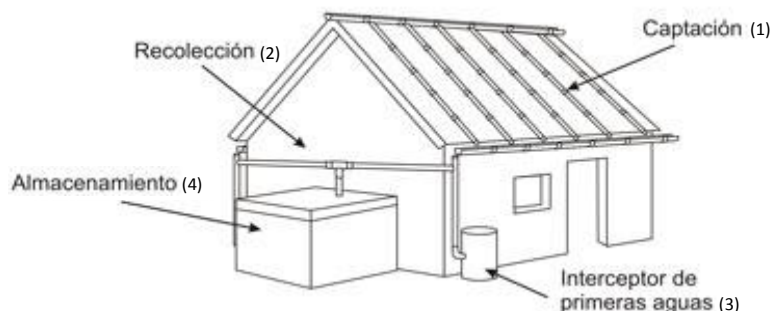


Figura 1. Sistema doméstico de recolección de agua lluvia.

Fuente: BVSDE, n. d.

La captación (1) se realiza generalmente en techos, cuyos factores más importantes son la inclinación, que debe ser mayor al 5 %, y el material, que debe tener poca rugosidad y no contener elementos como plomo. Así, es recomendable que los techos estén fabricados con tejas de Eternit, metal o plástico (Martínez & Peláez, 2016). Ambos factores inciden sobre la calidad y cantidad de agua lluvia que se colecte.

Para las estimaciones sobre la posible oferta de agua lluvia que pueda proporcionar un sistema de recolección, suele involucrarse el concepto de coeficiente de escorrentía del techo, en ocasiones llamado *coeficiente de captación*, que hace referencia al porcentaje de agua lluvia que la superficie de captura está en capacidad de recolectar e ingresar al sistema (Hasim et al., 2013). El valor de este coeficiente se involucra para tener en cuenta pérdidas de agua asociadas a evaporación, desbordes y rugosidad de la superficie y depende, por un lado, del material del techo o superficie de captura y de su inclinación y, por otro, de factores ambientales como la intensidad del evento de lluvia, los vientos y la temperatura (Biswas & Mandal, 2014; Farreny et al., 2011).

En este sentido, existen diferentes estudios a escala mundial que evalúan la influencia de estos factores sobre la eficiencia de diferentes superficies de captación de agua lluvia, como lo muestra la revisión de literatura de Farreny et al. (2011) (Tabla 1) quienes establecen un valor estándar de 0,8 para los techos en general.

Tabla 1. Estimaciones de coeficiente de escorrentía de superficies de captura de agua lluvia

Tipo de techo	Coeficiente de Escorrentía	Referencia
Techos en general	0.7 - 0.9	Pacey & Cullis (1989)
	0.85	McCuen (2004), Rahman et al. (2010)
	0.8 - 0.95	Lancaster (2006)
Concreto/asfalto	0.9	Lancaster (2006)
Metal	0.81 - 0.84	Liaw & Tsai (2004)
Aluminio	0.7	Ward et al. (2010)
Grava	0.8 - 0.85	Lancaster (2006)

Fuente: adaptado de Farreny et al. (2011)

La conducción o recolección (2) se realiza por canaletas y bajantes que conducen el agua lluvia hasta su almacenamiento. Estas suelen tener mallas que retienen sólidos gruesos e impiden la entrada de animales al sistema. Antes de la entrada de agua al tanque también se recomienda incorporar un filtro para elementos más finos o una trampa para grasas.

La intercepción de primeras aguas (3) se realiza para separar la primera fracción de cada evento de lluvia, pues esta contiene la mayor parte del polvo y otros elementos que se puedan encontrar sobre la superficie de captación del agua y, así mismo, lava la polución de la atmósfera. La capacidad del tanque interceptor se basa en el área de captación, y se estima que se requiere un litro por metro cuadrado para eliminar estos contaminantes (Hasim et al., 2013).

Para el almacenamiento (4) se adecua un tanque que cumpla con las dimensiones establecidas en función del agua requerida y de la precipitación del lugar. Este también debe contar con una tapa lo suficientemente amplia, que facilite su lavado.

Adicional a los filtros de sólidos gruesos y finos y a la trampa para grasas, se recomienda realizar una desinfección del agua almacenada, antes de ser consumida. A modo de tratamiento y prevención de contaminación futura, esto se

puede realizar con cloro, que es el desinfectante más comúnmente utilizado en el tratamiento de agua para consumo humano, en el lugar de depósito del agua y que además resulta ser un tratamiento muy efectivo y rentable (Lampoglia et al., 2008; Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016).

En este punto se puede tomar el agua manualmente del tanque de almacenamiento, mediante un punto de salida que evite el contacto directo con el agua y el ingreso de elementos indeseados, especialmente animales pequeños. La toma de agua no debe hacerse mediante el acceso directo de las personas al tanque. Otra opción es agregar un componente de distribución del agua directamente hacia puntos de salidas como lavamanos, duchas y sanitarias, que funcione por gravedad o por distribución mecánica, mediante una motobomba.

5. Modelación y modelos matemáticos

La modelación matemática es un proceso cognitivo mediante el cual se construyen prototipos con simbolismos matemáticos para estudiar el comportamiento del mundo real (Domínguez, 2000; Dym, 2004; Salett & Hein, 2004). Conlleva, generalmente, la articulación de un conjunto de ecuaciones que relacionan los componentes esenciales del sistema bajo estudio, con los que se pretende replicar la realidad. Se emplea, entre otros, para estudiar situaciones que en la práctica resultan inviables, costosas o riesgosas, para anticipar resultados futuros, optimizar procesos, generar teorías o para mayor comprensión de un objeto de estudio (Mancera et al., 2003).

El modelo matemático se refiere a un sistema matemático particular, construido con un fin específico y bajo una delimitación y unos supuestos claramente definidos. Su validez y desempeño se enmarca en que las relaciones y los parámetros que lo definen, representen de forma adecuada la realidad; y en que respete principios físicos de balance de masas y de conservación de la materia y la energía (Dym, 2004). Dentro de las características que los definen sobresalen las siguientes: determinístico o estocástico; lineal o no lineal; dinámico o estático; aglutinado o distribuido.

1. Software Stella

La modelación se realizó en el software *Systems Thinking Educational Learning Laboratory with Animation* (Stella 8.0), un programa para la simulación de sistemas dinámicos. Este utiliza cuatro componentes para la construcción de los modelos (Figura 2):

- *Stocks*: representa la variable de estado. A este componente ingresan, salen o se acumulan elementos o recursos, como por ejemplo agua, energía, individuos, etc.
- *Flujos*: representan los flujos de entrada y salida del *stock*. En conjunto los flujos representan la derivada de la variable del *stock* correspondiente ($dY/dt = \text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de salida}$).
- *Convertidores*: se utilizan para representar los parámetros y las variables de entrada y salida del *stock*.

- **Conectores:** transmiten información unidireccional entre los componentes y determinan las relaciones matemáticas entre ellos.

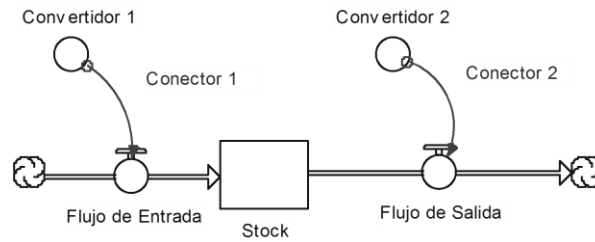


Figura 2. Componentes básicos del *software* Stella.
Fuente: Elaboración propia.

2. Simulación de Montecarlo

La simulación se refiere a los resultados que arroja el modelo matemático cada vez que este corre y con condiciones claramente definidas.

La simulación de Monte Carlo se refiere a un proceso iterativo de generación de números aleatorios que se fundamentan en la probabilidad de ocurrencia de valores particulares de una variable aleatoria, los cuales condicionan la salida del conjunto de datos que se simulan (Hannon & Ruth, 1997; Zapata et al., 2004), dando lugar a modelos estocásticos, es decir, modelos en que no se pueden predecir estados subsecuentes al actual.

Antecedentes

Existe un alto potencial de la precipitación como fuente de agua para consumo y uso doméstico, aunque es pobremente aprovechada (Biswas & Mandal, 2014). Los sistemas de cosecha de agua lluvia o *Rainwater Harvesting Systems* –RWHS- se han consolidado en muchas partes del mundo, como una de las principales alternativas, ante grandes represas y proyectos hídricos, por sus menores requerimientos energéticos y de infraestructura, al ser soluciones rápidas, efectivas y de bajo costo en virtud de la falta de agua asociada principalmente al crecimiento poblacional y a las demandas, urbanas e industriales (Cook et al., 2000; Hasim et al., 2013; Haque et al., 2016).

Un estudio realizado en 23 ciudades de siete regiones de Estados Unidos halló que, en general, los RWHS tienen alto potencial de proveer agua suplementaria a la fuente principal, aunque en algunas regiones las bajas precipitaciones son un limitante para el ahorro de agua de suministro (Steffen et al., 2013).

Estudios relacionados con la implementación de estos sistemas para agricultura mostraron un aumento en el rendimiento y la calidad de la producción agrícola comparada con cultivos de irrigación natural, así como una reducción en la necesidad de explotar terrenos inadecuados (ampliación de la frontera agrícola), como problema asociado al bajo rendimiento de los cultivos. (Cook et al., 2000).

Así mismo, un análisis económico de tres actividades agropecuarias alimentadas por RWHS en la India, encontraron relaciones positivas de costo-beneficio en todos los casos (Saha et al., 2007). Estos mismos autores encontraron, no obstante, que por dificultades topográficas y por la distribución de las lluvias a lo largo del año, se pierde más del 98 % de la lluvia potencialmente aprovechable, por lo que se presenta escasez después de los monzones.

Un criterio importante para evaluar el desempeño de los RWHS es la *confiabilidad* del sistema, entendida como el número de días en los que la demanda puede satisfacerse (Haque et al., 2016). Usando este criterio, Hajani & Rahman (2014) hallaron mayor confiabilidad cuando es mayor la capacidad de los tanques de almacenamiento y hay mayor precipitación.

Dentro de los estudios que se enfocan en los efectos de la estacionalidad climática se encuentra el de Hajani & Rahman (2014) en el que se tomaron los años de lluvias más altas, más bajas y cercanas al promedio histórico en tres lugares. Los autores descubrieron que en regiones más secas y en años de menor precipitación, se incrementa la incertidumbre para el funcionamiento de estos sistemas, en tanto la confiabilidad aumenta en situaciones opuestas.

Así mismo, los resultados de Ndiritu et al. (2011), muestran que el uso de sistemas mixtos (RWHS + otra fuente, en este caso un río) dan una mayor confiabilidad que el uso individual de una u otra fuente.

En un estudio de evaluación económica de sistemas RWHS se hallaron resultados adversos en un edificio universitario y en sistemas comunales de pequeños grupos de casas, que mostraron tiempos de retorno de la inversión muy largos: 7 y 23 años, respectivamente (Ward et al., 2010).

Así mismo, Hajani & Rahman (2014) analizaron la relación costo-beneficio para sistemas RWHS empleando tanques de diversos tamaños y varios usos del agua, pero no encontraron relaciones positivas. Por ello, estos autores resaltan la necesidad de contar con subsidios para que en zonas periurbanas y rurales se implementen estos sistemas a escala doméstica o de pequeñas fincas productoras. Estos mismos autores contrastaron a escala doméstica la demanda hídrica interna: sanitario y lavandería y externa: riego de cultivos y encontraron que la estacionalidad influye más sobre la demanda externa que sobre la interna.

En relación con estudios que se han adentrado en posibles variaciones asociadas al cambio climático, Haque et al. (2016) calcularon el ahorro de agua para cinco lugares de Sídney con precipitaciones medias diferentes, usando tanto la precipitación histórica como la estimada en el futuro. Dado que, para el periodo 2020-2039, se esperan épocas secas más marcadas (reducción de la precipitación entre 42 y 65 %), se observa menor confiabilidad de los sistemas y mayores impactos negativos. Es así que, por ejemplo, para un tanque de 3m³ para uso doméstico interno (inodoro y lavandería) se estimó una reducción en el ahorro de agua de 2 a 14 % y en la confiabilidad de 3 a 16 %. Según los resultados, un tanque

que cumple actualmente con la demanda no podrá cumplirla en el futuro, por lo que se requiere diseñar y poner en marcha sistemas con mayor capacidad.

Por último, respecto a la modelación de sistemas RWHS, un problema que suele encontrarse es la escala temporal de precipitación con la cual se construya el modelo, pues al usar una resolución mensual, contrastada con una resolución diaria, se llega a resultados que tienden a generar un sobredimensionamiento del tanque de almacenamiento (Ward et al., 2010).

En un estudio similar, Ndiritu et al. (2011) optaron por el método de simulación continua (*behaviour analysis*) que, afirman, genera una representación más realista y permite diferentes aproximaciones para evaluar el desempeño del sistema. Con este método encontraron que, para un mismo tamaño de tanque, el rendimiento es mayor con la resolución diaria que la mensual.

Respecto a las variables que se deben tener en cuenta, autores como Haque et al. (2016) señalan que la determinación del tamaño óptimo del tanque suele ser el principal objetivo de los modelos de RWHS, así como el área de captura y que la variabilidad temporal de la precipitación es el factor crítico gobernante en el desempeño de los RWHS. Afirmaciones semejantes son expuestas por Cook et al. (2000), Ward et al. (2010), Ndiritu et al. (2011), Hasim et al. (2013), Steffen et al. (2013) y Biswas & Mandal (2014).

Área de estudio

El municipio de Sopó se encuentra ubicado en la provincia Sabana Centro del departamento de Cundinamarca (Figura 3), a una altura de 2.587 m s. n. m. Limita con los municipios de Guasca, Cajicá, Chía, Tocancipá y La Calera y tiene una extensión de 111,5 km², distribuidos en 17 veredas. El área rural es de 110,44 km² (Rodríguez, 2013). Para el 2016 la Alcaldía de Sopó proyectaba una población de 17.564 y 9.775 habitantes para la cabecera y la zona rural, respectivamente.

La temperatura de Sopó oscila entre los 9 y los 15 °C, con un promedio de 14 °C y una precipitación de entre 500 y 700 mm anuales. La evaporación a lo largo del año varía de forma uniforme y se mantiene entre los 800 y los 1.000 mm. En los meses de menor precipitación se presenta un déficit hídrico (Barrera, 2016). Su régimen climático anual está fundamentalmente definido por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y su movilidad latitudinal (León et al., 2000), con periodos más lluviosos durante los meses de abril-mayo y octubre-noviembre (CAR, 2006).

Este municipio se encuentra casi en su totalidad dentro de la parte baja de la subcuenca del río Teusacá, que a su vez forma parte de la cuenca del río Bogotá y abastece de agua a este y a otros municipios cercanos. Se identifican 40 nacedores de agua, de los cuales más de la mitad (24) reportan escasa producción de agua. Así mismo, se registran 38 quebradas y 12 humedales (Alcaldía de Sopó, 2016). Una caracterización de las aguas regionales en 21 quebradas señala pérdida de vegetación y contaminación por vertimientos industriales, domésticos o agropecuarios, además del hecho de que muchos de estos cursos surten acueductos veredales, cultivos y consumo pecuario (Herrera, 2006).

A nivel de paisaje se observa alto predominio de pastizales para ganadería que ha reemplazado a los bosques andinos, hecho que puede haber generado cambios históricos en las condiciones naturales de escorrentía (Rodríguez, 2013).

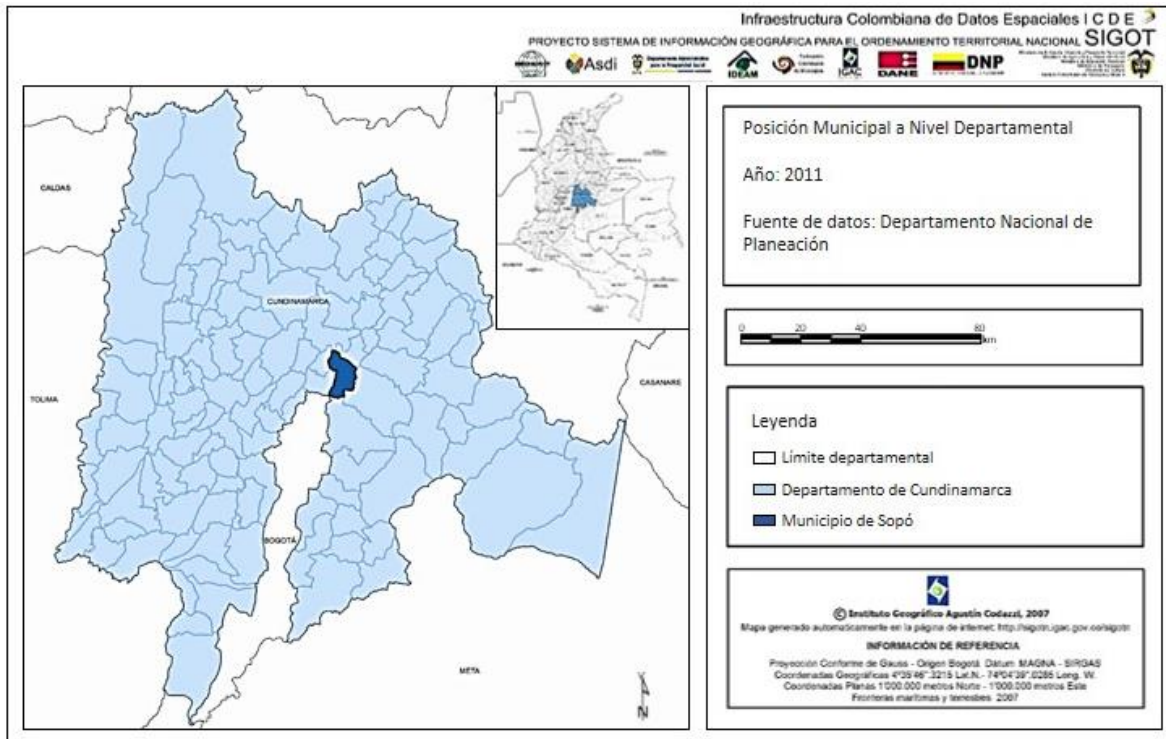


Figura 3. Ubicación del municipio de Sopó, Cundinamarca.
Fuente: IGAC, n. d.

En lo referente a las actividades socioeconómicas de Sopó, a finales de los años noventa la economía del municipio era principalmente agropecuaria, con cultivos tradicionales y alta producción de carne y leche, que dieron lugar a un desarrollo industrial importante en torno a los últimos. Más recientemente, ha habido una creciente llegada de proyectos de vivienda campestre, que ha generado un drástico aumento del precio del suelo y crisis en el sector agropecuario. A la vez se ha incrementado el sector industrial, la producción de materiales para construcción y los cultivos de flores (Herrera, 2006; Alcaldía de Sopó, 2016).

Metodología

Como primera medida, se solicitaron los registros históricos de precipitación diaria de la estación “Parque Sopó” de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Los datos suministrados abarcan el periodo 1980-2014.

Los datos crudos de precipitación diaria se separaron y organizaron por mes. De los datos de cada mes se obtuvo un histograma de frecuencias, utilizando la regla de

Sturges⁴ para calcular el número de clases. A manera de ejemplo, en la Tabla 2 se observa la distribución de frecuencias del mes de enero. Este procedimiento se realizó para cada uno de los meses, así como un análisis de estadística descriptiva en torno a ellos.

Tabla 2. Distribución de frecuencias de la precipitación diaria (mm) mes de enero

<i>Rango de clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>%</i>	<i>Valor medio de clase</i>	
0	3,3	625	0,92	91,78	1,65
3,3	6,6	21	0,95	3,08	4,95
6,6	9,9	19	0,98	2,79	8,25
9,9	13,2	2	0,98	0,29	11,55
13,2	16,5	5	0,99	0,73	14,85
16,5	19,8	2	0,99	0,29	18,15
19,8	23,1	4	1,00	0,59	21,45
23,1	26,4	1	1,00	0,15	24,75
26,4	29,7	0	1,00	0,00	28,05
29,7	33	2	1,00	0,29	31,35

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos organizados por mes se obtuvo el promedio mensual multianual, que se utilizó como valor de precipitación para los modelos determinísticos cuyos valores se pueden consultar en el Anexo 1.

Para los modelos de tipo estocástico se recurrió al método de simulación de Montecarlo como se ejemplifica en la Figura 4 para el mes de enero.

