

Propuesta del dimensionamiento del tanque de almacenamiento del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, campus central

Nicolás Garzón Peña

Nathalia Gualdrón Reyes

Trabajo de Grado para optar el título de ingeniero civil

Director:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental

Codirector:

Arley David Celis Vargas

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2019

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen María por haberme dado la fortaleza y permitirme dar este gran paso en mi vida.

A mis padres Wber Orlando Garzón y Jackeline Peña por ser los mejores maestros en cada uno de los pasos que doy en mi vida.

A mi hermano Ronaldo Garzón por ser el motivo y su ejemplo a seguir.

A mi amiga y compañera de tesis Nathalia Gualdrón, que con sus conocimientos y experiencias hicieron de esta una experiencia muy enriquecedora.

Nicolás Garzón Peña.

A Dios y la Virgen María por poner a mi disposición todos los medios necesarios para llegar a este momento de mi vida.

A mis papás por su ejemplo y especialmente por todos los esfuerzos y sacrificios que han hecho para brindarme todo lo necesario.

A mis hermanas por su apoyo incondicional, amistad, lealtad y cariño.

A mi compañero de tesis y amigas de la universidad por hacer de esta etapa una de las mejores de mi vida.

Nathalia Gualdrón Reyes.

Agradecimientos

Al profesor Edgar Ricardo Oviedo por su acompañamiento y dirección durante la realización de este proyecto y las enseñanzas impartidas durante el pregrado.

Al ingeniero Arley David Celis por su tiempo y dedicación durante el desarrollo del proyecto.

A el fontanero señor Epimenio Noriega Noriega por ayudarnos en la recolección de información para el desarrollo de este proyecto.

A el jardinero señor Luis Arguello por sus enseñanzas y disposición en cada una de las visitas de campo.

A la encargada de los servicios de aseo señora Yolanda por su colaboración en la toma de mediciones que se hicieron en las visitas de campo.

Al profesor Germán Osman por su iniciativa sostenible a través del edificio de la E3T y permitirnos hacer cada una de las visitas de campo.

A la ingeniera Laura Jazmín Amado Duarte por gestionar la información para el desarrollo de este proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco de referencia	18
2.1 Método YAS	20
2.2 Método YBS	20
2.3 Ecuación de balance de masa propuesta por E. Ghisi.....	20
2.4 Método Rippl	21
2.5 Método no paramétrico basado en un generador de lluvia estocástica	21
3. Metodología	22
3.1 Caso de estudio	22
3.2. Caracterización del sistema de aguas lluvias de la E3T	23
3.3. Selección de métodos de dimensionamiento	23
3.4 Aplicación de los métodos	25
3.4.1. Información requerida para la aplicación de los métodos.	25
3.4.2. Demanda diaria.	25
3.4.3. Oferta.	28
4. Resultados	28
4.1 Sistema de recolección de aguas lluvias	28
4.1.1 Tanque de almacenamiento actual.	32
4.1.2. Sistema de bombeo.	33

4.2. Demanda	34
4.2.2. Demanda para el riego.	35
4.2.3. Demanda para actividades de aseo.	36
4.2.4. Demanda representativa para la temporada de vacaciones.	37
4.3. Oferta hídrica	37
4.4. Análisis comparativo de los métodos	38
4.5. Propuesta de dimensionamiento	42
4.6. Discusión.....	42
4. Conclusiones	44
Referencias Bibliográficas	46

Lista de Tablas

Tabla 1.	<i>Métodos para el cálculo de la demanda</i>	26
Tabla 2.	<i>Áreas de captación.</i>	30
Tabla 3.	<i>Resultados de la aplicación de los métodos para la propuesta de dimensionamiento</i>	41
Tabla 4.	<i>Aplicación del criterio para los métodos de balance de masa en la selección de la capacidad ideal del tanque de almacenamiento</i>	44
Tabla 5.	<i>Ahorro respecto al volumen de tanque actual para cada uno de los métodos de balance de masas</i>	44

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Esquema básico de un SCALL. Adaptado de: Okoye, Solyali & Akintug (2015)..	19
<i>Figura 2.</i> Localización de la zona de estudio.	23
<i>Figura 3.</i> Algoritmo de selección de Metodología. Adaptado de: Vargas, Dominguez, Ward & Oviedo-Ocaña, (2019).....	24
<i>Figura 4.</i> Composición de la cubierta a) Modelo, b) Registro Fotográfico.....	29
<i>Figura 5.</i> Áreas de captación.	30
<i>Figura 6.</i> Captación y conducción al tanque.	32
<i>Figura 7.</i> Tanque de almacenamiento.....	33
<i>Figura 8.</i> Distribución a los puntos de consumo de agua.	34
<i>Figura 9.</i> Demanda total.	34
<i>Figura 10.</i> Consumo de agua en los inodoros.....	35
<i>Figura 11.</i> Consumo de agua en las cubiertas verdes.....	36
<i>Figura 12.</i> Consumo de agua en las actividades de aseo.....	36
<i>Figura 13.</i> Patrones de precipitación.	38
<i>Figura 14.</i> Eficiencia vs Volumen aplicado a los métodos de simulaciones continuas para el edificio de la E3T.....	39
<i>Figura 15.</i> Precisión del método no paramétrico para diez simulaciones donde cada color representa un valor de eficiencia tipo, usando las ecuaciones de balance de masa por el método de YAS.....	40
<i>Figura 16.</i> Volumen de tanque mediante los diferentes métodos para una eficiencia de 50%	40

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Formato de caracterización usado en las visitas técnicas.

Apéndice B. Registro fotográfico de las visitas técnicas.

Apéndice C. Método de intersección de la línea de Horton.

Apéndice D. Cultivos encontrados en las terrazas.

Apéndice E. Planos actualizados del sistema de recolección de aguas lluvias.

Apéndice F. Porcentaje de hombres y mujeres población flotante.

Apéndice G. Población flotante representadas en personas equivalentes a tiempo completo.

Apéndice H. Población fija.

Apéndice I. Consumo de agua en terrazas.

Apéndice J. Consumo de agua en actividades de aseo.

Apéndice K. Calendario académico estándar.

Apéndice L. Curvas de eficiencia aplicando el método no paramétrico.

Apéndice M. Descripción de los métodos de dimensionamiento.

Resumen

TÍTULO: PROPUESTA DEL DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, CAMPUS CENTRAL. *

AUTOR: NICOLÁS GARZON PEÑA. **
NATHALIA GUALDRÓN REYES. **

PALABRAS CLAVE: CONSTRUCCIÓN VERDE, DESARROLLO SOSTENIBLE, SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS, CAPTACIÓN, TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

DESCRIPCIÓN:

Bajo el panorama mundial de estrés hídrico aparecen las construcciones verdes como una alternativa para la conservación del agua a partir del aprovechamiento de aguas lluvias (ALL), contribuyendo a mitigar los peligros por inundaciones y usando el ALL en el riego de jardines, descarga de inodoros y funciones de mantenimiento. Con el propósito de contribuir a la sostenibilidad ambiental, la Universidad Industrial de Santander se ha sumado a esta iniciativa con el edificio renovado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T), el cual cuenta con un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias instalado desde el 2012. Esta investigación busca analizar y comparar el tanque de almacenamiento instalado con los resultados obtenidos empleando diferentes metodologías de dimensionamiento. La aplicación de estos métodos consideró el comportamiento hidrológico de la zona, la demanda actual y proyectada de agua, el área de captación, coeficientes de escorrentía y otra información adicional requerida por cada método. Cinco métodos fueron seleccionados para las características del sistema analizado, de los cuales, cuatro son de balance de masas y uno paramétrico. Los resultados obtenidos muestran que el volumen del tanque de almacenamiento está entre 17000 y 20000 (l) el cual se aproxima al valor actual del tanque 22000 (l). Se propone el tamaño del tanque obtenido aplicando el método YAS de 20 000 (l), eficiencia del 51% y ahorro de agua anual respecto al actual tanque del 11,8%, debido a que es una medida conservadora y cercana a la realidad. Finalmente se recomienda la estandarización de registros a la salida del tanque para tener un control del correcto funcionamiento del sistema.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Ingeniero Sanitario, MSc, PhD.

Abstract

TITLE: PROPOSAL OF DIMENSIONING OF THE STORAGE TANK OF RAINWATER HARVESTING SYSTEM OF THE ELECTRICAL, ELECTRONIC AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING BUILDING OF THE SANTANDER INDUSTRIAL UNIVERSITY, CENTRAL CAMPUS.

AUTHOR: NICOLÁS GARZON PEÑA. **
NATHALIA GUALDRÓN REYES. **

KEYWORDS: GREEN BUILDINGS, RAINWATER HARVESTING SYSTEM, CATCHMENT, STORAGE TANK.

DESCRIPTION:

Under the world landscape of water stress, green buildings appear as an alternative for the conservation of water from the use of rainwater (WR), helping to mitigate flood hazards and using the ALL in the irrigation of gardens, flushing of toilets and maintenance functions. In order to contribute to environmental sustainability, the Industrial University of Santander has joined this initiative with the renovated building of the School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering (E3T), which has a water use system rains installed since 2012. This research seeks to analyze and compare the current storage tank with the results obtained using different sizing methodologies considering the hydrological behavior of the area, the current and projected water demand, the catchment area, runoff coefficients and the level of information required for each method. Five methods were selected, four of mass balance and one parametric, the results show that the volume of the storage tank is between 17,000 and 20,000 (l) which approximates the current value of the tank 22,000 (l). The tank obtained by applying the YAS method of 20,000 (l) with an efficiency of 51% and an annual water saving compared to the current tank of 11.8%, is suggested as it is a conservative measure and close to reality, as well as the standardization of records at the exit of the tank to have a control of the correct functioning of the system.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Sanitary Engineer, MSc, PhD.

Introducción

La gestión del agua, como una problemática mundial, se ha visto afectada por factores como: la urbanización desaforada, la incidencia del cambio climático, el aumento de la población y la sobreexplotación de los recursos hídricos lo que ha generado estrés hídrico en muchas regiones (Fortuño, 2017; Santos & Taveira-Pinto, 2013). El consumo de agua se ha visto restringido en varios países asociado principalmente a dos problemáticas; el primero, la escasez física de agua, corresponde a que la demanda de agua es mayor que el suministro de agua. El segundo, la escasez económica de agua que supone la disponibilidad de agua, pero por razones económicas no es posible utilizar plenamente la fuente de agua (Fortuño, 2017). Bajo este panorama una de las soluciones para la reducción de la demanda de agua se encuentra en el uso eficiente del recurso hídrico, es así como las construcciones verdes aparecen como una alternativa a partir del aprovechamiento de aguas lluvias contribuyendo a mitigar los peligros por inundaciones y ser utilizada en actividades como el riego de jardines, descarga de inodoros y funciones de mantenimiento (Domènech & Saurí, 2011; Guo & Baetz, 2007). Grandes ciudades con peligro de inundaciones han acudido a las infraestructuras verdes para mitigar desbordamientos de alcantarillados como es el caso de Tianjin en China donde se han realizado pruebas piloto en la implementación de techos verdes para la gestión del agua urbana (Liu & Jensen, 2018).

En general un sistema convencional de captación y aprovechamiento de aguas lluvias (SCALL) está conformado por un conjunto de elementos típicos, por ejemplo: superficies de captación, canaletas, bajantes, filtro de primeras lluvias, tanque de almacenamiento (TA) y red de distribución (Abbasi & Abbasi, 2011). Aunque cada elemento cumple con una tarea relevante, diferentes autores han postulado al TA como un componente crucial en el diseño ya que evita el sobredimensionamiento y la baja eficiencia del sistema (Ghisi, 2010; Raimondi & Becciu, 2014).

