

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS
DENTRO DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA Y SU APORTE A LA
REDUCCIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

GABRIEL JAIME GÓMEZ OSSA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

SISTEMA DE FORMACIÓN AVANZADA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD

MEDELLIN

2023

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS
DENTRO DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA Y SU APORTE A LA
REDUCCIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

GABRIEL JAIME GÓMEZ OSSA

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Sostenibilidad

Asesor

JOSÉ ADRIÁN RÍOS ARANGO

Ingeniero Mecánico Mg.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

SISTEMA DE FORMACIÓN AVANZADA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD

MEDELLÍN

2023

05 de septiembre de 2023

Gabriel Jaime Gómez Ossa

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad”. Art. 92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma del autor

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive script that appears to read 'G. J. G. Ossa'.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo primeramente de Dios, por su comprensión, bondad y total entendimiento, a la asesoría de mi profesor José Adrián Ríos Arango por sus indicaciones y apoyo, a mi familia por entender el sacrificio en calidad y cantidad de tiempo, para compartir con ellos.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
JUSTIFICACIÓN	4
ANTECEDENTES	5
FUNDAMENTACIÓN DEL PROYECTO	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
METODOLOGÍA APLICADA	7
RESULTADOS	8
CÁLCULO DE VOLÚMENES DE ALMACENAJE	8
VARIABLES	8
METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE DIMENSIONAMIENTO TANQUES DE ACUMULACIÓN	9
MÉTODO RACIONAL	10
MÉTODO ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD	11
MÉTODO DEL BALANCE DEL AGUA	12
MÉTODOS DE FEWKES	12
MÉTODO DE RIPPL	13
EJEMPLO COMPARATIVO	14
ANÁLISIS DE RESULTADOS	22
PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE VOLÚMENES DEL TANQUE PARA RECOLECCIÓN DE AGUA LLUVIA PARA UNA OBRA DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA	24
IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA UTILIZACIÓN DE AGUAS LLUVIAS Y SUS REQUERIMIENTOS PARA EL USO	25
NECESIDADES DE TRATAMIENTO DE ACUERDO A IDENTIFICACIÓN DE SU USO ...	27
DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA	29
ANÁLISIS DE INVENTARIOS	31
BALANCE HÍDRICO	31
IMPACTO HÍDRICO	36
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variables determinación Volumen de almacenamiento	9
Figura 2 Esquema de bio filtración lenta con arena.....	28
Figura 3 Imagen resumen del proceso de filtración solar	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coeficientes de escorrentía o escurrimiento	10
Tabla 2 Precipitación promedio mensual de 2011 a 2022 Estación pluviométrica aeropuerto José María Córdoba	15
Tabla 3 Cálculo de demanda de agua lluvia por mes	16
Tabla 4 Cálculo de la oferta de agua por mes.....	16
Tabla 5 Cálculo de volumen necesario por mes para atención de necesidades de uso de agua lluvia. Método de la OPS	17
Tabla 6 Cálculo del agua lluvia al final del día , St.	18
Tabla 7 Aplicación de la Ecuación 8 para obtener el volumen de almacenamiento V_t , por periodos de un mes	20
Tabla 8 Cálculo de Volumen promedio por mes con aplicación de área óptima.....	21
Tabla 9 Cálculo del volumen de acumulación con base en la aplicación de la Ecuación 11	22
Tabla 10 Tabulación de las salidas obtenidas mediante la aplicación de los diferentes métodos	23
Tabla 11 Matriz de elección de método para la obtención del volumen de almacenamiento	24
Tabla 12 Parámetros límites del agua para la fabricación de concretos	26
Tabla 13 Identificación de usos en procesos constructivos y necesidades de tratamiento	27
Tabla 14 Distribución del uso del agua lluvia captada en procesos constructivos	32
Tabla 15 Balance Hídrico Agua de fuente usualmente captada	33
Tabla 16 Totales Balance Hídrico Agua Lluvia.....	36
Tabla 17 Cálculo de los factores de calidad de agua superficial industrial, para la extracción y la descarga	38
Tabla 18 Cálculo de los factores de calidad del agua superficial doméstica, para la extracción y la descarga.....	38
Tabla 19 Cálculo del Impacto hídrico causado por el uso de las fuentes usualmente utilizadas, Línea Base	39
Tabla 20 Cálculo del impacto hídrico causado por el uso del agua lluvia almacenada (37,3% del consumo total)	40

RESUMEN

En los proyectos de construcción se hace un uso indiscriminado del agua, sin tener en cuenta los costos asociados a su consecución y evacuación, además de no tener en cuenta que es un recurso limitado y que su uso indebido, acarrea consecuencias a nivel general dentro del planeta. Reducir el consumo de agua potable dentro de los proyectos de construcción, es necesario para ayudar a la conservación de este recurso, también reduciendo los costos del proyecto, por el uso de una fuente alternativa que nos brinda la naturaleza.

Es necesario buscar fuentes alternativas que permitan reducir el uso de agua potable dentro de los proyectos de construcción.

Una alternativa es el aprovechamiento del agua lluvia, su recolección, almacenamiento y utilización dentro de los procesos constructivos, así como también el desarrollo de su uso no solo como agua servida, sino que también para ser utilizada en procesos de fabricación de concretos y morteros; para lo cual se proponen algunos métodos para el tratamiento del agua lluvia, para viabilizar su uso dentro de estos procesos.

En este trabajo se presenta una propuesta, mediante la búsqueda bibliográfica de los métodos para la cuantificación de volúmenes de acumulación del agua lluvia, con base en las diferentes variables involucradas y por medio de un ejemplo comparativo se determinan los volúmenes óptimos, su destinación en los procesos constructivos y mediante el análisis de la huella hídrica, se obtiene el porcentaje de reducción del consumo de agua y su reducción al impacto hídrico.

Al aplicar esta propuesta, dentro del proyecto analizado de construcción de viviendas en el sector del alto del Escobero, del municipio de Envigado se obtiene una reducción del 37,4% en el consumo de agua dulce y a su vez reduce el impacto hídrico en un 54,7% dentro de la zona donde fue analizado.

PALABRAS CLAVES: Aprovechamiento de agua lluvia, Obras de Construcción, Agua Potable, Fuente alternativa de agua

ABSTRACT

In Construction sites, the indiscriminate use of the drinking water, no matter cost in terms of consecution and evacuation, besides the scarce of this resource and its imitated existence inside this planet, carries in to serious consequences for the planet.

To reduce the drinking water consumption in Construction sites, is necessary for the conservation of the water resource, besides reducing cost for the Project Budget, using Rainwater as alternate source giving us for the nature.

One of this alternate sources it is the Rainwater Harvesting, including its catching, storage and uses in the constructive process, and not only as grey water, but also incorporating it in the production of concretes and mortar inside Construction site; for which some methods for the treatment of rainwater are proposed, to enable its use within these processes.

This paper presents a proposal through the bibliographic search of the methods for the quantification of rainwater accumulation volumes, based on the different variables involved and by means of comparative example, the optimum volume is determined, their destination in construction processes and through the analysis of the water footprint, the percentage reduction in water consumption and it's reduction in water impact is obtained.

By applying this proposal, within the housing construction project analyzed in the Alto del Escobero sector, of the municipality of Envigado, a 37,4% reduction in the consumption of fresh water is obtained and in turn reduces the water impact by 54,7% within the area where it was analyzed.

KEY WORDS: Rainwater Harvesting, Construction Site, Drinking Water ,Alternative Water Sources.

INTRODUCCIÓN

El uso del agua en el mundo se ha multiplicado por seis, en los últimos cien años y sigue creciendo a un ritmo constante de 1 % anual, debido al cambio de los patrones de consumo, el crecimiento demográfico y al desarrollo económico, tanto así que, si la situación no cambia, el mundo enfrentaría un déficit hídrico del 40%, en el 2030 (Cambio Climático, n.d.).

Se ha reconocido ampliamente que el problema de la escasez del agua, cobra mayor relevancia en esta época y sobre todo en regiones áridas y semiáridas. Alrededor del mundo los mayores racionamientos de agua han ocurrido en el Medio Oriente, Norte de África y Asia central y es altamente probable que en la próxima década caigan sustancialmente las industrias que consuman grandes cantidades de agua en esas regiones (Hosseinian & Ghahari, 2021).

Según el programa medio ambiental de las Naciones Unidas, la construcción de edificios y toda su industria asociada consumen el 30% del agua dulce disponible del mundo; por esto es sumamente importante cuantificar por medio de indicadores ambientales y económicos, los impactos durante todo el proceso de construcción, desde la concepción, consecución de materias primas, transformación de estas materias primas, el uso, mantenimiento y la demolición del edificio. El análisis del agua usada en estos procesos a través del ciclo de vida del edificio, determinan la huella hídrica, (HH), de este, la cual debe ser tomada en cuenta para el análisis económico del proyecto, como un insumo más para el presupuesto (Rivero-Camacho & Marrero, 2022).

La metodología de la huella hídrica,(HH), ha sido aplicada a varios productos industriales, particularmente a los relacionados con la agricultura, sin embargo, en la industria de la construcción, este concepto es relativamente nuevo (Hosseinian & Ghahari, 2021).

La industria de la construcción es el segundo sector con más utilización de agua en el mundo, pero estudios particulares en la determinación de la huella hídrica han sido escasos. Se ha realizado la evaluación de la huella hídrica de algunos materiales que se utilizan en la construcción, como cemento, acero y vidrio, la determinación del agua necesaria para producirlos y el agua necesaria para asimilar los contaminantes, en la disposición a cuerpos de agua (Gerbens-Leenes et al., 2018).

En el proceso de construcción de proyectos de vivienda, es necesario el uso del agua para diversos procesos, tales como, limpieza de tapas de formaletas, lavado de fachadas, limpieza de baños, limpieza de espacios, revisiones y chequeos (pruebas de estanqueidad, pruebas de presión), aguas para curados de concretos (cilindros y elementos estructurales), lavados de tubería en bombeos, preparación de alimentos y lavados de herramientas, como también por hacer parte integral como insumo, para la producción de concretos y morteros dentro de las obras.

De acuerdo al análisis de resultados sobre el consumo del agua en las obras de construcción en edificaciones como vivienda unifamiliar entre $100 m^2$ y $200 m^2$, se consumen $105 m^3$ en los procesos constructivos, indicando esto que, para esta tipología de proyecto en específico, se consumen 684,16 L por metro cuadrado construido (Alaiza, 2004).