Este método utiliza la probabilidad de ocurrencia y el valor medio de clase de los conjuntos de datos diarios de cada mes. Así, en el software Stella, cada una de las clases, exceptuando la última, se representó mediante un convertidor, el cual se basó en la probabilidad de ocurrencia $p(x)$ de cada clase para realizar una simulación binomial, siendo $p(x) = 1$ y $1-p(x) = 0$.

Estos nueve convertidores (EneAI1 a EneAI9) se conectaron al convertidor “EneTasa” el cual representa el valor de precipitación que tomará el modelo en cada paso de tiempo, en este caso, para los 31 días del mes de enero. Para obtener el valor que debe tomar “EneTasa”, se utilizó un código condicional que ordena los convertidores “EneAI1” a “EneAI9” en orden ascendente (de menor a mayor probabilidad de ocurrencia) y toma el valor medio de clase del primero de dichos convertidores que en la simulación binomial haya obtenido el valor de “1”.

Los valores que toman las variables “EneTasa” a “DicTasa” representan el valor de precipitación de cada uno de los días de un año calendario, según el mes que

⁴ La regla de Sturges calcula el número adecuado de clases para obtener un histograma de frecuencias de un conjunto de datos, basándose en la fórmula: $c = 1 + 3.322 \cdot \log(n)$; c es el número de clases y n la cantidad de datos.

corresponda. Los valores de probabilidad de ocurrencia y los valores medios de clase utilizados de febrero a diciembre se incluyen en el Anexo 2.

Para la generación de los modelos, se tomó en cuenta que la modelación en Stella se fundamenta en ecuaciones diferenciales sustentadas en la ecuación diferencia de primer orden así:

$$Y_t = Y_{t-1} + \frac{dY}{dt} dt$$

Por lo demás, Stella halla la solución numérica del modelo por el método de diferencias finitas y posibilita tres métodos de integración: Euler, Runge-Kutta de segundo orden y Runge-Kutta de cuarto orden. En razón a que los modelos desarrollados en la presente investigación son lineales, se eligió el método de Euler que provee resultados idénticos a los arrojados por las soluciones analíticas. Adicionalmente, para el caso presente el método de diferencias finitas es aplicable por cuanto la función estudiada es continua y por tanto derivable en cualquier valor de t.

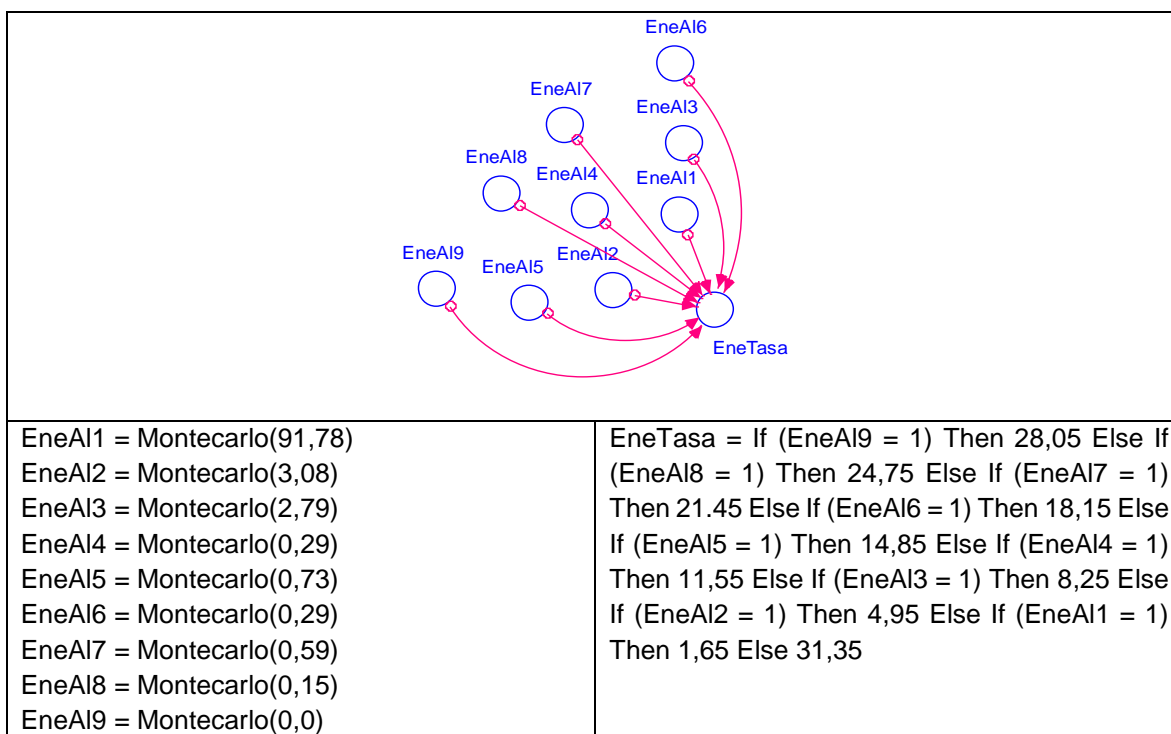


Figura 4. Simulación de Montecarlo para el mes de enero.
Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, para evaluar la implementación de un sistema de recolección de agua lluvia para consumo doméstico vital, tomando como base estándares nacionales e internacionales de demanda hídrica, se trabajaron cuatro modelos diferentes cuyos supuestos son los siguientes (Tabla 3):

Tabla 3. Supuestos de los modelos matemáticos construidos, tomando como base estándares nacionales e internacionales de demanda para consumo doméstico vital.

Modelo	1A	1B	1C	1D
Variables y registros de entrada				
Número de habitantes por residencia	4	4	4	4
Área de captación (m ²)	100	100	100	100
Coefficiente de captación	0.8	0.8	0.8	0.8
Demanda de agua por persona día (L/p/d)	20	20	20	20
	100	100	100	100
	367	367	367	367
Datos de precipitación (mm)	Promedio mensual multianual	Simulación diaria basada en probabilidades diarias multianuales desagregadas mensualmente	Promedio mensual multianual	Simulación diaria basada en probabilidades diarias multianuales desagregadas mensualmente
La simulación de la precipitación diaria es independiente de los resultados de precipitación de los días anteriores.				
Condiciones				
Tipo de modelo	Determinístico	Estocástico	Determinístico	Estocástico
Condición de captación	Sin separación de primeras lluvias	Sin separación de primeras lluvias	Con separación de primeras lluvias	Con separación de primeras lluvias
Tanque de captación	Hipotético e indefinido	Hipotético e indefinido	Hipotético e indefinido	Hipotético e indefinido
Periodo de simulación	365 días	365 días	365 días	365 días
Fecha de inicio de la simulación	1 de enero	1 de enero	1 de enero	1 de enero
	1 de abril	1 de abril	1 de abril	1 de abril
Variables y registros de salida				
Reservas de agua diarias y demanda de agua suplida diaria.				

Fuente: elaboración propia.

Respecto a la tabla anterior cabe destacar lo siguiente:

- El valor para el coeficiente de captación se fijó con base en la revisión de literatura de Farreny et al. (2011), quienes establecen un valor estándar de 0,8 para los techos en general.

- Los valores de demanda de agua de 20 y 100 L/persona/día (L/p/d) se tomaron a partir de lo estipulado por la OMS como acceso básico y acceso óptimo, respectivamente. Así, el acceso básico hace referencia a la cantidad de agua con la que una persona promedio logra suplir sus necesidades de consumo de agua (hidratación), higiene personal e higiene básica de alimentos, con un alto riesgo para su salud; mientras que con un acceso óptimo se suplen todas las necesidades de hidratación, higiene personal y alimentación con un riesgo muy bajo para la salud. Por último, el valor de 367 litros de consumo de agua diario por persona equivale a 11m³ de agua al mes, establecidos según la Resolución 750 del 2016 como el consumo básico⁵ para una persona en Colombia, ubicada a una altitud superior a los 2.000 m s. n. m. La simulación para las demandas de 100 y 367 L/p/d se hizo solo cuando se logró suplir la demanda anterior.
- Para los dos modelos determinísticos, 1A y 1C, cabe aclarar que se asignó el promedio de precipitación diaria de cada mes a todos los días del mes, por lo cual no se tiene en cuenta la influencia del número de días con lluvia ni la varianza del conjunto de datos de precipitación.
- Para estos cuatro primeros modelos se manejó un tanque de almacenamiento hipotético con capacidad indefinida, con lo cual se obtuvo el valor máximo de agua que potencialmente se podría almacenar, en función de la precipitación observada en los modelos determinísticos, y simulada, en los modelos estocásticos. En estos últimos se hicieron 10 iteraciones (corridas) del modelo y se promediaron sus resultados.
- Respecto a la fecha de inicio de simulación, se manejaron dos fechas, 1 de enero y 1 de abril, que hacen referencia a épocas de sequía y lluvia, respectivamente. La simulación para ambos casos se realizó por un periodo de 365 días.
- Para evaluar el desempeño del sistema de captación de aguas lluvias, se calculó la confiabilidad del sistema a partir del *indicador de Confiabilidad*, que se define como el número de días en los que se logra suplir la demanda establecida respecto al número total de días de simulación (Ndiritu et al., 2011; Hasim et al., 2013; Hajani & Rahman, 2014), que para el caso corresponden a un ciclo anual de 365 días:

$$\text{Confiabilidad} = \frac{\# \text{ de días en que se suplió la demanda}}{\# \text{ de días de simulación}} \times 100$$

- Adicionalmente, se calcularon las diferencias entre oferta y demanda, en donde los valores negativos indican un déficit hídrico (mayor demanda que oferta) y los valores positivos indican excedentes de agua (mayor oferta que demanda).
- Los modelos desarrollados en el estudio son (Wainwright & Mulligan, 2004):

⁵ Según la Resolución 750 del 2016, el consumo básico es “aquel que satisface las necesidades esenciales de una familia promedio” en función de la altitud a la que se encuentra ubicada. Para este caso se toma la demanda asignada para el rango que va a partir de los 2.000 metros sobre el nivel del mar en adelante, la cual se fija en 11 m³ mensuales por suscriptor facturado.

- *Determinísticos* en tanto emplean en la entrada constantes o valores promedio de las variables aleatorias.
- *Estocásticos* en tanto incorporan en las entradas variables aleatorias conocidas cuyos valores se obtienen por un procedimiento aleatorio (Simulación de Montecarlo).
- *Dinámicos* en tanto evalúan el comportamiento del sistema a través del tiempo.
- *Secuenciales* en tanto incorporan al modelo, en un tiempo dado, los resultados obtenidos en el tiempo inmediatamente anterior.
- *Físicos* en tanto parten de ecuaciones conocidas y no de estimaciones empíricas.

Descripción de los modelos:

Modelo 1A: Determinístico sin separación de primeras lluvias. Se construyó tomando el promedio de precipitación mensual multianual de los datos observados, obteniendo en total 12 valores de precipitación. Este se simuló por día para un periodo de 365 días.

Modelo 1B: Estocástico sin separación de primeras lluvias. Parte del planteamiento anterior y mantiene los valores para demanda de agua, número de habitantes y área de captura. Para los datos de precipitación se recurrió al método de Montecarlo mediante el cual se produjeron valores simulados de precipitación diaria.

Modelo 1C: Determinístico con separación de primeras lluvias. Este modelo, al igual que el modelo 1A toma el promedio de precipitación mensual multianual de los datos observados. Con él se obtuvieron en total 12 valores de precipitación. Sin embargo, al momento de realizar la captura de agua, se separan las primeras lluvias (1 litro por m² de área de captura) y este volumen se descuenta de la cantidad de agua que entrará al tanque de almacenamiento. Estas primeras lluvias pueden desecharse o utilizarse para otro tipo de demandas, como por ejemplo lavado de pisos o sanitarios y son consideradas por diferentes autores como un mecanismo de limpieza de las superficies colectoras y de la polución presente en la atmósfera (OPS, 2009; Hasim et al., 2013; Biswas & Mandal, 2014).

Modelo 1D: Estocástico con separación de primeras lluvias. Parte de modelo 1C y mantiene la separación de las primeras lluvias, pero para los datos de precipitación se recurrió al método de Montecarlo mediante el cual se obtuvieron valores simulados de precipitación diaria (365 datos en total).

Finalmente, para realizar el análisis de costos del sistema modelado, se manejaron dos diseños: uno sin separación de primeras lluvias y otro con separación, que contarán con la capacidad de almacenamiento suficiente para responder a los resultados del segundo objetivo. Se hicieron varias cotizaciones de los elementos requeridos, con el fin de encontrar el menor costo.

Como resultados, se obtuvo la estadística descriptiva y los histogramas de frecuencia de los datos de precipitación del área de estudio y para cada modelo se

obtuvo la confiabilidad, déficit y excedencias de agua y el rango y promedio de los valores de entrada (captación efectiva de agua lluvia diaria) y salida (demanda suplida diaria) de agua del tanque hipotético para cada escenario planteado (24 en total). Así mismo, en el análisis de costos, se estableció el tamaño óptimo del tanque, las especificaciones técnicas del sistema y el costo para los dos sistemas diseñados, con y sin separación de primeras lluvias.

Resultados y análisis

Estadística descriptiva e Histogramas de Frecuencias de la Precipitación del área de estudio

Como se puede observar en la Figura 5, la precipitación en la zona tiene un comportamiento caracterizado por dos periodos secos y dos periodos húmedos. El promedio diario anual multianual es de 2,06 mm, con valores que oscilan entre los 0 y 63,4 mm. A pesar de que este último valor corresponde a noviembre, la temporada lluviosa de mayor intensidad se presenta en la primera mitad del año, en abril y mayo, que tienen promedios de precipitación mensual multianual más altos que los de octubre y noviembre.

Así mismo, el periodo seco más intenso se presenta de diciembre a febrero; siendo enero el mes con menor precipitación media, con un valor de 1,08 mm. Durante la mitad del año se presenta un periodo seco más suave pero más prolongado, en los meses de junio a septiembre. Por estas razones se tomaron los meses de enero y abril como las fechas de inicio de simulación para periodo seco y lluvioso, respectivamente.

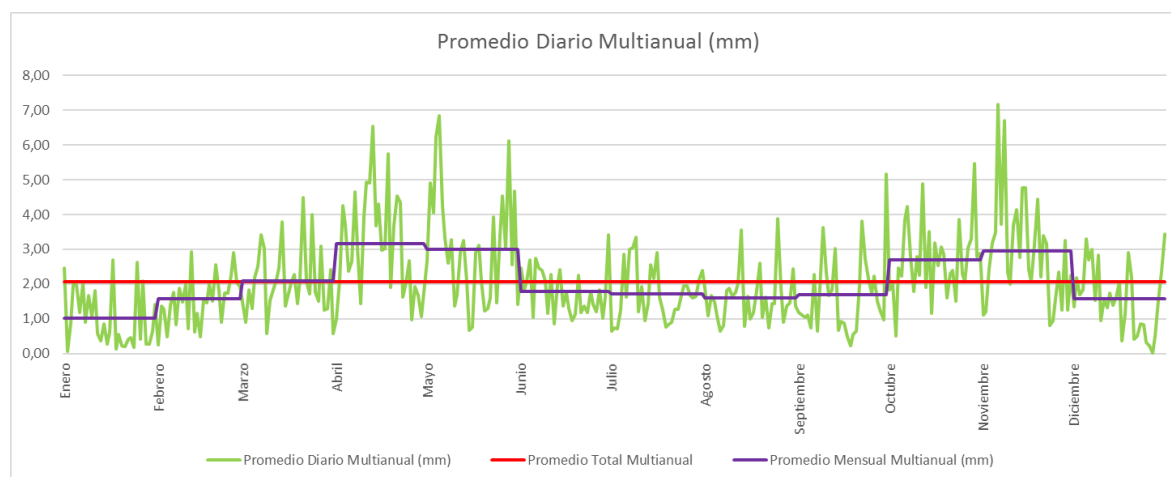


Figura 5. Promedio de precipitación diaria multianual (mm) de los datos tomados por la estación “Parque Sopó” del municipio de Sopó, Cundinamarca, para el periodo 1984-2014.

Fuente: elaboración propia.

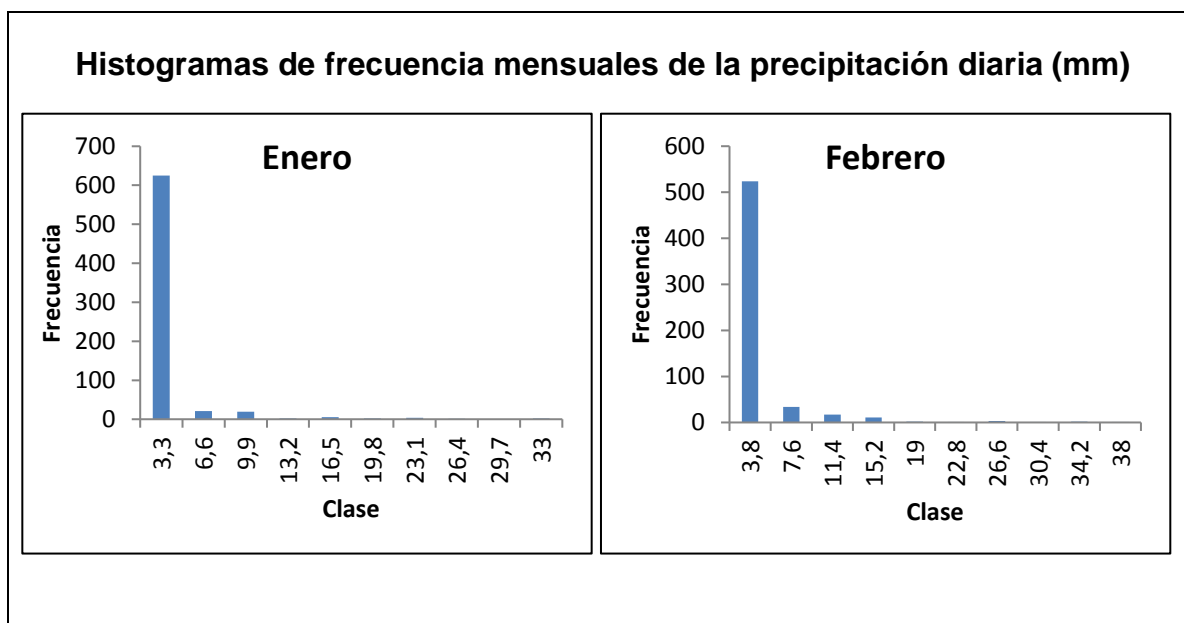
Adicionalmente, se calcularon estadísticas descriptivas de los datos de precipitación para cada uno de los meses (Tabla 4) y se hicieron histogramas de frecuencias para