De hecho, el tamaño de los TA de agua lluvia para aplicaciones de construcción ecológica se considera como un problema de diseño a escala reducida de ingeniería hidrológica (Guo & Baetz, 2007).

Es así como en la literatura se encuentran diversas metodologías para el dimensionamiento del TA. Estas pueden ser clasificadas principalmente en cuatro tipos, acorde con (Vargas, Dominguez, Ward & Oviedo-Ocaña, 2019): métodos simplificados (Ward, Memon, & Butler, 2008), métodos de simulación continua de balance de masas (Alan Fewkes, 2000; Liaw & Tsai, 2004), no paramétricos (Basinger, Montalto, & Lall, 2010a) y métodos estadísticos (Guo & Baetz, 2007; Lee, Lee, Yang, & Yu, 2000; M. D. Su, Lin, Chang, Kang, & Lin, 2009). En general, los resultados de la aplicación de los métodos indican que la capacidad no puede ser estandarizada siendo influenciada por variables específicas, tales como: la precipitación local, el área de captación, la demanda de agua, el nivel de información disponible y el objetivo del sistema (Aladenola & Adeboye, 2010; Imteaz, Rahman, & Ahsan, 2012; Mwenge Kahinda, Taigbenu, & Boroto, 2010).

Universidades como Toledo-Ohio (Anand & Apul, 2011) se han sumado a la iniciativa del aprovechamiento de aguas lluvias para usos no potables como la descarga de inodoros. En Melbourne-Australia la universidad de Swinburne posee dos TA que captan el agua lluvia y la usan para irrigación del campus (Imteaz et al., 2012). En Colombia, la Pontificia Universidad Javeriana construyó dos TA de aguas lluvias, que captan la mayor parte de la escorrentía y posteriormente es utilizada en actividades de riego y lavado de zonas duras y fachadas (Lara Borrero et al., 2007). Con el propósito de contribuir a la sostenibilidad ambiental, la Universidad Industrial de Santander se ha sumado a esta iniciativa con el edificio renovado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T), el cual cuenta con un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias instalado desde el 2012. Esta investigación busca analizar y

comparar el actual TA con los resultados obtenidos empleando diferentes metodologías de dimensionamiento a partir de la caracterización del sistema y considerando el comportamiento hidrológico de la zona, la demanda actual, el área de captación, coeficientes de escorrentía y el nivel de información requerido para cada método.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer el dimensionamiento del tanque de almacenamiento del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el sistema actual de aprovechamiento de aguas lluvias que presenta el edificio de E3T.
- Seleccionar al menos cinco métodos para el dimensionamiento del tanque de aguas lluvias a aplicar en el caso de estudio.
- Analizar comparativamente los tamaños de tanque obtenidos con los métodos seleccionados y el existente en el sistema.

2. Marco de referencia

Los sistemas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias (SCALL) son una unidad en la cual se guarda y almacena el agua lluvia generalmente de techos, para luego ser reutilizada en usos no potables domésticos (Fonseca et al., 2017), además de ser una de las alternativas de ahorro de agua que ayudan entre muchos factores a la disminución de los efectos del cambio climático sobre las fuentes de agua (Pandey, Gupta, & Anderson, 2003), zonas secas (Oweis & Taimeh, 1996), áreas urbanas (Pachpute, Tumbo, Sally, & Mul, 2009) y centros educativos (Lara Borrero et al., 2007). La viabilidad de un SCALL está influenciada por factores como: los patrones de demanda, el tamaño del área de captación, el perfil de precipitaciones en la zona y la capacidad del tanque de almacenamiento.

Típicamente la superficie de recolección son las cubiertas de los edificios y en otros casos, superficies impermeables cercanas a la zona de almacenamiento. El sistema de recolección como se muestra en la Figura 1, está compuesto por bajantes, canaletas cilíndricas y tuberías que entregan al tanque el agua donde es temporalmente almacenada. En el proceso de control de calidad se utilizan dispositivos complementarios como pantallas de desechos, desviadores de flujo y filtros. Para el suministro, una o más bombas son instaladas con el fin de asegurar la presión adecuada y luego ser entregada a los diferentes usos (Abbasi & Abbasi, 2011). Dentro de todos sus componentes, el eje central es el tanque de almacenamiento, que permite la implementación de las funciones básicas de almacenamiento y tratamiento del agua recolectada (Raimondi & Becciu, 2014). El correcto dimensionamiento del tanque de agua es uno de los factores más importantes a la hora de diseñar estos sistemas, ya que evita el sobredimensionamiento y la baja eficiencia (Ghisi, 2010).

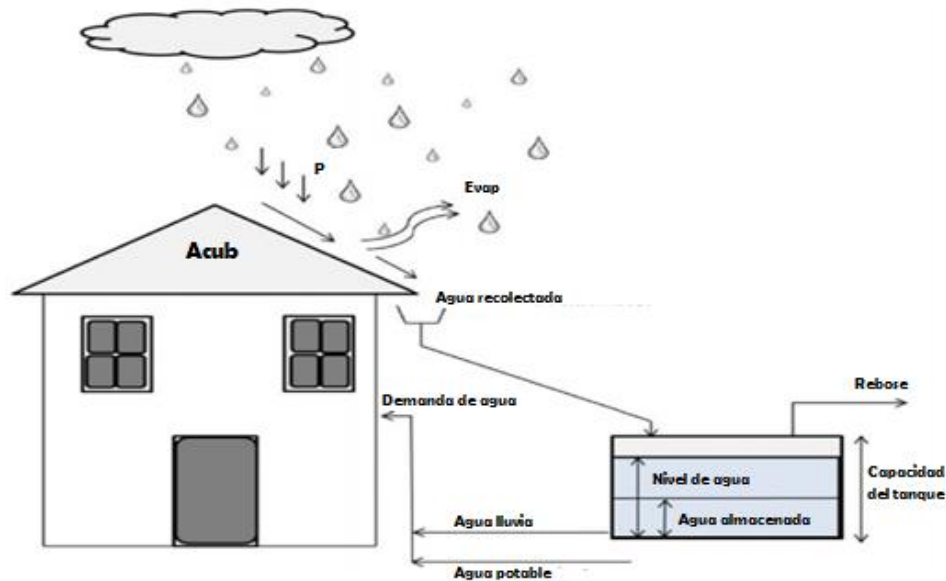


Figura 1. Esquema básico de un SCALL. Adaptado de: Okoye, Solyali & Akintug (2015).

Existe una gran cantidad de literatura acerca de las metodologías para estimar el dimensionamiento del tanque de almacenamiento. Estas pueden ser clasificadas principalmente en cuatro tipos: métodos simplificados (Ward, Memon, & Butler, 2010), métodos de simulación continua de balance de masas (Alan Fewkes, 2000; Liaw & Tsai, 2004), no paramétricos (Basinger, Montalto, & Lall, 2010b) y métodos estadísticos (Guo & Baetz, 2007; Lee et al., 2000; M. Su, Lin, Chang, Kang, & Lin, 2009).

Los métodos simplificados son de fácil aplicabilidad, se recomiendan principalmente para el diseño preliminar del tanque (ANQIP, 2009). Estos métodos se basan en la oferta y en la demanda. Con respecto a la demanda el tanque se basa solo en las necesidades de agua y la duración de escasez de agua (Alan Fewkes, 2000) y en la oferta, solo la disponibilidad de agua. Los métodos de simulación continua de balance de masas brindan mejores resultados, son recomendados ya que utilizan simulaciones continuas para rastrear las entradas y las salidas de agua, cambiando de esa manera el volumen del tanque de almacenamiento de acuerdo con una ecuación de balance de masa. Estos métodos tienen la capacidad de incorporar cambios estacionales en la lluvia o en la

demanda (A Fewkes, 2000). También permiten evaluar la eficiencia del sistema, que se define como el cociente entre la cantidad de agua que aporta el tanque de agua lluvias sobre la demanda que tiene el tanque (la & Marcel, 2014).

2.1 Método YAS

Jenkins et al. (1978) desarrollo un modelo de comportamiento e identifico dos algoritmos que describen la operación del tanque de almacenamiento. El primero el cual es el método YAS (Ver apéndice M) toma el rendimiento de agua (El agua que aporta el sistema) como el volumen de agua en almacenamiento desde el intervalo de tiempo anterior o la demanda de agua en el intervalo de tiempo actual, lo que sea más pequeño. La esorrentía del intervalo de tiempo actual es luego adicionada al volumen de agua almacenada del intervalo de tiempo anterior y luego es sustraído el rendimiento.

2.2 Método YBS

El método YBS (Ver apéndice M) asigna el rendimiento como el volumen de agua almacenada en el tanque del intervalo de tiempo anterior más la esorrentía del intervalo actual o la demanda actual, la que sea menor de las dos. Luego la esorrentía del intervalo actual es adicionada al volumen de agua almacenada del intervalo de tiempo anterior antes de extraer el rendimiento y permitir que cualquier exceso de agua sea evacuado por medio de la salida de excesos.

2.3 Ecuación de balance de masa propuesta por E. Ghisi

Por medio de la metodología propuesta por Ghisi et al. (2007), se utilizó el programa computacional Neptuno (Ver apéndice M). Mediante el uso de datos que permiten un modelado adecuado del sistema se pueden calcular resultados como el potencial de ahorro de agua potable a través del uso de agua lluvia y la capacidad del depósito entre otros. El programa requiere de información como los datos de lluvia en una escala diaria, las simulaciones son realizadas sobre

esta base y los resultados se presentan de manera diaria y mensual, esto con el fin de poder realizar análisis más sencillos del comportamiento del sistema en los cambios estacionales.

2.4 Método Rippl

Este método (Ver apéndice M) permite calcular el volumen de agua que se necesita almacenar durante la temporada de lluvias para compensar la falta de agua durante el periodo de sequía (Tomaz, 2005; Quadros, 2010). Este método tiene la desventaja de sobredimensionar el tanque de almacenamiento ya que está diseñado para satisfacer la totalidad de la demanda en los periodos de sequía, sin embargo, posee la ventaja de poder verificar el límite máximo del tanque ya está diseñado para abastecer una eficiencia del 100%. (Sanches, Terêncio, & Pacheco, 2015). El volumen del tanque está dado por la máxima diferencia positiva entre la demanda y el agua lluvia recolectada.

2.5 Método no paramétrico basado en un generador de lluvia estocástica

SARET es un algoritmo basado en números aleatorios para generar precipitaciones estocásticas las cuales sirven de entrada para cualquier otro método de dimensionamiento. El método se basa en la probabilidad de ocurrencia de la lluvia, su principio son las cadenas de Markov las cuales establecen que la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior.

Después de haber mencionado como funciona cada uno de los métodos, el propósito principal de esta investigación es proponer un volumen optimo del tanque de almacenamiento del sistema de recolección de aguas lluvias con el que cuenta el edificio de la E3T, aplicando una serie de metodologías las cuales permitirán describir el comportamiento del sistema y así poder establecer cuál es el volumen de tanque más adecuado de acuerdo a las necesidades hídricas actuales.

3. Metodología

3.1 Caso de estudio

El sitio de estudio corresponde al edificio de la E3T, que se encuentra ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en la ciudad de Bucaramanga. Cuenta con un área construida de 674.20 (m²) por cada piso. El promedio anual de lluvia en el área de estudio es de 1265.8 (mm), y la temperatura media anual corresponde a 23.07 (°C) (IDEAM). La precipitación de la zona está distribuida en cuatro etapas: dos periodos secos y dos húmedos. Las temporadas secas comprenden los meses de diciembre a marzo y, en menor proporción, de junio hasta agosto. De otro lado, las temporadas lluviosas incluyen los meses de abril a mayo y octubre a noviembre.

