

DISEÑO DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA EN UNA VIVIENDA USANDO LA TÉCNICA DEL SUPERADOBE.

DESIGN OF A RAINWATER HARVESTING SYSTEM IN A RESIDENTIAL HOUSE USING THE EARTH BAG TECHNIQUE



DISEÑO DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA EN UNA VIVIENDA USANDO LA TÉCNICA DEL SUPERADOBE

DESIGN OF A RAINWATER HARVESTING SYSTEM IN A RESIDENTIAL HOUSE USING THE EARTHBAG TECHNIQUE

Vallejo, M.¹, Ramírez, E.², Rocha, C.³

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia en una vivienda unifamiliar usando la técnica del superadobe en la ciudad de Manizales, Colombia. Adicionalmente, se muestran las características del diseño arquitectónico y una comparación de las principales técnicas que utilizan tierra.

El diseño presentado busca beneficiar la economía de hogares de bajos ingresos con la futura implementación de sistemas sostenibles en vivienda, que además de beneficiar el medio ambiente presentan una disminución en costos asociados por facturación, en el caso del sistema de aguas lluvias y por construcción en la técnica de superadobe.

El estudio mostrado fue realizado a partir de la consulta y análisis de datos de las precipitaciones reportadas por las estaciones aledañas al sector objeto de estudio, aprovechando la base de datos del SIMAC - Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas. Adicionalmente, el volumen de agua consumida y tarifas de los suscriptores de los estratos 1 y 2 se realiza a partir de los datos suministrados por la empresa de acueducto y alcantarillado de la ciudad. En cuanto al sistema constructivo se realiza un estudio comparativo de cada técnica analizando la frecuencia de mantenimiento, facilidad de construcción, costo y rendimiento.

La comparación realizada de las diversas técnicas de construcción en tierra muestra que la técnica del superadobe presenta mayores beneficios ya que en este tipo de proyectos el trabajo en comunidad es vital.

Con el diseño del sistema de agua lluvia se consigue recolectar $47 \text{ m}^3/\text{año}$ lo que permite un ahorro anual neto del 36,40 % del volumen de agua de la red que es aproximadamente el 29% del costo total anual del servicio de agua y alcantarillado.

¹ Arquitecta, SENA Regional Caldas, Investigadora Experta, mvallejo@sena.edu.co, ORCID ID 0000-0002-3705-4497

² Tgo. Desarrollo Gráfico de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería, SENA Regional Caldas, Auxiliar de Investigación, erika.152217@gmail.com

³ Ingeniero electricista, SENA Regional Caldas, Investigador experto, crochaos@sena.edu.co, ORCID ID 0000-0002-8229-3251



Este trabajo establece las bases para construcciones futuras con una perspectiva ambiental, aprovechando los recursos naturales, diseñando viviendas dignas, confortables, de bajo costo, pero de fácil implementación.

Abstract

This paper presents the design of a rainwater harvesting system in a single-family house using the earthbag technique in the city of Manizales, Colombia. In addition, the characteristics of the architectural design and a comparison of the main techniques using earth are shown.

The design presented seeks to benefit the economy of low-income households with the future implementation of sustainable housing systems, which besides benefiting the environment present a decrease in associated costs for billing, in the case of the rainwater system and by construction in the superadobe technique.

The study was carried out based on the consultation and analysis of precipitation data reported by the stations near the sector under study, taking advantage of the SIMAC - Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas database. In addition, the volume of water consumed and the rates of the subscribers of economic status 1 and 2 is based on the data provided by the aqueduct and sewage company of the city. As for the construction system, a comparative study of each technique is carried out by analyzing the frequency of maintenance, ease of construction, cost and performance.

The comparison made of the different techniques of construction on earth shows that Earthbag technique presents greater benefits since in this type of projects the work in community is vital.

With the design of the rainwater system it is possible to harvest 47 m³/year which allows a net annual saving of 36.40% of the volume of water of the network that is approximately 29% of the total annual cost of the water and sewerage utility.

This work establishes the basis for future constructions with an environmental perspective, taking advantage of natural resources, designing decent, comfortable, low-cost but easily implemented housing.

Palabras clave: superadobe, agua lluvia, bioconstrucción, sostenibilidad, agua.

Keywords: earthbag, rainwater, bioconstruction, sustainability, water.



1. Introducción

Un sistema de agua lluvia pretende recolectar, almacenar, tratar y distribuir el agua producto de las precipitaciones, con el fin de aprovecharla en usos domésticos, agrícolas o incluso como mecanismo de control de inundaciones dependiendo de las dimensiones del sistema. Sus principales componentes son: captación y conducción, interceptor de primeras aguas o prefiltrado, almacenamiento, tratamiento del agua, bombeo y distribución.

A continuación, se describen las principales ventajas y desventajas de un sistema de agua lluvia.

Ventajas y desventajas de un sistema de agua lluvia

Entre las ventajas y desventajas de un sistema de agua lluvia se encuentran las siguientes (CAWST, 2011):

- Evita los costos de los sistemas de distribución (acueducto) debido a la cercanía entre el punto de captación y los puntos de consumo.
- Permite disminuir el volumen demandado de la red pública de agua.
- Proporciona una reserva de agua en caso de emergencia, desastres naturales o inconvenientes con la red pública.
- En algunos casos puede usarse como control de inundaciones durante períodos de fuertes lluvias.
- Reducción de la operación y mantenimiento del sistema ya que el usuario tiene el control de la captación, almacenamiento y filtrado del agua.
- La tecnología empleada es sencilla, relativamente fácil de construir, instalar y operar.
- Es relativamente fácil de reconfigurar, expandir o, en algunos casos reubicar.
- Es posible capacitar a los usuarios finales en la construcción e instalación del sistema.
- Los usuarios pueden ahorrar dinero a largo plazo debido a su poca o nula dependencia de la red pública u otros proveedores.
- Los costos de operación y mantenimiento son despreciables.
- El agua lluvia suele poseer mejores propiedades físicas y químicas que las fuentes de agua superficiales y subterráneas expuestas a contaminación.
- El agua recolectada de los techos es generalmente de calidad aceptable para uso y consumo doméstico.
- La recolección y tratamiento del agua lluvia permite a los usuarios acceder a un suministro de agua de buena calidad lo que podría mejorar su salud.
- El sistema utiliza estructuras existentes (techos, patios, parques, entre otros).
- Posee pocos impactos ambientales negativos en comparación con los sistemas convencionales.
- El desarrollo del sistema se basa en la autogestión y ayuda a la comunidad.