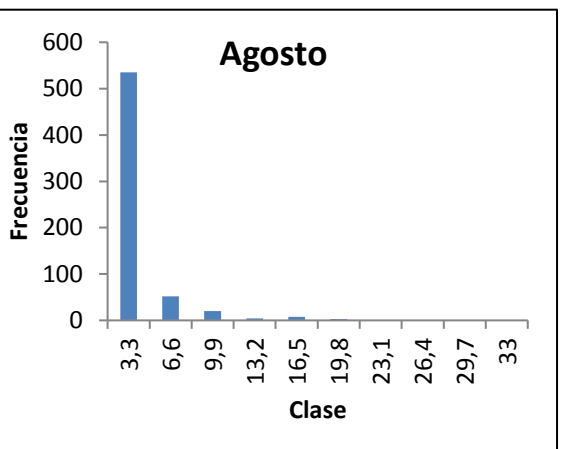
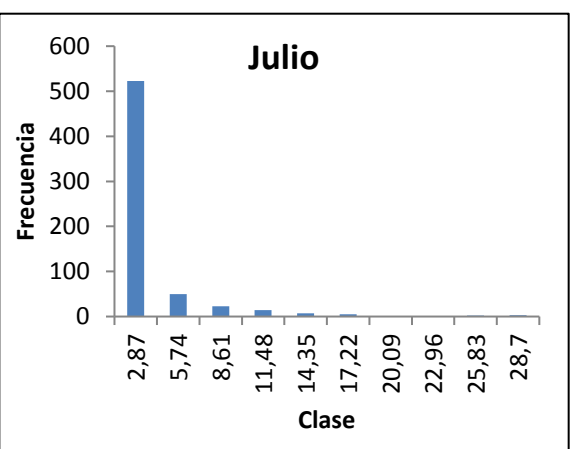
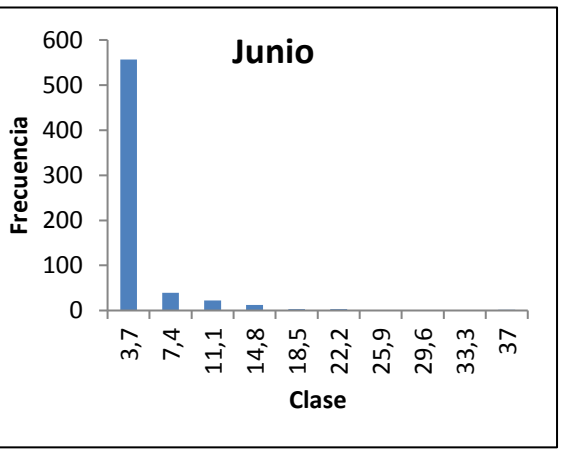
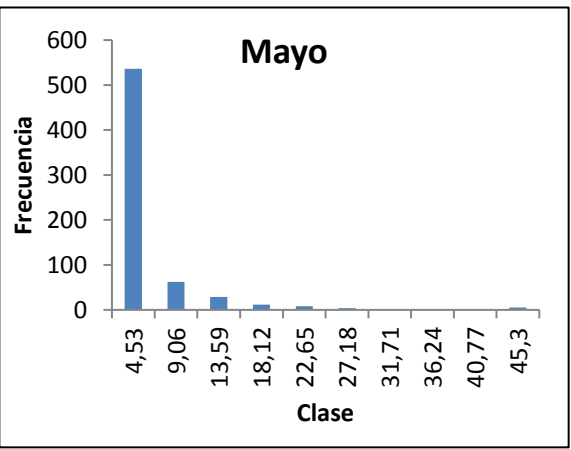
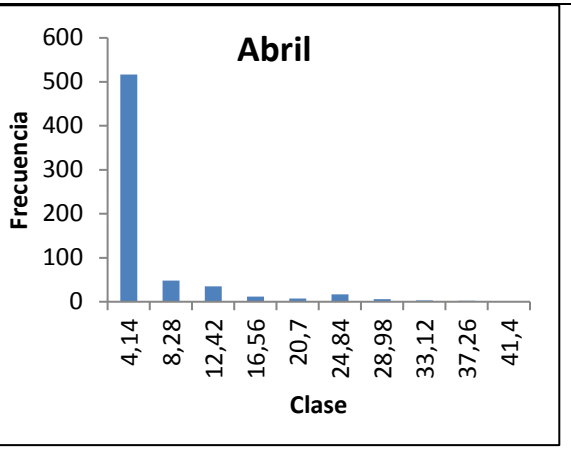
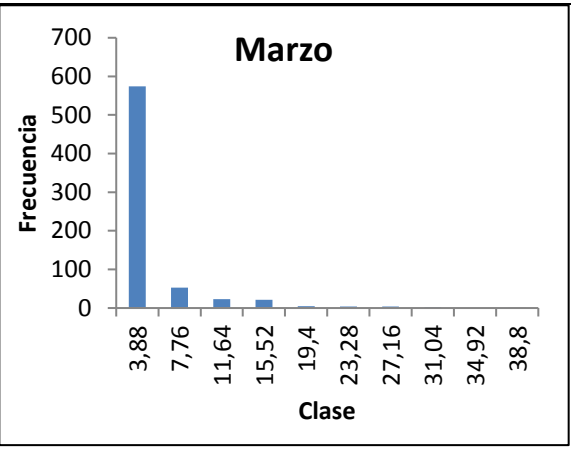
estos mismos datos (Figura 6), con el fin de comprender el comportamiento de la precipitación en el área de estudio y con ello aportar argumentos al análisis de los resultados arrojados por los sistemas de recolección de agua lluvia modelados.

Tabla 4. Estadística descriptiva de los datos de precipitación diaria multianual de la estación “Parque Sopó” del municipio de Sopó, Cundinamarca, para el periodo 1984-2014.

	Media	Mediana	Desviación estándar	Coef. de variación	Curtosis	Coefficiente de asimetría	Mínimo diario	Máximo diario
Enero	1,01	0	3,39	3,36	32,87	5,24	0	33
Febrero	1,57	0	4,20	2,68	24,74	4,45	0	38
Marzo	2,08	0	4,55	2,19	14,83	3,42	0	38,8
Abril	3,15	0,3	6,22	1,97	8,57	2,84	0	41,4
Mayo	3,00	0,5	6,11	2,04	18,28	3,84	0	45,3
Junio	1,78	0,4	3,74	2,10	28,09	4,48	0	37
Julio	1,72	0,3	3,64	2,12	18,67	3,87	0	28,7
Agosto	1,61	0,3	3,36	2,09	26,42	4,39	0	33
Septiembre	1,69	0,1	4,80	2,84	42,68	5,69	0	50,7
Octubre	2,69	0,1	5,77	2,14	11,86	3,23	0	40
Noviembre	2,94	0,1	6,90	2,35	19,38	3,89	0	63,4
Diciembre	1,58	0	4,69	2,97	24,69	4,56	0	40,3

Fuente: elaboración propia.





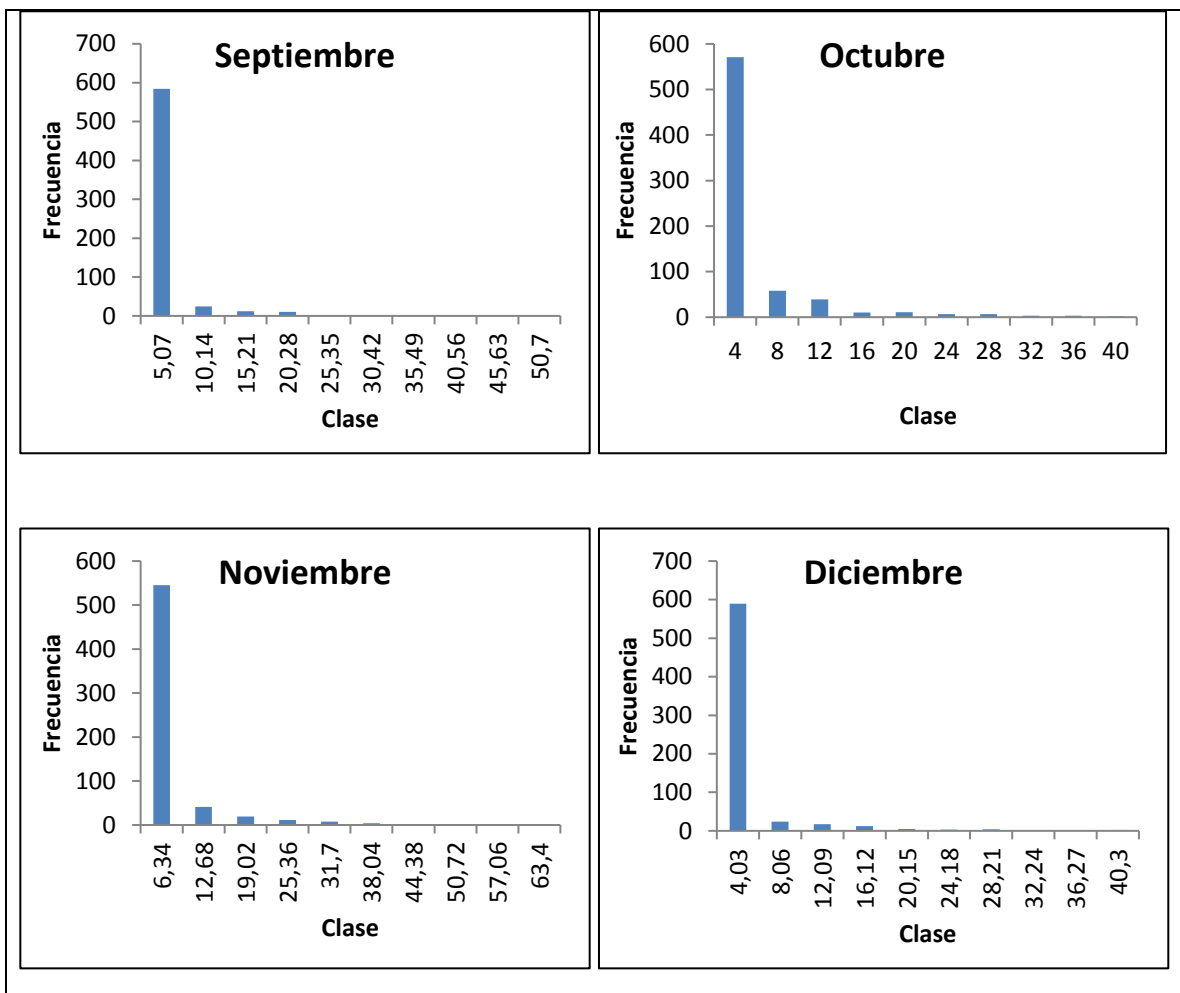


Figura 6. Histogramas de frecuencias de los datos de precipitación diaria multianual de los meses de enero a diciembre, para el periodo 1984-2014.

Fuente: elaboración propia.

Se observa, a lo largo de todo el año, una marcada concentración de la precipitación diaria cercana a cero, lo que se puede ver tanto en los valores de asimetría y curtosis, como en la distribución de los datos de la Figura 6. Por un lado, para la curtosis se encontró que la distribución de los datos se encuentra muy concentrada alrededor del promedio (distribución leptocúrtica) especialmente en enero y septiembre y menos concentrada en abril y octubre.

Adicionalmente, el coeficiente de asimetría expone valores positivos en todos los casos, indicando que la mayor parte de los datos se aglomera por debajo del promedio, quedando muy pocos datos en valores altos de precipitación. Al igual que para la curtosis, se presenta mayor asimetría en enero y septiembre y menor en abril y octubre, que corresponden a meses de sequía y lluvia respectivamente. Esto se debe a que en los meses de mayor precipitación llegan a presentarse valores muy altos que, a pesar de ser escasos, influyen sobre estas medidas de tendencia central.

Caso similar ocurre con la variabilidad de los datos, pues la desviación estándar es mayor durante los meses de mayor precipitación (abril y noviembre) y menor durante los más secos (enero y agosto). No obstante, y dado que la media y la desviación estándar están afectadas por la magnitud de los datos, el coeficiente de variación permite una estimación más apropiada de la variación de la precipitación mensual. Por eso se observa que esta, contrariamente, es mayor durante los meses de sequía y menor durante los de lluvia.

Es importante tener en cuenta estos factores al modelar sistemas de recolección de agua lluvia ya que la variabilidad temporal de la precipitación es un factor gobernante en el desempeño de los mismos (Haque et al., 2016). Así, para este caso, la mayor parte de los días del año llueve muy poco y en un número menor de días se concentran altas precipitaciones. Claramente esta situación dificulta la efectividad de un sistema de recolección de aguas lluvias, por cuanto requiere de mayores tanques de almacenamiento o de una mayor área de captura.

Ahora bien, según la precipitación y temperatura anual de la zona, este municipio registra un clima de tipo cálido-húmedo, de acuerdo con la clasificación de Caldas-Lang, tal como se muestra en la Figura 7.

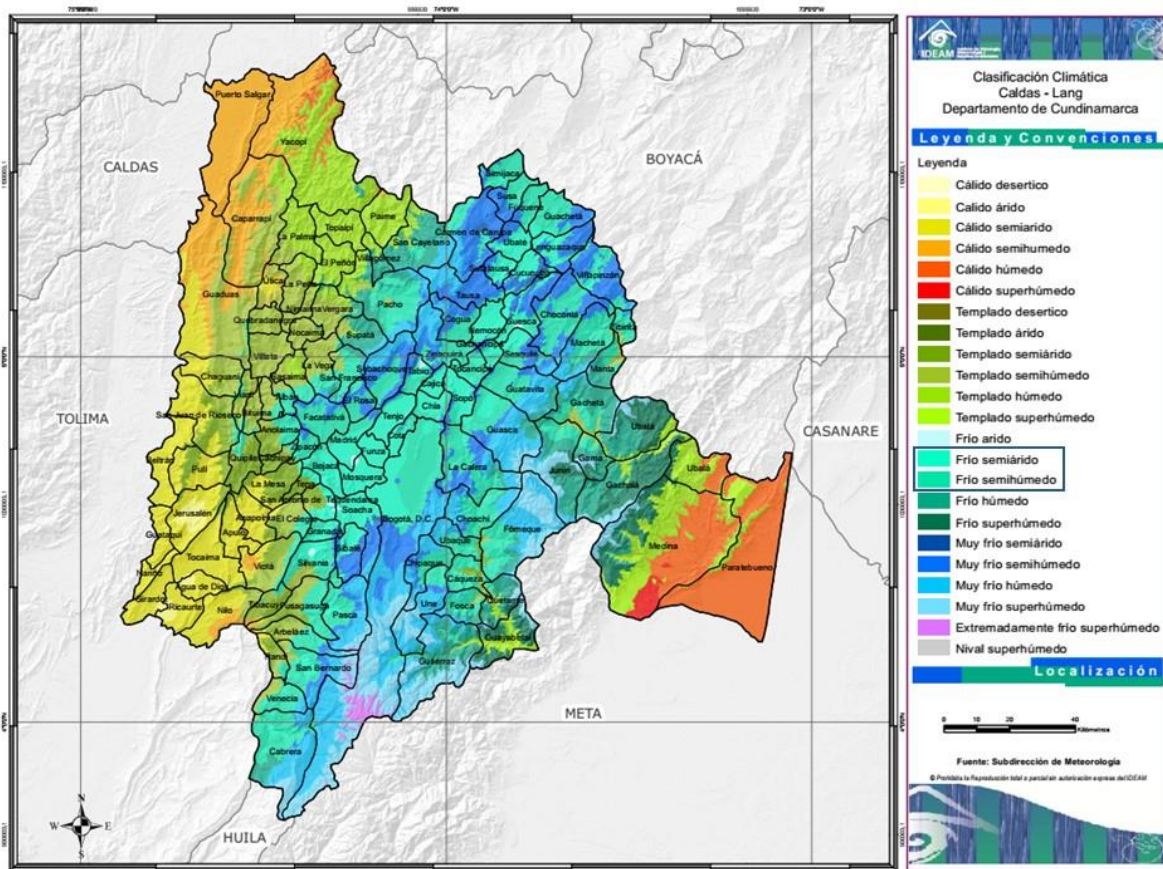


Figura 7. Clasificación climática de Caldas-Lang para el departamento de Cundinamarca. Fuente: Ideam,

A partir de esta clasificación, los resultados de captación de agua lluvia que se presentan más adelante pueden aplicar para todas las zonas con mayor precipitación y menor temperatura, es decir, toda la región central del departamento de Cundinamarca. Sin embargo, cabe resaltar que el comportamiento de la precipitación a lo largo del año varía dentro de esta misma zona, por lo cual aplica el valor total de captación de agua, mas no la capacidad de almacenamiento establecida, pues, por ejemplo, en los lugares con un pico de lluvia al año, se presenta un periodo más largo de lluvia que requerirá mayor capacidad para suplir un periodo igualmente más largo de menores lluvias.

Confiabilidad de los sistemas de recolección de agua lluvia modelados

En la Tabla 5 se presentan los resultados de confiabilidad del sistema para los cuatro modelos construidos y las seis combinaciones de parámetros resultantes de las tres diferentes demandas evaluadas y las dos fechas de inicio de simulación, que da un total de 24 escenarios.

Para el primer modelo, determinístico y sin separación de primeras lluvias (códigos 1 y 2), se presentó una situación muy contrastante, puesto que para la demanda de 20 L/p/d (acceso básico), se obtuvo una confiabilidad del 100 % para el sistema de recolección, iniciando la simulación tanto en enero como en abril, mientras que para la demanda de 100 L/p/d (acceso óptimo) la confiabilidad fue del 0 %.

Caso similar se observa en el tercer modelo (códigos 5 y 6), también determinístico, pero con separación de primeras lluvias. En este caso se observa que para acceso básico se suplió la demanda la mayor parte del año, con una confiabilidad de 83,56 y 100 %, para las simulaciones iniciadas en enero y abril, respectivamente, pero para acceso óptimo no llegó a suplirse la demanda establecida (100 L/p/d) durante ningún día del año.

Tabla 5. Confiabilidad de los cuatro sistemas modelados para los 24 escenarios establecidos

		Fecha de Inicio	Acceso básico OMS	Acceso óptimo OMS	Consumo básico Colombia	Código	Modelo
Sin separación de primeras lluvias	Determinístico	Ene.	100 %	0 %	-	1	1A
		Abr.	100 %	0 %	-	2	
	Estocástico	Ene.	100 %	85,75 %	0 %	3	1B
		Abr.	100 %	97,53 %	0 %	4	
Con separación de primeras lluvias	Determinístico	Ene.	83,56 %	0 %	-	5	1C
		Abr.	100 %	0 %	-	6	
	Estocástico	Ene.	93,15%	76,99 %	0 %	7	1D
		Abr.	100 %	86,30 %	0 %	8	

Fuente: elaboración propia.

Para los modelos estocásticos, la situación es un poco más favorable para el caso de acceso óptimo OMS. Por un lado, el segundo modelo (códigos 3 y 4), que no separa las primeras lluvias, suple en su totalidad la demanda para acceso básico, y alcanza 85,75 % y 97,53 % para acceso óptimo.

Por otro lado, el cuarto modelo, estocástico y con separación de primeras lluvias (códigos 7 y 8), solo logra suplir la totalidad de la demanda básica, si se inicia el aprovechamiento de agua lluvia durante la época lluviosa (abril). Sin embargo, de iniciarse en época seca (enero), se contaría con agua para el 93,15 % de los días del año y, con una demanda de 100 L/p/d, se llegaría a valores de confiabilidad de 76,99 % de iniciarse en esta misma época y de 86,30 % de iniciarse durante la época de mayores precipitaciones.

De los resultados obtenidos se observa, como primera medida, una gran diferencia entre los modelos determinísticos y los estocásticos, siendo estos últimos los que más agua lluvia proporcionaron para las tres demandas establecidas, independientemente de la separación de las primeras lluvias. Este contraste se debe al comportamiento de la precipitación local pues, como se advirtió a partir de los histogramas de frecuencia de cada mes, a lo largo de todo el año los datos se encuentran más concentrados hacia los valores bajos de la distribución, razón por la cual el promedio también toma valores bajos.

En este sentido, al tomar el promedio como dato de entrada de precipitación para los modelos determinísticos, los resultados son acordes a lo que, de modo general, ocurriría a lo largo de todo el año y sobre lo cual se puede tener mayor certeza, es decir, una precipitación insuficiente para satisfacer las demandas para acceso óptimo de la OMS y para el consumo básico establecido para Colombia. Sin embargo, los resultados de los modelos estocásticos muestran que tampoco se debe descartar la influencia de los valores más altos de precipitación. Así, estos valores, aunque menos frecuentes, generan un aporte considerable a las entradas de agua lluvia al sistema de recolección, llegando a suplir buena parte de la demanda de 100 L/p/d e incluso supliendo con mayor margen de variación la demanda para acceso básico, como se puede observar al comparar los resultados para esta demanda de los dos modelos con separación de primeras lluvias.

Respecto a ambos modelos estocásticos, es importante tener en cuenta que, debido al método de simulación utilizado, se puede estar subestimando la probabilidad de ocurrencia de cada una de las clases exceptuando la penúltima clase, al ser esta la primera que toman en consideración las variables “EneTasa” a “DicTasa” para obtener el valor de precipitación de cada paso de tiempo.

Por otro lado, al analizar la influencia de la separación de las primeras lluvias, se observa que esta acción tiene mayor incidencia sobre las reservas del tanque de almacenamiento y, en particular, cuando se presenta menor oferta de agua lluvia.

Este resultado obliga a sopesar la importancia de la separación de las primeras lluvias para eliminar residuos depositados sobre las superficies de captación, ante

la posibilidad de contar con una mayor confiabilidad del sistema. La primera situación no revestiría problemas en regiones con alta precipitación y amplia distribución anual, pero para el caso estudiado claramente representa una menor confiabilidad del sistema. Los resultados indican que, al no eliminarse esta fracción de la lluvia, se logra suplir al 100 % la demanda, mientras que para los dos modelos en que sí se elimina, no se alcanzó tan alta confiabilidad cuando se inició la simulación en enero. Este efecto se hace más evidente al comparar los dos modelos estocásticos, que ante menor demanda presentan grandes diferencias, y que estas disminuyen fuertemente a medida que aumenta la demanda.