Esta es la primera edificación verde del campus que cuenta con un grupo de tecnologías sostenibles que buscan aliviar el impacto ambiental de su operación, a partir de la reducción de los consumos de energía eléctrica y de agua potable. Los espacios están distribuidos de la siguiente manera: el sótano, la planta baja y los pisos 2, 3 y 4 son utilizados como aulas (en total 17); el piso 5 está conformado por 9 oficinas y una terraza verde y el piso 6 alberga la terraza verde principal. El servicio sanitario cuenta con 19 inodoros para hombres, 14 para mujeres y 5 lava traperos (uno en cada piso a excepción de las oficinas).

Entre el grupo de tecnologías con las que cuenta el edificio para su operación se puede mencionar: un sistema de aislamiento térmico a partir de las cubiertas vegetales (techos verdes), iluminación, climatización natural y artificial, y la implementación de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, siendo este último el objeto de investigación en este caso de estudio.

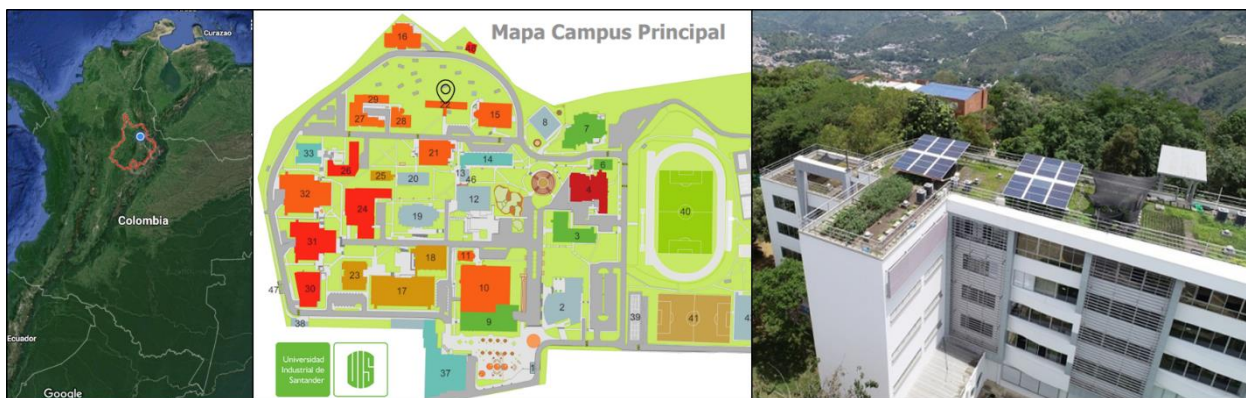


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

3.2. Caracterización del sistema de aguas lluvias de la E3T

Para la caracterización del sistema fue necesario establecer contacto con el personal administrativo y los docentes encargados del funcionamiento de la edificación, los cuales proporcionaron los planos hidrosanitarios y pluviales del edificio. Esta información fue verificada y ampliada por medio de un formato de visita (Ver Apéndice A), que se le realizó al personal encargado de la operación y mantenimiento del sistema. Las visitas al sistema se realizaron con el objetivo de identificar las zonas de captación, su drenaje y conexión con el actual tanque de almacenamiento, así como, el trayecto que realiza el agua lluvia luego de que ésta es almacenada para luego ser distribuida a los puntos de consumo. Entre las actividades realizadas en las visitas se tomaron medidas al tanque, se identificó el sistema de bombeo, se hizo la apertura de las cajas de inspección y se realizaron pruebas de drenaje.

3.3. Selección de métodos de dimensionamiento

Dos criterios de selección se tuvieron en cuenta. El primero, fue el algoritmo de selección propuesto por (Vargas, Dominguez, Ward & Oviedo-Ocaña, 2019), en el que por medio de múltiples simulaciones se llegó a la combinación de metodologías de balance de masas, probabilísticas, simplificadas y diseños basados en costos. Este algoritmo presenta cuatro etapas clave para direccionar la selección del método que mejor se ajusta a cada caso particular de

dimensionamiento, las cuales son: a) la precisión que se tiene de los datos de precipitación y demanda, b) si el sistema debe suplir el total de la demanda de agua, c) las implicaciones financieras y, d) la consideración de un factor de seguridad. En la *Figura 3* se muestra en color rojo el camino que se tomó para este caso de estudio bajo las siguientes consideraciones: a) se tienen datos diarios de precipitación y de demanda, b) solo se va a satisfacer una parte de la demanda total de agua, c) no se va tener en cuenta las implicaciones financieras puesto que el tanque ya está construido y solo se quiere verificar que su tamaño sea verdaderamente óptimo para las condiciones de demanda y los patrones de lluvia que actualmente se presentan y e) se tendrá a consideración un factor de seguridad que hace referencia a escenarios potencialmente adversos que se puedan presentar.

El segundo criterio, está enfocado en la comparación de los datos de entrada que requieren cada uno de los métodos y los datos que se lograron recolectar por medio de solicitudes de información y las distintas visitas que se realizaron al sistema.

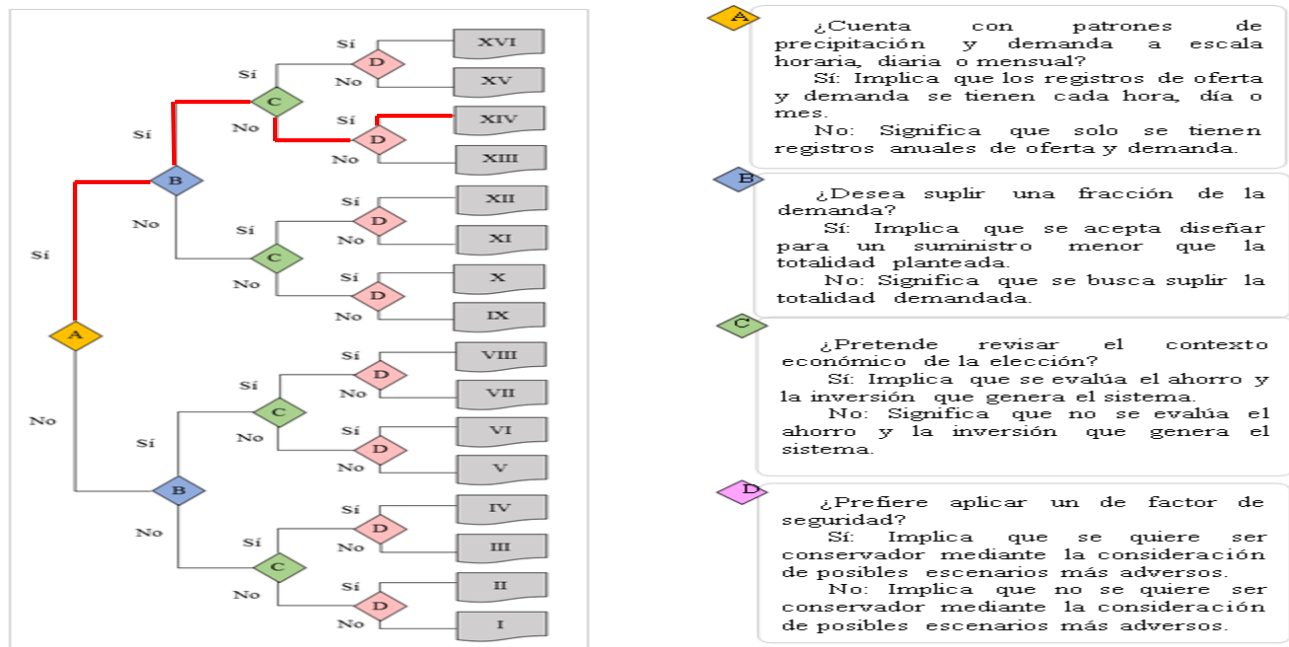


Figura 3. Algoritmo de selección de Metodología. Adaptado de: Vargas, Dominguez, Ward &

3.4 Aplicación de los métodos

Los volúmenes de TA se determinaron a partir de simulaciones hechas en hojas de cálculo programadas en el lenguaje VBA (Visual Basic for Applications). Los detalles de los métodos seleccionados se pueden encontrar en el apéndice M.

3.4.1. Información requerida para la aplicación de los métodos. Con el objetivo de determinar qué proporción de la lluvia es la que está escurriendo superficialmente se utilizó el coeficiente de escorrentía que a su vez depende de la cobertura del suelo, la capacidad de filtración y la pendiente de la zona. El método de intersección de la línea de Horton fue utilizado para calcular la pendiente media de las semi-cuencas en los alrededores del edificio. El criterio de Horton consiste en trazar un mallado sobre la proyección planimétrica de la cuenca, en este caso las líneas del mallado se separaron cada 1 metro para mayor exactitud. La pendiente será la razón entre el producto del conteo de las intersecciones entre el mallado y las curvas de nivel, con la distancia entre curvas, dividido en la longitud total de las líneas de la malla (Ver Apéndice C). Una vez obtenido el valor de la pendiente se asigna el coeficiente de escorrentía para cada una de las áreas de captación.

3.4.2. Demanda diaria. El actual sistema de recolección de agua lluvias del edificio E3T se usa para actividades que no requieren agua potable como es el riego de las terrazas, la descarga de inodoros y actividades de aseo. De la caracterización se evidenció que se dispone de poca información para el cálculo de la demanda, así que se estudiaron distintas alternativas para el cálculo de cada uno de ellas. Los datos se recopilaban de fuentes abiertas, incluidos los sitios web oficiales de la universidad. La validación y recopilación de material actualizado se llevó a cabo

con el personal administrativo del edificio. La Tabla 1 resume la metodología de cálculo aplicada para cada una de las demandas.

Tabla 1.

Métodos para el cálculo de la demanda

Demanda	Metodología de cálculo
Inodoro	Recopilación de datos y revisión de literatura
Riego	Información de las visitas
Aseo	Información de las visitas

3.4.2.1. Demanda de inodoros. Dado que la demanda de inodoros depende de la cantidad de personas que harán descargas al inodoro, la población total se dividió en dos: población flotante (estudiantes de pregrado) y población fija (estudiantes de posgrado, docentes y administrativos). Para cuestiones de este estudio se llamó población fija aquellos que se encuentran todo el día en el edificio, motivo por el cual se asumió que el 100 % de ellos realizan descargas al inodoro. El cálculo de ésta población se obtuvo de la administración del edificio y de la información que se encuentra en la página web de la Universidad.