Entre las desventajas del sistema se encuentran: Baja calidad del agua debido a la contaminación del aire, escasez de espacio y alto costo de la tierra.

- Incertidumbre del suministro de agua lluvia debido a la variación climática.
- Los costos de capital que se requieren para construir e instalar el sistema pueden ser altos para los usuarios finales (los estratos más bajos lo pueden percibir como un sistema costoso).
- El mantenimiento y limpieza del sistema son fundamentales para una adecuada operación.
- Puede ser un foco de mosquitos si los tanques de almacenamiento no se cubren adecuadamente.
- Falta de políticas públicas que incentiven masivamente la implementación del sistema.
- Falta de políticas públicas que integren los sistemas de agua lluvias al plan de manejo de recursos hídricos.
- Carencia de subsidios económicos para apoyar a los hogares en su implementación.
- Preocupación de que la instalación de sistemas de recolección de agua lluvia impida a los hogares calificar para futuras opciones de suministro de agua con niveles de servicio más altos.

De acuerdo a los sistemas que se han venido implementando en la captación de aguas lluvias, se observa que estos sistemas son costosos para ser implementados en los estratos de bajos ingresos, debido a que no cuentan con la capacidad económica para comprar y mantener un sistema de dichas características, sumado al desconocimiento frente a procesos de recolección y tratamiento, así como a sus ventajas y beneficios a largo plazo. También se identifica la falta de conciencia y control sobre el consumo del recurso hídrico, el desaprovechamiento de las aguas lluvias establece una dependencia total a la empresa de acueducto de la ciudad lo cual genera altos costos en la facturación del servicio, que podrán ser reducidos con la implementación de un sistema adaptable a viviendas unifamiliares, accesible para familias de estrato 1 y 2 de la ciudad de Manizales.

El presente artículo tiene como propósito evidenciar los resultados del proyecto de investigación en curso *“Diseño de un sistema residencial a bajo costo para la recolección y tratamiento de agua lluvia como fuente de abastecimiento de viviendas unifamiliares”* en donde se evalúa como componente principal de una vivienda sostenible el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, adicionalmente, se presenta el diseño de una vivienda de bajo costo con la técnica de superadobe o tierra ensacada como objeto arquitectónico para el dimensionamiento y especificación del sistema, concebidos o implementados para vivienda estrato 1 y 2 de la ciudad de Manizales. Esto con el fin de ayudar a contrarrestar los efectos del cambio climático y la necesidad de optimizar recursos. También se busca beneficiar la economía de hogares de bajos ingresos con la futura implementación de sistemas sostenibles en vivienda, que además de beneficiar el medio ambiente presentan una disminución en costos asociados por facturación, en el caso del sistema de aguas lluvias y por construcción en la técnica de superadobe.

Como objetivos específicos del sistema de aprovechamiento de agua lluvia se tienen los siguientes:



1. Realizar un estudio de acuerdo con los sistemas de captación de aguas lluvias que se han desarrollado en los últimos años definiendo características y costos de implementación y mantenimiento como punto de partida para el diseño de un nuevo sistema de menor costo.
2. Realizar un estudio del comportamiento frente al consumo de agua en viviendas en un sector de estrato 1 y/o 2 de la ciudad de Manizales caracterizando tipos y cantidades de consumo estándares estableciendo posibles reducciones con la implementación de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias.
3. Diseñar un sistema de captación, almacenamiento y potabilización de aguas lluvia que permita una fácil instalación y reutilización del recurso hídrico dentro de una vivienda unifamiliar como aporte a la disminución de consumo de agua potable suministrada por la empresa de acueducto y reducción en el costo de facturación.
4. Validar con la comunidad estudio y alcaldía de Manizales el diseño del sistema frente a componentes, estadísticas de consumo y reducción en facturación con el fin de viabilizar su implementación en viviendas unifamiliares.

Como referencias teóricas a nivel arquitectónico se retoma el planteamiento de la *Vivienda social Progresiva* como concepto de expansión y crecimiento, al permitir reducir la inversión inicial y ser transformada y mejorada con el tiempo acorde a las necesidades, posibilidades y preferencias de quien la habite (Abreu and Courte, 2013b).

Como sistema constructivo se analiza la construcción en superadobe, la cual combina la técnica de tierra apisonada junto con bolsas tejidas desarrollada por el arquitecto Iraní Nader Khalili. Esta técnica consiste en llenar los sacos con tierra húmeda compactada (Hunter and Kiffmeyer, 2004). La técnica del superadobe o tierra ensacada es una forma constructiva reciente y en muchos países carece de estándares que garanticen su correcta implementación como es el caso de Colombia. A pesar de lo anterior, se ha encontrado un referente que utiliza y promueve la técnica como una solución en el objetivo de obtener viviendas seguras y de bajo costo. Dicho referente es Nepal, un país al sur de Asia que debido a su ubicación geográfica posee alta actividad sísmica, evidencia de ello es el terremoto de abril de 2015 con una intensidad de 7,8 grados en la escala de Richter (para tener una referencia de su magnitud, podría compararse con el terremoto del eje cafetero en enero de 1999 el cual fue de 6,2 grados en la escala de Richter, es decir el terremoto de Nepal liberó aproximadamente 32 veces más energía que el terremoto del eje cafetero), dicho evento ocasionó cerca de 9.000 víctimas mortales, aproximadamente 22.000 heridos y cuantiosos daños materiales (DIDIER et al., 2016). A partir de lo anterior, el gobierno nepalí pudo evidenciar que las construcciones a partir de tierra ensacada o superadobe fueron una de las edificaciones que mejor se comportaron frente a dicho evento natural, ya que no tuvieron daños estructurales y por tal motivo fue considerado en las directrices para la construcción sismo-resistente (NEP, 2015).