Para lograr reducir el consumo del agua dulce en estos procesos y así reducir el impacto hídrico de la industria de la construcción, es necesario buscar una fuente alterna diferente al consumo de agua potable.

La falta de información referente a la no obtención de retorno económico al generar infraestructuras que hagan posible la recolección y almacenamiento del agua lluvia en los proyectos de construcción, puede hacer que la inversión en un sistema de captación y distribución de agua lluvia dentro de un proyecto de construcción de vivienda sea percibido solo como un gasto, y no como una inversión.

Por otro lado, la disponibilidad del recurso de agua potable en algunas zonas de las ciudades, como sistemas de distribución de agua potable a través de red, hace que no se recurra a la búsqueda de fuentes alternas, que nos puedan suplir las necesidades del uso de agua dentro de las obras de construcción. Lo anterior se da en alguna medida por la falta de metodologías o guías que indiquen bajo qué condiciones y en qué proporción es viable la captación y distribución de aguas lluvias dentro de un proyecto de construcción y las ganancias que desde la sostenibilidad implican realizar este tipo de aprovechamiento, reduciendo el consumo de agua potable significativamente y determinando esta reducción con base en la medición de la huella hídrica durante el periodo de construcción.

JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta que a pesar que desde el año 1990, un total de 2.600 millones de personas han obtenido acceso a mejores fuentes de agua potable, aún 663 millones de personas todavía carecen de dicho acceso (ONU (2015) Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 2030, n.d.).

Adicionalmente a que, dentro de las metas de este ODS, “Aumentar sustancialmente la utilización eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir sustancialmente el número de personas que sufren de escasez de agua” , los esfuerzos por desarrollar nuevos procedimientos que permitan disminuir el consumo de agua en la industria de la construcción y la evaluación integral del impacto ambiental , no ha sido notable (Mannan & Al-Ghamdi, 2020).

La industria de la construcción consume grandes cantidades de agua durante los procesos constructivos, procesos como remojado de piezas de mampostería, mezclas de concreto y morteros, procesos de curado de elementos , lavado y triturado de materiales para agregados, como a su vez en procesos de lavados de maquinarias y equipos y procesos de demolición al final del ciclo de vida de la estructura; por lo tanto es fundamental, incluir el análisis de la huella hídrica dentro de la construcción , para abarcar toda la sostenibilidad dentro de esta industria (Ali et al., 2021).

Los fenómenos extremos de lluvias serán más frecuentes e intensos contrastando con grandes épocas de sequías, en varias zonas del mundo (Cambio Climático, n.d.); esta variabilidad puede ser aprovechada para recolectar y almacenar volúmenes de aguas lluvias en época de precipitaciones y utilizar el agua lluvia acumulada dentro de procesos constructivos en periodos secos.

Por lo anterior, toma particular importancia, desarrollar un sistema de recolección de agua lluvia en obras de construcción, de vivienda, reduciendo el consumo de agua por red y utilizando mayor volumen de esta en los procesos constructivos, a su vez, con la cuantificación de la huella hídrica, obtener el porcentaje de reducción del impacto hídrico a las fuentes usualmente utilizadas; que es lo que se presenta en este trabajo.

ANTECEDENTES

El aprovechamiento del agua lluvia para diversos fines, presenta una variedad de escenarios a lo largo de toda la civilización, sobre todo aprovechamiento para fines agrícolas principalmente de riego.

Desde inicios de la civilización el hombre en su afán de contar con este recurso y sobre todo en zonas mayormente áridas, hizo uso de sistemas para la captación de agua lluvia para utilización en labores del día a día (Ballén Suárez et al., 2006).

En el contexto mundial, han sido varias las propuestas para generar alternativas, tendientes a considerar la implementación del agua lluvia mediante su almacenamiento y su uso posterior.

En una revisión región por región de todos los continentes se describen en forma general, los diversos desarrollos, de acuerdo a la región en cuestión y a los recursos económicos disponibles para realizar inversión en estos sistemas.

Por ejemplo, en algunas zonas remotas de Asia, se han desarrollado varios sistemas para la recolección y acumulación del agua lluvia, aprovechando los recursos locales para así poder contar con este recurso para uso posterior (Biswas & Mandal, 2014).

En Taiwán, existen iniciativas de utilización del agua lluvia incluyendo desde los diseños aspectos para la implementación de sistemas de recolección y aprovechamiento, para desarrollos inmobiliarios (Cheng et al., 2006).

En Suramérica se destacan desarrollos particulares en países como Brasil, en los cuales se ha incentivado desde el gobierno nacional, la construcción de un millón de tanques para la recolección de aguas lluvias en 5 años. Incluso, se avanza alrededor de la implementación del acumulamiento de agua lluvia, como sistema regulador de condiciones de escorrentía adverso, pudiendo desempeñar un papel importante en controles de inundación y regulación de corrientes.

Para el caso particular de Colombia, los sistemas de recolección de aguas lluvias a niveles masivos, se encuentran representados en el aprovechamiento de las cubiertas de grandes extensiones construidas, como centros comerciales, Alkosto Bogotá y Alkosto Villavicencio, en donde mediante el aprovechamiento en la recolección en estas estructuras, son conducidas a contenedores, para posteriormente atender en un 75 % y un 100%, el consumo de agua potable, respectivamente, después de tratamiento, para estas instalaciones (Ballén Suárez et al., 2006).

También este sistema de recolección y aprovechamiento de agua lluvia ha sido desarrollado en Universidades, como es el caso particular del sistema de recolección de aguas lluvias y aprovechamiento posterior en descargas de baños y uso de estas aguas grises en labores cotidianas de aseo sin ningún tratamiento previo, descrito para la Universidad Nacional, en su sede de Bogotá (Ballén Suárez et al., 2006).

Del uso del agua lluvia durante el proceso constructivo en el mundo, es poco lo que se ha desarrollado, a excepción de algunos trabajos en Brasil, donde se ha empleado el agua de escorrentía y de cubiertas y sistemas de andamiaje, para realizar recolección del agua lluvia, con el fin de reducir el consumo del agua potable en el sitio de construcción (Diehl de Souza & Ghisi, 2020).

También en Brasil, fue realizado un estudio cualitativo, donde mediante la recolección de

información en 6 zonas diferentes de la región, se construyó una lista de chequeo , con información para la implementación de sistemas de recolección de agua lluvia y su utilización en obras de construcción, útil para realizar un estándar y lograr certificaciones en sostenibilidad (Zeule et al., 2020).

Fueron encontradas algunas referencias, mayormente en tesis y trabajos de grado, en donde se abordan los sistemas de recolección y aprovechamiento posterior en Colombia, sobre todo a nivel institucional y algunos cuantos, que abordan la problemática a nivel de sistemas de recolección y aprovechamiento en obras de construcción.

Dentro de los trabajos de grado, se encuentra el trabajo realizado por María Fernanda Camelo Capador, para optar al título de magister en construcción de la Universidad Nacional de Bogotá, del año 2017, donde se describen algunos elementos importantes para realizar el proceso de implementación para el uso de agua lluvia en una obra de construcción en la ciudad de Bogotá (Camelo Capador, 2017).

Dentro del trabajo de grado para optar al título de profesional de construcción y gestión de arquitectura, realizado por Natalia Rocha, Efraín Rojas y Geraldine Redondo, del Colegio Mayor de Cundinamarca, se encontró un insumo importante, que hace pensar en realizar no solo un sistema de recolección de agua lluvia dentro de una obra de construcción, sino que también se optó por un sistema de distribución de los volúmenes captados de aguas lluvias dentro de una obra de construcción (Rojas et al., 2017).

Así pues, dentro de la revisión de la literatura realizada, fue posible apreciar el desarrollo de investigaciones, aisladas y que estas pueden ser usadas para formular una respuesta integral al aprovechamiento de las aguas lluvias en una obra de construcción. Algunas de las opciones que se han propuesto para el aprovechamiento de aguas lluvias son el uso de sistemas de captación de muros, cubiertas y andamiajes, integrándolo con las listas de chequeo, para así lograr certificaciones de sostenibilidad y realizando un punto central de almacenamiento de agua lluvia, de donde sea posible realizar la distribución del agua lluvia contenida, para ser utilizada en cada uno de los procesos dentro de las obras de construcción, reduciendo el consumo del agua potable, que generalmente es utilizada, para suplir estos procesos (Diehl de Souza & Ghisi, 2020).

FUNDAMENTACIÓN DEL PROYECTO

OBJETIVO GENERAL

Formular una propuesta metodológica para la recolección de aguas lluvias dentro de un proyecto de construcción de vivienda y su aporte para la reducción de la huella hídrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar metodologías usadas para el cálculo de volumen de aguas lluvias susceptibles de aprovechamiento en un proyecto de construcción.
- Plantear potenciales usos de aguas lluvias para reúso en un proyecto de construcción.

- Realizar la medición de la huella hídrica con enfoque de ciclo de vida, identificando la reducción del consumo de agua por el uso del agua lluvia.

METODOLOGÍA APLICADA

La primera fase metodológica consistió en una revisión bibliográfica de diferentes modelos o metodologías para la estimación del volumen de almacenamiento de agua lluvia; con base en la información recolectada, se construyó una matriz definiendo las ventajas, desventajas y variables requeridas para el cálculo de este volumen, incluyendo un análisis de la viabilidad de obtención y recolección de la información, como elementos para la selección de los modelos más viables de implementar.

La segunda fase metodológica, consta en determinar las características físico-químicas del agua lluvia y sus requerimientos mínimos, para su uso en procesos constructivos y con base en esto se cuantificaron los volúmenes necesarios, para atender estos procesos. Para ello fueron efectuado balances de masa considerando la información disponible relacionada con los requerimientos mínimos y la calidad de las fuentes típicas que se usan actualmente en los procesos constructivos.

La tercera fase consistió en la evaluación de la huella hídrica en los procesos de producción para la construcción de vivienda. Con base en el manual de evaluación de la huella hídrica de acuerdo a la norma ISO 14406 ((COSUDE), 2016), se determinó el Índice de impacto hídrico y su reducción mediante el uso del agua lluvia captada, dentro de los procesos constructivos.