En el caso de la población flotante (aquella que no está todo el día ni todos los días en el edificio) fue necesario convertirlas en el equivalente de personas a tiempo completo. Esto es el número total de horas que se encuentra en uso cada uno de los salones, dividido en un periodo de horas representativo (se tomó de 14 horas ya que es el número de horas que está en funcionamiento el edificio y que se supone las personas deben hacer uso del baño). Este cociente se multiplicó por la capacidad máxima de cada salón, debido a que la situación más crítica sucede cuando el edificio está completamente lleno. La cantidad de personas a tiempo completo se repartió en el porcentaje de hombres y mujeres. Este porcentaje se consiguió por medio de un conteo de hombres y mujeres desde la página web de la Escuela de Ingeniería E3T de todos los grupos y todas las materias (Ver

apéndice F). Se vio la necesidad de realizar de distribuir por sexo ya que la frecuencia de descarga de inodoros (N_f) es distinta para hombres y mujeres. Según estudios realizados en centros educativos en promedio una mujer realiza 3 descargas/día y un hombre 1 descarga/día (Anand & Apul, 2011; Scheuer, Keoleian, & Reppe, 2003). Una vez obtenido el total de descargas de inodoros por día de la semana (P_t), se aplicó la ecuación (1) adaptada de (Otaki, Otaki, & Aramaki, 2017) para el cálculo de la demanda para inodoros.

$$C_{inodoros} = V_f \times N_f \times P_t \quad (1)$$

Donde el consumo de inodoros $C_{inodoros}$ está en litros/día, V_f dado en litros que representa el volumen de agua por descarga y se obtuvo del catálogo institucional de Corona®, N_f es la frecuencia de descarga por persona que para cuestiones del cálculo se adaptó lo encontrado en la literatura para un periodo de 14 horas y P_t es la población total que hará descargas al inodoro.

3.4.2.2. Demanda de riego. Para la estimación de la cantidad de agua utilizada en las cubiertas verdes se realizaron dos visitas, una para un día de riego normal que comprende los días lunes, martes, miércoles y jueves, y la otra para el día viernes, que es el día en que se gasta más agua debido a que el jardinero encargado de las cubiertas, no hace las actividades del riego los fines de semana, por lo tanto, es necesario utilizar más agua para que los cultivos puedan subsistir durante estos días.

Durante la visita, lo primero que se hizo fue calcular el caudal de riego. Para ello, se tomó el tiempo que la manguera de riego demora en llenar un balde de 5 galones. Después, se tomó el tiempo que al jardinero le toma hacer el riego en cada una de las terrazas. Se decidió tomar los valores obtenidos directamente de la visita ya que de esta manera se obtendrán resultados más aproximados a las condiciones del caso de estudio.

3.4.2.3. Demanda para actividades de aseo Para calcular la demanda de las actividades de aseo, se realizaron visitas de acompañamiento a las labores de limpieza, de esta manera se calculó la cantidad de agua que se usa para el lavado de baños, limpieza de los pasillos, aseo de oficinas y salones. Para el lavado de baños se tomó la cantidad de agua que se usó en la limpieza de un solo baño y, posteriormente, se multiplicó por el número total de unidades. En la limpieza de pasillos se calculó la cantidad de agua que se usa por metro cuadrado. Y en el aseo de oficinas y salones, primero se obtuvo la cantidad de agua que se usó para asear un salón estándar, y se multiplicó por el total de salones y oficinas (convertidas en salones equivalentes) para generar el total de agua usada. Para el cálculo se consideró la frecuencia empleada por los trabajadores para el aseo de cada espacio y unidades sanitarias.

3.4.3. Oferta. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) tiene entre sus varias funciones la recolección de datos de precipitaciones a través de aparatos de medición ubicados en el territorio colombiano. En este caso una estación meteorológica se encuentra ubicada a 355.13 m del edificio en estudio y su información se obtuvo por medio de la página web del Instituto.

4. Resultados

4.1 Sistema de recolección de aguas lluvias

El sistema de recolección de aguas lluvias del E3T fue instalado hace 6 años desde la entrega de la remodelación que se hizo al edificio en el año 2012. Sus áreas de captación comprenden las 2 cubiertas verdes ubicadas en el 5 (terrazza 1) y 6 (terrazza 2) piso respectivamente y los alrededores del edificio. La terraza 1 cuenta con un área de 137 m^2 y la terraza 2 de 429 m^2 . El techo verde como se muestra en la Figura 4 está conformado así: la cubierta vegetal en la que se encuentran

cultivos como: tomate cherry, berenjena (siendo estos objetos de estudio por parte de la escuela de Biología), guasca, maní entre otros (Ver Apéndice D). Luego se encuentra la capa de sustrato, el geotextil superior, la lámina drenante y el impermeabilizante de PVC. Debido al poco espesor del sustrato, solo se pueden sembrar plantas de raíz corta y a futuro se tiene planeado el cultivo de pimentón, habichuelas y frijol. En los alrededores del edificio se identificaron zonas de captación a partir de las pruebas de drenaje, inspección visual y el plano de curvas de nivel. Finalmente se llegó a las siguientes áreas de captación: canaletas perimetrales de concreto, zona vegetal adyacentes a las canaletas (Ver Figura 5), dos sumideros ubicados en el costado oeste del edificio y la zona compuesta por baldosas de concreto perteneciente a la entrada del edificio. El total de áreas de captación con sus coeficientes de escorrentía se encuentra en la Tabla 2.

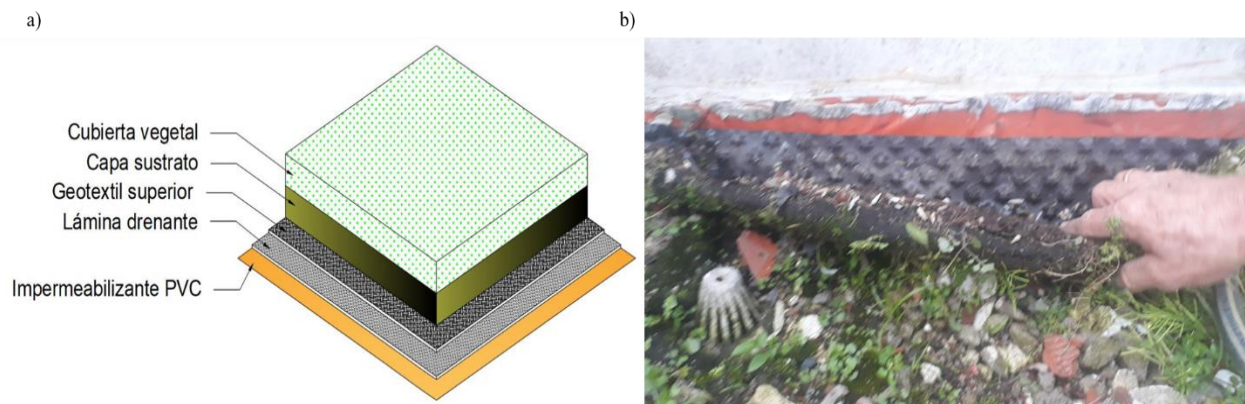


Figura 4. Composición de la cubierta a) Modelo, b) Registro Fotográfico.

Tabla 2.

Áreas de captación.

Áreas de captación	Área (m^2)	Coefficiente escorrentía
Terraza 1	429,00	0,45
Terraza 2	137,00	0,45
Canaletas	53,20	0,95
Sumidero 1	1,00	---
Sumidero 2	1,40	---
Zona de entrada	142,70	0,95
Área verde 1	489,91	0,45
Área verde 2	229,77	0,45
Área verde 3	13,81	0,45
Área verde 4	49,18	0,45
TOTAL	1546,97	
Coefficiente escorrentía ponderado	0,513	

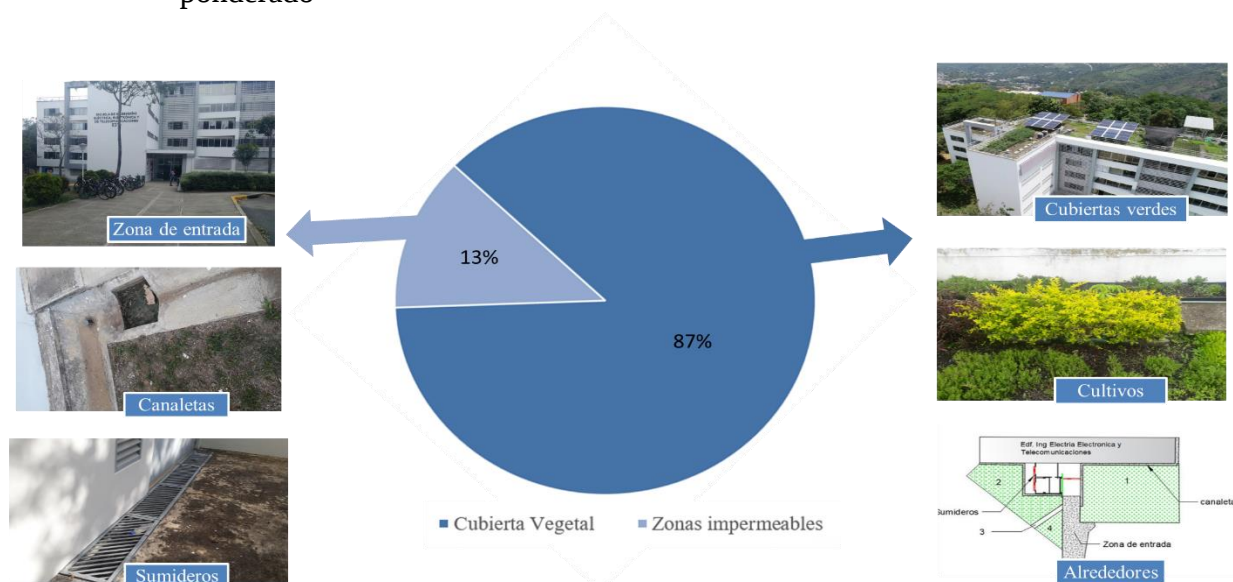


Figura 5. Áreas de captación.

El proceso de captación es el siguiente: el agua lluvia que cae en las terrazas se infiltra por las capas que componen la cubierta verde y junto con la lámina drenante y la pendiente del terreno, permiten que el agua infiltrada sea conducida a los desagües que se encuentran ubicados en el perímetro de la terraza. Los desagües están distribuidos así: ocho bajantes (tres planos y cinco de cúpula) para la terraza uno y dos bajantes (uno de cúpula y el otro plano) para la terraza dos. Todos

éstos de 3 pulgadas de diámetro, cubiertos con una malla fina (esto a modo de impedir el paso de lodos y otras partículas a las tuberías de drenaje). El agua lluvia que viaja por los bajantes desemboca en ocho cajas de inspección ubicadas alrededor del edificio.

Por otro lado, la lluvia que cae en las zonas exteriores que funcionan como áreas de captación, son conducidas gracias a la pendiente del terreno, hacia las canaletas. Éstas últimas dirigen el agua hacia los sifones que se encuentran ubicados justo en la intersección de cambio de dirección de las canaletas. El agua que atraviesa los sifones viaja por medio de una tubería enterrada que las conduce a las cajas de inspección. Una vez el agua captada de las terrazas y alrededores llega a las cajas de inspección es conducida, por medio de un sistema de tuberías enterradas, a una caja de inspección principal que se encuentra a un costado del tanque de almacenamiento. Al interior de la caja de inspección principal, en el fondo se encuentra una tubería de 8 pulgadas que drena hacia un pozo de inspección que se encuentra a 13.6 m de distancia. Justo encima, a 10 cm de centro a centro de esa tubería, se encuentra otra tubería de 6 pulgadas de diámetro que conduce el agua hacia el tanque de almacenamiento. Adicionalmente se encontró que uno de los lava-traperos que se encuentra en la parte baja del edificio desemboca directamente a la caja de inspección principal. Esta configuración de la caja de inspección permite que no ingresen partículas al tanque, pero especialmente obliga al sistema que solo cuando ocurra una lluvia considerable esa agua llegue a ser almacenada al tanque, es decir, para eventos pequeños de lluvia el agua será drenada directamente al pozo de inspección. Por esta razón, al interior del tanque se tiene una válvula de flotador o válvula de llenado que activa la entrada de agua potable cuando el nivel del tanque baja. En la Figura 6 se ilustra el proceso de captación y conducción al tanque descrito anteriormente. Una actualización de los planos fue necesaria ya que los inicialmente suministrados por la

administración del edificio no correspondían a lo encontrado en las vistas técnicas (Ver Apéndice E).