En este artículo primero se presenta la metodología utilizada, posteriormente son mostrados los avances y resultados en función a la pertinencia de implementar la técnica en superadobe en comparación a otros



técnicas en tierra, luego los requerimientos de consumo de agua de una vivienda estrato 1 con el paso a paso para el correcto dimensionamiento y especificación técnica del sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, así como diseños y requerimientos de iluminación. Cada uno de ellos con el propósito de contribuir a la construcción de una vivienda sostenible.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se contemplaron 4 fases:

- Fase 1: para esta fase se realizó la recolección de información de sistemas y componentes desarrollados a nivel mundial con el fin de reseñar sus rendimientos y definir posibles modificaciones en un nuevo diseño optimizado en costo para esta actividad se realizó una consulta bibliográfica de artículos y patentes en diferentes bases de datos nacionales e internacionales desarrollando una matriz comparativa referenciando materiales, técnicas, implementaciones y costos, consolidando componentes comunes que permitan su réplica en un nuevo diseño que aplique a las condiciones de las viviendas de estrato 1 y 2 de la ciudad de Manizales.
- Fase 2: en esta fase se consultaron los perfiles de consumo de agua y su costo, teniendo en cuenta información suministrada por la empresa de servicio de acueducto (en este caso Aguas de Manizales S.A. E.S.P.), la cual muestra el promedio de consumo mensual de acuerdo con el estrato y las tarifas. Adicionalmente, dicha información fue contrastada con la información suministrada por algunos habitantes del asentamiento.
- Fase 3: se procedió a estimar el tamaño del tanque de almacenamiento de agua de acuerdo con los perfiles de consumo de agua y la oferta de agua lluvia establecidos en la fase 2 y se procedió a realizar el diseño arquitectónico, civil y eléctrico de la vivienda y el sistema de aprovechamiento de agua.
- Fase 4: con el diseño del sistema se cuantificó el costo de este y se presentará a la administración municipal y a la comunidad con el diseño de vivienda del proyecto "Diseño de un prototipo de vivienda de interés social empleando materiales vernáculos en la ciudad de Manizales" para su viabilidad frente a la construcción del prototipo a escala real conjunto con la vivienda de interés prioritario ya obtenida en el proyecto 2019.

3. Resultados

3.1 Vivienda unifamiliar utilizando la técnica de tierra ensacada o superadobe

A continuación, se presenta una comparación de la técnica de tierra ensacada (superadobe), tapia pisada, adobe y bahareque en relación a características como frecuencia de mantenimiento, facilidad de



construcción, requerimientos de herramientas, mano de obra especializada, costo y rendimiento con el fin de determinar la técnica que puede cubrir mejor las necesidades del proyecto.

3.1.1 Comparación de acuerdo con la frecuencia de mantenimiento

Esta característica se refiere a la frecuencia con la que se debe realizar el mantenimiento debido a su habilidad para soportar las condiciones climáticas y respuesta frente a la humedad. Al comparar las 4 principales técnicas de construcción utilizando tierra (tierra ensacada, tapia, adobe y bahareque) podemos inferir lo siguiente valoración:

(1) La técnica que más requiere mantenimiento es el bahareque o quicha debido a la facilidad de aparición de grietas debido al alto porcentaje de retracción durante el secado.

(2) La técnica de construcción empleando adobe en muchos casos no es apta para construirse en regiones con alta sismicidad, y altas precipitaciones, un mantenimiento frecuente de las paredes exteriores es necesario.

(3) La tapia pisada soporta un poco más las condiciones ambientales que el bahareque o el adobe, sin embargo, no tiene un buen comportamiento frente a los sismos.

(4) La técnica de la tierra ensacada permite un mayor control de la humedad y resistencia estructural frente a los sismos.

3.1.2 Comparación de acuerdo con la facilidad de construcción

Esta característica tiene en cuenta la complejidad de la construcción, considerando si requiere maquinaria, herramientas, materiales industriales y dificultad para el propietario constructor sin experiencia, teniendo en cuenta que el proyecto en estudio busca el desarrollo de la vivienda mediante trabajo comunitario. De acuerdo con la información previamente presentada de cada una de las técnicas podemos establecer lo siguiente valoración:

(1) Los ladrillos de adobe necesitan mucho tiempo y esfuerzo hasta que los ladrillos se puedan utilizar con eficacia. Los bloques de adobe requieren una proporción adecuada de arena, arcilla, agua, paja y en ocasiones estiércol con el fin de garantizar las condiciones adecuadas para su uso.

(2) La tapia pisada requiere de moldes temporales (tapial) donde se compacta la mezcla, lo que aumenta el esfuerzo y experiencia requerida para manipular los elementos y seleccionar la tierra apropiada.

(3) El Bahareque tradicional requiere experiencia en la preparación del entramado y la mezcla, pero no requiere la utilización de formaletas o equipo especializado.

(4) El superadobe no requiere una mezcla de tierra específica ni uso de materiales adicionales ya que el saco compensa la tierra de baja calidad. Adicionalmente, no requiere de moldes o formaletas ya que el saco realiza dicha función.

3.1.3 Comparación de acuerdo con el costo

Para comparar el costo es realizado un análisis estimado del valor por m² para cada una de las técnicas constructivas como lo evidencia la Tabla 1.

Tabla 1. Costo sistema constructivo por m²

Sistema Convencional	Tapia	Bahareque	Superadobe
\$1.329.043	\$1.607.125,50	\$1.200.000,00	\$500.838,00

Nota. Adaptado de (Construdata, 2021, Perez Pinilla, 2020)

El modelo de cálculo para el sistema convencional nace del índice de costos directos suministrados por Construdata para vivienda multifamiliar VIS en la ciudad de Cali [Construdata, 2021]. Para el caso de la tapia se asumen los valores establecidos en el Análisis de precios unitarios de viviendas tradicionales [Perez Pinilla, 2020]. El superadobe al no contar con costos publicados de referencia en Colombia, se opta por tomar los valores del Diseño de una Vivienda para la Gobernación del Atlántico en el año 2015 por Casa del Pozo, empresa dedicada a la construcción con tierra en Colombia. Para la actualización de los valores del superadobe al 2020, se toma como referencia el Índice de Costos de la Construcción de Vivienda ICCV, establecidos por el DANE para cada uno de los años comprendidos entre el 2015 y 2020. Ver Tabla 2.