Así mismo, las primeras lluvias aportan principalmente a las reservas potenciales de agua y, con mayor demanda, el sistema pierde el respaldo de agua almacenada. Por tanto, al haber menos reservas el sistema depende más del agua que entra día a día para suplir la demanda, lo que implica una mayor incertidumbre, asociada a la variabilidad climática local.

Respecto a las diferencias entre el inicio de la captación durante la época seca (enero) o la época lluviosa (abril), se observan diferencias más sutiles pero que igualmente indican que las diferencias de precipitación, entre ambas épocas del año, llegan a ser suficientes para generar efectos relevantes en la confiabilidad del sistema en esta u otras zonas con características de precipitación como las expuestas. Por lo anterior, el momento ideal para poner en marcha un sistema de recolección de agua lluvia sería en época lluviosa, en especial si se realiza separación de las primeras lluvias.

Rango y promedio de la oferta y demanda de agua lluvia

Antes de abordar estos resultados en la Tabla 6 se muestran las convenciones asociadas a los componentes de los modelos matemáticos construidos.

Tabla 6. Convenciones asociadas a los modelos construidos

Nombre	Descripción	Unidad de medida
Ene-Dic	Promedio de precipitación mensual multianual basado en datos observados.	mm
EneAl1 – EneAl9	Valor obtenido por probabilidad de ocurrencia para cada una de las clases de la distribución de frecuencias.	-
EneTasa – DicTasa	Valor de precipitación diaria basado en simulación de Montecarlo.	mm
R	Precipitación. Toma valores diarios, bien sea mediante el promedio mensual multianual o por simulación de Montecarlo, según se especifica en cada modelo.	mm
Conversión	Factor de conversión de milímetros a metros, para los datos de entrada de precipitación.	m ⁻¹
Área	Área de captación de agua lluvia de la vivienda.	m ²
C	Coeficiente de captación del área de captación.	-
T	Volumen de agua potencialmente almacenable (tanque hipotético).	m ³
N	Número de habitantes de la vivienda.	-
D:hab	Demanda de agua diaria per cápita.	m ³

dE:dt	Captación efectiva de agua lluvia diaria.	m ³
dS:dt	Demanda diaria suplida.	m ³
Déficit	Diferencia entre la captación efectiva de agua lluvia diaria (dE:dt) y la demanda diaria suplida (dS:dt).	m ³
FR	Valor de primeras lluvias: 1 litro por m2 de área de captación.	mm
TFR	Volumen de agua en el tanque de captación de primeras lluvias.	m ³
dEFR:dt	Captación efectiva de primeras lluvias.	m ³
dSFR:dt	Desagüe o uso de primeras lluvias para demandas no contempladas.	m ³

Fuente: elaboración propia.

Modelo 1. Demanda vital de agua

Para los resultados del segundo objetivo, se obtuvieron cuatro modelos que evalúan si la disponibilidad de agua lluvia en el área de estudio permite satisfacer el consumo doméstico vital, tomando como base estándares nacionales e internacionales, para una vivienda de cuatro habitantes.

Modelo Determinístico sin separación de primeras lluvias (códigos 1 y 2) para demanda básica OMS y demanda óptima OMS

En la Figura 8 se puede observar el modelo junto con el lenguaje matemático que lo sustenta y en la Figura 9 las salidas del mismo, para las demandas de 20 y 100 L/p/d.

Las ecuaciones matemáticas que rigen los modelos sin separación de las primeras lluvias son las siguientes:

$$T_t = T_{t-1} + \frac{dT}{dt} dt$$

$$T = R \times \text{Área} \times C \times FC \times t - D: \text{hab} \times N \times t$$

$$\frac{dT}{dt} = R \times \text{Área} \times C \times FC - D: \text{hab} \times N$$

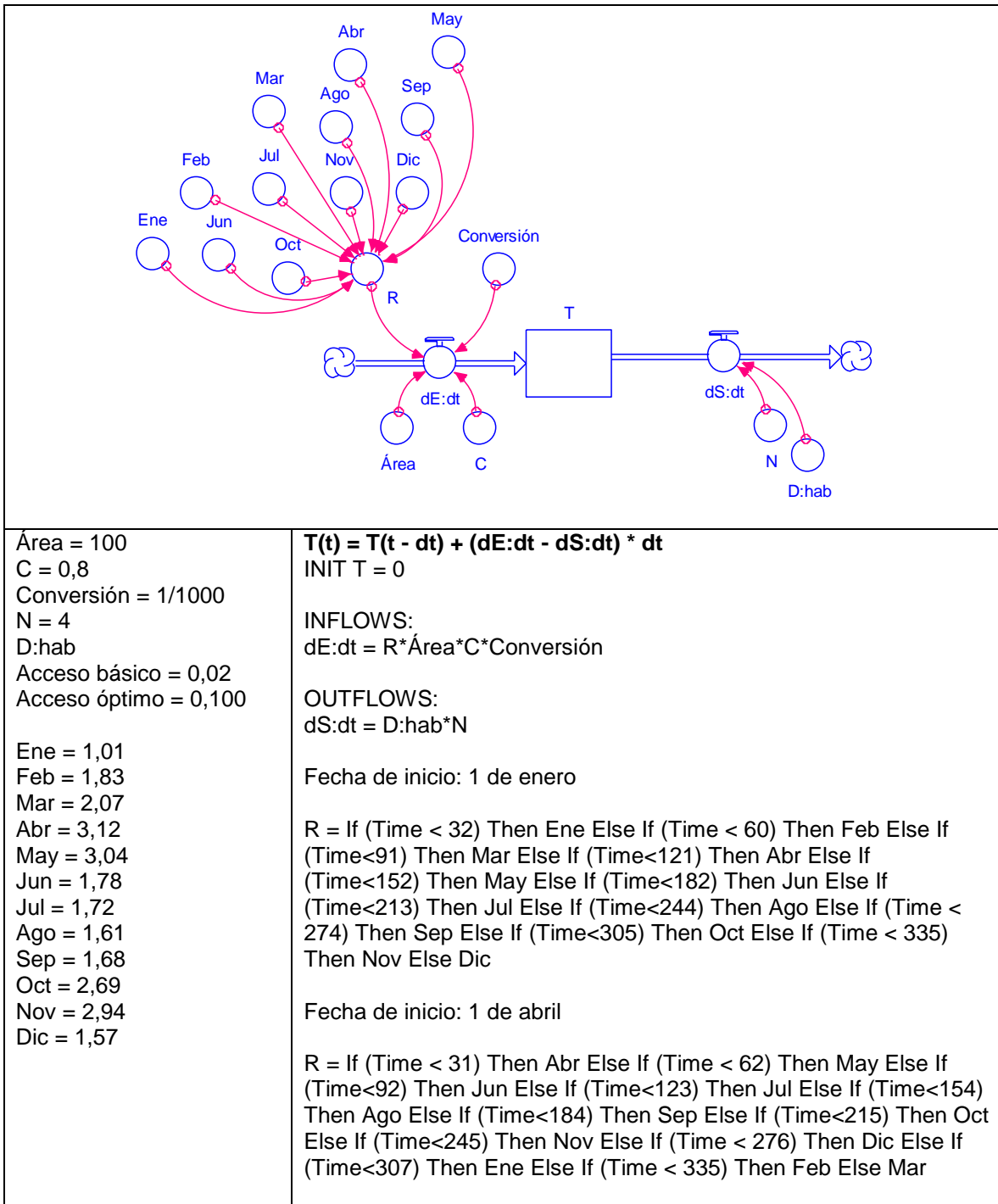


Figura 8. Modelo determinístico y sin separación de primeras lluvias en el *software* Stella.

Fuente: elaboración propia.

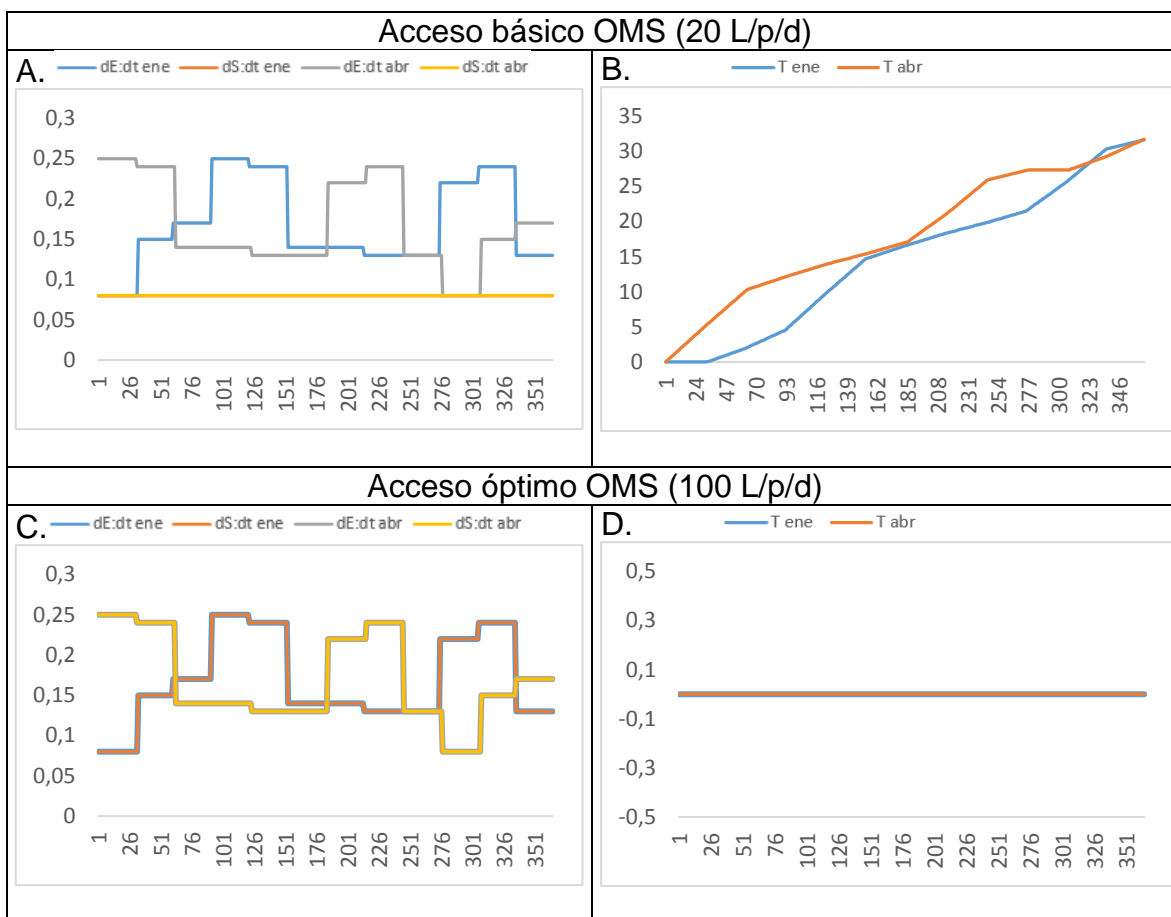


Figura 9. Resultados del modelo determinístico sin separación de primeras lluvias. Oferta (dE:dt) y demanda (dS:dt) de agua lluvia (m^3) para acceso básico (A) y óptimo (C). Volumen de agua de almacenamiento potencial (m^3) para acceso básico (B) y óptimo (D).

Fuente: elaboración propia.

Para este modelo, la captación diaria de agua lluvia (dE:dt), que aplica para las dos demandas establecidas (20 y 100 L/p/d) tuvo un rango de 0,08 a 0,25 m^3 .

En la sección izquierda (A) se muestra el comportamiento de las variables de oferta y demanda diaria a lo largo del año de simulación. Aquí, dS:dt indica la demanda suplida diaria, con un valor constante de 0,08 m^3 para la demanda de acceso básico, sin diferencias al iniciar la simulación en enero o en abril.

Para este caso, se observa que la captación de agua supera durante todos los días del año la demanda requerida por los cuatro habitantes de la vivienda, con excepción de los días del mes de enero donde la captación es igual a la demanda, en el escenario donde se inició la simulación en este mes.

En la sección derecha (B) se observa el almacenamiento potencial de agua lluvia, y se reconoce un desfase de tres meses entre ambas líneas, que corresponde a la

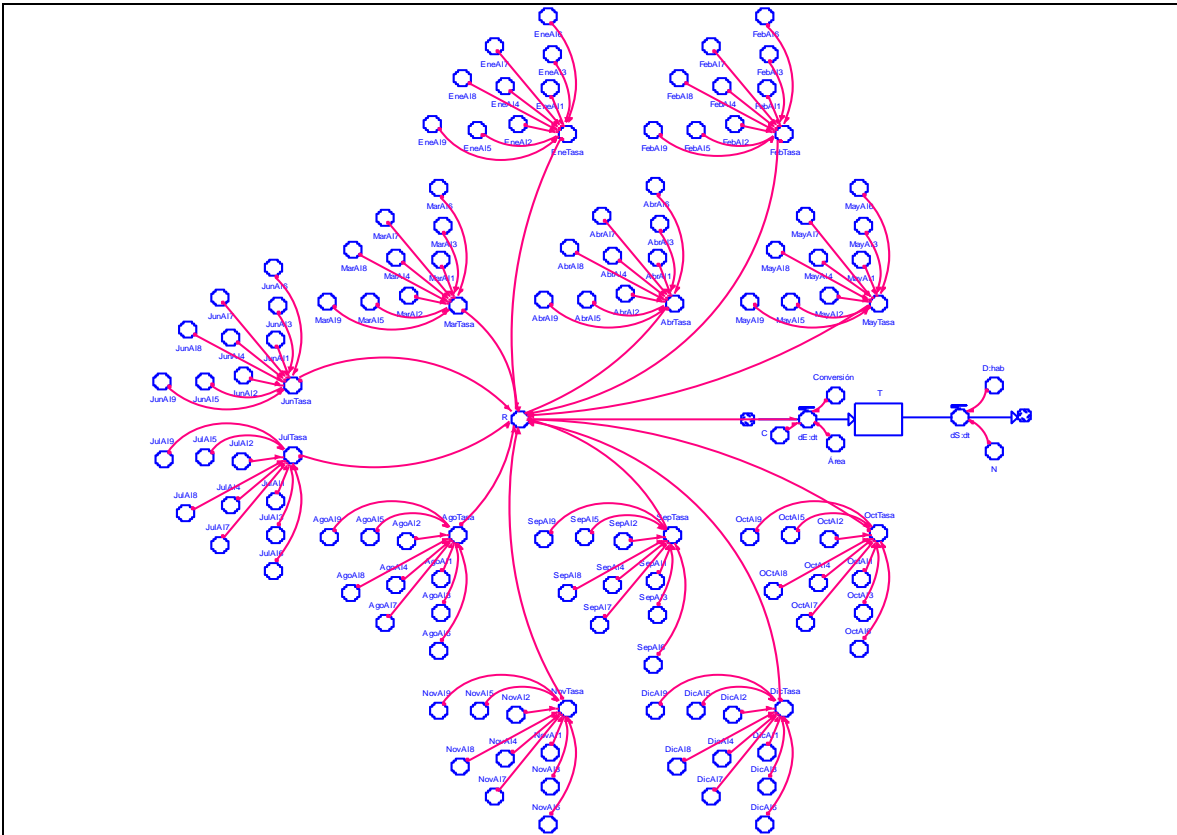
fecha de inicio de simulación. Sin embargo, el comportamiento de la variable es el mismo para ambos escenarios y muestra un crecimiento ininterrumpido del volumen de agua para almacenamiento potencial. Para el primer escenario (inicio de simulación en enero) este crecimiento inicia a partir del mes de febrero, momento en que se empiezan a generar los excedentes de agua diarios, que dan como valor máximo de agua potencialmente almacenable $31,66 \text{ m}^3$. Para la simulación iniciada en abril, el valor máximo de agua almacenada fue de $31,75 \text{ m}^3$.

Para el acceso óptimo, el rango de valores de la demanda suplida diaria fue de $0,08$ a $0,25 \text{ m}^3$ que es igual al rango para la captación de agua lluvia, es decir, que ambas variables tuvieron un comportamiento exactamente igual, sin diferencias al iniciar la simulación en enero o en abril. Esto se debe a que la demanda total diaria ($0,40 \text{ m}^3$) siempre fue mayor al agua captada diaria, pero el valor máximo que puede tomar la demanda suplida ($dS:dt$) es el agua que puede almacenarse en el tanque en cada paso de la simulación, y al no haber excedentes, el agua disponible fue únicamente la que entró cada día por la lluvia. En virtud de estos resultados, no se hizo la simulación para la demanda de 367 L/p/d (consumo básico para Colombia).

Dado que no se suplió nunca la demanda, no fue posible que se generaran excedentes de agua para almacenamiento, por lo que el tanque de acopio para este caso permanecería vacío durante todo el año, tal como se observa en la columna (B) para el acceso óptimo.

Modelo Estocástico sin separación de primeras lluvias (códigos 3 y 4) para demanda básica OMS, demanda óptima OMS y demanda para consumo básico en Colombia

Los resultados obtenidos en el *software* Stella para este modelo se exhiben en la Figura 10. Para este caso solo se presentan los valores usados para la simulación de Montecarlo en enero. En el Anexo 2 se incluyen los valores utilizados de febrero a diciembre. En la Figura 11 se muestran las salidas del modelo para las tres demandas establecidas.



Área = 100
 C = 0,8
 Conversión = 1/1000
 D:hab
 Acceso básico = 0,02
 Acceso óptimo = 0,100
 Consumo básico Colombia = 0,367

$T(t) = T(t - dt) + (dE:dt - dS:dt) * dt$
 INIT T = 0
 INFLOWS:
 dE:dt = R*Área*C*Conversión
 OUTFLOWS:
 dS:dt = D:hab*N

EneA1 = Montecarlo(91,78)
 EneA2 = Montecarlo(3,08)
 EneA3 = Montecarlo(2,79)
 EneA4 = Montecarlo(0,29)
 EneA5 = Montecarlo(0,73)
 EneA6 = Montecarlo(0,29)
 EneA7 = Montecarlo(0,59)
 EneA8 = Montecarlo(0,15)
 EneA9 = Montecarlo(0,0)

EneTasa = If (EneA19 = 1) Then 28,05 Else If (EneA18 = 1) Then 24,75 Else If (EneA17 = 1) Then 21,45 Else If (EneA16 = 1) Then 18,15 Else If (EneA15 = 1) Then 14,85 Else If (EneA14 = 1) Then 11,55 Else If (EneA13 = 1) Then 8,25 Else If (EneA12 = 1) Then 4,95 Else If (EneA11 = 1) Then 1,65 Else 31,35

Fecha de inicio: 1 de enero
 R = If (Time<32) Then EneTasa Else If (Time<60) Then FebTasa Else If (Time<91) Then MarTasa Else If (Time<121) Then AbrTasa Else If (Time<152) Then MayTasa Else If (Time<182) Then JunTasa Else If (Time<213) Then JulTasa Else If (Time<244) Then AgoTasa Else If (Time<274) Then SepTasa Else If (Time<305) Then OctTasa Else If (Time<335) Then NovTasa Else DicTasa

Fecha de inicio: 1 de abril
 R = If (Time<31) Then AbrTasa Else If (Time<62) Then MayTasa Else If (Time<92) Then JunTasa Else If (Time<123) Then JulTasa Else If (Time<154) Then AgoTasa Else If (Time<184) Then SepTasa Else If (Time<215) Then OctTasa Else If (Time<245) Then NovTasa Else If (Time < 276) Then DicTasa Else If (Time<307) Then EneTasa Else If (Time<335) Then FebTasa Else MarTasa

Figura 10. Modelo estocástico y sin separación de primeras lluvias en el software Stella. Fuente: elaboración propia.