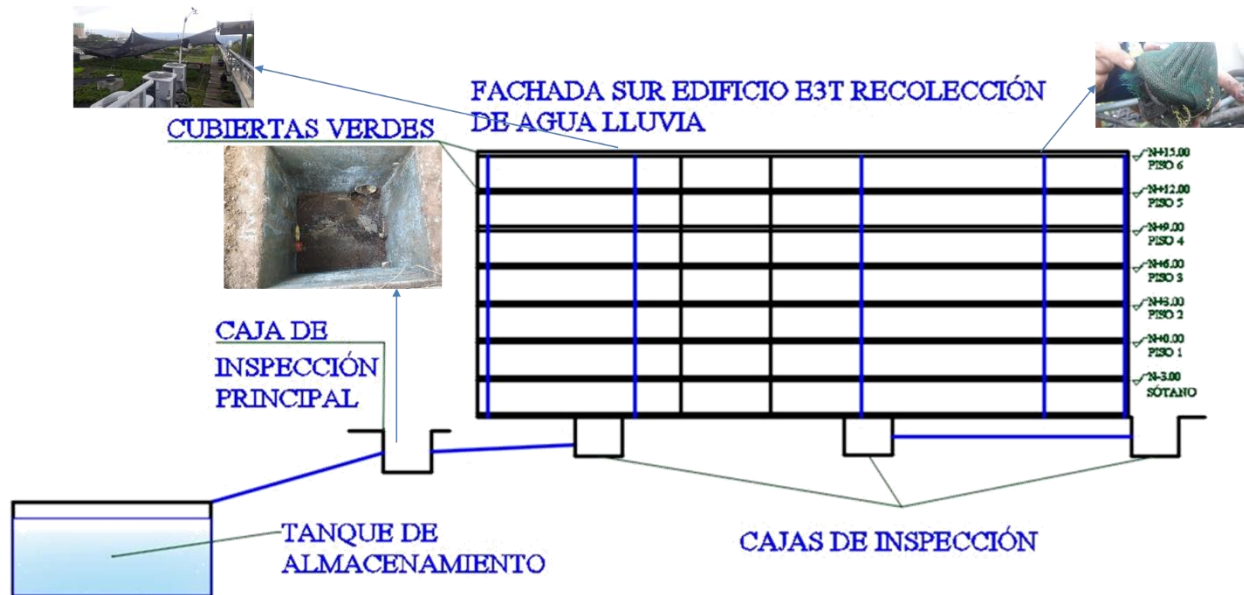


Figura 6. Captación y conducción al tanque.

4.1.1 Tanque de almacenamiento actual. Actualmente, el tanque se encuentra ubicado en el costado sur-oeste del E3T. Es de tipo subterráneo y está hecho de hormigón reforzado con dimensiones de 3.80 (m) de largo, 2.20 (m) de alto y 3.20 (m) de ancho, tiene un nivel máximo de agua de 1.9 (m), con una capacidad aproximada de 22 (m^3) y un nivel mínimo de 0.3 (m). Cuenta con dos aireadores de 4 pulgadas, dos tuberías de 6 pulgadas para la entrada y excesos de aguas lluvias respectivamente. Por medio de una tubería de 1 pulgada se realiza la entrada de agua potable y dos tuberías de 4 pulgadas para el lavado del tanque y para conducir el agua del tanque al cuarto de máquinas. Como se mencionó en la sección anterior, este tanque multipropósito tiene entrada de agua potable, así como, un flotador eléctrico de mercurio que envía una señal al tablero del cuarto de máquinas y apaga las bombas cuando el nivel del tanque llega a su mínimo (30 cm).

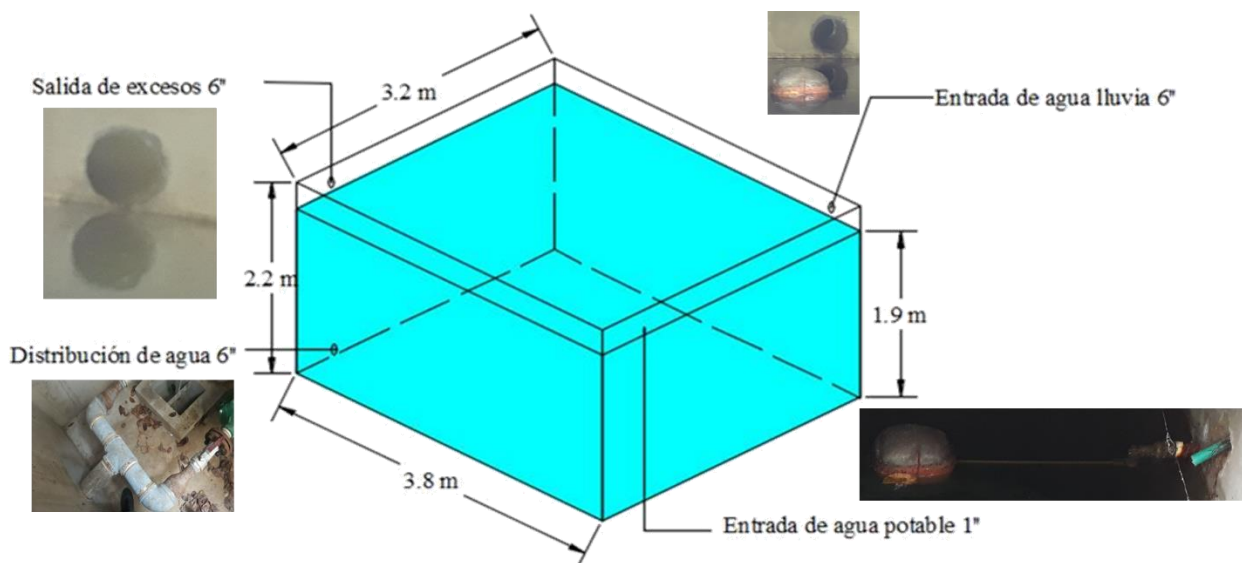


Figura 7. Tanque de almacenamiento.

4.1.2. Sistema de bombeo. El cuarto de bombas se encuentra contiguo al tanque y forma parte de la misma estructura de concreto. El sistema está conformado por dos bombas eléctricas BARNES modelo 2015 E-10-3, dos tanques de presión hidroflo de 300 (l), un tablero alternador conexión estrella- triángulo de 10 HP y un manómetro.

Cuando el manómetro registra una baja de presión (menor a 50 psi) éste envía una señal al tablero eléctrico, el cual activa alternadamente las bombas. El agua que entra por una tubería de 4 pulgadas al cuarto de bombas sale por medio de otra tubería del mismo diámetro para ser distribuida a los puntos de consumo.

Si el sistema presenta daños, por ejemplo, en el tablero de control, las bombas no pueden funcionar. En este caso se cierra la válvula de suministro del tanque y se activa un *bypass* que abastece agua potable directamente de la red. Situación que se está presentando al momento del desarrollo de esta investigación y que ha limitado la toma de datos del consumo de agua.

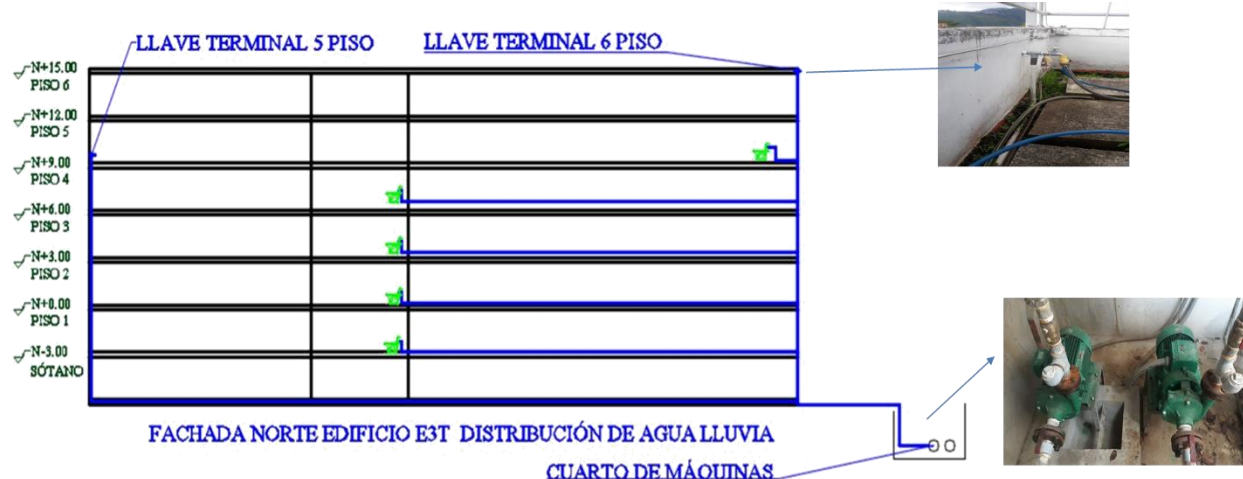


Figura 8. Distribución a los puntos de consumo de agua.

4.2. Demanda

A continuación, se presenta el consumo de agua que se obtuvo para los inodoros, riego de las cubiertas y actividades de aseo. La Figura 9 presenta la demanda total para todos los días de la semana, así como la demanda representativa en los periodos de vacaciones.

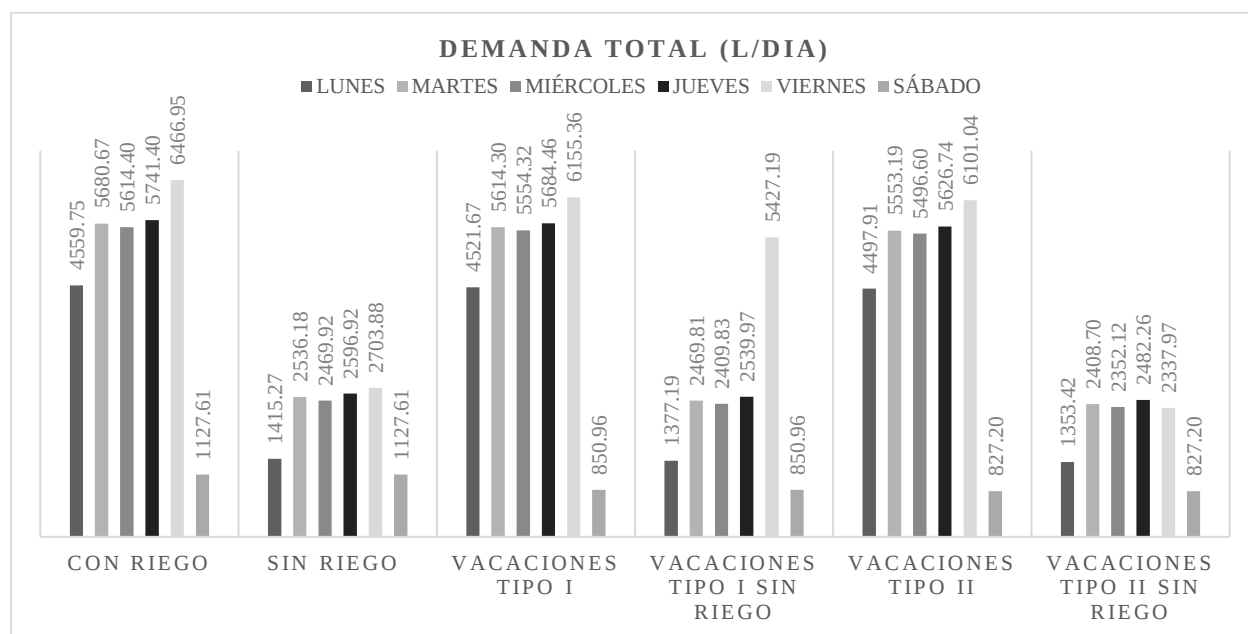


Figura 9. Demanda total.