Tabla 2. Índice de Costos de Construcción de Vivienda (ICCV) a 2020

Año	Índice	Costo del superadobe/m ²
2015		\$ 421.200,00
2016	3,16	\$ 434.509,92
2017	4,77	\$ 455.236,04
2018	2,49	\$ 466.571,42
2019	2,84	\$ 479.822,05
2020	4,38	\$ 500.838,25

Nota. Elaboración propia

De acuerdo con la información previamente analizada, se clasifican los siguientes sistemas constructivos de mayor a menor costo: (1) Tapia, (2) Sistema convencional (estructura en concreto), (3) Bahareque y (4) Superadobe.

3.1.4 Comparación de acuerdo con el rendimiento

Esta característica considera el tiempo requerido para construir los muros de acuerdo con la mano de obra requerida para su ejecución (*tiempo/m³*) [Minke, 2006].

- (1) La tapia pisada comparada con las otras técnicas es la que más requiere mano de obra, debido a sus requerimientos de encofrado y compactación. El rendimiento de la mano de obra considerando preparación, transporte y ejecución de forma artesanal está en el orden de 20 a 30 *horas/m³*.
- (2) El superadobe tiene características similares a la tapia pisada, como por ejemplo la necesidad de compactar los sacos. Sin embargo, no requiere el proceso del encofrado.
- (3) La construcción con adobe es una de las técnicas con mayor rendimiento, su construcción es similar a la construcción con ladrillo y una persona /día puede fabricar entre 300 - 500 adobes.
- (4) El bahareque al ser una técnica de entramado y relleno, una vez que el entramado es instalado el rendimiento es alto ya que no se debe encofrar ni compactar.

En la Tabla 3 se presenta de forma resumida la comparación de las principales técnicas de construcción en tierra teniendo en cuenta que la técnica con mayor valoración asociados a cada característica es la que cumple mejor a las condiciones del proyecto. Es de resaltar que no hay una técnica definitivamente mejor que otra simplemente hay técnicas que se adaptan mejor a un proyecto en específico, en este caso, la técnica del superadobe es la que reúne mayores beneficios para el proyecto y por dicha razón es la técnica seleccionada como parte del diseño arquitectónico y civil.

Tabla 3. Comparación de las principales técnicas de construcción en tierra.

Característica	Técnica			
	Superadobe	Tapia	Adobe	Bahareque
Mantenimiento	4	3	2	1
Facilidad constructiva	4	2	1	3
Costo	4	1	2	3
Rendimiento	2	1	3	4
Total	14	7	8	11

Nota. Elaboración propia

3.1.5 Diseño arquitectónico empleando superadobe

Se plantea el diseño de una vivienda progresiva que parte de una vivienda VIS de 40 *m²* a una vivienda NO VIS de 100 *m²*. Se propone como una vivienda flexible que puede variar de superficie útil y distribución en diseño según requerimientos de quien lo habite.

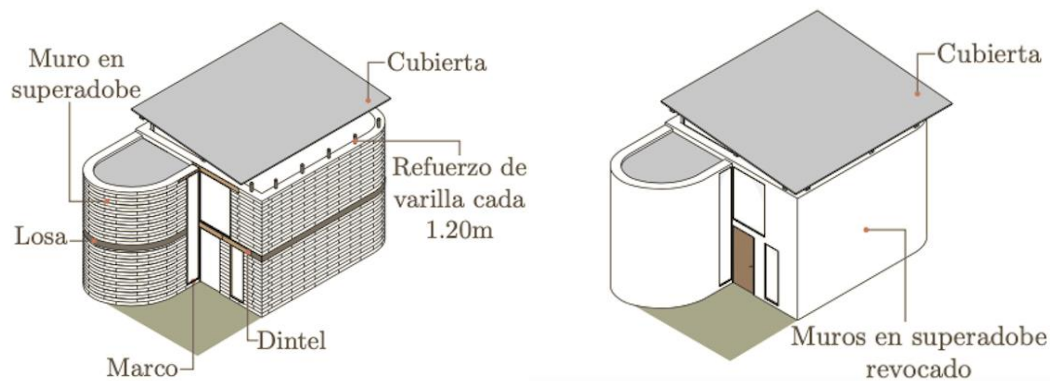
Se implementa la técnica de superadobe como sistema constructivo principal, donde sus muros son estructurales y por consecuencia fijos en el diseño de la vivienda; por el contrario, en su interior se proponen muros livianos que darán la posibilidad de integrar y modificar espacios. También se plantea el uso de la guadua como sistema constructivo independiente que soporta la cubierta de la vivienda.

La vivienda desde su diseño arquitectónico se proyecta para la implementación de un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, lo cual es determinante para la implantación en el lote y

la disposición volumétrica, que permite la correcta ubicación de los tanques de almacenamiento y distribución sin interferir visual y estéticamente con la propuesta arquitectónica.

La implementación de dichos sistemas contribuye a la sostenibilidad de la vivienda, con el ahorro de agua y el uso de materiales del lugar, que potencializan el recurso local y permiten menos gasto energético y económico en su construcción. En la Figura 1. se presenta el diseño arquitectónico de la vivienda en superadobe.

Figura 1. Vivienda progresiva en la técnica de superadobe



Nota. Elaboración propia

3.2 Sistema de aprovechamiento de agua lluvia

En esta sección se presentan los datos de las precipitaciones de las estaciones climatológicas cercanas a la zona objeto de estudio, la cantidad de agua recolectada de acuerdo con las características de la vivienda y climatología de la zona, la demanda de agua en viviendas unifamiliares de estrato 1 y 2 en la ciudad de Manizales de acuerdo a la empresa de acueducto. Por último, el tamaño del tanque de almacenamiento es calculado.