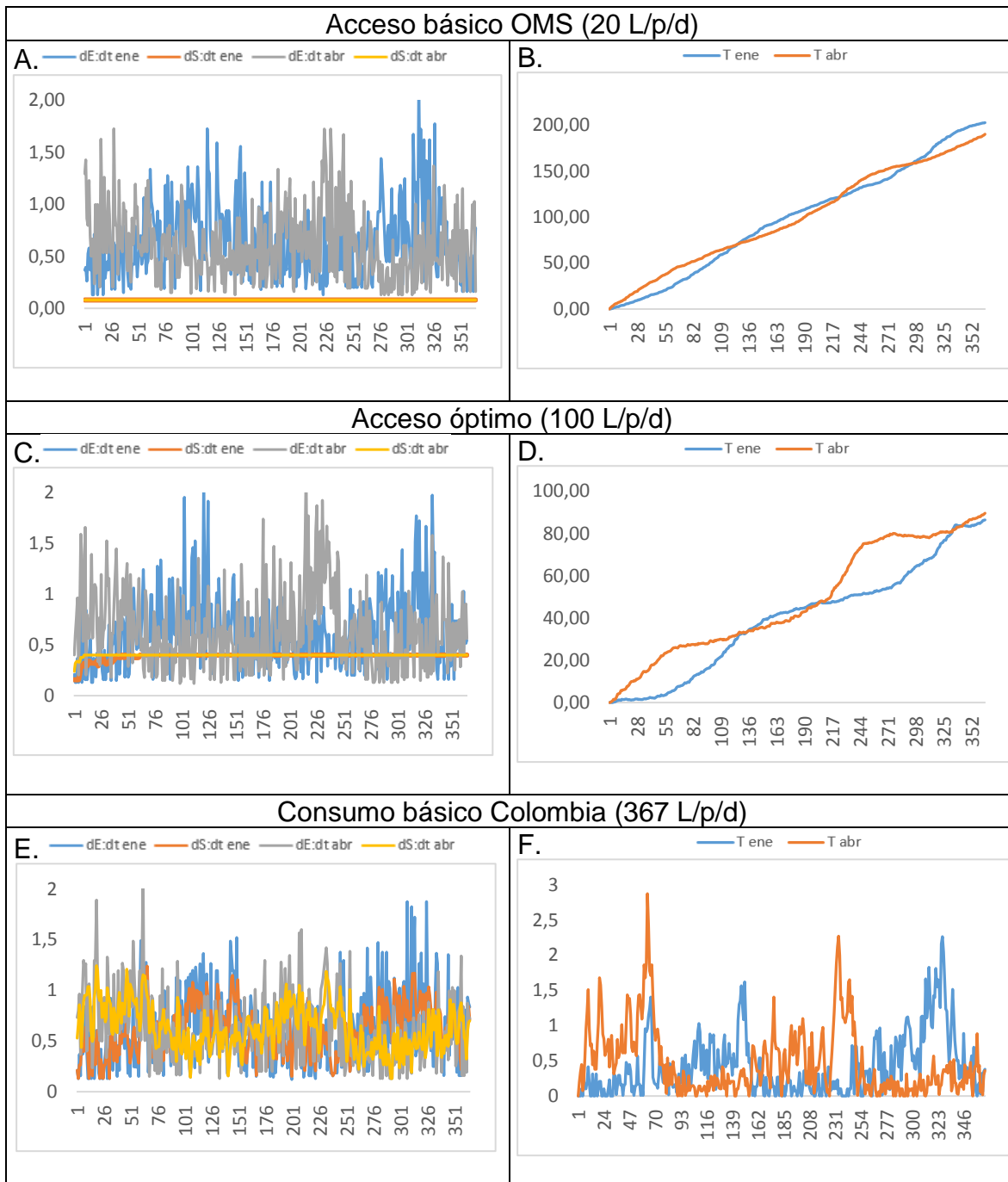


Figura 11. Resultados del modelo estocástico y sin separación de primeras lluvias. Oferta ($dE:dt$) y demanda ($dS:dt$) de agua lluvia (m^3) para acceso básico (A), óptimo (C) y consumo básico Colombia (E) . Volumen de agua de almacenamiento potencial (m^3) para acceso básico (B), óptimo (D) y consumo básico Colombia (F). Fuente: elaboración propia.

En este segundo modelo los valores de captación de agua lluvia son diferentes, debido a que los datos de entrada de precipitación se obtuvieron de forma aleatoria por simulación de Montecarlo. Por tanto, se realizaron 10 simulaciones para cada modelo y el rango promedio para $dE:dt$ fue de 0,13 a 2,03 m^3 .

Ahora bien, para el acceso básico (20 L/p/d) se obtuvo un valor fijo para la demanda suplida diaria (dS:dt) de 0,08 m³ para ambas fechas de inicio de la simulación. El valor de demanda suplida diaria fue igual al valor de la demanda total, dado que a lo largo de todo el periodo de simulación se presentaron excedentes de agua lluvia y la demanda se suplió sin problema. Esto además generó una acumulación potencial ininterrumpida de agua, que dio como valor máximo promedio⁶ de agua acumulada 203 m³ para la simulación iniciada en enero y 190 m³ para la iniciada en abril.

A pesar de lo anterior, cabe resaltar que, al ser un modelo estocástico, se pueden presentar días en los que el agua captada sea menor a la demanda total; sin embargo, ya que el volumen potencial de almacenamiento de agua nunca llega a cero, sería posible suplir este déficit con el agua colectada en días anteriores.

Para el acceso óptimo (100 L/p/d), los valores para la demanda suplida diaria varían entre ambas fechas de inicio de la simulación, con un promedio que abarca un rango de 0,16 a 0,4 m³ y 0,24 a 0,4 m³ para enero y abril, en su orden. El límite superior de este rango corresponde a la demanda total diaria y se da para los días en los que hubo excedentes de agua en el sistema o suficiente agua acumulada en el tanque de almacenamiento hipotético.

Por otro lado, para el total de las iteraciones, los valores más bajos observados fueron de 0.13 y 0.17 m³ respectivamente; estos valores corresponden al primer mes de simulación de cada escenario, enero y abril. Estos valores coinciden con los días en que no había excedentes de días anteriores para suplir la demanda.

Con respecto a la simulación iniciada en enero, cabe anotar que, aunque en agosto también se presentaron valores de 0,13 m³ para captación diaria de agua lluvia, el valor de demanda suplida diaria fue de 0,4 m³ para todos los días del mes, porque para esta época del año había suficiente agua acumulada para suplir el déficit diario. En el Anexo 3 se pueden consultar los valores de simulación para captación de agua lluvia y demanda suplida diaria durante enero y agosto, para el escenario con inicio de simulación en enero.

Para esta demanda, la cantidad de agua potencialmente acumulable fue mucho menor que para la demanda anterior, con un valor máximo promedio de 86,4 y 89,6 m³ para las simulaciones iniciadas en enero y abril, respectivamente, ya que en este caso sí se requirió de tales reservas para suplir la demanda durante algunos días del año.

Finalmente, el rango de valores de demanda suplida diaria obtenido para el consumo básico para Colombia, 367 L/p/d, fue de 0,12 a 1,47 m³ para el total de las iteraciones, pero de 0,13 a 1,24 m³ para el promedio final, sin diferencias según la fecha de inicio de simulación. Del rango de las iteraciones realizadas se evidencia que pueden presentarse días en los que la precipitación sea mayor a la demanda establecida, pero el resultado promedio de las 10 iteraciones no permite reconocer

⁶ Al no haber diferencias entre las dos fechas de inicio de simulación, este valor aplica para ambos casos.

tal situación. Este promedio respalda los resultados de la confiabilidad, que fueron del 0 % y señalan que esta demanda es muy elevada para poder suplirse únicamente por medio de agua lluvia.

Ahora bien, al observar los valores de las iteraciones individuales y no del promedio, se reconoce una situación cercana a la ocurrida con la demanda anterior. Por un lado, el límite superior también coincide con la demanda total diaria que en este caso es de 1,47 m³ y, por otro lado, el límite inferior coincide con la menor precipitación registrada para ambas fechas de inicio de la simulación. Sin embargo, estos valores no se presentan durante el primer mes de la simulación, sino que para ambos casos se da únicamente en julio, que corresponde con la segunda época de sequía del año, cuando no había reservas de agua.

El valor máximo promedio alcanzado para las reservas potenciales de agua al final de la simulación fue de 0,38 y 0,36 m³.

Modelo Determinístico con separación de primeras lluvias (códigos 5 y 6) para demanda básica OMS y demanda óptima OMS

La representación gráfica de este modelo se presenta en la Figura 12. Para este caso se incluye un componente de separación de primeras lluvias (FR) que se descartan al momento de suplir la demanda establecida. Por su parte, la Figura 13 muestra las salidas de este modelo.

Las ecuaciones matemáticas que rigen los modelos con separación de las primeras lluvias son las siguientes:

$$T_t = T_{t-1} + \frac{dT}{dt} dt$$

$$T = (R - 1) \times \text{Área} \times C \times \text{Conversión} \times t - D; \text{ hab } x N \times t; \text{ si } R > 1, \text{ sino} = 0$$

$$\frac{dT}{dt} = (R - 1) \times \text{Área} \times C \times \text{Conversión} - D; \text{ hab } x N; \text{ si } R > 1, \text{ sino} = 0$$

$$TFR_t = TFR_{t-1} + \frac{dTFR}{dt} dt$$

$$TFR = 1 \times \text{Área} \times C \times \text{Conversión} \times t - TFR \times t; \text{ si } R > 1, \text{ sino} = 0; \text{ se desocupa diariamente}$$

$$\frac{dTFR}{dt} = 1 \times \text{Área} \times C \times \text{Conversión} - TFR; \text{ si } R > 1, \text{ sino} = 0$$

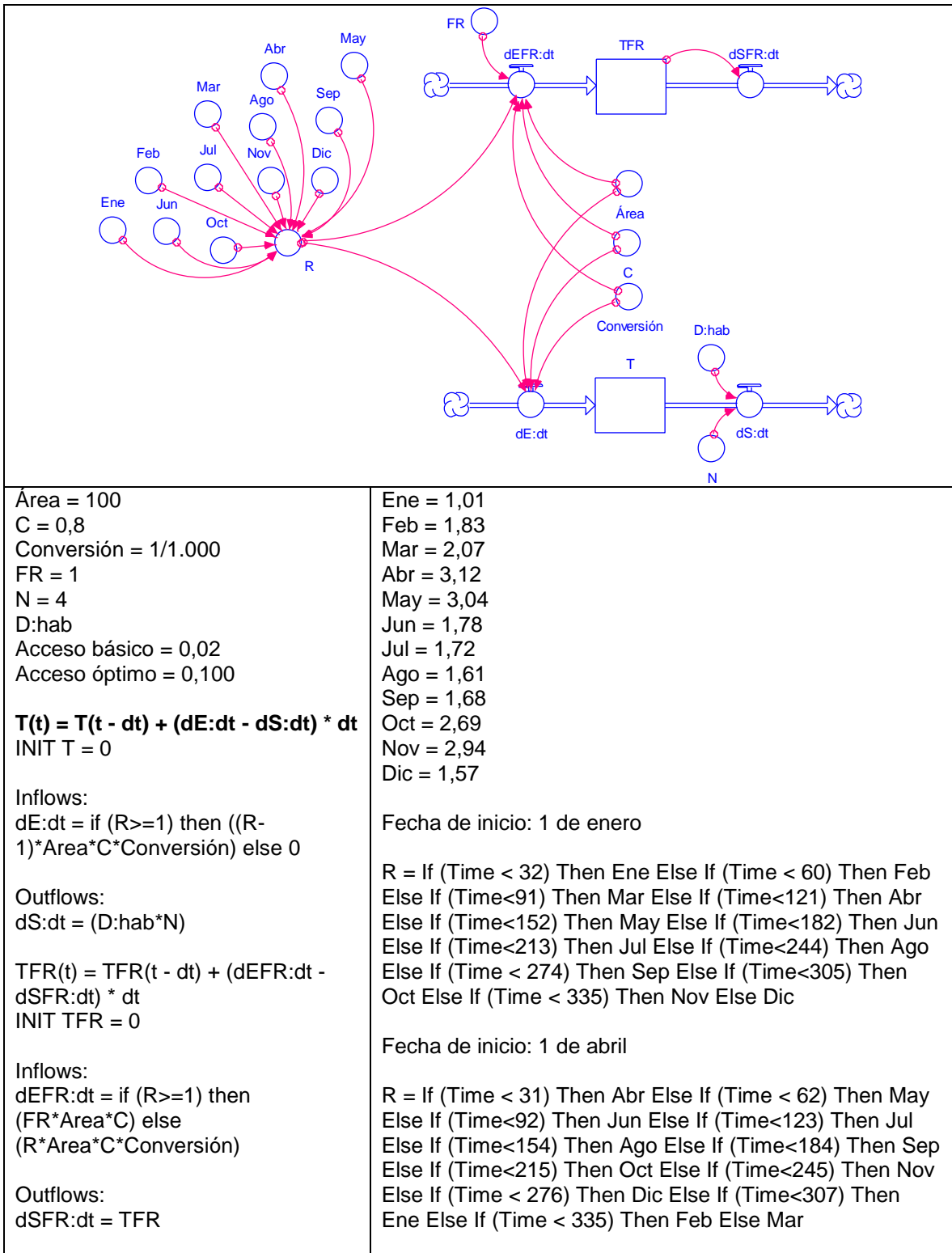


Figura 12. Modelo determinístico y con separación de primeras lluvias en el software Stella.

Fuente: elaboración propia.

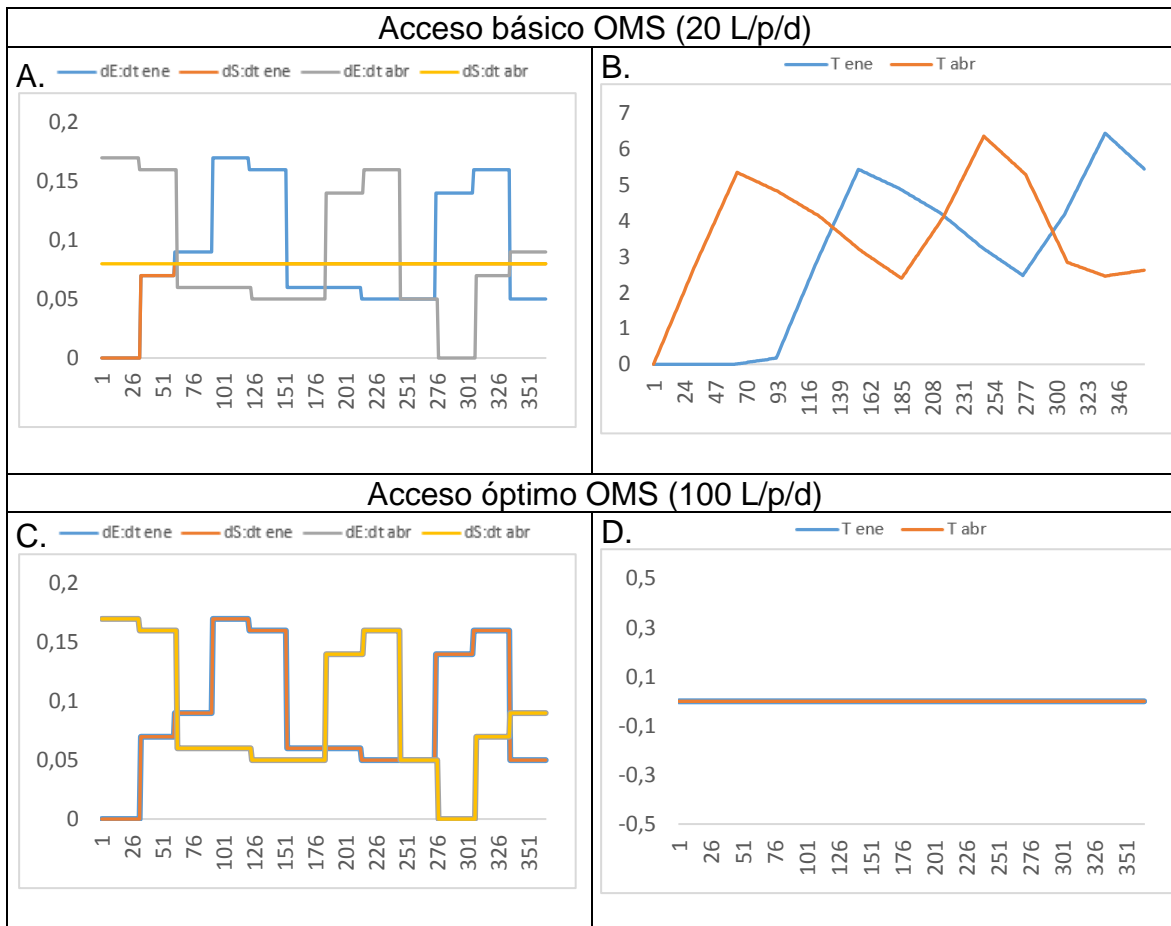


Figura 13. Resultados del modelo determinístico y con separación de primeras lluvias. Oferta (dE:dt) y demanda (dS:dt) de agua lluvia (m^3) para acceso básico (A) y óptimo (C). Volumen de agua de almacenamiento potencial (m^3) para acceso básico (B) y óptimo (D).

Fuente: elaboración propia.

En este modelo el rango de agua colectada diaria es menor al del modelo determinístico sin separación de primeras lluvias, a pesar de usar los mismos datos de entrada de precipitación, debido a que la separación de esta fracción de lluvia disminuye de forma importante la cantidad de agua que logra colectar el sistema. Así, para este caso el rango fue de 0 a $0,17 m^3$.

En lo referente al escenario de acceso básico, la demanda suplida diaria no es constante para la simulación iniciada en enero, con un rango de 0 a $0,08 m^3$ porque la máxima cantidad de agua extraída diariamente del tanque de almacenamiento no puede ser mayor al volumen de agua que este contiene.

Por esta razón, para los meses de enero y febrero el sistema no logra suplir la demanda hídrica básica de una vivienda de cuatro personas durante el primer año. Adicionalmente, durante junio a septiembre y en diciembre, se presenta déficit de agua (mayor demanda que oferta), pero este, al igual que en el anterior modelo (estocástico sin separación de primeras lluvias), se suple con el agua que se

almacena en el tanque durante el primer periodo lluvioso del año (marzo a abril), lo que explica los dos momentos de decrecimiento en el volumen de agua en el tanque (Figura 13B).

Por otro lado, con esta misma demanda se presentan resultados más favorables cuando inicia la simulación en abril, pues en este caso se logra suplir la demanda total durante todo el año. Esto se debe a que, al iniciar el funcionamiento del sistema durante una época lluviosa, con un promedio de precipitación diaria superior a la demanda establecida, se logran generar suficientes excedentes para suplir el déficit hídrico de la época seca. Por esta razón, la demanda suplida diaria ($dS:dt$) tuvo un valor constante de $0,08 \text{ m}^3$.

A pesar de las diferencias mencionadas anteriormente, el comportamiento de la variable de almacenamiento potencial de agua fue igual para ambas simulaciones, una vez se lograron generar excedentes de agua en el tanque. Así, el valor máximo de agua potencialmente almacenable fue de $6,45$ y $6,37 \text{ m}^3$, respectivamente.

En el caso del acceso óptimo OMS, la demanda suplida diaria tuvo un rango de 0 a $0,17 \text{ m}^3$ para ambas fechas de inicio de simulación, con una demanda total de $0,4 \text{ m}^3$ que no logró suplirse en ningún momento del año. Debido a este déficit constante no se lograron generar excedentes y el tanque de almacenamiento potencial permaneció vacío durante toda la simulación.

Como no se suplió la demanda para acceso óptimo, no se efectuó la simulación para acceso básico Colombia (367 L/p/d) en ninguna de las dos fechas de inicio de simulación.

Modelo Estocástico con separación de primeras lluvias (códigos 7 y 8) para demanda básica OMS, demanda óptima OMS y demanda para consumo básico en Colombia

Los resultados obtenidos en el *software* Stella para este modelo se muestran en la Figura 14. Para este caso, solo se presentan los valores usados para la simulación de Monte Carlo para el mes de enero. Los valores utilizados de febrero a diciembre se incluyen en el Anexo 2. En la Figura 15 se muestran las salidas del modelo para las tres demandas establecidas.