4.2.1. Consumo de agua para inodoros. El edificio de este caso de estudio recibe en total 1614 personas entre estudiantes de pregrado y posgrado, docentes y administrativos. El 78% de los estudiantes de pregrado son hombres y el restante mujeres, en el Apéndice F se encuentra el conteo de hombres y mujeres para todas las materias dictadas en el edificio. El día jueves se presenta la mayor cantidad de población flotante representadas como personas a tiempo completo, la misma situación se observa para el consumo de agua de inodoros ya que está directamente relacionado a la cantidad de personas. En el Apéndice H se encuentra el estimado de personas a tiempo completo.

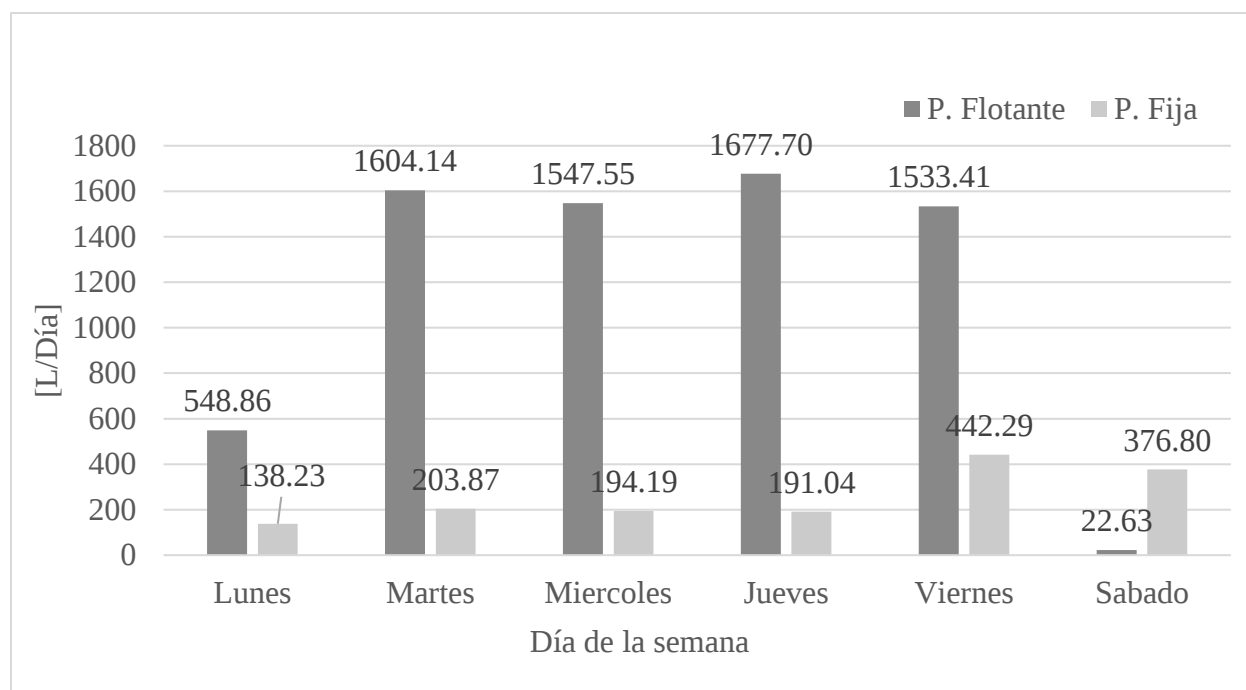


Figura 10. Consumo de agua en los inodoros.

4.2.2. Demanda para el riego. Las terrazas se riegan manualmente, se realiza dos veces al día. Entre semana de lunes a jueves se gasta un tiempo aproximado de 1h:13min:00s para el riego de las dos terrazas. El viernes se demora 12 minutos más que el resto de días, ya que el sábado ni domingo el jardinero encargado no trabaja. Para el viernes la demanda de riego es de 3763 (l) y

los días de lunes a jueves es de 3659.9 (l). Cabe resaltar que los días donde la lluvia supera esta demanda no se realiza riego.

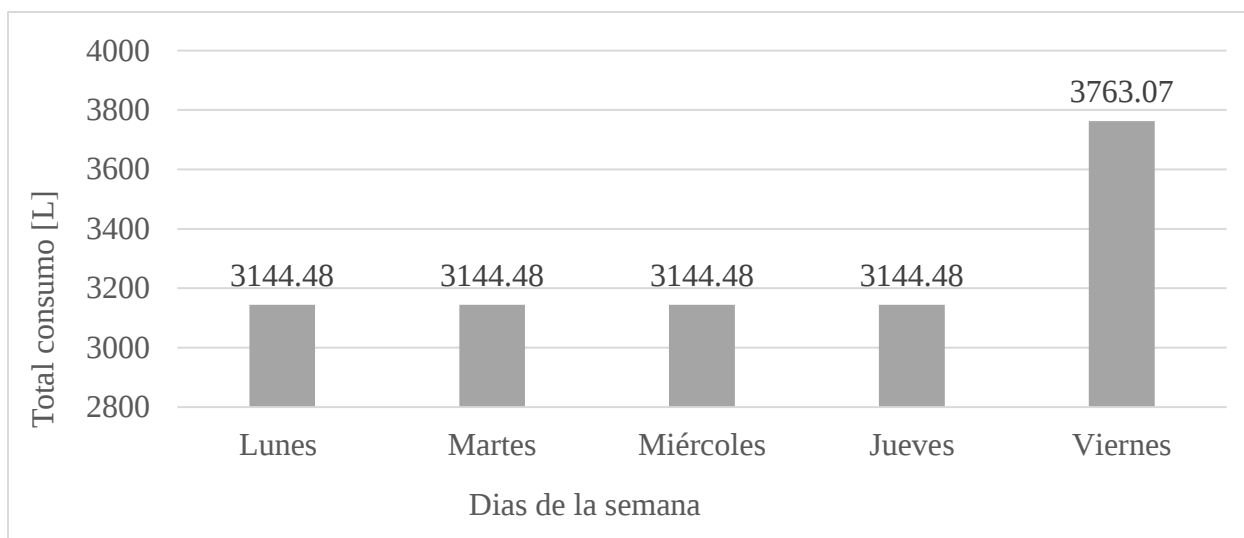


Figura 11. Consumo de agua en las cubiertas verdes.

4.2.3. Demanda para actividades de aseo. Para el lavado de un baño se gastan 31 (l) de agua y esto multiplicado por el total de baños (9) equivale a 279 (l). En los pasillos se obtuvo que se consume 0.43 litros de agua por cada m^2 en total se gastan 209.18 (l) para el lavado de pasillos. Se obtuvo que para las actividades de aseo de salones y oficinas se requiere de 240 (l). Finalmente, las actividades de aseo en total requieren de 728.18 litros de agua por día.

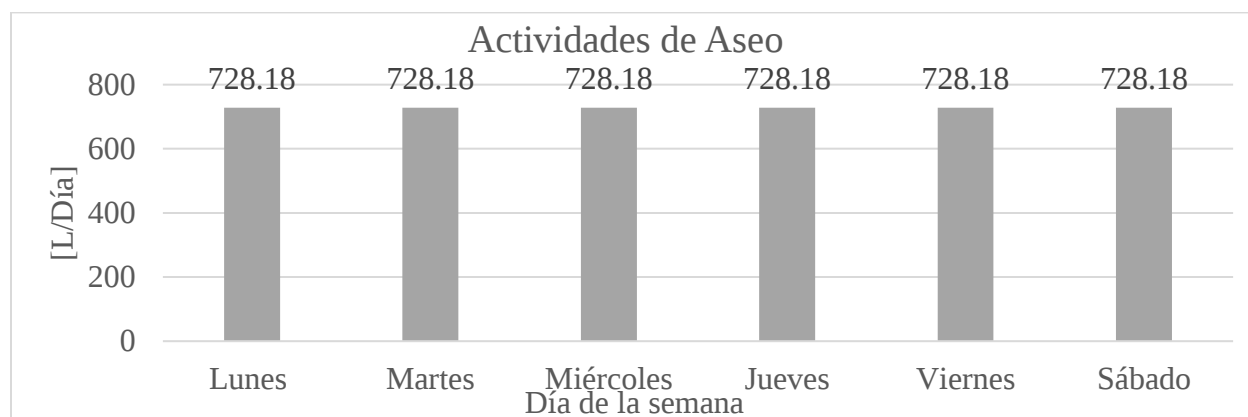


Figura 12. Consumo de agua en las actividades de aseo.

4.2.4. Demanda representativa para la temporada de vacaciones. Se realizó un calendario estándar, en el cual se tuvo en cuenta los meses en los cuales los estudiantes, docentes y el personal administrativo están en vacaciones. Las vacaciones Tipo I tienen en cuenta las descargas de inodoros del personal administrativo y docentes planta, así como el consumo en actividades de aseo y el riego de las terrazas. A estas vacaciones se le adjudica la segunda semana de enero, las tres primeras semanas del mes de junio y las últimas 3 semanas del mes de julio. Las vacaciones Tipo II solo tienen en cuenta las descargas de inodoros asociada al personal administrativo, consumo de agua en actividades de aseo y riego de cubiertas. Este tipo de vacaciones se le adjudica a la última semana de junio y la primera semana de julio. Las dos últimas semanas de diciembre y la primera de enero se asumió que todo el personal está en vacaciones y por tanto la demanda es cero. (Ver Apéndice K)

4.3. Oferta hídrica

A partir de la información proporcionada por el IDEAM se obtuvieron registros desde el año 1961-2003, sin embargo, varios años se descartaron ya que tenían una gran cantidad de datos faltantes. La estimación de datos faltantes no se pudo realizar ya que en algunos años éstos superaban el 10% y las estaciones cercanas tampoco tenían registros de esos días en específicos. Es así como se utilizó un registro histórico de 28 años. El régimen de precipitación como se muestra en la *Figura 13* presenta periodos de sequía en los meses de diciembre, enero, marzo y abril, comportamiento similar al del área metropolitana de Bucaramanga.

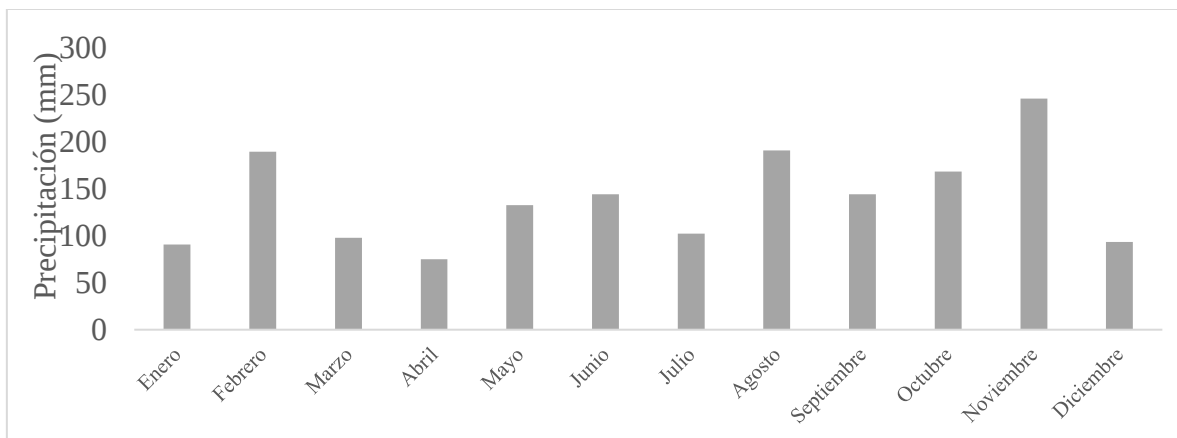


Figura 13. Patrones de precipitación.