Todas las fases metodológicas, fueron basadas en la recolección de datos bibliográficos de las zonas circundantes a un proyecto de construcción de 33 viviendas ubicado en el sector del alto del Escobero, del municipio de Envigado elegido como unidad de análisis.

El tipo de información recolectada fue referente a los insumos necesarios para el desarrollo de la metodología, datos como pluviometría de la zona, tenores de uso de agua en materiales y procesos constructivos, áreas útiles de captación de agua lluvia, índices de escasez hídrica de la cuenca, metodologías para el cálculo de volúmenes de acumulación, entre otros.

Mediante un ejemplo comparativo del método racional, del método de la Organización Mundial de la Salud, del método del balance del agua, del método de Fewkes y del método de Rippl, se realizó la propuesta metodológica para la elección del método o de los métodos más apropiados.

Con el resultado del volumen de almacenamiento de acuerdo a la metodología de elección y a la no necesidad de tratamientos previos para la utilización del agua lluvia, de acuerdo con las propiedades físico-química del agua lluvia, según lo investigado en la segunda fase de la metodología, fue realizada la distribución de los volúmenes dentro de los procesos constructivos; con base en estos volúmenes y por medio de la aplicación de la metodología ISO 14406, para la obtención de la huella hídrica, se calcularon los porcentajes de reducción por aprovechamiento del agua lluvia y su reducción al impacto hídrico del proyecto dentro de la zona analizada, como parte de la tercera fase metodológica de esta propuesta.

RESULTADOS

En este capítulo se realiza la presentación de los resultados obtenidos indicando su aplicación, de acuerdo al estado de madurez del proyecto y a la ubicación geográfica del proyecto del mismo.

CÁLCULO DE VOLÚMENES DE ALMACENAJE

VARIABLES

Una regla básica, para el dimensionamiento de cualquier sistema de recolección de aguas lluvias, es que el volumen de agua a ser captado y almacenado, sea igual o exceda el volumen de agua usada (Krishna, n.d.).

Para la obtención de un volumen eficiente de acumulación para aprovechamiento del agua lluvia dentro de un proyecto de construcción se deben tener en cuenta, las siguientes variables.

1. Volumen de precipitación por periodo determinado de la zona del proyecto a construir.
2. Tipo de Proyecto en altura o en extensión.
3. Área disponible para la captación del agua lluvia.

Se utiliza como área aplicable, para captar el agua lluvia, estructuras impermeabilizadas, como las cubiertas en teja de zinc de las zonas de campamentos.

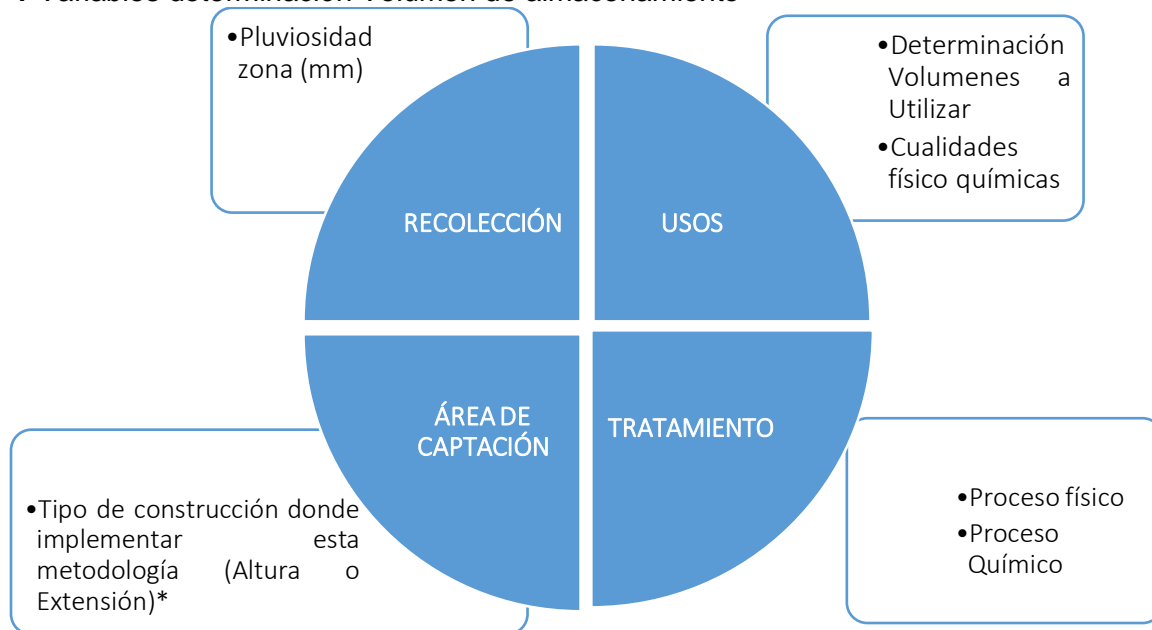
De todas formas, también pueden ser captadas aguas de escorrentías superficiales, pero por sus características (arrastre de sólidos), incrementarían los costos de tratamientos para ser utilizadas en procesos que así lo requieran.

4. Volúmenes de agua lluvia a necesitar de acuerdo a los procesos constructivos.

Las tres primeras variables son de relación directa a la obtención del volumen a almacenar y la cuarta variable entra a participar adicionando volúmenes requeridos, cuando la disponibilidad del agua lluvia en la zona del proyecto de construcción sea alta y de acuerdo a las necesidades de tratamiento previo de acuerdo a su utilización.

La Figura 1, presenta las variables que intervienen para el cálculo del volumen de almacenamiento.

Figura 1 Variables determinación Volumen de almacenamiento



* La implementación en un proyecto en altura, no es objeto de este estudio
 Fuente. Autoría propia con base en las variables descritas.

Dependiendo de la ubicación geográfica del proyecto, se considera la implementación del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, es por eso que, para zonas con niveles de pluviosidad bajos, se debe cuantificar el volumen total a recolectar mensualmente, su uso destinado y la relación costo beneficio con la implementación de este sistema de recolección de aguas lluvias.

Es también un factor predominante para la obtención del máximo beneficio la duración del proyecto de construcción, condicionando así la implementación de este sistema a los meses de duración y relacionándolos con la pluviosidad durante ese periodo de tiempo y de la disponibilidad de espacios para el almacenamiento y utilización en tiempo seco.

METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE DIMENSIONAMIENTO TANQUES DE ACUMULACIÓN

El elemento más costoso en el diseño de una red para el aprovechamiento de aguas lluvias es el tanque de acumulación, por eso se debe tener especial cuidado en su dimensionamiento óptimo, con el fin de viabilizar la implementación de este sistema (López Hernández et al., 2017).

Existen varias metodologías para la determinación de volúmenes óptimos para acumulación del agua lluvia; a continuación, se hará una breve descripción de cada una de ellas, con el fin de determinar que variables pueden ser tenidas en cuenta para el dimensionamiento de tanques de acumulación para una obra de construcción y evidenciar cuál o cuáles, de estos métodos, presentan la mejor alternativa para su aplicación.

MÉTODO RACIONAL

Esta metodología se basa en la obtención del volumen de agua lluvia a almacenar, con la determinación directa de la superficie para captar y los *mm* (Cantidad de litros (L) de agua por metro cuadrado (m^2) de área de captación), de precipitación media, obtenido de registros del IDEAM, para cada zona en particular donde se pretenda implementar este sistema de aprovechamiento de agua lluvia; además se debe tener en cuenta el factor de escurrimiento o coeficiente de escorrentía, C_e o C , que es aquel que racionaliza el agua aprovechable con base en la superficie de la estructura de captación.

$$V = A * P(t) * C_e \quad (1)$$

Donde:

V: equivale al volumen para acumulación de agua lluvia(L)

P(t): es la pluviosidad en un tiempo determinado medida en (mm)

C_e : es el coeficiente de escurrimiento, de acuerdo a la superficie donde se capte el agua lluvia (adimensional). Este coeficiente puede ser tomado de la Tabla 1

En caso de requerir unidades en metros cúbicos el resultado obtenido con el cálculo del volumen (V), debe ser dividido por 1000.

Tabla 1 Coeficientes de escorrentía o escurrimiento

Superficie	Coeficiente*	Fuente
Concreto	0,6-0,9	(CONAGUA,2016)
Pavimento	0,5-0,6	(Pizarro et al,2015)
Geomembrana (PVC)	0,85-0,95	(CONAGUA,2016)
Azulejos, teja	0,8-0,9	(CONAGUA, 2016), (OPS et al, 2003), (Solano et al, 2017)
Lámina acanalada	0,7-0,9	(CONAGUA, 2016), (OPS et al, 2003), (Solano et al, 2017)
Calles asfaltadas	0,85	(SE,2013)
Adoquinadas o empedradas con cemento	0,75	(SE,2013)
Terrazas	0,6	(SE,2013)
Adoquín sin juntear	0,6	(SE,2013)
Terracerías	0,4	(SE,2013)
Tejado duro inclinado	0,8	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Tejado plano sin gravilla	0,8	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Tejado plano con gravilla	0,6	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Tejado verde intensivo	0,3	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Tejado verde extensivo	0,6	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Superficie empedrada/superficie con empedrado compuesto	0,5	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Revestimiento asfáltico	0,8	(ESPA,2002), (Lluis-Huguet et al., 2016)
Madera	0,8-0,9	(OPS et al, 2003), (Solano et al, 2017)
Paja	0,6-0,7	(OPS et al, 2003), (Solano et al, 2017)

* (ESPA,2002) Usa el nombre de coeficiente de rendimiento de la superficie de captación.
Fuente: Adaptado de "Captación de Agua Lluvia como alternativa para el uso en la agricultura" (p.117), Roblero R, Flores J, 2022, Vivienda y Comunidades sustentables (Roblero & Flores, 2022).

Este método presenta la ventaja de ser comprendido fácilmente, pero no garantiza la obtención del volumen óptimo de almacenamiento. Se recomienda su uso para determinar información muy general del volumen a captar y tener indicios iniciales de los volúmenes a acumular, de acuerdo a una zona en particular.