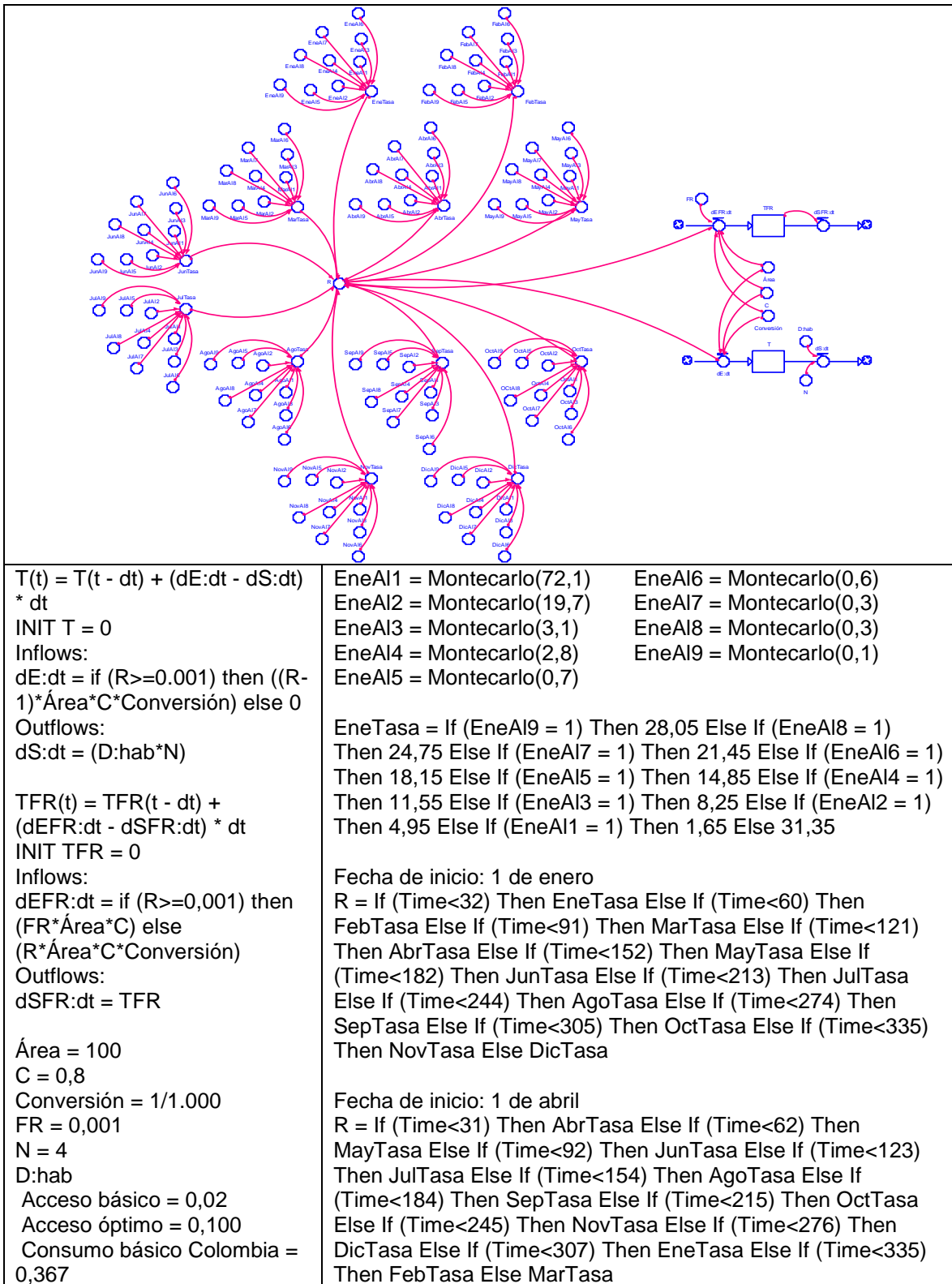


Figura 14. Modelo estocástico y sin separación de primeras lluvias en el software Stella.

Fuente: elaboración propia.

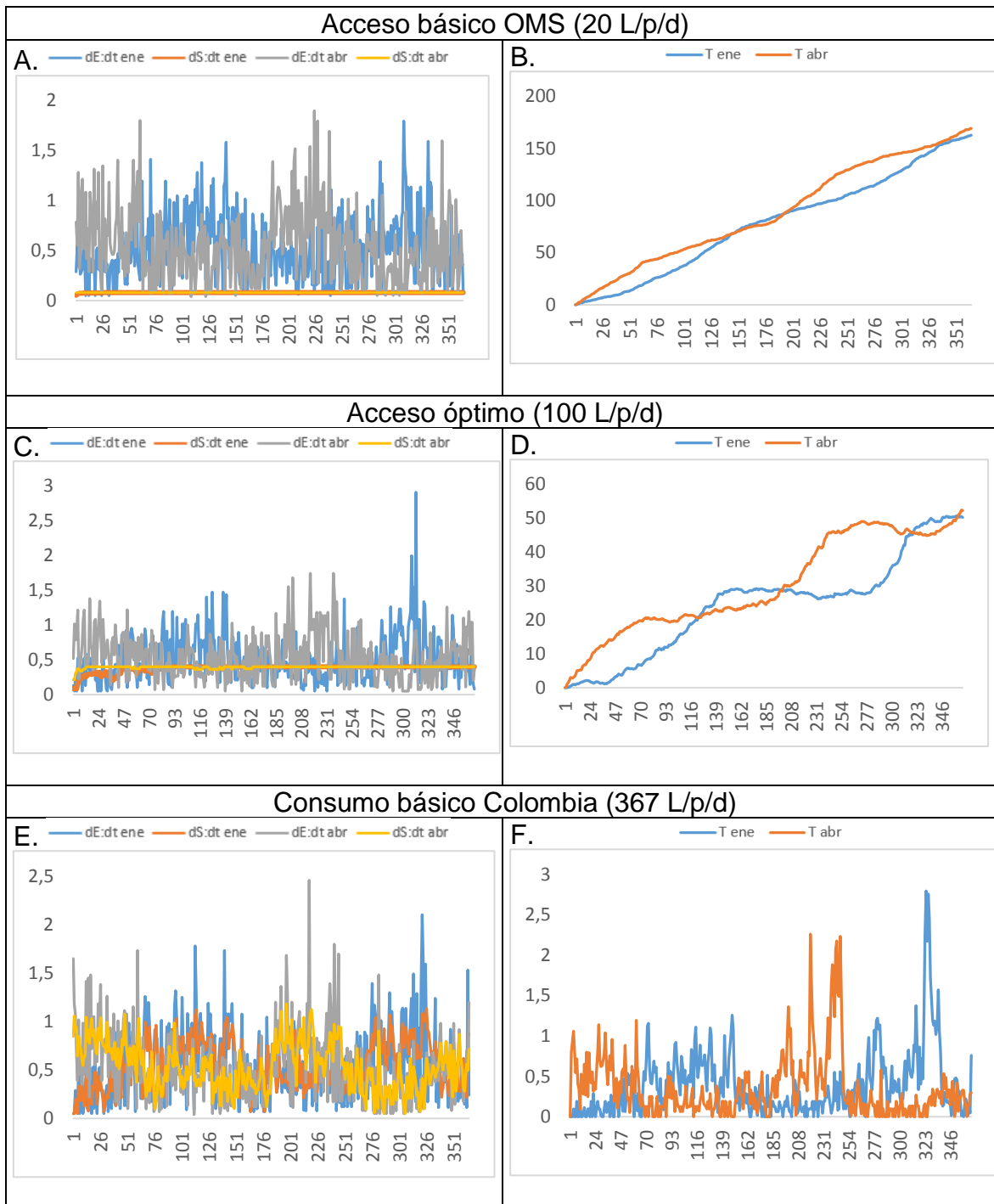


Figura 15. Resultados del modelo estocástico y con separación de primeras lluvias. Oferta (dE:dt) y demanda (dS:dt) de agua lluvia (m^3) para acceso básico (A), óptimo (C) y consumo básico Colombia (E) . Volumen de agua de almacenamiento potencial (m^3) para acceso básico (B), óptimo (D) y consumo básico Colombia (F). Fuente: elaboración propia.

Para este modelo los resultados de captación de agua lluvia diaria arrojaron un rango de 0,05 a 2,15 m^3 según el promedio de las 10 iteraciones realizadas.

Aquí, al igual que para el otro modelo estocástico, es importante mencionar que, si bien los resultados expuestos a continuación muestran un buen desempeño del sistema, pueden presentarse días en los que el agua captada no logre suplir la demanda y que, en estos casos, el volumen de agua almacenada tendrá mayor importancia para que no se presente déficit.

Con una demanda total de $0,08 \text{ m}^3$ (20 L/p/d), se obtuvo un rango promedio para la demanda suplida diaria de $0,05$ a $0,08 \text{ m}^3$ para la simulación iniciada en enero, y un valor constante de $0,08 \text{ m}^3$ para la que se inició en abril. Así, se ve que al iniciar el sistema de recolección de agua lluvia en una época lluviosa, se garantiza que se supla la demanda a lo largo de todo el año. Mientras que, si se inicia en época seca, se debe esperar a que se generen excedentes de agua en el tanque de acopio para que se pueda suplir la demanda durante los días en que se llegue a presentar déficit hídrico. Cabe resaltar que, para este último caso, el déficit se presentó únicamente durante los primeros días de enero y, sin embargo, estas diferencias se vieron reflejadas en la cantidad de agua potencialmente almacenable, ya que para esta simulación el promedio máximo alcanzado fue de $162,8 \text{ m}^3$ mientras que para la que se inició en abril fue de $169,2 \text{ m}^3$.

Por su parte, la segunda demanda, 100 L/p/d, generó días de déficit tanto en la simulación iniciada en enero como en la de abril, pero con diferencias notables entre el valor mínimo promedio de $dS:dt$ de cada una, con valores de $0,09$ y $0,21 \text{ m}^3$ respectivamente. A pesar de esto, en ambos casos se alcanzó a suplir la demanda total de $0,40 \text{ m}^3$ para la mayor parte del año. Para esta demanda, la cantidad de agua potencialmente acumulable tuvo un valor máximo promedio de $50,73$ y $52,49 \text{ m}^3$.

Finalmente, el rango de valores de demanda suplida diaria obtenido para el consumo básico para Colombia, 367 L/p/d, fue de $0,05 \text{ m}^3$ como límite inferior para ambas simulaciones y, como límites superiores, $1,13 \text{ m}^3$ para la iniciada en enero y $1,18 \text{ m}^3$ para la de abril. Estos valores indican que hubo déficit hídrico durante todo el año y respaldan los resultados de confiabilidad que fueron del 0 % para ambos casos.

Los resultados de estos 24 escenarios presentados anteriormente no son comparables directamente con otras investigaciones sobre el tema pues no hay un diseño estándar que responda a las particularidades climáticas y socioeconómicas de todos los lugares por igual. Así, por ejemplo, la determinación de la capacidad del tanque, que es uno de los factores clave de estos sistemas se debe establecer en función de parámetros locales, como el tipo y la cantidad de la demanda y especialmente la precipitación del lugar (Hajani & Rahman, 2014).

A pesar de esto, se presentan múltiples factores en común entre los estudios sobre sistemas de recolección de agua lluvia, en general. Como primera medida, el área de captación y el tamaño del tanque son elementos clave en el diseño del sistema en diversas investigaciones. En este sentido Ward et al. (2010) establecen el área de captación como un factor limitante y cuyo ajuste es muy importante para suplir mejor la demanda. Caso similar a lo que sucede con los resultados obtenidos aquí,

pues incluso manejando un tanque hipotético sin límite de capacidad, el agua colectada no fue suficiente para suplir completamente la demanda en todos los casos.

Sin embargo, a pesar de ser un limitante, no se evaluó un área más amplia ya que el área promedio de las casas en Cundinamarca está alrededor de los 118 m³ (DANE, 2017), de los cuales es muy probable que no todo sea en techos o áreas utilizables para captar agua (Anexo 4).

Otro aspecto que mencionan diversos autores (OPS, 2009; Torres et al., 2013; Biswas & Mandal, 2014) es la separación de las primeras lluvias, por temas de calidad del agua, que ya se mencionaron previamente. Aquí se evaluó la influencia de la separación de estas primeras lluvias sobre la cantidad de agua que un sistema puede llegar a captar y se evidenció que esto sí reduce en cierta medida la confiabilidad del sistema. A pesar de esto, los modelos, que se diferenciaron por incluir o no este factor, presentaron unos resultados muy similares. Por tanto, el rango de entrada de agua, para los modelos determinísticos, fue de 0,08 a 0,25 m³, al no separar las primeras lluvias, y de 0 a 0,17 m³, cuando estas sí se descartaron. Así mismo, para los modelos estocásticos el rango estuvo entre 0,13 y 2,03 m³ y 0,05 y 2,15 m³. Este último descartó dicha fracción.

Por otro lado, en lo que respecta a costos del sistema, la inclusión de este componente implica la adición de elementos, principalmente un segundo tanque donde se dispongan estas aguas. No obstante, y ya que no se ven cambios mayores en la cantidad de agua lluvia colectada, es preferible descartar las primeras lluvias para proporcionar un agua de mejor calidad y restringir la implementación de un sistema sin este componente. Sobre este aspecto cabe adicionar que Biswas & Mandal (2014) señalan que “el agua lluvia es extremadamente limpia y segura, [...] si se colecta en un área donde el tráfico intenso y las urbanizaciones se encuentran lejos” (pág. 5), por lo que en algunas zonas rurales se puede prescindir de tal separación. De una u otra forma, el agua que se colecte debe pasar por filtros de sólidos finos y gruesos y podría incorporar un tratamiento con cloro, factores que permitirían el aprovechamiento para consumo de la totalidad del agua que capte el sistema.

Cabe notar que los modelos construidos en esta investigación operan sobre una resolución diaria y sobre este particular Ndiritu et al. (2011), al comparar datos de resolución mensual y diaria, afirman que la resolución temporal de los datos de precipitación tiene una alta influencia sobre la precisión de los modelos de RWHS siendo así que, a mayor resolución, se llega a estimaciones más acertadas sobre el diseño del sistema, específicamente en cuanto al volumen del tanque de almacenamiento. Adicionalmente, Campisano & Modica (2014), mencionan que una resolución diaria permite resultados muy acertados, pero que incluso una resolución mayor a la diaria puede ser más recomendable, más que todo para la estimación de tanques pequeños o con demandas hídricas altas.

Finalmente, se puede decir que, para este caso, las dos aproximaciones estocásticas reflejan mejor el proceso modelado, por cuanto posibilitan una amplia

variabilidad de resultados con base en entradas aleatorias fundamentadas en la probabilidad de ocurrencia de la precipitación. Así, aunque en este caso todas las simulaciones manejaron una resolución diaria, los modelos determinísticos lo hicieron con un único valor a lo largo de cada mes, dejando de lado detalles que no se ven reflejados en el promedio. En este sentido, se pueden tomar los modelos determinísticos como un punto de referencia, pero se tomarán los resultados de los modelos estocásticos para establecer las dimensiones del tanque, lo que da como resultado dos diseños para sistemas de recolección de agua lluvia, uno sin separación de las primeras lluvias y otro con un tanque adicional para esta porción del agua captada.

Análisis de costos de los sistemas de recolección de agua lluvia modelados

Para el diseño del sistema de recolección de agua lluvia se tomó como base el esquema presentado anteriormente en la Figura 1, al cual se le han adicionado medidas para el techo como se puede observar en la Figura 16. Así, para el techo se establecieron unas dimensiones de 10 m de largo y 5 m de caída por lado y lado (dos aguas, área de captación), dando un área de captura de 100 m², y la altura de la casa se fijó en 3 m, medida desde el piso hasta la parte más baja del techo (importante para el transporte).

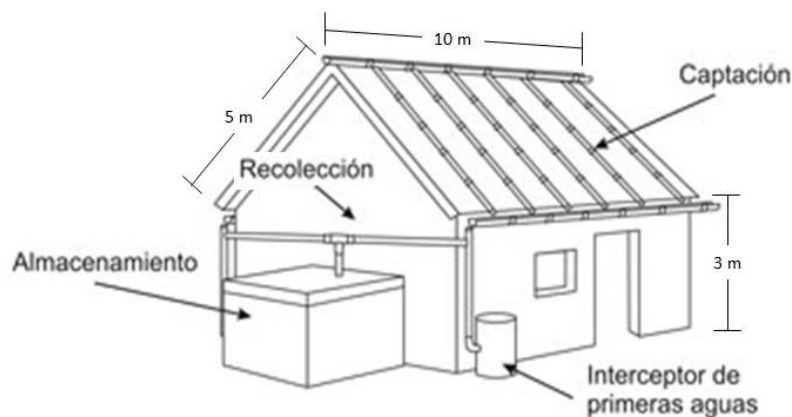


Figura 16. Dimensiones de la vivienda y diseño base para el sistema doméstico de recolección de agua lluvia.

Fuente: BVSDE n. d.

A partir de este diseño y para realizar el análisis de costos, se hicieron varias cotizaciones sobre los elementos requeridos para su construcción, en almacenes de cadena y otros almacenes que manejan estos materiales, con el fin de comparar y encontrar el menor costo.

Ahora bien, ya que se busca que el sistema se adapte a las condiciones existentes en las viviendas e implique el menor costo económico posible, a continuación, se presenta una cotización base, para los dos diseños establecidos, en la que no se incluyen los componentes de captación y distribución, pues estos se pueden considerar como opcionales según las condiciones particulares en las que se quiera

implementar el sistema. Sin embargo, estos costos se muestran como adicionales, en la cotización total estimada de cada diseño. Así, para el caso de la captación, este consiste básicamente en el techo de la casa, que solo debería implementarse en caso de que los materiales de los que está hecho sean inadecuados para la captación de agua lluvia.

Por otro lado, la distribución del agua se puede realizar de forma manual, por gravedad o mecánica. El primer método no requiere mayores acoples, más allá de una llave de bola (grifo) en el punto de salida del tanque, para la toma de agua; el segundo, que requeriría una estructura de soporte para el tanque de almacenamiento y un sistema de tuberías dentro de la vivienda, no se consideró ya que el diseño está pensado para casas de un piso, que deben tener una altura mínima de 2,20 m (Ministerio de Vivienda, n. d.), por lo cual no es viable ubicar la entrada del tanque a menor altura que el componente de recolección y a mayor altura que la ducha (punto de salida de agua más alto de la vivienda). Finalmente, para la distribución por gravedad, se incluyen los costos del sistema de bombeo, más no del sistema de tubería, ya que, al basar el diseño en una casa hipotética, no se cuenta con planos para determinar la ubicación de los puntos de salida de agua, e igualmente, este sistema no implica mayores costos respecto al costo total, como sí lo hace el sistema de bombeo.

De este modo, para el primer diseño, sin separación de primeras lluvias, y para la demanda básica OMS (tanque de 250 L) y las demandas óptima OMS y consumo básico para Colombia (tanque de 1000 L), se presentan los costos en la Tabla 7.

Para la situación con demanda básica, y ya que con la precipitación diaria se logra suplir completamente la demanda, se estableció un tanque con capacidad de 250 L con el cual se lograría dar abasto a la cantidad de agua que entra diariamente en el sistema a lo largo de todo el año y, adicionalmente, se contaría con una reserva constante de agua del mismo volumen, que podría suplir demandas secundarias. El costo base para la construcción de este sistema sería de \$1.161.040.

Para consumo óptimo se podría manejar un tanque con capacidad mínima de 400 L, que eventualmente lograría mantenerse lleno y suplir la demanda en las épocas de déficit diario. Esto ya que se logran generar excedentes casi desde el comienzo, pues para la simulación iniciada en enero, la demanda suplida diaria se empieza a estabilizar a principios de marzo y, para la que inició en abril, esta se supe desde mediados del primer mes.

Sin embargo, para que la demanda total logre suplirse lo antes posible, se debe almacenar toda el agua lluvia que el sistema puede captar durante los primeros meses, cuando aún se presenta déficit, para lo cual se requiere un tanque de 1.000 litros, que es el valor máximo que alcanza el agua potencialmente almacenable durante este periodo crítico, para la simulación iniciada en enero. Con este tanque, tras superar el periodo de déficit se tendrían excedentes aproximados constantes de 600 L y el costo del sistema básico sería de \$1.224.122.

En el caso de la demanda más alta (367 L/p/d) se manejaría el mismo diseño que para la demanda anterior, ya que el agua potencialmente acumulable alcanzó valores superiores a los 1.000 litros solo en el 10,7 y el 13,2 % de los días del año, para las simulaciones de enero y abril, por lo cual, si se utiliza un tanque de mayor capacidad, este se estaría subutilizando la mayor parte del tiempo, y también se estarían desperdiciando recursos y espacio (Hajani & Rahman, 2014).

Tabla 7. Costos para el diseño del sistema de recolección de agua lluvia, sin separación de primeras lluvias para las demandas de 20, 100 y 367 L/p/d.