3.2.2 Requerimientos de consumo de agua en viviendas unifamiliares de estrato 1 y 2

Para dimensionar los diferentes componentes del sistema de recolección de agua lluvia se debe considerar los siguientes pasos (ver Figura 2) [McCarton et al., 2021, CAWST,2011]:

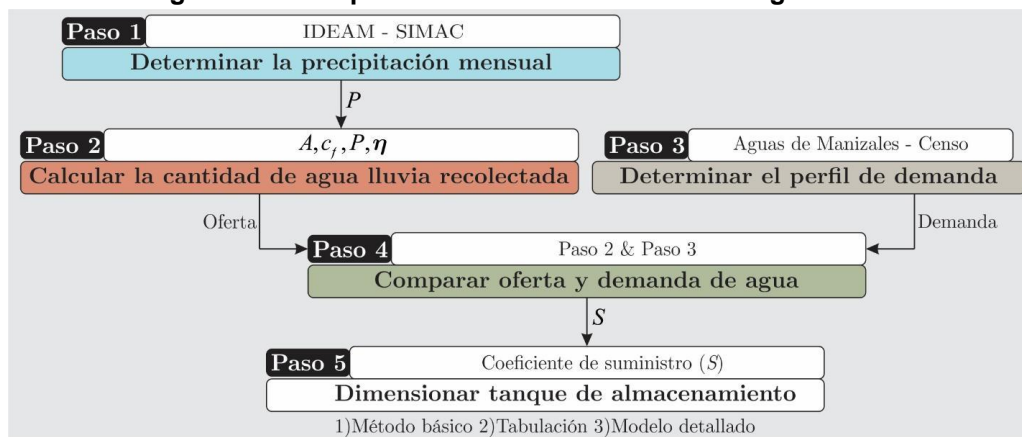
3.2.3 Paso 1: determinar la precipitación mensual

En este paso se busca recolectar el histórico de precipitaciones en la zona donde se desarrollará el proyecto.

La zona objeto de estudio es el asentamiento Chachafruto, el cual se encuentra en la comuna 7 Tesorito cerca de las estaciones climatológicas La Nubia, Expoferias y Bosque Popular, dichas estaciones hacen

parte de la red de estaciones de la ciudad de Manizales la cual mediante el Geoportal SIMAC - Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas, cualquier persona con acceso a internet puede acceder a los datos climatológicos recolectados por las diversas estaciones que hacen parte de la red. En la Tabla 4 se presenta el promedio mensual de precipitaciones en las estaciones aledañas al asentamiento.

Figura 2. Pasos para dimensionar el sistema de agua lluvia.



Nota. Elaboración propia

Tabla 4. Promedio mensual de precipitaciones en las estaciones La Nubia, Expoferias y Bosque Popular

Estación	Mes												Total [mm]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
La Nubia	74,85	93,96	144,55	166,54	167,81	93,87	61,66	64,86	105,54	174,48	167,56	81,82	1397,50
Expoferias	61,72	119,43	201,36	237,56	162,12	86,64	49,16	58,40	112,40	138,36	256,08	114,20	1597,43
El Bosque	41,08	111,40	180,85	234,32	154,12	83,56	51,20	64,00	119,45	139,68	161,52	88,48	1429,66

Nota. Elaborado a partir de los datos obtenidos en (IDE,2014)

De las tres estaciones la que reporta mayor nivel de precipitación mensual es la estación Expoferias con 1597,46 mm al año, en segundo lugar, la estación El Bosque Popular con 1429,66 mm y por último la estación La Nubia con 1397 mm al año. Teniendo en cuenta la anterior información, se utilizará el reporte de la estación La Nubia considerando que es el escenario pesimista, dicha estación tiene un promedio de precipitación mensual de 116 mm, su nivel más bajo es en el mes de julio con 61,66 mm y un nivel máximo de 174 mm en el mes de octubre, realizando la relación entre su valor máximo y mínimo de precipitación se determina una relación de 2,7174 lo que significa que la zona objeto de estudio posee precipitaciones que se distribuyen de manera relativamente uniforme a lo largo del año.

3.2.4 Paso 2: calcular la cantidad de agua lluvia recolectada

La cantidad de agua lluvia recolectada S_{SAL} depende de 4 variables: el área de captación A , precipitaciones P , coeficiente de flujo c_f y la eficiencia del sistema de filtración η . Dicha cantidad se puede estimar a partir de (1):

$$S_{SAL} = (A)(P)(c_f)(\eta) \quad (1)$$

donde,

- S_{SAL} es la cantidad de agua recolectada por el sistema de agua lluvia en m^3 .
- A es el área de captación del agua lluvia en m^2 .
- P es el total de precipitaciones en un tiempo determinado (puede ser diario, mensual o anual).
- c_f es el coeficiente de flujo, depende del material seleccionado para la cubierta.
- η es la eficiencia del filtro dada por la relación entre el flujo de salida de agua filtrada y el flujo de entrada del agua lluvia recogida de la superficie del techo. Usualmente se asume como 0,9 si no se tienen datos del fabricante.

Teniendo en cuenta (1), los valores de las precipitaciones mensuales de la Tabla 4 - estación La Nubia, un área de captación de $47 m^2$, un coeficiente de flujo c_f de 0,8 y una eficiencia del filtro de 0,9 es posible obtener los siguientes datos resumidos en la Tabla 5 cantidad de agua recolectada por el sistema de agua lluvia.

Tabla 5. Cantidad de agua recolectada por el sistema de agua lluvia

Mes	$A [m^2]$	$P [m/mes]$	c_f	η	$S_{SAL} [m^3]$
1	47	0,07485	0,8	0,9	2,5329
2		0,09396			3,1796
3		0,14455			4,8915
4		0,16654			5,6357
5		0,16781			5,6786
6		0,09387			3,1765
7		0,06166			2,0865
8		0,06486			2,1948
9		0,10554			3,5714
10		0,17448			5,9044
11		0,16756			5,6702
12		0,08182			2,7687

Nota. Elaboración propia.

3.2.5 Paso 3: calcular el perfil de demanda

Para estimar la demanda de agua fueron utilizados los datos suministrados por la empresa que presta el servicio de acueducto en la ciudad de Manizales (ver Tabla 6), se puede apreciar el perfil de consumo

para los meses del año 2020 de acuerdo al estrato 1. Se puede destacar un consumo máximo en el mes de junio equivalente a $12,06 m^3$ de agua para el estrato 1 y $12,82 m^3$ para el estrato 2 por suscriptor.