MÉTODO ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD

Con base en los datos de pluviosidad obtenidos en los últimos 15 años, se determina la cantidad de agua que cae por metro cuadrado y a partir de este dato se obtienen el área de la captación y el volumen del tanque de almacenamiento, también se pueden obtener los volúmenes de aguas disponibles por cada mes y compararlos con la demanda de un mes en específico (Lima, 2004).

$$V = V_i * A_i \quad (2)$$

Donde :

V_i es el volumen del tanque para el mes i (m^3)

A_i es el volumen captado en el mes i (m^2)

D_i es el volumen demandado en el mes i que se calcula a partir de la ecuación 3

$$D_i = \frac{N_u * N_d * Dot}{1000} \quad (3)$$

Donde :

N_u es número de personas

N_d es número de días del mes

Dot es dotación (L/persona x día), al dividir por mil (1000), se obtiene el volumen en m^3

En el caso de la determinación de volúmenes dentro de las obras de construcción, Dot puede reemplazarse por el volumen demandado por la utilización del agua lluvia en los procesos constructivos, N_u y N_d , deben ser omitidos, pues este valor ya no dependería de los usuarios y número de días, sino del volumen obtenido por el cálculo de la demanda del volumen a utilizar.

La oferta de agua por mes A_i , de acuerdo a la disponibilidad con base en la pluviosidad por mes, se calcula de la siguiente forma:

$$A_i = \frac{P_{pi} * C_e * A_c}{1000} \quad (4)$$

Donde:

P_{pi} es la precipitación promedio mensual (L/ m^2), con base en los registros de lluvias entre los últimos 10 o 15 años, de la zona a implementar.

$$P_{pi} = \sum_{i=1}^{i=n} P_i / n \quad (5)$$

C_e es el coeficiente de escorrentía adimensional. Este número puede ser obtenido en la Tabla 1

A_c es la superficie de captación (m^2)

Una vez son obtenidos A_i y D_i , para cada mes, se procede a encontrar el V_i , correspondiente a cada mes.

Si el valor V_i es negativo, quiere indicar que el área de captación es insuficiente y se deberán tomar las acciones correspondientes para lograr contar con el volumen demandado.

Este método, es de fácil aplicación, tiene en cuenta la oferta y la demanda del agua y permite el cálculo a su vez del área necesaria para coleccionar el volumen requerido, como también el cálculo

del volumen del tanque (Lozano et al., n.d.).

MÉTODO DEL BALANCE DEL AGUA

Basado en un el balance del agua en un tiempo determinado, este método es empleado, para calcular el volumen del tanque de almacenamiento.

La ecuación es la siguiente:

$$S_t = S_{t-1} + R_t - D_t \quad (6)$$

$$0 \leq S_{t-1} \leq v_{Tank}$$

Donde:

S_t = Volumen de agua almacenado al final del día "t" (m^3)

S_{t-1} = Volumen de agua almacenado al inicio del día "t" (m^3)

R_t = Volumen de agua que cae sobre el área de recolección durante el día "t" (m^3)

D_t = Demanda del agua en el día "t" (m^3)

v_{Tank} = Capacidad de almacenamiento del agua (m^3)

El volumen diario de agua (m^3), recolectada (R_t), en un área de captación, se determina de la siguiente forma:

$$R_t = C \cdot A \cdot P_{eff,t} \quad (7)$$

Donde:

C = Coeficiente de escorrentía o escurrimiento, adimensional

A = Área de recolección (m^2)

$P_{eff,t}$ = Precipitación efectiva diaria al final del día "t" (mm)

La determinación del agua demandada para un día "t", se obtiene de la siguiente forma:

$$D_t = N_{cap} \cdot q \cdot \frac{\rho}{100}$$

Donde:

D_t = Demanda del agua en el día "t" (m^3)

N_{cap} = Número de residentes *

q = Total del agua diaria demandada por persona (m^3) *

ρ = Porcentaje de agua demandada que debe abastecer el sistema

* En el cálculo del volumen demandado diariamente, el producto obtenido de las variables, N_{cap} y q puede ser reemplazados por el volumen a utilizar para procesos constructivos.

Este método tiene la ventaja de conocer los valores mínimos de abastecimiento para suministrar en un periodo, como unidad el día; pero la obtención de estos valores de una zona determinada, puede que no sea conocida con certeza y hace que se deban interpolar valores o hacer supuestos, que pudieren incurrir en errores y por lo tanto, no obtener el volumen óptimo de la capacidad de almacenamiento del agua.

MÉTODOS DE FEWKES

Estos métodos son basados en los comportamientos de los sistemas de almacenamiento, de acuerdo a los periodos de tiempo de recolección (Fewkes, 2000).

El primero de los métodos, está basado en datos de recolección diarios, aplicando un balance de masas.

$$V_t = V_{t-1} + Q_t - D_t \quad (8)$$

Dentro del cual:

$$0 \leq V_t \leq S$$

Donde:

V_t : Agua almacenada en un intervalo de tiempo t (m^3)
 Q_t : Entrada de agua en un intervalo de tiempo t (m^3)
 D_t : Demanda del agua en el intervalo de tiempo t (m^3)
 S : Volumen de almacenamiento (m^3)

El segundo método se basa en obtener la eficiencia del almacenamiento adecuado E_T y se obtiene de la siguiente relación.

$$E_T = \frac{AR}{D} \quad (9)$$

Donde:

A : Área de captación (m^2)
 R : Promedio precipitación anual (m)
 D : Promedio de demanda anual (m^3)

De la expresión anterior se puede obtener el área más eficiente de captación, teniendo como variables fijas el promedio de precipitación anual (R) y La demanda promedio anual (D), para un proyecto particular y asumiendo la eficiencia máxima de la acumulación, como el cociente señalado con el número 1.

Con la siguiente expresión, puede ser obtenido el volumen del tanque (S)

$$S = X * D_d \quad (10)$$

Donde:

X : Número de días de almacenamiento
 D_d : Promedio diario de la demanda (m^3)

Las ventajas de este método radican en el uso del aprovechamiento máximo del agua lluvia dentro de un periodo de tiempo determinado, también da la escogencia de usar una eficiencia determinada de acumulación y con base en esta poder elegir el área óptima para la captación.

MÉTODO DE RIPPL

En este método se determina el volumen requerido de almacenamiento, para el periodo más largo de sequía y corresponde a la diferencia máxima acumulada entre la demanda de agua potable y el agua lluvia colectada (Matos et al., 2013).

El volumen óptimo del tanque de almacenamiento (VT), se obtiene del valor acumulativo (positivo), iterando los volúmenes mensuales de precipitación, menos los consumos mensuales estimados,

$$VT = \sum_{i=1}^n (Volci - Volpi) \quad (11)$$

Donde:

$Volpi$: Volumen disponible de agua lluvia por mes (m^3)

$$Volpi = A \cdot C \cdot Ppi \quad (12)$$

Donde:

A : Área de recolección (m^2)

C : Coeficiente escorrentía o escurrimiento, adimensional. Este número puede ser obtenido en la Tabla 1

Ppi : Precipitación promedio mensual (mm)

$Volci$: Volumen de agua potable a reemplazar con agua lluvia (m^3), o volumen requerido

Este método tiene la ventaja de que se maximiza el uso del agua lluvia, determinando los periodos secos y la reserva de acuerdo al uso, para esos periodos.

EJEMPLO COMPARATIVO

Mediante la aplicación de cada uno de los métodos descritos anteriormente, se hará un ejercicio comparativo, en el cual se determinarán las variables necesarias y los diferentes volúmenes obtenidos, pretendiendo con esto, lograr una propuesta metodológica para aplicación práctica.

A continuación, se plantea una situación particular en la cual se aplicarán las metodologías expuestas, para la obtención de un volumen de almacenamiento.

Es necesaria captar un volumen determinado (v), de agua lluvia para uso en procesos de la construcción de 30 viviendas unifamiliares, durante 1 año, en un lote de terreno, de $3000 m^2$, ubicado en la parte alta del municipio de Envigado, Antioquia y su aprovechamiento para la evacuación de las baterías de baños para provisionales de obra. Se dispone de una superficie de captación de $50 m^2$.

Se establecen variables que permanecen constantes, para este análisis y su forma de obtención.

Para este ejercicio en particular el área de captación corresponde a $50 m^2$ y la superficie de recolección a cubierta en teja de material de zinc, (c_e) 0,9, valor obtenido en la Tabla 1.

La determinación de la pluviometría de la zona, corresponde a la información obtenida para las estaciones pluviométricas circundantes a la zona del proyecto en la parte alta del municipio Envigado, Loma del Escobero, obtenida en la página web del IDEAM, en consulta, descarga datos hidrometeorológicos, periodo comprendido entre enero de 2022 y diciembre de 2022, (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], s.f).

La estación de datos meteorológicos generalmente no coincide con la ubicación exacta del proyecto, por lo tanto, es necesario buscar información de estaciones cercanas a este y que

tengan información para los periodos que se requieran.

Para este caso en particular fueron tomados los datos de la estación ubicada en el aeropuerto José María Córdoba, de la ciudad de Rionegro, Antioquía con código 23085270. Para el periodo de duración i , se consideraron de 12 meses

Tabla 2 Precipitación promedio mensual de 2011 a 2022 Estación pluviométrica aeropuerto José María Córdoba

Mes	Precipitación promedio mes (mm)
Enero	73,2
Febrero	114,3
Marzo	160,0
Abril	238,5
Junio	167,7
Mayo	263,9
Julio	144,9
Agosto	171,1
Septiembre	206,2
Octubre	225,4
Noviembre	204,3
Diciembre	98,1
Promedio	172,3

Fuente: Construcción propia, con datos obtenidos Estación pluviométrica Aeropuerto José María Córdoba estación código 23085270 (IDEAM, s.f.).

CÁLCULO DE VOLUMEN MÉTODO RACIONAL

Teniendo en cuenta la información para el área de estudio se procedió a determinar el volumen del tanque de almacenamiento mediante el método del volumen racional, considerando que es de fácil aplicación y que solo requiere promedios o valores mensuales de precipitación. De acuerdo con la ecuación 1, se tiene que:

$$V = AxP(t)xCe$$

$$A = 50 \text{ m}^2 \text{ variable fija}$$

$$Ce = 0,9 \text{ número adimensional de la Tabla 1}$$

$$P(t) = 172,3 \text{ L / m}^2 \text{ Promedio de precipitación mes obtenido de la Tabla 2}$$

$$V = 7,753 \text{ L}$$

El valor obtenido por este método corresponde a 7,753 L, como capacidad del volumen para utilizar dentro del proyecto. En este método no es tenido en cuenta el volumen requerido para utilizar dentro de la construcción, solo da una idea general de un volumen de almacenamiento del cual se tendría disponible con base en el promedio de precipitación mensual para esta zona en particular.