4.4. Análisis comparativo de los métodos

Los resultados obtenidos por cada método son presentados en la Tabla 3. Como se puede observar el método YAS y YBS son los más y menos conservadores respectivamente. Esto se debe a que YAS define el suministro como el valor más pequeño entre lo almacenado al final del día anterior y la demanda de agua requerida para ese día. Por otro lado, el método YBS espera que llueva, es decir, el suministro para este método es el mínimo valor entre la demanda requerida para ese día y la suma del volumen almacenado al final del día anterior, más la lluvia captada en ese día. El método Ghisi, por su parte, es un valor intermedio entre estos dos, con un comportamiento asintótico similar, así como se observa en la Figura 14. En este caso, los volúmenes del tanque de almacenamiento obtenido por los métodos de balances de masas (YAS, YBS y Ghisi) son más pequeños que los resultados obtenidos por el método de Rippl. Este último calcula un solo tamaño de tanque para una eficiencia del 100% ya que fue diseñado para que el tanque trabaje a una eficiencia máxima, es decir, durante la temporada lluviosa va a recoger toda el agua que posteriormente será utilizada en época de sequía, esta condición extrema tiende a sobredimensionar el tamaño de almacenamiento. Los métodos de simulación continua a excepción

del método Rippl tienen la ventaja de analizar el comportamiento del sistema a través de la eficiencia en función de las capacidades del tanque como se ilustra en la Figura 14.

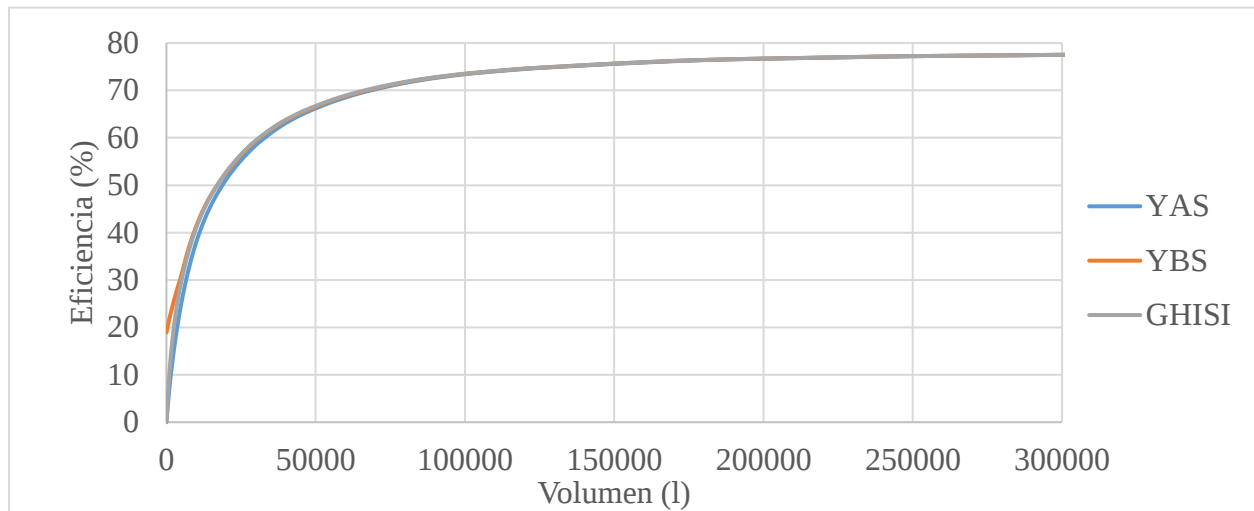


Figura 14. Eficiencia vs Volumen aplicado a los métodos de simulaciones continuas para el edificio de la E3T.

El último algoritmo seleccionado es SARET (Herramienta de Estimación de Almacenamiento y Confiabilidad). Éste método no paramétrico genera precipitaciones estocásticas que pueden constituir la entrada de otros métodos y para cuestiones de este análisis se usaron los mismos métodos de balance de masa (YAS, YBS y Ghisi). En la Tabla 3 se observa que los volúmenes de tanque por el método no paramétrico son más conservadores que los resultados obtenidos por las simulaciones de balance de masa para valores pequeños de eficiencia, aunque se observa un comportamiento contrario en eficiencias cercanas a la máxima. Dado que el algoritmo de este método se basa en números aleatorios carece de precisión, cada nueva simulación arroja un volumen diferente para la misma eficiencia. Esta diferencia de volumen es más notoria para eficiencias cercanas a la máxima. Un comportamiento con más precisión se evidencia en la Figura 15 justo antes del crecimiento asintótico, para eficiencia del 55%, los valores de TA toman valores cercanos. A pesar de esto la adopción del enfoque no paramétrico elimina las imprecisiones que se puede generar en la adopción de supuestos estadísticos como sucede en los modelos

paramétricos. En la Figura 16 se muestra los valores de volumen de tanque para una eficiencia del 50% que corresponde a un valor justo antes del comportamiento asintótico en todos los métodos. Un tanque de 16544 (l) es el promedio de los valores obtenidos. El coeficiente de variación es de 0.138, lo que representa una heterogeneidad en los datos, esto se puede afirmar debido a que los métodos YAS y YBS corresponden a las metodologías más y menos conservadoras respectivamente.

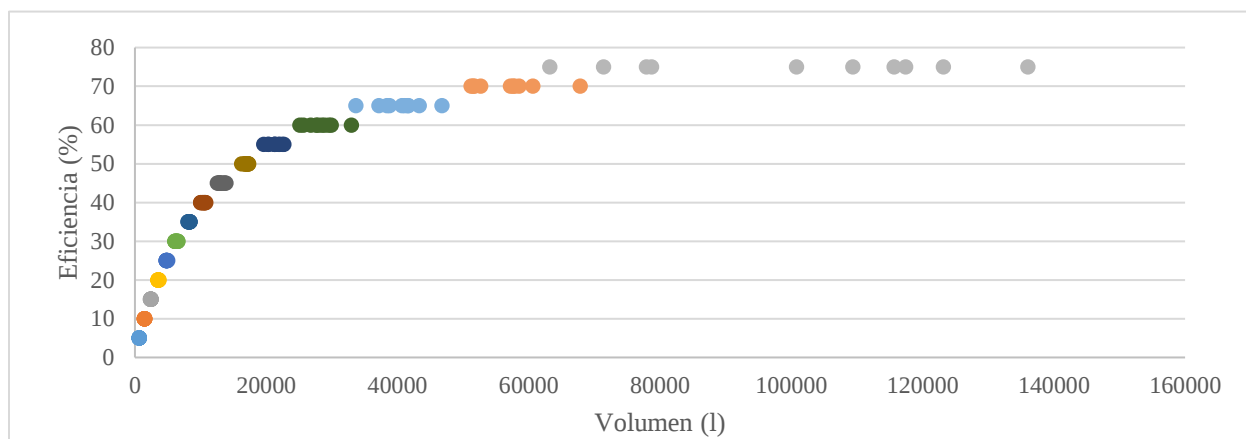


Figura 15. Precisión del método no paramétrico para diez simulaciones donde cada color representa un valor de eficiencia tipo, usando las ecuaciones de balance de masa por el método de YAS.

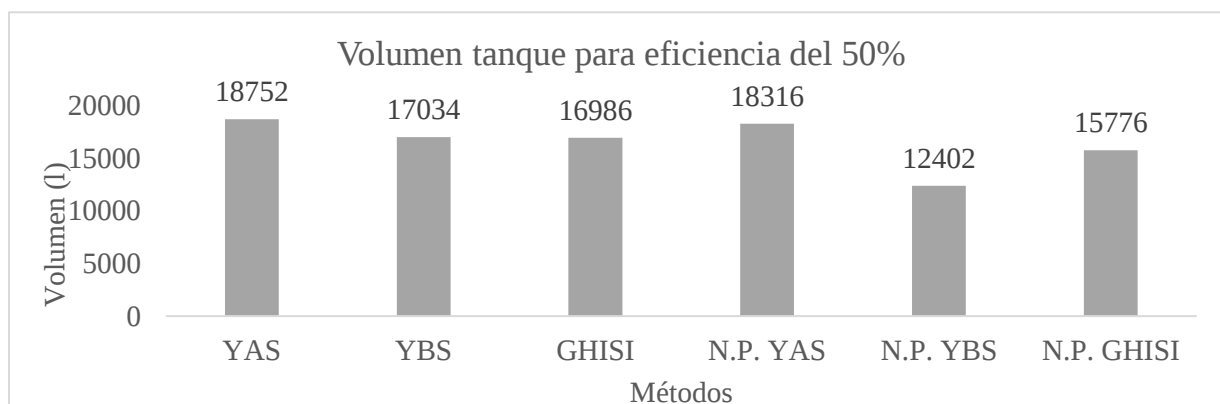


Figura 16. Volumen de tanque mediante los diferentes métodos para una eficiencia de 50%

Tabla 3.

Resultados de la aplicación de los métodos para la propuesta de dimensionamiento

Grupo	Métodos	EFICIENCIA (%)															
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	77,80
Método de balance de masa	YAS	694	1504	2480	3626	4967	6609	8597	11068	14345	18752	24663	32928	45651	68419	132337	373000
	YBS	-	-	-	370	2250	4514	6683	9181	12444	17034	23185	31318	44225	67105	130669	371000
	GUISI	479	959	1662	2516	3633	5110	7008	9415	12615	16986	22835	31016	43633	66356	130616	372000
	RIPPL	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	8103116,79
Método no paramétrico	YAS	673	1475	2477	3651	4985	6533	8428	10774	13843	22671	32990	46775	67828	115668	136064	303305
	YBS	0	0	0	0	0	1173	2758	4988	7713	16476	26393	40232	61840	107735	129820	294639
	GHISI	431	958	1670	2539	3564	4774	6284	8599	11263	19962	29961	43704	64520	111296	132475	299396

Nota: todos los volúmenes están en litros.

4.5. Propuesta de dimensionamiento

Un criterio para la selección de la capacidad óptima del tanque se basó en la recomendación hecha por (Ã & Oliveira, 2007) donde la capacidad ideal corresponde a incrementos menores del 1% de ahorro de agua potable para un incremento de la capacidad del tanque de 1000 (l). Bajo esta premisa se obtuvo que la capacidad ideal del tanque para los métodos de balance de masa es de 20 000 (l), 17 000 (l) y 18 000 (l) para YAS, YBS y Ghisi respectivamente. En la Tabla 4 se encuentra los resultados de la aplicación del criterio. En el modelo no paramétrico se usó como criterio una eficiencia aproximadamente el 65% de la eficiencia máxima adaptada de (Vargas, Dominguez, Ward & Oviedo-Ocaña, 2019), llegando así a valores de tanque de 18 316 (l), 12 402 (l) y 15 776 (l) para YAS, YBS y Ghisi respectivamente.