Componente	Elementos	Cant.	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)	Sistema básico	Componentes adicionales		
Captación	Teja PVC #8	46	32.290	1.485.340		✓		✓
Recolección	Canaleta amazona x 3m	10	72.300	723.000	✓	✓	✓	✓
	Tapa externa	1	6.950	6.950				
	Tapa interna	1	4.400	4.400				
	Soporte canal	20	2.550	51.000				
	Unión canal	8	14.300	114.400				
	Unión esquina canal	2	24.300	48.600				
	Unión canal-bajante	1	19.300	19.300				
	Adaptador bajante	1	5.400	5.400				
	Tubo ventilación PVC (bajante)	2	23.900	47.800				
	Codo PVC	2	3.400	6.800				
Distribución manual	Filtro purificador de agua	1	19.900	19.900	✓	✓		
	Válvula de bola 1/2	1	9.500	9.500				
Distribución mecánica	Bomba periférica 1/2 hp	1	350.000	350.000			✓	✓
	Filtro purificador de agua	1	19.900	19.900				
	Válvula de bola 1/2	1	9.500	95.00				
Almacenamiento	Tanque 250 L	1	103.990	103.990	1.161.040	2.646.380	1.511.040	2.996.380
	Tanque 1000 L	1	167.072	167.072	1.224.122	2.709.462	1.574.122	3.059.462

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, para el segundo diseño en la Tabla 8 se observan los costos de construcción del sistema, a los que se adiciona el componente de separación de primeras lluvias.

En el segundo diseño se debe emplear un segundo tanque, de menor capacidad, en el que se almacenen y descarten diariamente estas primeras lluvias. Este debe tener una capacidad estándar para todas las demandas de 100 litros, pero ya que no hay tanques de este tamaño, se debe usar un tanque de 150 litros y, mediante

una válvula de flotador, el tanque recibirá agua hasta los 100 litros y, posteriormente, el resto del agua que se colecte será canalizada al tanque de almacenamiento.

Tabla 8. Costos para el diseño del sistema de recolección de agua lluvia, con separación de primeras lluvias para las demandas de 20, 100 y 367 L/p/d.

Componente	Elementos	Cant.	Precio unitario	Precio total	Sistema básico	Componentes adicionales		
Captación	Teja PVC #8	46	32.290	1.485.340		✓		✓
Recolección	Canaleta amazona x 3m	10	72.300	723.000	✓	✓	✓	✓
	Tapa externa	1	6.950	6.950				
	Tapa interna	1	4.400	4.400				
	Soporte canal	20	2.550	51.000				
	Unión canal	8	14.300	114.400				
	Unión esquina canal	2	24.300	48.600				
	Unión canal-bajante	1	19.300	19.300				
	Adaptador bajante	1	5.400	5.400				
	Tubo ventilación PVC (bajante)	2	23.900	47.800				
	Tee sanitaria 3 PVC	1	3.700	3.700				
	Codo PVC	2	3.400	6.800				
Intercepción primeras lluvias	Tanque 150 L	1	82.290	82.290	✓	✓	✓	✓
	Válvula de flotador 1/2	1	19.900	19.900				
Almacenamiento	Tanque 1000 L	1	167.072	167.072				
Distribución manual	Filtro purificador de agua	1	19.900	19.900	✓	✓		
	Válvula de bola 1/2	1	9.500	9.500				
Distribución mecánica	Bomba periférica 1/2 hp	1	350.000	350.000			✓	✓
	Filtro purificador de agua	1	19.900	19.900				
	Válvula de bola 1/2	1	9.500	9.500				
					1.326.312	2.811.652	1.676.312	3.161.652

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a los resultados para acceso básico OMS, se observa que, al exceder la oferta a la demanda la mayor parte del tiempo, se puede recurrir al tanque más pequeño, con el que se podría contar con una reserva constante de (0,15 o 0,25 m³, el tamaño del tanque) con excepción del primer mes, para la simulación iniciada en enero. Hay que señalar que este tamaño de tanque sería un limitante para lograr suplir la demanda total lo antes posible ya que, en este caso, sí se usan las reservas de agua desde el inicio. Por ello, aplicando un tanque de 1.000 litros, se supera el valor máximo diario de agua que entra al sistema en este mes de déficit, se cumple con la demanda total en el tiempo estimado y se puede llegar a contar con una reserva constante de 920 litros.

En el caso de acceso óptimo OMS, también se supe la demanda total la mayor parte del año, con excepción de los tres primeros meses y la mitad del primer mes, para el inicio de simulación en sequía y lluvias, respectivamente. A partir de esto,

se establece que un tanque de 1.000 litros sería el más adecuado para el caso pues supera el volumen máximo de agua que ingresa en el primer mes, para la primera simulación y no presenta mayores afectaciones a la demanda, para la simulación iniciada en abril.

Finalmente, y al igual que para el sistema sin separación de primeras lluvias, para la demanda más alta el agua potencialmente almacenable supera los 1.000 litros en solo el 8,2 y el 5,8 % de los días del año, para las simulaciones de enero y abril, por lo cual el mejor tamaño de tanque también es de 1.000 litros.

Ya que para las tres demandas se estableció el mismo tamaño de tanque y los demás componentes fueron iguales, el costo total de construcción del sistema es de \$1.326.312, en los tres casos.

Ahora bien, para los dos diseños estos costos pueden llegar a ser muy elevados especialmente si se quieren implementar en zonas rurales y para estratos bajos. Sin embargo, cabe resaltar que estos sistemas suelen implicar efectos positivos para la sociedad, al generar beneficios ambientales, como el disminuir la presión sobre otras fuentes hídricas; sociales, como mejorar la calidad de vida de las personas y económicos, por ser menos costosos que otros mecanismos de acceso al agua.

Por lo anterior, es importante buscar la forma de incrementar sus beneficios por encima de sus costos, bien sea mediante incentivos o subsidios del Gobierno que reduzcan su costo inicial, para fomentar el uso de estos sistemas o incrementando los beneficios que estos generan, combinándolos con otras fuentes hídricas o considerando el aporte que tienen cuando se usan con fines productivos como la agricultura (Liang & van Dijk, 2011).

Así, estos sistemas generan beneficios ambientales mayores que los costos que acarrearán, tanto económicos como en consumo de materiales, a pesar de que estos últimos también son relativamente bajos. Aun así, es importante considerar la percepción de sus usuarios, pues si el tiempo de retorno de la inversión es muy largo o sus beneficios no son tan visibles en comparación con otras fuentes, puede no haber el incentivo suficiente para diseñarlos u operarlos (Ward et al., 2010; Liang & van Dijk, 2011).

Ahora bien, para este caso, el sistema cumple la demanda vital y esto puede ser un gran beneficio si se considera que en muchas zonas sí hay otras fuentes de agua, pero estas no son suficientes en calidad o cantidad. Así, tomar agua de los ríos puede ser riesgoso para la salud y además afecta su caudal, mientras que el agua de lluvia es más segura, si se toman las medidas adecuadas, y aporta a la conservación de otros cuerpos de agua y de las cuencas en general, cuando se hace a mayor escala (Steffen et al., 2013). Igualmente, se puede seguir usando el agua de los ríos, pero para usos no potables, domésticos o agropecuarios. Por otro lado, cuando hay fuente de agua potable el agua lluvia puede servir como reserva o reducir el uso del agua de suministro y disminuir sus costos, con lo cual también habría un beneficio económico a largo plazo poniendo en marcha estos sistemas.

Conclusiones

Esta investigación ha demostrado la importancia de trabajar la precipitación con valores estocásticos mostrando a la vez la poca representatividad de los modelos determinísticos que operan, por ejemplo, con valores promedio.

Los sistemas de recolección de agua lluvia son una fuente hídrica que debería tenerse más en cuenta por su adaptabilidad, accesibilidad y bajo costo, en comparación con otros mecanismos de abastecimiento de agua, especialmente en zonas pobladas dispersas, en donde los mecanismos tradicionales son más deficientes. Los mismos no acarrear impactos negativos sobre el drenaje de cuencas, la escorrentía o los caudales, ni sobre la limnología puesto que se implementan sobre construcciones ya hechas y el volumen de agua en consideración es extremadamente bajo (ej. 1,5% en predios de una fanegada).

En esta investigación se evaluó esta alternativa de abastecimiento en función de las características particulares del área de estudio, principalmente la oferta de agua lluvia, determinada por el comportamiento local de la precipitación, que en esta zona presenta dos picos de lluvias, en abril-mayo y octubre-noviembre, y una tendencia en la distribución de los datos hacia los valores más bajos.

Estas características permiten diseñar un sistema que no requiera una capacidad de almacenamiento tan alta como la que requeriría una zona con un único pico de lluvias al año. Esto, ya que el sistema puede almacenar agua durante temporadas cortas para suplir el déficit hídrico durante épocas secas de aproximadamente tres meses, que así mismo son relativamente cortas.

Además, la alta ocurrencia de valores bajos de precipitación puede implicar una menor oferta de agua lluvia para el sistema, pero así mismo son una base sólida para su diseño, porque no se van a sobreestimar las dimensiones requeridas ni se va a incurrir en costos innecesarios.

Por otro lado, el municipio se encuentra inmerso en una zona con iguales o mayores precipitaciones y menor temperatura anual, y por ello, una mayor oferta hídrica, por lo cual, estos resultados aplican cercanamente a los municipios colindantes. Aun así, cabe resaltar que el diseño del sistema se podrá aplicar solo a zonas que sean similares tanto en comportamiento como en cantidad de lluvia a lo largo del año.

De esta forma, según los resultados de los modelos, existe la posibilidad de satisfacer la demanda vital de agua, básica y óptima, establecida por la Organización Mundial de la Salud, para consumo humano, e incluso contar con excedentes de agua para demandas secundarias menores, más no los requerimientos de consumo domésticos establecidos según la legislación colombiana. Por ello, un sistema de recolección de agua lluvia implementado aquí sería insuficiente como fuente única de agua para las personas, a pesar de lo cual, este sí implicaría grandes beneficios en su calidad de vida al suplir satisfactoriamente la demanda vital y proporcionar un acceso cercano y seguro al agua. Por las razones previamente expuestas, el presente estudio no consideró captaciones con fines agrícolas o pecuarios.

Los costos de construcción del sistema pueden llegar a ser superiores a las posibilidades económicas de muchas familias rurales, pero también implican grandes beneficios. Por ello es importante considerar mecanismos que mejoren la relación costo-beneficio y la percepción de los usuarios sobre estos sistemas, mediante incentivos o subsidios, combinándolos con otros medios de acceso al agua o generando ganancias a partir de su implementación.

Recomendaciones

Para estudios futuros sería importante contemplar la autocorrelación temporal que puede experimentar la precipitación, así como los efectos que genera en la acumulación de excedentes y de déficits de agua.

Para lograr una mayor precisión tanto en el diseño como en los costos de construcción del sistema, se recomienda tener mayor especificidad sobre el lugar donde se quiera instalar, incluyendo detalles como la distribución de la vivienda y la ubicación de los puntos de salida dentro de ella. No obstante, los datos arrojados por los modelos trabajados aquí, permiten tener valores de referencia, que son igualmente válidos, para establecer qué tanto puede aportar la precipitación local en la suplencia de las necesidades hídricas de las personas.

Por otro lado, también es importante considerar la utilidad de estos sistemas como mecanismo complementario de otras formas de acceso al agua, especialmente cuando estas fuentes puedan llegar a faltar. Así, por ejemplo, en muchas zonas de Colombia las quebradas y ríos son una fuente directa de toma de agua, incluso para consumo humano. Pero estos cuerpos de agua son muy vulnerables ante la contaminación o pérdida de caudal, por el deterioro de sus cuencas y la acción directa sobre ellos.

Finalmente, se deben tener muy en cuenta los beneficios que estos sistemas pueden representar para la calidad de vida de las personas y para la conservación de otras fuentes hídricas, más allá del costo inicial que puedan acarrear. Esto, sin desconocer que el factor económico es un claro limitante para su puesta en marcha, por lo cual, el apoyo del Estado, fuentes alternativas de financiación, e incluso su uso para fines productivos, pueden ser medios importantes para lograr su implementación.

Referencias

Acevedo, L., & Peláez, C. (2014). La ciudad postmoderna: agujero negro de la biosfera. *Revista Experimental*, (2) 1-6.

Acosta, A. (2008). ¡La sed global! En: C. Pineda, ed., *Agua y Vida en Colombia; Apuntes y conclusiones Foro Paipa 2007*, [online] Bogotá D.C.: Editorial Politécnico Grancolombiano, pp. 53-60. Recuperado de <http://repository.poligran.edu.co/bitstream/10823/611/1/Foro%20Paipa%202007.%20Agua%20y%20Vida.pdf> [Consultado el 15 Sep. 2016].

Alcaldía Municipal de Sopó. (2016). Datos generales – estado situacional de los sectores para formulación de plan de desarrollo municipal 2016-2019. Sopó: autor.

Barrera, J. O. (2016). Caracterización de los sistemas de producción agropecuaria mediante la simulación de escenarios de manejo de uso de los recursos agua y suelo usando el modelo SWAT por medio de la utilización de un sistema de información geográfica, caso de estudio cuenca río Teusacá (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José Caldas.

Bermúdez, A. (2011). Efectos de la ganadería en el proceso de transformación del paisaje, en el valle de Sopó, municipio de Guasca, Cundinamarca, durante el periodo 1945-2009 (Tesis de pregrado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Biswas, B. K. & Mandal, B. H. (2014). Construction and evaluation of rainwater harvesting system for domestic use in a remote and rural area of Khulna, Bangladesh. *International Scholarly Research Notices*, 1-6.

BVSDE. (n. d.). *Guía de orientación en saneamiento básico para alcaldías de municipios rurales y pequeñas comunidades*. Recuperado de www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/2-3sas.htm

Breña-Puyol, A. F. & Jacobo-Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. México, D. F.: Universidad Autónoma Metropolitana. 289 p.

Caicedo, N. (2008). Equidad en la distribución del agua; romper la brecha entre lo urbano y lo rural. En: C. Pineda, ed., *Agua y vida en Colombia; Apuntes y conclusiones Foro Paipa 2007*, [online] Bogotá D.C.: Editorial Politécnico Grancolombiano, pp. 215-228. Recuperado de <http://repository.poligran.edu.co/bitstream/10823/611/1/Foro%20Paipa%202007.%20Agua%20y%20Vida.pdf> [Consultado el 15 de septiembre del 2016].

Campisano, A., & Modica, C. (2014). Selecting time scale resolution to evaluate water saving and retention potential of rainwater harvesting tanks. *Procedia Engineering*, 70, 218-227.

Castiblanco, C. (2007). La economía ecológica: Una disciplina en busca de autor. *Gestión y Ambiente*, 10(3), 7-22.

Cook, S., Li, F., Geballe, G. T., & Burch Jr., W. R. (2000). Rainwater harvesting agriculture: an integrated system for water management on rainfed land in China's semiarid areas. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(8), 477-483.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá*. Bogotá: autor.

Correa, G. (2016). Laudato Si y la cuestión del agua en Colombia. *Revista Universidad de La Salle*, (68), 215-231.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2017). Vivienda VIS y No VIS, Series históricas – 16 áreas de influencia, II 2012 – IV 2016. Bogotá: autor. Recuperado de www.dane.gov.co [Consultado el 20 abr. 2017].

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2013). Censo Nacional Agropecuario – Caracterización de los productores residentes en el área rural dispersa censada. Bogotá: autor.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2013). Censo Nacional Agropecuario – Caracterización de los productores residentes en el área rural dispersa censada. Bogotá: autor.

Díaz-Pulido, A. P., Chingaté-Hernández, N., Muñoz-Moreno, D. P., Olaya-González, W. R., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Estudios socio-jurídicos*, 11(1), 84-116.

Dym, C. L. (2004). *Mathematical modelling. Principles of mathematical modeling*. Elsevier. Claremont, California: Harvey Mudd College.

Domínguez, E. (2000). Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos. *Meteorología colombiana*, 2, 33-38.

Escobar, A. (2008). Política pública en agua potable y saneamiento básico. En: C. Pineda, ed., *Agua y vida en Colombia; Apuntes y conclusiones Foro Paipa 2007*. [online] Bogotá D.C.: Politécnico Gran Colombiano, pp. 77-98. Recuperado de <http://repository.poligran.edu.co/bitstream/10823/611/1/Foro%20Paipa%202007.%20Agua%20y%20Vida.pdf> [Consultado el 15 de septiembre del 2016].

Farreny, R., Morales Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: quantity and quality assessments in Spain. *Water research*, 45(10), 3245-3254.

Foladori, G. (2001). La economía ecológica. *Sustentabilidad*, 189-195.

Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS). (2015). Programa de abastecimiento de agua y manejo de aguas residuales en zonas rurales. Madrid, España: autor.

Food and Agriculture Organization (FAO). (1998). Definiciones y conceptos. En: *Censos agropecuarios y género*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/004/x2919s/x2919s05.htm> [Consultado el 29 de octubre del 2016].

Hajani, E., & Rahman, A. (2014). Reliability and cost analysis of a rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater Sydney, Australia. *Water*, 6, 945-960.

Hannon, B. & Ruth, M. (1997). *Modeling dynamic biological systems*. Switzerland: Springer International Publishing, 398 p.

Haque, M. M., Rahman, A. & Samali, B. (2016). Evaluation on climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production*, 137, 60-69.

Hasim, H., Hudzori, A., Yusop, Z. & Ho, W. S. (2013). Simulation based programming for optimization of large-scale rainwater harvesting system: Malaysia case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 80, 1-9.

Herrera, A. C. (2006). *Aplicación SIGAM – Sistema de gestión ambiental como herramienta para el fortalecimiento de la gestión municipal en Sopó, Cundinamarca*. (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de la Salle.

Hirschboeck, K. K. (2009). Future Hydroclimatology and the Research Challenges of a Post-Stationary World. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 142(1), 4-9.

Ideam. (n. d.). *Introducción al atlas interactivo*. Recuperado de <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>

IGAC. (n. d.). Mapas temáticos predefinidos – Nacional. Recuperado de http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/frames_pagina.aspx

Lampoglia, T. C., Agüero, R. & Barrios, C. (2008). *Orientaciones sobre agua y saneamiento para zonas rurales*. Lima, Perú: Asociación Servicios Educativos Rurales-OMS-CEPIS/OPS.

Liang, X. & van Dijk, M. P. (2011). Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing. *Resources, conservation and recycling*, 55 (11), 1100-1108.

Lora Gómez, C. (2009). *El agua como eje del desarrollo regional, estudio de caso: región abastecida por el páramo de Chingaza*. (Tesis de maestría). Bogotá: Universidad de los Andes.

Mancera, J. M., Peña, E. J., Giraldo, R. & Santos, A. (2003). *Introducción a la modelación ecológica. Principios y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Martínez, A., David, J., & Peláez Marín, R. (2016). *Diseño de tanques automatizados para la reserva de aguas lluvias*. (Tesis de pregrado). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (n. d.). *Guía práctica de captación de agua lluvia*. San Salvador: autor.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2016). *Lineamiento técnico para jornadas de lavado y cepillado de tanques de almacenamiento de agua de uso doméstico y depósitos de agua de uso institucional, como medida de prevención ante la infestación por Aedes aegypti para dengue, chikunguña, zika y otras enfermedades transmitidas por vectores en Colombia*. Bogotá: autor.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Minvivienda). (n. d.). Anexo técnico, especificaciones técnicas de vivienda y obras de urbanismo. Bogotá: autor.

Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioVivienda/141127%20ANEXO%20TECNICO%20PVG%202.pdf> [Consultado el 20 de abril del 2017]

Morell, I. & Hernández, F. (2000). *El agua en Castellón: un reto para el siglo XXI*. Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume.

Ndiritu, J., Odiyo, J. O., Makungo, R., Ntuli, C. & Mwaka, B. (2011). Yield-reliability analysis for rural domestic water supply from combined rainwater harvesting and run-of-river abstraction. *Hydrological Science Journal*. 56(2), 238-248.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2003). Agua para todos, agua para la vida: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo – Resumen. París: autor.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2013). Estadísticas sanitarias mundiales 2013. Suiza: autor.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2009). *Guía de orientación en saneamiento básico para alcaldías de municipios rurales y pequeñas comunidades*. Lima; Perú: autor.

Palacio, N. (2010). Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. *Gestión y Ambiente*, 13(2), 25-40.

Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra: autor.