CÁLCULO DE VOLUMEN POR EL MÉTODO DE LA ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD

De acuerdo con la Ecuación 2

$$V = V_i * A_i$$

D_i , Se determina con base en las necesidades de uso, para cada mes dentro de la obra de construcción.

Para este ejemplo en particular, se estiman los volúmenes de evacuación para las baterías de baño para cada mes, D_i , (Columna 5 , Tabla 3), de acuerdo con el número de trabajadores por mes, (Columna 3, Tabla 3), durante el desarrollo del proyecto.

De acuerdo a la Ecuación 3, $D_i = N_u \times N_d \times Dot$, se tiene que:

Tabla 3 Cálculo de demanda de agua lluvia por mes

Mes y año	Número de días de trabajo por mes (N_d)	Número de trabajadores por mes (Cantidad)	Dotación necesaria por mes (L/persona día)	Demanda por mes D_i (L)
Enero	20	50	18	18000
Febrero	26	60	18	28080
Marzo	26	80	18	37440
Abril	20	100	18	36000
Mayo	25	100	18	45000
Junio	25	120	18	54000
Julio	26	120	18	56160
Agosto	24	120	18	51840
septiembre	26	100	18	46800
Octubre	26	100	18	46800
Noviembre	26	100	18	46800
Diciembre	20	80	18	28800

Fuente: Elaboración propia con base número de días de utilización de los servicios públicos de la construcción por mes, número de trabajadores en obra de construcción por mes y consumo por evacuación de sanitarios 6 litros por evacuación, 3 evacuaciones al día por persona.

Ahora, con base en la Ecuación 4, $A_i = P_{pi} \times C_e \times A_c$, se determina la oferta de volumen por mes (Columna 5, Tabla 4).

Tabla 4 Cálculo de la oferta de agua por mes

Mes	Precipitación promedio mes P_{pi}	Coefficiente de escorrentía C_e	Área de captación m^2	Oferta de agua lluvia por mes A_i (L)
Enero	73,2	0,9	50	3294
Febrero	114,3	0,9	50	5142
Marzo	160,0	0,9	50	7202

Mes	Precipitación promedio mes Ppi	Coefficiente de escorrentía Ce	Área de captación m ²	Oferta de agua lluvia por mes Ai (L)
Abril	238,5	0,9	50	10733
Mayo	263,9	0,9	50	11877
Junio	167,7	0,9	50	7548
Julio	144,9	0,9	50	6522
Agosto	171,1	0,9	50	7698
Septiembre	206,2	0,9	50	9278
Octubre	225,4	0,9	50	10142
Noviembre	204,3	0,9	50	9194
Diciembre	98,1	0,9	50	4415

Fuente: Elaboración propia, construida con base en la precipitación promedio mensual de la Tabla 2, el número de escorrentía 0,9 y área de captación 50 m².

Ahora con base en la Ecuación 2, se determina el volumen que se debe disponer mes a mes ,(Columna 4,Tabla 5),para la atención de suministro de agua para esta construcción y durante el periodo considerado en este ejercicio.

Tabla 5 Cálculo de volumen necesario por mes para atención de necesidades de uso de agua lluvia. Método de la OPS

Mes (i)	Oferta por mes Ai (L)	Demanda por mes Di (L)	Volumen necesario por mes Vi (L)
Enero	3294	18000	-14706
Febrero	5142	28080	-22938
Marzo	7202	37440	-30238
Abril	10733	36000	-25267
Mayo	11877	45000	-33123
Junio	7548	54000	-46452
Julio	6522	56160	-49638
Agosto	7698	51840	-44142
Septiembre	9278	46800	-37522
Octubre	10142	46800	-36658
Noviembre	9194	46800	-37607
Diciembre	4415	28800	-24386

Fuente: Elaboración propia. Aplicación de Ecuación 2, incluidas variables de demanda por mes y oferta por mes, para obtener el volumen necesario para atender la construcción durante los meses de ejecución.

Nótese que para todos los meses el valor generado,(Columna 4, Tabla 5), es negativo, indicando esto que la oferta de agua lluvia de la zona es insuficiente para atender los consumos demandados para la evacuación de baterías de baño de la construcción durante su duración, para lo cual se hace necesario el incrementar las áreas de captación de aguas lluvias para atender la necesidad específica de la construcción, para este ejercicio en particular.

Este método considera las entradas y salidas, disponibles y necesarias, para encontrar un volumen óptimo de almacenaje.

CÁLCULO DE VOLUMEN MÉTODO DEL BALANCE DEL AGUA

Para el cálculo del volumen utilizando este método, debe conocerse el registro de lluvias diario, al final del día, por lo tanto, se deben hacer uso de datos históricos para conocer el comportamiento aproximado de la zona y de esta forma simular el comportamiento durante los días en los cuales se va a realizar el proyecto de construcción.

Debido a lo anteriormente expuesto, son tomados los datos diarios del mes de menor precipitación del año inmediatamente anterior, a la fecha en que se inicia el proyecto de construcción.

Para este caso en particular asumiremos el inicio del proyecto en el mes de enero de 2023 y consideraremos entonces el valor correspondiente a la precipitación promedio mensual, mínima del año 2022, con un valor, de acuerdo a la Tabla 2, de 73,2 mm.

Con base en la Ecuación 6 y Ecuación 7, se calcula el volumen diario de acuerdo al consumo para un periodo de 30 días, correspondientes al mes de enero de 2022.

Las variables de la Ecuación 6, son:

S_t = Volumen de agua almacenado al final del día "t" (m^3)

S_{t-1} = Volumen de agua almacenado al inicio del día "t" (m^3)

R_t = Volumen de agua que cae sobre el área de recolección durante el día "t" (m^3)

D_t = Demanda del agua en el día "t" (m^3), se asume un valor de 900 L por día, correspondiente al consumo de 20 trabajadores, durante un día del mes de enero, valor tomado de la Tabla 3.

Las variables de la Ecuación 7, son:

C = Coeficiente de escorrentía o escurrimiento = 0,9 (adimensional), tomado de la Tabla 1, valor máximo correspondiente a la superficie de captación, lámina acanalada.

A = Área de recolección (m^2) = 50

$P_{eff,t}$ = Precipitación efectiva diaria al final del día "t" (mm)

Tabla 6 Cálculo del agua lluvia al final del día, S_t .

Día	$P_{eff,t}$ Lts / m^2	S_t m^3 [1]= [2]+ [3]- [4]	S_{t-1} m^3 [2]	R_t m^3 $R_t = C \cdot A \cdot P_{eff,t}/1000$ [3]	D_t m^3 [4]
31/12/2021	0	0	0	0	0,900
1/01/2022	0,465	-0,88	0,00	0,020925	0,900
2/01/2022	0,956	-1,74	-0,88	0,04302	0,900
3/01/2022	1,453	-2,57	-1,74	0,065385	0,900
4/01/2022	0	-3,47	-2,57	0	0,900
5/01/2022	0,013	-4,37	-3,47	0,000585	0,900
6/01/2022	0,394	-5,25	-4,37	0,01773	0,900
7/01/2022	22,818	-5,13	-5,25	1,02681	0,900
8/01/2022	0,924	-5,98	-5,13	0,04158	0,900
9/01/2022	0	-6,88	-5,98	0	0,900

Día	$P_{eff,t}$ Lts / m ²	S_t m ³ [1]= [2]+ [3]- [4]	S_{t-1} m ³ [2]	R_t m ³ $R_t = C . A . P_{eff,t}/1000$ [3]	D_t m ³ [4]
10/01/2022	0	-7,78	-6,88	0	0,900
11/01/2022	2,897	-8,55	-7,78	0,130365	0,900
12/01/2022	6,7	-9,15	-8,55	0,3015	0,900
13/01/2022	14,842	-9,38	-9,15	0,66789	0,900
14/01/2022	14,375	-9,64	-9,38	0,646875	0,900
15/01/2022	0,123	-10,53	-9,64	0,005535	0,900
16/01/2022	0	-11,43	-10,53	0	0,900
17/01/2022	4,934	-12,11	-11,43	0,22203	0,900
18/01/2022	0,033	-13,01	-12,11	0,001485	0,900
19/01/2022	0	-13,91	-13,01	0	0,900
20/01/2022	0	-14,81	-13,91	0	0,900
21/01/2022	0	-15,71	-14,81	0	0,900
22/01/2022	0	-16,61	-15,71	0	0,900
23/01/2022	0	-17,51	-16,61	0	0,900
24/01/2022	0	-18,41	-17,51	0	0,900
25/01/2022	0	-19,31	-18,41	0	0,900
26/01/2022	0	-20,21	-19,31	0	0,900
27/01/2022	0	-21,11	-20,21	0	0,900
28/01/2022	0	-22,01	-21,11	0	0,900
29/01/2022	0	-22,91	-22,01	0	0,900
30/01/2022	0	-23,81	-22,91	0	0,900

Fuente: Elaboración propia con base en aplicación de Ecuación 6 y Ecuación 7.

De la columna 2 , de la Tabla 6, se obtienen los valores correspondientes a los volúmenes de almacenamiento, al final de cada día del periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 a 31 de enero de 2022.

Obteniéndose valores negativos, que corresponden a déficit en el almacenamiento del día para abastecer la necesidad de atención de las baterías sanitarias de la obra de construcción, en este caso particular.

Se analizó este escenario en particular, identificando que el área de captación, es insuficiente para este mes y se debe incrementar para lograr tener una capacidad suficiente, que permita abastecer las necesidades de la construcción, para este periodo.

CÁLCULO DE VOLUMEN MÉTODO DE FEWKES

Este método presenta 2 alternativas de uso, para determinar el volumen de almacenamiento por un periodo determinado basado en el balance de masas, obtenido de la Ecuación 8 y la otra alternativa, es determinar la eficiencia del volumen almacenado, en función del promedio de precipitaciones anuales, la demanda de agua y el área de captación, obtenido de la Ecuación 9. Estos 2 métodos, no son independientes, sino complementarios, con el fin de hallar el volumen

óptimo de almacenamiento y el área óptima de captación.

Inicialmente, se obtendrán volúmenes de almacenamiento para periodos de un mes durante un año.