Tabla 6. Consumo promedio en para los estratos 1 y 2 en Manizales durante el año 2020 por suscriptor.

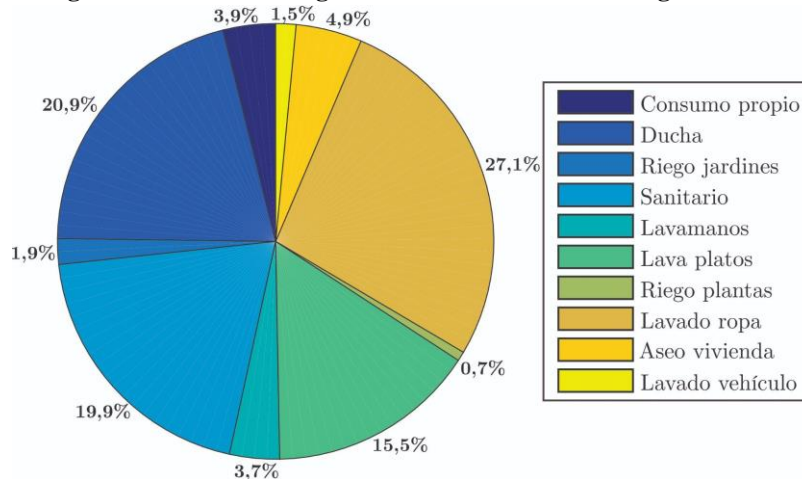
Clase de Servicio	MES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estrato 1	11,27	11,22	11,17	11,14	11,27	12,06	11,00	11,51	11,53	10,82	11,11	11,08
Estrato 2	12,56	12,17	12,14	12,41	12,25	12,82	12,48	12,48	12,76	11,88	12,22	12,23

Nota. Elaboración propia.

El sistema de agua lluvia tiene como prioridad cubrir la demanda de agua para aquellas aplicaciones que no requieren agua potable. Si con la implementación del sistema se logra alcanzar la demanda de dichas aplicaciones y adicionalmente quedan reservas de agua se puede pensar en mejorar la calidad del agua para conseguir los niveles requeridos para su consumo.

En Colombia de acuerdo con [DNP,1991] el consumo de agua tiene la siguiente distribución según su uso (ver Figura 3 Consumo de agua en Colombia según su uso). Allí se puede observar que cerca del 44% del consumo total de agua se utiliza en uso potable (Consumo propio, ducha, lavamanos, lavaplatos), mientras que el restante 56% se utiliza en usos no potables, por lo tanto, dicho porcentaje se establece como el valor a usar para el cálculo del sistema de agua lluvia.

Figura 3. Consumo de agua doméstico en Colombia según su uso.



Nota. Elaboración propia a partir de los datos tomados de [DNP,1991].

3.2.6 Paso 4: comparar la oferta y la demanda de agua

Para realizar la comparación de la cantidad de agua recolectada versus el agua no potable requerida se hace uso de la Tabla 7, y dependiendo del valor del coeficiente de suministro S el cual relaciona la oferta y demanda de agua es posible tomar diferentes decisiones. En la Tabla 8 son presentadas las alternativas que se pueden adoptar.

De acuerdo con lo presentado en las Tablas 5 y 6, se puede concluir que el agua recolectada por el sistema de agua lluvia es menor que la demanda anual de agua. Por lo tanto, el suministro de agua de las viviendas se debe complementar con otras fuentes.

Al analizar la información presentada en la Tabla 7 se puede observar que durante todos los meses la demanda de agua es superior a la recolección de agua del sistema, por lo que hay un déficit total de agua anual de aproximadamente $87,8 \text{ m}^3$ (columna 7: Def/Sup) por lo que es necesario continuar utilizando la red de acueducto local para suplir la carencia de agua. Adicionalmente, en la columna 8 se muestra el coeficiente de suministro S , la cual nos indica que el sistema de agua lluvia tendrá la capacidad de aportar 33,8730% del agua requerida no potable durante el mes más seco (mes 7, correspondiente a julio), aproximadamente el 97% del agua demandada durante el mes más lluvioso (octubre) y un promedio anual de 62,7280% de la demanda total de agua no potable, equivalente a 35,1277% de la demanda total de agua anual.

Tabla 7. Comparación de la oferta y demanda de agua lluvia mensual.

Mes	P [mm]	S [m ³]	D_T [m ³]	D_{NP} [m ³]	D_P [m ³]	D_T		D_{NP}	
						Def/Sup [m ³]	S_{D_T} [%]	Def/Sup [m ³]	$S_{D_{NP}}$ [%]
1	74,85	2,5329	11,27	6,3112	4,9588	-8,7371	22,4749	-3,7783	40,1338
2	93,96	3,1796	11,22	6,2832	4,9368	-8,0404	28,3387	-3,1036	50,6049
3	144,55	4,8916	11,17	6,2552	4,9148	-6,2784	43,7921	-1,3636	78,2001
4	166,54	5,6357	11,14	6,2384	4,9016	-5,5043	50,5899	-0,6027	90,3391
5	167,81	5,6787	11,27	6,3112	4,9588	-5,5913	50,3877	-0,6325	89,9780
6	93,87	3,1766	12,06	6,7536	5,3064	-8,8834	26,3396	-3,5770	47,0351
7	61,66	2,0866	11	6,1600	4,84	-8,9134	18,9689	-4,0734	33,8730
8	64,86	2,1949	11,51	6,4456	5,0644	-9,3151	19,0692	-4,2507	34,0521
9	105,54	3,5715	11,53	6,4568	5,0732	-7,9585	30,9755	-2,8853	55,3134
10	174,48	5,9044	10,82	6,0592	4,7608	-4,9156	54,5693	-0,1548	97,4453
11	167,56	5,6702	11,11	6,2216	4,8884	-5,4398	51,0372	-0,5514	91,1378
12	81,82	2,7688	11,08	6,2048	4,8752	-8,3112	24,9891	-3,4360	44,6233
Total	1397,5	47,2914	135,18	75,7008	59,4792	-87,8886	35,1277	-28,4094	62,7280

Nota. Elaboración propia. P : precipitación mensual, S : cantidad de agua recolectada, D_T :demanda total de agua, D_{NP} : demanda de agua no potable, D_P : demanda de agua potable, Def/Sup : déficit o superávit, S_{D_T} : coeficiente de suministro considerando demanda total. $S_{D_{NP}}$: coeficiente de suministro considerando demanda no potable.