Considerando las imprecisiones que puede llegar a tener el método no paramétrico, es recomendable asociar el volumen del tanque a los métodos de balance de masa. Por esta razón se propone el método YAS como el tamaño más óptimo para el tanque de almacenamiento del E3T donde se obtuvo un tamaño de tanque de 20 000 (l) y una eficiencia de 51% y un ahorro de agua anual respecto al actual tanque del 11,8% (Ver Tabla 5).

4.6. Discusión

En el desarrollo de esta investigación se encontró que la demanda de riego genera un 56% gasto de agua en comparación a las actividades de descarga de inodoros y aseo que juntas generan un 44%. Esto se ve reflejado en la Figura 9 donde el día de mayor demanda corresponde al viernes y coincide con el día de mayor riego en las cubiertas. El comportamiento de la demanda cuando no se realiza el riego de las cubiertas se observa en la Figura 9 donde el valor del consumo disminuye a más de la mitad en comparación a los días que si se realiza riego. Una estrategia para seguir

aprovechando el sistema de recolección de aguas lluvias que podría implementarse a futuro, es la instalación de dispositivos de riego que aprovechen en su totalidad la humedad del suelo, y no se presente desperdicio de agua durante el riego.

A pesar de la poca información que se tiene del consumo actual del tanque, las bases de datos del número de estudiantes de cada salón, sirvió para llegar a un aproximado de la estimación de descargas de inodoros, así como las mediciones directas del consumo de agua en el riego y en las actividades de aseo. Sin embargo, se recomienda estandarizar las mediciones del consumo mediante registros continuos al medidor que se encuentra a la salida del tanque de almacenamiento, para verificar el correcto funcionamiento del sistema y detectar posibles fugas.

De las simulaciones realizadas para los métodos de balance de masa se obtuvo que la eficiencia máxima es cercana al 78%, es decir que, aunque se captara toda el agua lluvia, aun así, con la configuración actual que presenta el sistema no alcanzaría el 100% de eficiencia. Esto puede estar influenciado por las zonas impermeables que pertenecen a las áreas de captación, así como los elementos que obstruyen el paso del agua de escurrir. La terraza dos en este caso, solo cuenta con dos desagües de agua para un área considerablemente grande, esto hace que gran parte de lo que llueve se esté infiltrando en el sustrato o evaporando y no se esté comunicando con el sistema de tuberías para llegar al tanque de almacenamiento.

Tabla 4.

Aplicación del criterio para los métodos de balance de masa en la selección de la capacidad ideal del tanque de almacenamiento

YAS			YBS			GHISI		
Volumen	Eficiencia	Delta	Volum	Eficiencia	Delta	Volum	Eficiencia	Delta
(l)	(%)	Eficiencia	en (l)	(%)	Eficiencia	en (l)	(%)	Eficiencia
19000	50,25	0,96	16000	49,02	0,95	17000	50,01	0,97
20000	51,21		17000	49,97		18000	50,98	

Tabla 5.

Ahorro respecto al volumen de tanque actual para cada uno de los métodos de balance de masas

Método	Volumen	Total Rendido	Total demandado	Eficiencia	Ahorro respecto al tanque actual
o	(l)	(l)	(l)	(%)	(%)
YAS	20000	18618588,79	36358758,21	51,208	3,3
YBS	17000	18168166,81	36358758,21	49,969	7,7
GHISI	18000	18535588,85	36358758,21	50,980	6,2

4. Conclusiones

Este estudio presenta el tamaño del tanque de almacenamiento para el edificio del E3T calculado bajo 5 metodologías que simulan el rendimiento de los sistemas de recolección de agua lluvia. El tema central de esta investigación es la comparación de los resultados obtenidos con las 5 metodologías y el actual tanque que tiene el edificio, en términos de su eficiencia de ahorro de agua para las condiciones actuales de demanda, áreas de captación y patrones de precipitación. Las curvas de rendimiento en función del tamaño de tanque presentan un comportamiento similar asintótico para los métodos de YAS, YBS y Ghisi. Los volúmenes óptimos encontrados en los métodos de balance de masas fueron 20 000 (l) para YAS con una eficiencia de 51%, 17 000 (l)

para YBS con una eficiencia aproximada de 50% y 18 000 (l) para Ghisi con una eficiencia aproximada de 51%. En comparación al tanque actual solo se genera un incremento en la eficiencia de 1.74%, 4.14% y 3.39% para cada uno de los tres métodos respectivamente, la cual no compensa el incremento en el volumen. En la aplicación del método no paramétrico se asumió en concordancia a lo propuesto por (Vargas, Dominguez, Ward & Oviedo-Ocaña, 2019) donde el tamaño óptimo del tanque corresponde aquel que represente el 65% de la eficiencia máxima bajo este criterio se obtuvo tamaños de tanques de 18 316 (l) para YAS, 12 402 (l) para YBS y 15 776 (l) para Ghisi. En comparación con el tamaño actual 22 000 (l) donde se obtuvo una eficiencia promedio para todos los métodos aproximadamente de 53 % se evidencia que incrementos de volumen no aportan aumentos significativos en la eficiencia. Por esta razón se propone como el tamaño óptimo del tanque el arrojado por YAS en la aplicación de métodos de balance de masa de 20 000 (l).

Referencias Bibliográficas

- Abbasi, T., & Abbasi, S. (2011). Sources of Pollution in Rooftop Rainwater Harvesting Systems and Their Control. *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, 41(23), 2097-2167. doi: 10.1080/10643389.2010.497438
- Ã, E. G., & Oliveira, S. M. De. (2007). Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil, 42, 1731–1742. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.001>
- Aladenola, O. O., & Adeboye, O. B. (2010). Assessing the potential for rainwater harvesting. *Water Resources Management*, 24(10), 2129–2137. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y>
- Anand, C., & Apul, D. S. (2011). Economic and environmental analysis of standard , high ef fi ciency , rainwater fl ushed , and composting toilets, 92, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.005>
- Andres, J., Borrero, L., Eduardo, A., Abello, T., Claudia, M., Pinilla, C., ... Gonzalez, V. (2007). Riego Y Lavado De Zonas Duras Y Fachadas En El Campus De La Pontificia Universidad, (2), 193–202.
- ANQIP. (2009). Especificação Técnica ANQIP ETA 0701 - Versão 4, 1–24. Retrieved from <http://www.anqip.com/images/stories/comissoes/0701/ETA0701.pdf>
- Basinger, M., Montalto, F., & Lall, U. (2010a). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator, 392, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.039>
- Basinger, M., Montalto, F., & Lall, U. (2010b). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology*, 392(3–4), 105–

118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.039>

- Domènech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 598–608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.010>
- Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach, 1(1999), 323–333.
- Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban Water*, 1(1999), 323–333. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00026-1)
- Fonseca, C. R., Hidalgo, V., Díaz-Delgado, C., Vilchis-Francés, A. Y., & Gallego, I. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145, 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.057>
- Fortuño, M. (31 de marzo de 2017). World Economic Forum. Recuperado el 2 de Enero de 2019, de <https://es.weforum.org/agenda/2017/03/la-economia-del-agua-cada-vez-sera-mas-importante/>
- Ghisi, E. (2010). Parameters influencing the sizing of rainwater tanks for use in houses. *Water Resources Management*, 24(10), 2381–2403. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9557-4>
- Ghisi, E., & Marcel Cordoba, M. (2014). *Manual do usuário, Netuno 4*. Florianópolis
- Guo, Y., & Baetz, B. W. (2007). Sizing of Rainwater Storage Units for Green Building Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), 197–205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(197))

- IDEAM. (s.f.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales . Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=VInformacionIdeam&lTipo=admin&lFuncion=lstSolicitud>
- Imteaz, M. A., Rahman, A., & Ahsan, A. (2012). Reliability analysis of rainwater tanks: A comparison between South-East and Central Melbourne. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.05.009>
- Jenkins, D., Pearson, F., Moore, E., Sun, J. K., & Valentine, R. (1978). Feasibility of rainwater collection systems in California. Contribution No. 173. Californian Water Resources Centre, University of California.
- Lara Borrero, J. A., Torres Abello, E. A., Campos Pinilla , M. C., Duarte Castro, L., Echeverry Robayo, J. I., & Villegas Gonzalez, P. A. (2007). Aprovechamiento del agua lluvia para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Lee, K. T., Lee, C. D., Yang, M. S., & Yu, C. C. (2000). Probabilistic design of storage capacity for rainwater cistern systems. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(3), 343–348. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0597>
- Liaw, C.-H., & Tsai, Y.-L. (2004). Optimum Storage Volume of Rooftop Rain Water Harvesting Systems for Domestic Use. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(4), 901–912. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01054.x>
- Liu, L., & Jensen, M. B. (2018). Green infrastructure for sustainable urban water management: Practices of five forerunner cities. *Cities*, 74(January), 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.11.013>

- Mwenge Kahinda, J., Taigbenu, A. E., & Boroto, R. J. (2010). Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(13–14), 742–751. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.004>
- Okoye, C., Solyalı, O., & Akıntuğ, B. (2015). Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach. *Resources, Conservation And Recycling*, 104, 131–140. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.08.015
- Otaki, Y., Otaki, M., & Aramaki, T. (2017). Combined Methods for Quantifying End-Uses of Residential Indoor Water Consumption, 33–47. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0204-9>
- Oweis, T. Y., & Taimeh, a. Y. (1996). Evaluation of a small basin water-harvesting system in the arid region of Jordan. *Water Resources Management*, 10(1986), 21–34. <https://doi.org/10.1007/BF00698809>
- Pachpute, J. S., Tumbo, S. D., Sally, H., & Mul, M. L. (2009). Sustainability of Rainwater Harvesting Systems in Rural Catchment of Sub-Saharan Africa. *Water Resources Management*, 23(13), 2815–2839. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9411-8>
- Pandey, D. N., Gupta, a K., & Anderson, D. M. (2003). Rainwater harvesting as an adaptation to climate change. *Current Science*, 85(1), 46–59. Retrieved from wos:000184219200016
- Quadros, C., 2010. Rainwater Harvesting. Case Study: FCT/UNL Campus. (MSc thesis). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal.
- Raimondi, A., & Becciu, G. (2014). Probabilistic modeling of rainwater tanks. *Procedia Engineering*, 89, 1493–1499. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.437>
- Sanches, L. F., Terêncio, D. P. S., & Pacheco, F. A. L. (2015). Rainwater harvesting systems for low demanding applications Science of the Total Environment Rainwater harvesting systems for low demanding applications. *Science of the Total Environment*, 529(June), 91–100.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.061>

Santos, C., & Taveira-Pinto, F. (2013). Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 1–6.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.004>

Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building : modeling challenges and design implications, 35, 1049–1064. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00066-5)

Su, M. D., Lin, C. H., Chang, L. F., Kang, J. L., & Lin, M. C. (2009). A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(7), 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.005>

Su, M., Lin, C., Chang, L., Kang, J., & Lin, M. (2009). Resources , Conservation and Recycling A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation, 53, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.005>

Tomaz, P., 2005. Aproveitamento de água da chuva para áreas urbanas e fins não potáveis. Navegar, São Paulo, Brazil (in Portuguese).

Vargas, D., Dominguez, I., Ward, S., & Oviedo-Ocaña, E. (2019). Assisting global rainwater harvesting practitioners: a decision support tool for tank sizing method selection under uncertainty. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(3), 506-520. doi: 10.1039/c8ew00707a

Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2008). Rainwater harvesting : model-based design evaluation, 1–11.

Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2010). Rainwater harvesting : model-based design evaluation, 85–96. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.783>