Tabla 7 Aplicación de la Ecuación 8 para obtener el volumen de almacenamiento V_t , por periodos de un mes

Mes	P_{pm} Lts / m^2 [1]	V_t Lts [2]= [3]+ [4]- [5]	V_{t-1} Lts [3]	Q_t Lts [4]= A .[1]. C	D_t Lts [5]
Enero	73,2	-14706,375	0	3293,625	18000
Febrero	114,3	-37644,75	-14706,375	5141,625	28080
Marzo	160,0	-67882,875	-37644,75	7201,875	37440
Abril	238,5	-93149,625	-67882,875	10733,25	36000
Mayo	263,9	-126272,25	-93149,625	11877,375	45000
Junio	167,7	-172723,875	-126272,25	7548,375	54000
Julio	144,9	-222361,5	-	6522,375	56160
Agosto	171,1	-266503,125	172723,875	7698,375	51840
Septiembre	206,2	-304024,875	-222361,5	9278,25	46800
Octubre	225,4	-340682,625	-	10142,25	46800
Noviembre	204,3	-378289,125	304024,875	9193,5	46800
Diciembre	98,1	-402674,625	-	4414,5	28800
			378289,125		

Fuente: Elaboración propia con base en la Ecuación 8 y variables fijas C y A para este ejercicio.

C = Coeficiente de escorrentía o escurrimiento = 0,9 (adimensional), obtenido de la Tabla 1

A = Área de recolección (m^2) = 50

De la información de la columna [2], de la Tabla 7, se obtienen los volúmenes de almacenamiento por mes, requeridos para el uso dentro del proyecto. Nótese que estos valores son negativos, indicando esto, que, con los volúmenes ofertados para cada periodo, no cubren la demanda de uso dentro del proyecto; lo que indica nuevamente, que para satisfacer la demanda de agua lluvia, debe ser aumentada el área de captación.

Ahora se aplicará la Ecuación 9, $E_T = \frac{AR}{D}$, para obtener la eficiencia del volumen almacenado con el área del ejemplo.

A : Área de captación (50 m^2)

R : Promedio precipitación anual (218,1 mm) Precipitación media anual Obtenido de [IDEAM], s.f).promedio de precipitación anual periodo de año 2011 al 2022.

D : Promedio de demanda anual (41,31 m^3) Volumen promedio de demanda anual (Valor promedio de la columna 3 , de la Tabla 5)

$$E_T = 0,2$$

El anterior valor indica que utilizando 50 m^2 de superficie para la captación, estamos solo aprovechando en un 20 % del volumen óptimo de almacenaje, lo que hace inviable.

Incrementando la eficiencia en un valor superior al 100 por ciento, se incrementará el área de captación y será obtenido un área óptima para el almacenaje del agua lluvia para abastecer con suficiencia la demanda para cada mes.

Con una eficiencia de magnitud, $E_T = 1,45$ y dejando constantes los valores de precipitación anual promedio y demanda anual promedio, se obtiene:

A: Área de captación ($347,64 \text{ m}^2$), área eficiente.

Tabla 8 Cálculo de Volumen promedio por mes con aplicación de área óptima

Mes	P_{pm} Lts / m^2 [1]	V_t Lts [2]= [3]+ [4]- [5]	V_{t-1} Lts [3]	Q_t Lts [4]= A .[1]. C	D_t Lts [5]
Enero	73,2	4899,516493	0	22899,5165	18000
Febrero	114,3	12567,58329	4899,51649	35748,0668	28080
Marzo	160,0	25199,90644	12567,5833	50072,3232	37440
Abril	238,5	63824,74545	25199,9064	74624,839	36000
Mayo	263,9	101404,318	63824,7455	82579,5726	45000
Junio	167,7	99885,74436	101404,318	52481,4263	54000
Julio	144,9	89073,72231	99885,7444	45347,978	56160
Agosto	171,1	90758,05046	89073,7223	53524,3281	51840
Septiembre	206,2	108466,7419	90758,0505	64508,6915	46800
Octubre	225,4	132182,5478	108466,742	70515,8059	46800
Noviembre	204,3	149301,9997	132182,548	63919,4519	46800
Diciembre	98,1	151194,6	149302	30692,6003	28800

Fuente: Elaboración propia mediante la aplicación de la Ecuación 8. Asumiendo que se incrementa el área de captación al área eficiente.

Ahora, aplicando la Ecuación 1, colocando el valor del área eficiente, $347,64 \text{ m}^2$, se obtiene un Volumen de almacenamiento total $V = AxP(t)xCe$, $V = 53,91 \text{ m}^3$.

CÁLCULO DE VOLUMEN MÉTODO DE RIPPL

Mediante la aplicación de la Ecuación 11, $VT = \sum_{i=1}^n (Volci - Volpi)$, se calculan los volúmenes necesarios a utilizar de agua lluvia y con base en la obtención del volumen precipitado por mes se cuantifica un volumen óptimo y eficiente, para la acumulación de agua lluvia durante el periodo de la construcción.

Mediante la tabulación de las variables de la Ecuación 11, se obtendrá el volumen total, con base en el acumulado de los valores positivos resultado de la resta de las variables de esta ecuación.

Tabla 9 Cálculo del volumen de acumulación con base en la aplicación de la Ecuación 11

Mes	P_{pi} Lts / m ² [1]	V_{olci} m ³ [2]	V_{olpi} m ³ [3]	V_{ti} m ³ [4]=[2] – [3]	Acumulativo positivo m ³ [5]
Enero	73,19	4,5	3,29	1,21	
Febrero	114,25	7,02	5,14	1,88	3,08
Marzo	160,04	9,36	7,20	2,16	5,24
Abril	238,51	9	10,73	-1,73	5,24
Mayo	263,94	11,25	11,88	-0,63	5,24
Junio	167,74	13,5	7,55	5,95	11,19
Julio	144,94	14,04	6,52	7,52	18,71
Agosto	171,08	12,96	7,70	5,26	23,97
Septiembre	206,18	11,7	9,28	2,42	26,40
Octubre	225,38	11,7	10,14	1,56	27,95
Noviembre	204,30	11,7	9,19	2,51	30,46
Diciembre	98,10	7,2	4,41	2,79	33,25

Fuente: Elaboración propia mediante la aplicación de la Ecuación 11. Método de Rippl

Permanece constante el área $A = 50 \text{ m}^2$

$V_{olci} = F\% \cdot Di / 1000$, este es el volumen de la demanda requerida en agua lluvia, que se afecta por un porcentaje $F\%$, este corresponde a una estimación ponderada del uso del agua lluvia en un periodo de tiempo.

En este caso se estimará, que la cuarta parte de las personas en obra harán uso del servicio de baños en un día, así que $F\% = 0,25$.

Di , corresponde a la demanda diaria de utilización del agua lluvia y que se tomará de la columna 3 de la Tabla 5.

De la tabla 9, se determina el volumen óptimo de acumulación, dato que se obtiene de la columna 5, como valor final de acumulación de valores positivos $33,25 \text{ m}^3$.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el método racional, es obtenido un valor de magnitud positiva, $7,75 \text{ L}$, que daría indicios del total del volumen que se podría obtener con base en la información pluviométrica de la zona y un área fija determinada para la captación del agua lluvia; este método no considera la demanda de agua lluvia durante la construcción del proyecto, pero si es una forma directa de obtener la oferta del agua lluvia, para un periodo en particular, de acuerdo con la utilización del promedio de precipitación para el periodo.

Con el método de la Organización Panamericana de la salud (OPS), Tabla 5, se obtienen valores de almacenamiento, con base en los periodos analizados y contempla los volúmenes requeridos para cada periodo en particular, a su vez, da indicios, al respecto de la suficiencia o no del área disponible para la captación. El método del balance de aguas, Tabla 6, da una información similar al método de la OPS, por lo tanto se puede considerar el uso de cualquiera de los dos, para obtener la información en relación a volúmenes de almacenamiento requerido, de acuerdo a la demanda para el periodo considerado; también indicando que, cuando los valores obtenidos de

volumen , tienen magnitud negativa, como se aprecian en la columna 4 de la Tabla 5 y 3 y 4 de la Tabla 6, el área de captación , no es suficiente , para implementar el proyecto de recolección de agua lluvia para la zona en particular , o es necesario regular el consumo del agua lluvia para el uso durante el periodo.

Con el método de Fewkes, Tabla 7, se obtienen volúmenes de almacenamiento, para periodos de tiempo considerados, también es posible determinar un área eficiente , para la captación del agua lluvia, pero no es tendido en cuenta la optimización del consumo del agua lluvia, a diferencia del método de Rippl, que si la considera.

Con el método de Rippl, Tabla 9, se obtiene el almacenamiento óptimo para cada periodo de tiempo considerado, teniendo en cuenta la eficiencia del consumo durante ese periodo y con la sumatoria acumulativa por periodo, columna 6 de la Tabla 9, se puede obtener un volumen de captación necesario para el desarrollo del proyecto durante el periodo analizado.

Es posible, entonces, inferir que, con la determinación de las magnitudes de los volúmenes obtenidos para almacenamiento, por medio de los métodos de la OPS y del balance del agua, se debe incrementar el área de captación para la recolección del agua lluvia, obteniendo el área óptima por el método de Fewkes, y considerando el uso racional del agua lluvia, calculado mediante el método de Rippl.

El factor importante, en la determinación de volúmenes de almacenamiento para la captación y utilización de agua lluvia dentro de un proyecto, además de depender del área de captación, toma más relevancia la determinación del consumo racional del agua lluvia, para obtener un volumen de acumulación eficiente, para su uso dentro de un periodo de tiempo considerado.

Tabla 10 Tabulación de las salidas obtenidas mediante la aplicación de los diferentes métodos

Salidas	Método Racional	Método de la OPS	Método del Balance del Agua	Método de Fewkes	Método de Rippl
<i>Almacenamiento requerido</i>	7,77 m ³			53,91m ³	33,25m ³
<i>Almacenamiento diario</i>	No	(-)	(-)	No	No
<i>Almacenamiento mensual</i>	No	No	No	(-)	(+ -)
<i>Área obtenida</i>	No	Incrementar	Incrementar	347,64 m ²	50 m ²

Fuente: Elaboración propia, con base en el análisis de los datos obtenidos mediante la aplicación de cada método.