Tabla 8. Indicadores de decisión de acuerdo al coeficiente de suministro de agua.

Coeficiente de suministro (S)	Indicador
$S > 100\%$	- Indica que el agua recolectada es mayor que la demanda anual de agua no potable. Es decir, el exceso podría almacenarse y tratarse para suplir necesidades adicionales.
$S < 100\%$	- Indica que el agua recolectada es menor que la demanda anual de agua no potable. Es decir, se debe complementar el suministro con otra fuente de agua.
$S = 100\%$	- Indica que el agua recolectada es igual a la demanda anual de agua no potable.

Nota. Adaptado de [McCarton et al., 2021].

3.2.7 Paso 5: dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Para estimar el tamaño del tanque de almacenamiento se tuvo en cuenta lo propuesto en [McCarton et al., 2021] donde se considera un período sin lluvia de 18 días al año ($18/365 = 5\%$), también indican que la capacidad de almacenamiento debe ser el valor más pequeño entre el 5% del agua recolectada anualmente o el 5% de la demanda total anual de agua no potable. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 9 se presentan los resultados de lo solicitado.

Tabla 9. Datos para determinar el tamaño del tanque

	S_{SAL} anual [m^3]	D_{NP} anual [m^3]
Total	47,2914	75,7008
5%	2,36457	3.78504

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 9. Datos para determinar el tamaño del tanque, el 5% del agua recolectada en un año corresponde a $2,3645 m^3$ mientras que el 5% de la demanda de agua no potable durante un año corresponde a $3,78504 m^3$, por lo tanto, el tamaño del tanque a utilizar será de $2,3645 m^3$ correspondiente a 2.364 litros.

3.2.7 Comparación del sistema de agua convencional y el sistema de aprovechamiento de agua lluvia

El consumo de agua anual en $m^3/año$ para el estrato 1 en la ciudad de Manizales es 135,18 de acuerdo con lo establecido previamente en la Tabla 7. Comparación de la oferta y demanda de agua lluvia mensual. Para establecer el costo anual del sistema de agua convencional se tiene en cuenta las tarifas de agua y alcantarillado para los diversos estratos y tipo de uso establecidos por la empresa de servicios públicos Aguas de Manizales para el año 2021 presentados en la Tabla 10.

Considerando que para el estrato 1 se presenta una tarifa de \$1.922,70 de cargo fijo para el acueducto, \$ 1.709,62 de cargo fijo para el alcantarillado, consumo básico de acueducto \$ 857,58 y consumo básico de alcantarillado \$ 730,48 mensualmente, el costo mes a mes y anual al usar el sistema convencional de suministro de agua es presentado en la Tabla 11.

Tabla 10. Tarifas aplicadas a los usuarios de Aguas de Manizales a partir de enero de 2021.

Estrato/tipo de uso del servicio	Acueducto	Alcantarillado	Acueducto	Alcantarillado
	Cargo Fijo	[mes/suscriptor]	Consumo básico	[\$/m ³]
Estrato 1	\$ 1.922,70	\$ 1.709,62	\$ 857,58	\$ 730,48
Estrato 2	\$ 3.117,89	\$ 2.772,36	\$ 1.390,67	\$ 1.184,56
Estrato 3	\$ 4.417,01	\$ 3.927,51	\$ 1.970,12	\$ 1.678,13
Estrato 4	\$ 5.196,48	\$ 4.620,60	\$ 2.317,79	\$ 1.974,27
Estrato 5	\$ 7.794,72	\$ 6.930,90	\$ 3.476,69	\$ 2.961,41
Estrato 6	\$ 8.314,37	\$ 7.392,96	\$ 3.708,46	\$ 3.158,83
Industrial	\$ 6.755,42	\$ 6.006,78	\$ 3.013,13	\$ 2.566,55
Comercial	\$ 7.794,72	\$ 6.930,90	\$ 3.476,69	\$ 2.961,41
Oficial	\$ 5.196,48	\$ 4.690,60	\$ 2.317,79	\$ 1.974,27

Nota. Elaboración propia.

Tabla 11. Costo anual del servicio de acueducto y alcantarillado para el estrato 1.

Mes	D_T [m ³]	Acueducto		Alcantarillado	
		Consumo	Cargo Fijo	Consumo	Cargo Fijo
1	11,27	\$ 9.664,93	\$ 1.922,70	\$ 8.232,51	\$ 1.709,62
2	11,22	\$ 9.622,05	\$ 1.922,70	\$ 8.195,99	\$ 1.709,62
3	11,17	\$ 9.579,17	\$ 1.922,70	\$ 8.159,46	\$ 1.709,62
4	11,14	\$ 9.553,44	\$ 1.922,70	\$ 8.137,55	\$ 1.709,62
5	11,27	\$ 9.664,93	\$ 1.922,70	\$ 8.232,51	\$ 1.709,62
6	12,06	\$ 10.342,41	\$ 1.922,70	\$ 8.809,59	\$ 1.709,62
7	11	\$ 9.433,38	\$ 1.922,70	\$ 8.035,28	\$ 1.709,62
8	11,51	\$ 9.870,75	\$ 1.922,70	\$ 8.407,82	\$ 1.709,62
9	11,53	\$ 9.887,90	\$ 1.922,70	\$ 8.422,43	\$ 1.709,62
10	10,82	\$ 9.279,02	\$ 1.922,70	\$ 7.903,79	\$ 1.709,62
11	11,11	\$ 9.527,71	\$ 1.922,70	\$ 8.115,63	\$ 1.709,62
12	11,08	\$ 9.501,99	\$ 1.922,70	\$ 8.093,72	\$ 1.709,62
Total	135,18	\$ 115.927,66	\$ 23.072,40	\$ 98.746,29	\$ 20.515,44

Nota. Elaboración propia.