Rodríguez, A. S. (2013). *Análisis del impacto de la suburbanización dada por la presión de la vivienda de estratos altos en la sabana de Bogotá. Estudio de caso: la alteración del paisaje rural del municipio de Sopó, Cundinamarca*. (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.

Saha, R., Gosh, P. K., Mishra, V. K. & Bujarbaruah, K. M. (2007). Low-cost micro-rainwater harvesting technology (Jalkund) for new livelihood of rural hill farmers. *Current Science*, 92(9), 1258-1265.

Salett, M. & Hein, N. (2004). Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática. *Educación Matemática*, 16 (2), 105-125.

Samper Pizano, E. (2008). Introducción: El agua es un bien público y pertenece a la nación. En: C. Pineda, ed., *Agua y vida en Colombia; Apuntes y conclusiones Foro Paipa 2007*. [online] Bogotá: Politécnico Gran colombiano, pp. 15-20. Recuperado de <http://repository.poligran.edu.co/bitstream/10823/611/1/Foro%20Paipa%202007.%20Agua%20y%20Vida.pdf> [Consultado el 15 de septiembre del 2016].

Steffen, J., Jensen, M., Pomeroy, C. A. & Burian, S. J. (2013). Watter supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U. S. cities. *Journal of the American Water Resources Association*, 49 (4), 810-824.

Subdirección de Agua y Saneamiento (SAS). (2014). Evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985-2013). Recuperado de https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Agua/Documentos_sectoriales/1_z_2014_Art%C3%83%C2%ADculo_DNP_Evolucion_coberturas_servicios_AA_1985_2013.pdf [Consultado el 20 de septiembre del 2016].

Torres, A., Méndez-Fajardo, S., Gutiérrez Torres, Á. P. & Sandoval, S. (2013). Quality of rainwater runoff on roofs and its relation to uses and rain characteristics in the villa Alexandra and Acacias neighborhoods of Kennedy, Bogota, Colombia. *Journal of Environmental Engineering*, 139(10), 1273-1278.

Torres, F. S. & Carvajal, A. V. (2014). *Cobertura de acueducto y alcantarillado, calidad del agua y mortalidad infantil en Colombia, 2000-2012* (N.º 012228). Bogotá: Universidad de los Andes-CEDE.

Wainwright, J., & Mulligan, M. (Ed.) 2004. *Environmental Modelling. Finding Simplicity in Complexity*. London: John Wiley & Sons.

Water Research Centre (WRC). (2014). *Hydroclimatology | Water Research Centre (WRC)*. [online] Recuperado de: <http://www.wrc.unsw.edu.au/hydroclimatology> [Consultado el 19 de junio del 2017].

Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2010). Rainwater harvesting: model-based design evaluation. *Water Science and Technology*, 61(1), 85-96.

Zapata, C. J., Piñeros, L. C. & Castaño, D. A. (2004). El método de simulación de Montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica. *Scientia Et Technica*, 1(24), 55-60.

León, G., Zea, J., & Eslava, J. (2000). Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 1, 31-38.

Anexos

Anexo 1. Precipitación media multianual diaria por mes (mm) (periodo 1980-2014)

Mes	mm	Mes	mm	Mes	mm	Mes	mm
Enero	1,01	Abril	3,12	Julio	1,72	Octubre	2,69
Febrero	1,83	Mayo	3,04	Agosto	1,61	Noviembre	2,94
Marzo	2,07	Junio	1,78	Septiembre	1,68	Diciembre	1,57

Anexo 2. Frecuencias de los rangos de precipitación utilizadas en la simulación de Monte Carlo para los modelos estocásticos.

Enero	
EneAI1 = Montecarlo(91,78) EneAI2 = Montecarlo(3,08) EneAI3 = Montecarlo(2,79) EneAI4 = Montecarlo(0,29) EneAI5 = Montecarlo(0,73) EneAI6 = Montecarlo(0,29) EneAI7 = Montecarlo(0,59) EneAI8 = Montecarlo(0,15) EneAI9 = Montecarlo(0,0)	EneTasa = IF (EneAI9 = 1) THEN 28,05 ELSE IF (EneAI8 = 1) THEN 24,75 ELSE IF (EneAI7 = 1) THEN 21,45 ELSE IF (EneAI6 = 1) THEN 18,15 ELSE IF (EneAI5 = 1) THEN 14,85 ELSE IF (EneAI4 = 1) THEN 11,55 ELSE IF (EneAI3 = 1) THEN 8,25 ELSE IF (EneAI2 = 1) THEN 4,95 ELSE IF (EneAI1 = 1) THEN 1,65 ELSE 31,35
Febrero	
FebAI1 = Montecarlo(87,92) FebAI2 = Montecarlo(5,70) FebAI3 = Montecarlo(2,85) FebAI4 = Montecarlo(1,85) FebAI5 = Montecarlo(0,34) FebAI6 = Montecarlo(0,17) FebAI7 = Montecarlo(0,50) FebAI8 = Montecarlo(0,17) FebAI9 = Montecarlo(0,34)	FebTasa = IF (FebAI9 = 1) THEN 32,3 ELSE IF (FebAI8 = 1) THEN 28,5 ELSE IF (FebAI7 = 1) THEN 24,7 ELSE IF (FebAI6 = 1) THEN 20,9 ELSE IF (FebAI5 = 1) THEN 17,1 ELSE IF (FebAI4 = 1) THEN 13,3 ELSE IF (FebAI3 = 1) THEN 9,5 ELSE IF (FebAI2 = 1) THEN 5,7 ELSE IF (FebAI1 = 1) THEN 1,9 ELSE 36,1
Marzo	
MarAI1 = Montecarlo(83,55) MarAI2 = Montecarlo(7,71) MarAI3 = Montecarlo(3,35) MarAI4 = Montecarlo(3,06) MarAI5 = Montecarlo(0,73) MarAI6 = Montecarlo(0,58) MarAI7 = Montecarlo(0,58) MarAI8 = Montecarlo(0,29) MarAI9 = Montecarlo(0,00)	MarTasa = IF (MarAI9 = 1) THEN 32,98 ELSE IF (MarAI8 = 1) THEN 29,1 ELSE IF (MarAI7 = 1) THEN 25,22 ELSE IF (MarAI6 = 1) THEN 21,34 ELSE IF (MarAI5 = 1) THEN 17,46 ELSE IF (MarAI4 = 1) THEN 13,58 ELSE IF (MarAI3 = 1) THEN 9,7 ELSE IF (MarAI2 = 1) THEN 5,82 ELSE IF (MarAI1 = 1) THEN 1,94 ELSE 36,86
Abril	
AbrAI1 = Montecarlo(79,78) AbrAI2 = Montecarlo(7,41) AbrAI3 = Montecarlo(5,40) AbrAI4 = Montecarlo(1,85) AbrAI5 = Montecarlo(1,08) AbrAI6 = Montecarlo(2,62)	AbrTasa = IF (AbrAI9 = 1) THEN 35,19 ELSE IF (AbrAI8 = 1) THEN 31,05 ELSE IF (AbrAI7 = 1) THEN 26,91 ELSE IF (AbrAI6 = 1) THEN 22,77 ELSE IF (AbrAI5 = 1) THEN 18,63 ELSE IF (AbrAI4 = 1) THEN 14,49 ELSE IF (AbrAI3 = 1) THEN 10,35 ELSE IF (AbrAI2 = 1) THEN 6,21 ELSE IF (AbrAI1 = 1) THEN 2,07 ELSE 39,33

AbrAI7 = Montecarlo(0,93) AbrAI8 = Montecarlo(0,46) AbrAI9 = Montecarlo(0,31)	
Mayo	
MayAI1 = Montecarlo(81,09) MayAI2 = Montecarlo(9,38) MayAI3 = Montecarlo(4,39) MayAI4 = Montecarlo(1,82) MayAI5 = Montecarlo(1,21) MayAI6 = Montecarlo(0,61) MayAI7 = Montecarlo(0,30) MayAI8 = Montecarlo(0,30) MayAI9 = Montecarlo(0,15)	MayTasa = IF (MayAI9 = 1) THEN 38,5 ELSE IF (MayAI8 = 1) THEN 34,0 ELSE IF (MayAI7 = 1) THEN 29,4 ELSE IF (MayAI6 = 1) THEN 24,9 ELSE IF (MayAI5 = 1) THEN 20,4 ELSE IF (MayAI4 = 1) THEN 15,9 ELSE IF (MayAI3 = 1) THEN 11,3 ELSE IF (MayAI2 = 1) THEN 6,8 ELSE IF (MayAI1 = 1) THEN 2,3 ELSE 43,04
Junio	
JunAI1 = Montecarlo(87,17) JunAI2 = Montecarlo(6,10) JunAI3 = Montecarlo(3,44) JunAI4 = Montecarlo(1,88) JunAI5 = Montecarlo(0,47) JunAI6 = Montecarlo(0,47) JunAI7 = Montecarlo(0,00) JunAI8 = Montecarlo(0,16) JunAI9 = Montecarlo(0,00)	JunTasa = IF (JunAI9 = 1) THEN 31,45 ELSE IF (JunAI8 = 1) THEN 27,75 ELSE IF (JunAI7 = 1) THEN 24,05 ELSE IF (JunAI6 = 1) THEN 20,35 ELSE IF (JunAI5 = 1) THEN 16,65 ELSE IF (JunAI4 = 1) THEN 12,95 ELSE IF (JunAI3 = 1) THEN 9,25 ELSE IF (JunAI2 = 1) THEN 5,55 ELSE IF (JunAI1 = 1) THEN 1,85 ELSE 35,15
Julio	
JulAI1 = Montecarlo(83,15) JulAI2 = Montecarlo(7,95) JulAI3 = Montecarlo(3,66) JulAI4 = Montecarlo(2,23) JulAI5 = Montecarlo(1,11) JulAI6 = Montecarlo(0,79) JulAI7 = Montecarlo(0,16) JulAI8 = Montecarlo(0,16) JulAI9 = Montecarlo(0,32)	JulTasa = IF (JulAI9 = 1) THEN 24,40 ELSE IF (JulAI8 = 1) THEN 21,53 ELSE IF (JulAI7 = 1) THEN 18,66 ELSE IF (JulAI6 = 1) THEN 15,79 ELSE IF (JulAI5 = 1) THEN 12,92 ELSE IF (JulAI4 = 1) THEN 10,05 ELSE IF (JulAI3 = 1) THEN 7,18 ELSE IF (JulAI2 = 1) THEN 4,31 ELSE IF (JulAI1 = 1) THEN 1,44 ELSE 27,27
Agosto	
AgoAI1 = Montecarlo(85,6) AgoAI2 = Montecarlo(8,32) AgoAI3 = Montecarlo(3,2) AgoAI4 = Montecarlo(0,64) AgoAI5 = Montecarlo(1,28) AgoAI6 = Montecarlo(0,48) AgoAI7 = Montecarlo(0,00) AgoAI8 = Montecarlo(0,16) AgoAI9 = Montecarlo(0,16)	AgoTasa = IF (AgoAI9 = 1) THEN 28,05 ELSE IF (AgoAI8 = 1) THEN 24,75 ELSE IF (AgoAI7 = 1) THEN 21,45 ELSE IF (AgoAI6 = 1) THEN 18,15 ELSE IF (AgoAI5 = 1) THEN 14,85 ELSE IF (AgoAI4 = 1) THEN 11,55 ELSE IF (AgoAI3 = 1) THEN 8,25 ELSE IF (AgoAI2 = 1) THEN 4,95 ELSE IF (AgoAI1 = 1) THEN 1,65 ELSE 31,35
Septiembre	
SepAI1 = Montecarlo(91,68) SepAI2 = Montecarlo(3,77) SepAI3 = Montecarlo(1,88) SepAI4 = Montecarlo(1,57) SepAI5 = Montecarlo(0,31)	SepTasa = IF (SepAI9 = 1) THEN 43,10 ELSE IF (SepAI8 = 1) THEN 38,03 ELSE IF (SepAI7 = 1) THEN 32,96 ELSE IF (SepAI6 = 1) THEN 27,89 ELSE IF (SepAI5 = 1) THEN 22,82 ELSE IF (SepAI4 = 1) THEN 17,75 ELSE IF (SepAI3 = 1) THEN 12,68 ELSE IF (SepAI2 = 1) THEN

SepAI6 = Montecarlo(0,16) SepAI7 = Montecarlo(0,00) SepAI8 = Montecarlo(0,31) SepAI9 = Montecarlo(0,00)	7,61 ELSE IF (SepAI1 = 1) THEN 2,54 ELSE 48,17
Octubre	
OctAI1 = Montecarlo(80,31) OctAI2 = Montecarlo(8,16) OctAI3 = Montecarlo(5,49) OctAI4 = Montecarlo(1,41) OctAI5 = Montecarlo(1,55) OctAI6 = Montecarlo(0,98) OctAI7 = Montecarlo(0,98) OctAI8 = Montecarlo(0,42) OctAI9 = Montecarlo(0,42)	OctTasa = IF (OctAI9 = 1) THEN 34 ELSE IF (OctAI8 = 1) THEN 30 ELSE IF (OctAI7 = 1) THEN 26 ELSE IF (OctAI6 = 1) THEN 22 ELSE IF (OctAI5 = 1) THEN 18 ELSE IF (OctAI4 = 1) THEN 14 ELSE IF (OctAI3 = 1) THEN 10 ELSE IF (OctAI2 = 1) THEN 6 ELSE IF (OctAI1 = 1) THEN 2 ELSE 38
Noviembre	
NovAI1 = Montecarlo(86,23) NovAI2 = Montecarlo(6,49) NovAI3 = Montecarlo(3,01) NovAI4 = Montecarlo(1,74) NovAI5 = Montecarlo(1,27) NovAI6 = Montecarlo(0,63) NovAI7 = Montecarlo(0,32) NovAI8 = Montecarlo(0,16) NovAI9 = Montecarlo(0,00)	NovTasa = IF (NovAI9 = 1) THEN 53,89 ELSE IF (NovAI8 = 1) THEN 47,55 ELSE IF (NovAI7 = 1) THEN 41,21 ELSE IF (NovAI6 = 1) THEN 34,87 ELSE IF (NovAI5 = 1) THEN 28,53 ELSE IF (NovAI4 = 1) THEN 22,19 ELSE IF (NovAI3 = 1) THEN 15,85 ELSE IF (NovAI2 = 1) THEN 9,51 ELSE IF (NovAI1 = 1) THEN 3,17 ELSE 60,23
Diciembre	
DicAI1 = Montecarlo(89,51) DicAI2 = Montecarlo(3,65) DicAI3 = Montecarlo(2,58) DicAI4 = Montecarlo(1,82) DicAI5 = Montecarlo(0,76) DicAI6 = Montecarlo(0,46) DicAI7 = Montecarlo(0,61) DicAI8 = Montecarlo(0,15) DicAI9 = Montecarlo(0,15)	DicTasa = IF (DicAI9 = 1) THEN 34,26 ELSE IF (DicAI8 = 1) THEN 30,23 ELSE IF (DicAI7 = 1) THEN 26,20 ELSE IF (DicAI6 = 1) THEN 22,17 ELSE IF (DicAI5 = 1) THEN 18,14 ELSE IF (DicAI4 = 1) THEN 14,11 ELSE IF (DicAI3 = 1) THEN 10,08 ELSE IF (DicAI2 = 1) THEN 6,05 ELSE IF (DicAI1 = 1) THEN 2,02 ELSE 38,29

Anexo 3. Valores diarios de captación de agua lluvia (dE:dt) y demanda suplida (dS:dt) para el modelo estocástico y sin separación de primeras lluvias, para los meses de enero y agosto

ENERO																					
Captación de agua lluvia (dE:dt)											Demanda suplida diaria (dS:dt)										
Día	# de iteración										Día	# de iteración									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,13	0,13	0,92	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
2	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
3	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	3	0,13	0,13	0,39	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	
5	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	5	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	
6	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,66	0,13	0,66	6	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,4	0,13	0,4	
7	2,51	0,13	2,51	0,66	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,66	7	0,4	0,13	0,4	0,4	0,13	0,13	0,4	0,4	0,13	
8	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	8	0,4	0,13	0,4	0,39	0,13	0,13	0,4	0,4	0,13	
9	1,45	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	1,72	0,13	0,13	9	0,4	0,13	0,4	0,4	0,13	0,13	0,4	0,4	0,13	
10	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,66	0,4	10	0,4	0,13	0,4	0,4	0,13	0,13	0,4	0,4	0,4	
11	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	11	0,4	0,13	0,4	0,4	0,13	0,13	0,4	0,4	0,39	
12	0,13	2,51	0,13	2,51	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	12	0,4	0,4	0,4	0,4	0,13	0,13	0,4	0,4	0,13	
13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	13	0,4	0,4	0,4	0,4	0,13	0,13	0,4	0,4	0,13	
14	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	1,45	0,13	0,13	0,13	0,13	14	0,4	0,4	0,4	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	0,4	15	0,4	0,4	0,36	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
16	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,66	2,51	0,13	0,13	1,45	16	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
17	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	17	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
18	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	18	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
19	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	19	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
20	0,13	0,4	0,13	0,66	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	20	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
21	0,13	0,13	0,66	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	21	0,4	0,4	0,4	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
22	0,13	0,13	0,13	0,66	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	22	0,4	0,36	0,39	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
23	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	23	0,4	0,13	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	
24	0,13	0,4	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	24	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,4	
25	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	2,51	0,13	0,13	0,4	25	0,4	0,13	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,4	
26	0,13	2,51	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	26	0,4	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
27	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,19	0,13	0,13	27	0,4	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,4	
28	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	28	0,4	0,4	0,4	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,4	
29	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,92	0,13	2,51	29	0,31	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,4	0,4	
30	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	30	0,13	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4	0,4	0,36	0,4	
31	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	31	0,13	0,4	0,4	0,31	0,13	0,4	0,4	0,4	0,13	

AGOSTO																					
Captación de agua lluvia (dE:dt)											Demanda suplida diaria (dS:dt)										
Día	# de iteración										Día	# de iteración									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
2	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	2,51	0,13	0,13	2,51	0,66	2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
3	0,13	2,51	2,51	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
5	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,66	0,13	0,13	5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
6	0,66	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
7	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,66	1,45	0,13	0,13	0,4	7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
8	0,13	0,13	0,66	2,51	0,13	0,66	0,13	0,13	0,13	2,51	8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
9	0,13	0,13	0,13	2,51	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
10	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,4	0,13	0,13	0,13	10	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
11	0,13	0,13	1,19	0,4	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	2,51	11	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
12	2,51	0,66	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	12	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	13	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
14	0,13	0,13	2,51	0,13	2,51	0,13	2,51	0,13	0,4	0,4	14	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
15	2,51	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	15	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
16	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	16	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
17	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,19	0,13	0,13	17	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
18	0,13	0,4	2,51	0,13	0,13	0,4	2,51	0,13	0,13	0,13	18	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
19	2,51	2,51	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	19	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
20	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,66	20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
21	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	21	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
22	0,13	0,13	1,19	0,13	2,51	0,13	0,66	0,13	0,13	0,4	22	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
23	0,13	1,45	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	23	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
24	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	2,51	24	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
25	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	25	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
26	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	0,13	0,13	26	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
27	0,13	0,4	0,4	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	27	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
28	2,51	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,13	0,13	0,13	28	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
29	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,51	2,51	0,13	0,13	29	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
30	0,4	0,13	0,13	0,13	1,19	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	30	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
31	2,51	0,4	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,4	0,4	31	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	

Anexo 4. Área unitaria para viviendas del departamento de Cundinamarca para el año 2016

Tipo de Vivienda	Trimestre (2016)	Estrato					
		Bajo-Bajo	Bajo	Medio-Bajo	Medio	Medio-Alto	Alto
VIS*	I	76	70	63	-	-	-
	II	70	67	66	36	-	-
	III	68	69	68	-	-	-
	IV	94	71	70	-	-	-
	Promedio	77	69	67	36	-	-
NO VIS	I	174	173	179	192	282	305
	II	186	178	171	191	243	355
	III	173	166	169	185	241	233
	IV	143	158	153	186	258	309
	Promedio	169	169	168	189	256	301
*VIS = Vivienda de Interés Social			Promedio total⁷		118		

Fuente: DANE (2017).

⁷ Ya que la problemática de acceso al agua se da principalmente en el área rural del país y en estratos bajos, el promedio total no tomó en cuenta a los estratos medio-alto y alto.