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE VOLÚMENES DEL TANQUE PARA RECOLECCIÓN DE AGUA LLUVIA PARA UNA OBRA DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA

Mediante la relación de entradas y salidas tenidas en cuenta para la realización del ejemplo comparativo, se construye una matriz para ayudar a la elección del método apropiado para la obtención del volumen de almacenamiento.

Con base en el tipo de información disponible, entradas y la necesidad de información requerida, salidas, se podrá determinar cuál método es el más apropiado para usar para la obtención de la información más relevante y su uso dentro del proyecto de aprovechamiento de agua lluvia dentro de una obra de construcción.

El método propuesto en la Tabla 11, es construido al asignar un valor de uno, a las celdas que señalan las entradas necesarias para obtener el volumen por cada método y en las salidas, el valor de uno a las celdas con la información que arroja cada uno de los métodos.

En la fila suma cantidad de entradas, se totaliza el número de unos por cada método, como a su vez para la fila suma cantidad de salidas. En la fila inferior se muestra la relación entre el número de entradas necesarias y el número de salidas resultante, para cada método.

La elección del método apropiado depende de la información que se tiene como dato o que se puede cuantificar a través de uno de los métodos y de la información que se quiera obtener. La relación entre las entradas y salidas, puede dar información sobre la elección de cada método.

Adicional a lo anterior, dependiendo de la etapa de implementación del proyecto de aprovechamiento, puede ser elegido el método racional, cuando se disponga de poca información y se quieran revisar los volúmenes obtenibles en periodos mensuales para ver la prefactibilidad de la aplicación del aprovechamiento en la ubicación del proyecto de construcción.

También, es posible darse cuenta de la insuficiencia de las áreas de captación disponibles, mediante la aplicación de los métodos del balance del agua y de la OPS y lograr un área óptima a partir de la aplicación del método de Rippl y el método de Fewkes.

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que para la obtención del volumen eficiente para la implementación del aprovechamiento de aguas lluvias dentro de un proyecto, se deben aplicar los diferentes métodos estudiados, indicando así que la aplicación de estos métodos es complementaria de acuerdo al tipo de información disponible y a la etapa de madurez del proyecto.

Tabla 11 Matriz de elección de método para la obtención del volumen de almacenamiento

	Método racional	Método de la OPS	Método del balance del agua	Método de Fewkes	Método de Rippl
Suma cantidad de entradas	4	4	5	6	5
Ubicación	1	1	1	1	1
Área de captación	1	1	1	1	1

	Método racional	Método de la OPS	Método del balance del agua	Método de Fewkes	Método de Rippl
Precipitación promedio mensual	1			1	1
Volumen a utilizar de agua lluvia		1	1	1	1
Precipitación promedio anual				1	
Coeficiente de escorrentía	1	1	1	1	1
Suma cantidad de salidas	1	2	2	4	4
Almacenamiento total requerido	1			1	1
Almacenamiento diario		1	1		
Almacenamiento mensual		1	1	1	1
Área óptima				1	1
Relación entradas/salidas	0,25	0,5	0,4	0,67	0,8

Fuente: Elaboración propia con base en la cantidad de entradas necesarias y salidas obtenidas para cada método.

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA UTILIZACIÓN DE AGUAS LLUVIAS Y SUS REQUERIMIENTOS PARA EL USO.

Con el fin de determinar los procesos constructivos para el uso de agua lluvia en un proyecto de construcción de vivienda, se deben analizar las características físico- químicas del agua lluvia y con base en estas características determinar sus usos y la necesidad de tratamientos necesarios para viabilizar su utilización dentro de los procesos en la construcción.

El agua lluvia dentro de la construcción de vivienda, puede ser usada dentro de varios procesos; como en lavado de baños, riego para evitar emisiones de polvo, desagüe de sanitarios, adición para compactación de superficies, humedecimiento de elementos cerámicos y concretos, para corte y colocación de mampostería, lavado de llantas de vehículos, curado de elementos de concreto, para llenado de tuberías en la ejecución de pruebas, entre otros. Para estos procesos, no son requeridas características químicas específicas del agua, que impidan ser utilizadas.

Por el contrario, para utilizar el agua como elemento integrante para la fabricación de concretos y morteros, son necesarias unas características físico químicas específicas, que permitan hacer uso del agua dentro de estos procesos.

El clima esta influenciado por muchos factores, tanto de origen natural, tales como la radiación solar, la órbita terrestre, las condiciones atmosféricas, la latitud, la longitud, la altura sobre el

nivel del mar, entre otros , como también los de origen antropocéntrico, incrementados por los efectos del cambio climático que se vive actualmente (Mora-Barrantes et al., 2021).

Dependiendo de la ubicación del proyecto donde se desea realizar el aprovechamiento del agua lluvia, será necesario conocer la afectación atmosférica a las características físico químicas del agua lluvia, que se requiera recolectar y comparar estos valores con los valores permitidos para utilizar el agua lluvia en la producción de morteros y concretos.

Toda agua utilizada para la fabricación de concretos debe tener unas características químicas, tales que el concreto manufacturado con esta, no sufra afectaciones a la resistencia y durabilidad (Medina, 2013).

Para determinar los parámetros permitidos deben ser consultadas estándares normativos, para cada país en particular, para el caso colombiano, debe ser consultada la norma técnica 3459. Según la NTC 3459, los parámetros límites para el agua en la fabricación de concretos, se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 *Parámetros límites del agua para la fabricación de concretos*

Parámetro	Concentración (mg/L)
Sulfatos	1000
Cloruros	1000
Sólidos totales	50000
Sólidos disueltos	2000
PH	≥ 5
Turbiedad	NA

Fuente: Fuente NTC 3459

En algunas zonas, debido a las condiciones atmosféricas y sus afectaciones locales, deberán ser analizadas muestras de agua lluvia recolectada y de acuerdo a estas características, determinar si esta puede ser usada para la fabricación de concretos y morteros dentro del proyecto en particular.

Es importante recolectar para las muestras, las aguas lluvias caídas por encima de periodos entre 5 y 10 minutos, con el fin que en estos primeros minutos se disuelvan muchas de las partículas que se alojan en las gotas de lluvia (Bedoya-Montoya & Medina-Restrepo, 2016). Con base en la necesidad de tratamientos previos o consideraciones normativas, se establece la identificación para el uso del agua lluvia recogida.

Tabla 13 *Identificación de usos en procesos constructivos y necesidades de tratamiento*

Procesos Constructivos	Tratamiento Requerido
Integrante de mezclas de concreto y/o morteros	Tratamiento de filtración lenta con área. Revisar parámetros límites NTC 3459.
Para hidratación personal	Potabilización
Curado de elementos de concreto	No necesario
Llenado de tuberías en la ejecución de pruebas	No necesario
Lavado de llantas de vehículos,	No necesario
Desagüe de sanitarios	No necesario
Adición para compactación de superficies	No necesario
Humedecimiento de elementos cerámicos	No necesario
Lavado de áreas de servicio	No necesario
Riegos para evitar emisiones de polvo	No necesario
Para corte y colocación de mampostería	No necesario
Llenado de tuberías en la ejecución de pruebas	No necesario

Fuente: Elaboración propia.

NECESIDADES DE TRATAMIENTO DE ACUERDO A IDENTIFICACIÓN DE SU USO

Usualmente las condiciones del agua lluvia son consideradas de buena calidad, para ello se debe tener un especial cuidado en los procedimientos para la captación y almacenamiento (Hernández Avilés & Chaparro, 2020).

Los parámetros más comúnmente usados para determinar la condición del agua lluvia son el pH y la turbiedad, dependiendo estos, de la condición atmosférica de la zona donde se recolecta y de la superficie donde se realiza la captación. El valor más bajo de pH del agua lluvia se obtienen de la recolección directa de la atmósfera con relación a valores máximos (pH 5,0) y valores medios (pH 6,0) y el pH más bajo se obtiene de la captación sobre superficie de acero galvanizado. Los valores de turbiedad mínimos son los recolectado en superficies de láminas recubiertas de zinc (Zdeb et al., 2020, p. 5,6).

En la selección de un tratamiento adecuado para la potabilización del agua lluvia, se deben revisar que los métodos elegidos sean de fácil implementación y que requieran pocos mantenimientos, para maximizar la relación entre el costo y el beneficio (Lani et al., 2018, p. 12). La potabilización del agua usualmente consiste en la eliminación de elementos volátiles, seguido de precipitación de impurezas con floculantes y procesos de filtración y desinfección con cloro u ozono (Romero, 2008).

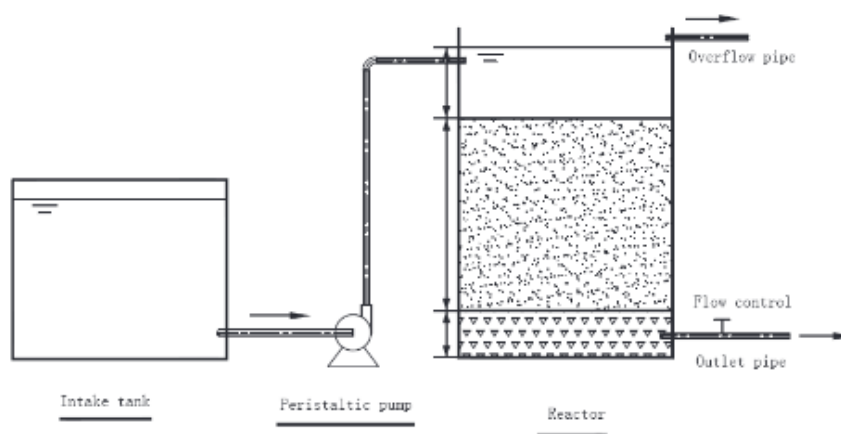
Los tratamientos de filtración, consisten en el paso del agua a través de medios filtrantes, que

reduzcan la carga de partículas nocivas que impidan su uso.

Con el fin de implementar un proceso práctico y económico tanto en ejecución, como en mantenimiento, se puede implementar el método de filtración lento con arena, que ha probado efectividad en la reducción de agentes contaminantes como micro organismos y partículas sólidas. Basados en las mejoras de los métodos de filtración lentos con arena convencional, el método de la biofiltración lenta con arena, ha comprobado que efectivamente ayuda a remover bacterias y otros contaminantes microbiológicos, como a también la remoción de metales pesados, amoníaco, nitrógeno, material orgánico y turbiedad del agua lluvia recolectada (Liu et al., 2019).