Como se estableció previamente en la Tabla 7. Comparación de la oferta y demanda de agua lluvia mensual, el sistema propuesto de acuerdo con las 4 variables (precipitación, área de la cubierta, coeficiente de flujo y eficiencia del filtro) puede recolectar aproximadamente $47,2914 \text{ m}^3/\text{año}$ (ver columna 3 de la Tabla 7). De acuerdo con lo anterior y considerando una demanda total de agua anual de $135,18 \text{ m}^3$, se puede inferir que el ahorro anual neto es cerca del 36,40 % en volumen de agua de la red. Por otro lado, el ahorro mensual y anual al implementar el sistema de agua lluvia se puede observar en la Tabla 12.

4. Conclusiones

- La implementación de la técnica de superadobe brinda beneficios económicos en la construcción de un sistema a base de materiales locales de bajo impacto ambiental. También abre la posibilidad a la autoconstrucción al ser una técnica sencilla de ejecutar, sin uso de maquinaria pesada y sin necesidad de mano de obra calificada. Si bien la técnica no cuenta con el suficiente reconocimiento en el país para el aval de licencias constructivas, experiencias en el exterior como es el caso de Nepal, utiliza y promueve la técnica como una solución de viviendas seguras de bajo costo.
- El modelo de vivienda social progresiva posibilita acceso a la adquisición de vivienda, al disminuir su inversión inicial y permite su crecimiento con el transcurso del tiempo. Siempre y cuando se cuente con la debida planificación, acompañamiento arquitectónico y estructural para no caer en un panorama de vivienda informal. También aporta a la deconstrucción de las ciudades, en el actual modelo de vivienda social, homogénea y masiva, con la construcción de viviendas diversas y flexibles.
- Con el sistema convencional de suministro de agua el volumen correspondiente al consumo para el estrato 1 en Manizales es de 135,18 en $\text{m}^3/\text{año}$ y su costo anual en $\text{COL}\$/\text{año}$ teniendo en cuenta acueducto y alcantarillado es de $\$258.261,79$ correspondiente a la suma de los costos fijos y a sus correspondientes consumos básicos. Por otro lado, al tener en cuenta que el sistema de agua lluvia recolecta $47,2914 \text{ m}^3/\text{año}$ esto permite un ahorro anual neto del 36,40 % del volumen de agua de la red y un ahorro anual neto de $\$ 75.101,5807$ que es aproximadamente el 29% del costo total anual del servicio de agua y alcantarillado. Es de resaltar que el volumen total de agua recolectada es utilizado con fines no potables ya que la capacidad de recolección no permite suplir el consumo de agua potable.

Tabla 12. Ahorro mensual y anual con el sistema de agua lluvia en el estrato 1.

Mes	Recolección	Ahorro [\$]		
		Acueducto	Alcantarillado	Combinado
1	2,5329	\$ 2.172,1850	\$ 1.850,2503	\$ 4.022,4353
2	3,1796	\$ 2.726,7669	\$ 2.322,6389	\$ 5.049,4057
3	4,8916	\$ 4.194,9143	\$ 3.573,1955	\$ 7.768,1098
4	5,6357	\$ 4.833,0753	\$ 4.116,7761	\$ 8.949,8513
5	5,6787	\$ 4.869,9313	\$ 4.148,1698	\$ 9.018,1011
6	3,1766	\$ 2.724,1550	\$ 2.320,4141	\$ 5.044,5691
7	2,0866	\$ 1.789,4045	\$ 1.524,2009	\$ 3.313,6053
8	2,1949	\$ 1.882,2701	\$ 1.603,3031	\$ 3.485,5732
9	3,5715	\$ 3.062,8243	\$ 2.608,8900	\$ 5.671,7144
10	5,9044	\$ 5.063,4981	\$ 4.313,0484	\$ 9.376,5465
11	5,6702	\$ 4.862,6762	\$ 4.141,9899	\$ 9.004,6661
12	2,7688	\$ 2.374,4579	\$ 2.022,5448	\$ 4.397,0027
Total	47,2914	\$ 40.556,1588	\$ 34.545,4219	\$ 75.101,5807

Nota. Elaboración propia.



5. Referencias.

[CAWST, 2011] CAWST (2011). Introduction to household rainwater harvesting. participant manual. Technical report, Centre for Affordable Water and Sanitation Technology.

[DNP, 1991] DNP (1991). Determinación de consumos de agua potable en Colombia, Departamento Nacional de Planeación.

[IDE, 2014] (2014). Centro de datos e indicadores ambientales de Caldas (CDIAC). IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales CORPOCALDAS. Consultado de <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/> , el día 07 de abril de 2021.

[NEP, 2015] (2015). Design catalogue for reconstruction of earthquake resistant houses. Technical Report Volumen II, Government of Nepal, Ministry of Urban Development, Department of Urban Development and Building.

[Construdata, 2021] Construdata (2021). Índice de costos, costos de construcción por m2 en diferentes tipologías. *Construdata, edición 197*.

[Abreu and Couret, 2013b] Abreu, D. G. and Couret, D. G. (2013b). Vivienda progresiva y flexible, aprendiendo del repertorio. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXIV(2):48–63

[DIDIER et al., 2016] DIDIER, M., GHOSH, S., and STOJADINOVIC, B. (2016). Vulnerability of the nepalese building stock during the 2015 gorkha earthquake. *Nepal Engineers' Association Technical Journal*.

[Hunter and Kiffmeyer, 2004] Hunter, K. and Kiffmeyer, D. (2004). *Earthbag building :the tools, tricks and techniques*. New Society Publishers, Gabriola Island, B.C.

[McCarton et al., 2021] McCarton, L., O'Hogain, S., and Reid, A. (2021). *The worth of water : designing climate resilient rainwater harvesting systems*. Springer, Cham, Switzerland.

[Minke, 2006] Minke, G. (2006). *Manual de construcción en tierra*.

[Perez Pinilla, 2020] Perez Pinilla, J. D. (2020). Análisis de los precios unitarios de construcciones tradicionales en tapia pisada en Boyacá y Santander. Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.