El proceso de biofiltración lenta con arena, consiste de tres elementos, un tanque de entrada, una bomba peristáltica, que es una bomba hidráulica de desplazamiento positivo y un reactor de arena para la filtración lenta (Liu et al., 2019).

Figura 2 Esquema de bio filtración lenta con arena



Fuente: Tomado de Applying bio-slow sand filtration for water treatment (p.2), por Liu L et al, 2019, Polish Journal of Environmental Studies, 28(4).

Básicamente el proceso de biofiltración se compone de dos procesos, el primero es la absorción del sedimento que ocurre principalmente en la capa superficial del lecho filtrante y el segundo es la remoción de bacterias, que ocurre en la capa superior del medio del lecho filtrante (Liu et al., 2019).

Con base en los costos de implementación y en los mantenimientos requeridos, entra en relevancia el proceso de desinfección solar, dado que ha demostrado ser una técnica efectiva para el tratamiento microbiológico del agua y sobre todo en zonas donde se cuenta con una abundante radiación solar (Chaúque et al., 2021).

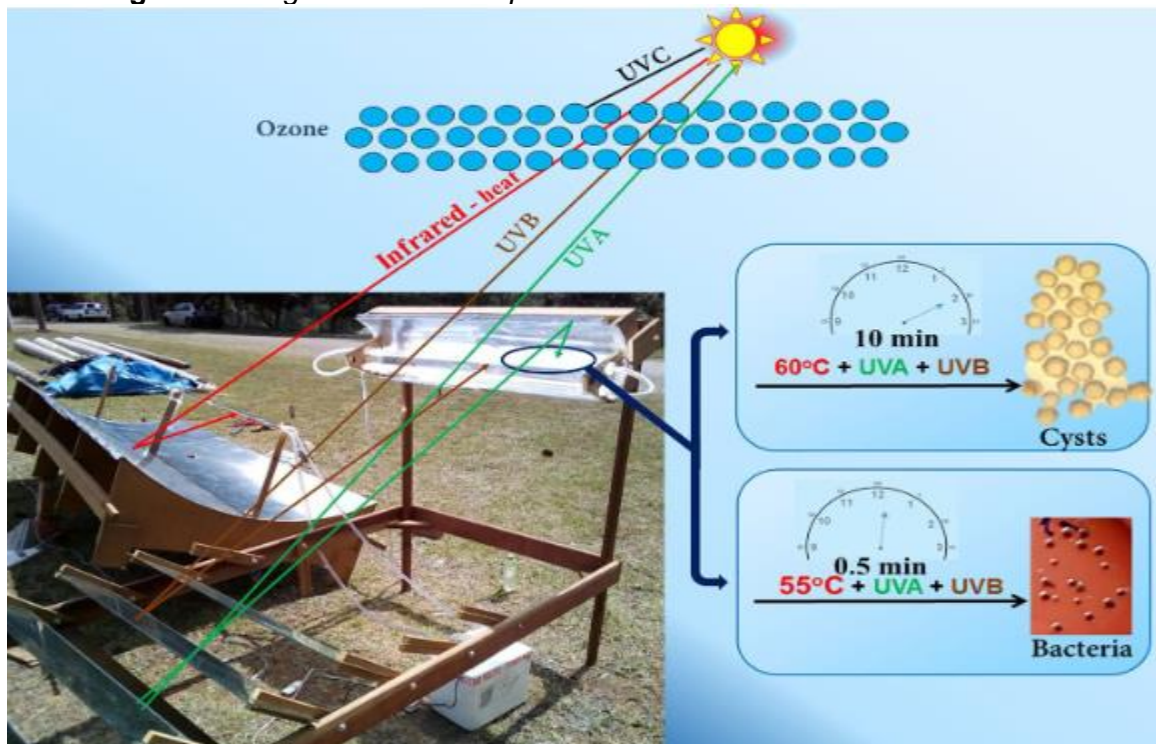
La técnica para la desinfección solar, básicamente consiste en disponer el agua a tratar en recipientes plásticos o incluso bolsas y exponerlos a la radiación solar durante mínimo 6 horas. Adicionalmente antes de colocar el agua a tratar, pueden ser usados procedimientos adicionales que mejorarían las condiciones del agua a consumir, tales como, localizar las botellas con agua en superficies reflectivas, que incrementen la cantidad de luz solar a absorber, pintar de negro la parte inferior del reactor, para permitir el calentamiento por la luz solar, agitar fuertemente los contenidos del agua antes de ser tapados, para incrementar el nivel inicial del oxígeno disuelto

y por último, pueden ser filtradas estas aguas de forma previa (McGuigan et al., 2012, p. 2).

La desinfección del agua por medio del sol, ocurre por los efectos sinérgicos del calor y de los rayos UV, los cuales producen daños irreversibles a nivel celular a los microorganismos presentes en el agua a tratar cuando se expone al sol. Varios estudios han demostrado que la desinfección solar y la pasteurización solar, reducen o inactivan la viabilidad de varios microorganismos, tales como, bacterias, virus, hongos, gusanos y quistes protozoarios (McGuigan et al., 2012, p. 124).

La cantidad del agua tratada depende del número de recipientes plásticos transparentes, usualmente botellas en polietilentereftalato, PET. Para superar esta limitante se han desarrollado sistemas continuos o semicontinuos de desinfección solar. En general los métodos de flujos continuos de desinfección solar son diseñados para exponer a altas dosis de radiación solar al agua contaminada que se desea tratar, para inactivar los microorganismos presentes durante un corto tiempo de exposición (McGuigan et al., 2012). En la Figura 3 se presenta el resumen del proceso de filtración solar, medios filtrantes y los tiempos de exposición de microorganismos inactivados con la utilización del procedimiento.

Figura 3 Imagen resumen del proceso de filtración solar



Fuente: Tomado de *Journal of Hazardous Materials, Photochemical & Photobiological Sciences*, (2021), 20, (p 124).

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

El agua es un recurso, que, a pesar de su abundancia en la tierra, no se puede considerar infinito y del cual se deben establecer formas de medir su uso y los impactos creados por su uso a este recurso, comprometiendo así la disponibilidad del agua en el tiempo.

La huella hídrica (HH), es un concepto introducido en el año 2002, por el Dr. Arjen Hoekstra, de la Universidad de Twente, de los países bajos y que, a partir del año 2008, con la fundación de la Water Footprint Network (WFN), tomó más relevancia como indicador para medir el volumen del agua dulce utilizado para producir bienes y servicios (Red Es Agua, 2016).

La huella hídrica evalúa el consumo y la contaminación en el uso y la producción de bienes y servicios de forma directa e indirecta. La HH directa es el indicador, con el cual se determina el volumen del agua usada y/o contaminada directamente dentro de la producción de un bien o servicio y la HH indirecta, es la cantidad del agua utilizada y/o contaminada, en todos los procesos intervinientes para la fabricación y distribución de un producto o servicio.

La huella hídrica, dependiendo del tipo del agua considerada, se clasifica en tres colores, verde, azul y gris. La verde, es la relacionada con el agua lluvia, incorporada al producto; la huella hídrica azul es la relacionada con el uso consuntivo del agua (superficial o subterránea), incorporada al producto, incluso devuelta a otra cuenca en periodos diferentes a la extracción y la huella hídrica gris, es la relacionada con la calidad del agua y su posible contaminación, debido a los efluentes causados por la producción de un bien o servicio (Red Es Agua,2016).

Como indicador de uso, la HH, difiere del método del cálculo del volumen clásico de extracción en 3 aspectos:

1. No incluye el volumen del agua azul a medida que esté retornando a la fuente de captación.
2. No solo incluye el agua azul, sino también incluye el agua verde y gris.
3. No se restringe al uso solo directo del agua, también incluye su uso indirecto.

La huella hídrica ofrece una mejor y más amplia perspectiva, de como el productor o consumidor se relaciona con el uso del agua. Es una medida volumétrica del uso del agua y de su contaminación al ser usada en procesos de producción, no es medida de la severidad del impacto causado al agua por este uso.

La evaluación de la huella hídrica es una herramienta analítica, que ayuda a entender como las actividades y productos relacionadas con el uso del agua, están siendo más sustentables o no. Como herramienta, provee panoramas, no de lo que se debe hacer, sino más bien que puede ser hecho para reducir los impactos del uso del agua dentro de un proceso (Hoekstra et al., 2011).

La metodología para el cálculo de la huella hídrica, más comúnmente usada es la propuesta por la Water Footprint Network, WFN (Hoekstra et al., 2011).

La metodología de análisis para el cálculo de la huella hídrica, comprende de cuatro fases de análisis que consisten en; definición de objetivos y alcance de la evaluación, cuantificación de la huella hídrica, análisis de sostenibilidad y formulación de respuestas. Mediante la aplicación de estas fases nos permite, evaluar la presión sobre los recursos hídricos, comprender la distribución geográfica y temporal de estos recursos, evaluar la sostenibilidad, eficiencia y equidad del uso y contaminación del agua y establecer estrategias para la toma de decisiones, locales, regionales y globales, a nivel de producto o empresarial, para el mejor uso de estos recursos dentro de los procesos (Red Es Agua,2016).

Otra metodología usada para la determinación de la huella hídrica, es la metodología ISO 14046, que se basa en el análisis del ciclo de vida (ACV), (COSUDE, 2016).

La diferencia entre estas dos metodologías, es que la metodología del cálculo de la huella hídrica,

propuesta por la WFN, se basa en la cuantificación del volumen y la de la ISO 1406, se basa en un enfoque de impacto ambiental (Red es Agua, 2021).

La decisión de la utilización de las metodologías para el cálculo de la huella hídrica, depende de la información de la que se disponga, el público objetivo a quien el estudio vaya dirigido o el nivel de detalle que se pretenda alcanzar (Red Es Agua, 2021).

Para el cálculo del impacto hídrico, proporcionado por la construcción de viviendas, es utilizada la metodología ISO 14046, que, por medio de la evaluación del balance hídrico, se determina el porcentaje de reducción de la huella hídrica, por el aprovechamiento del agua lluvia, dentro de un proyecto de construcción.

ANÁLISIS DE INVENTARIOS

Para la determinación del balance hídrico, se limita el estudio a la obtención del uso directo del agua captada. Por lo anterior es utilizado como dato de entrada, el volumen correspondiente a la captación del agua lluvia en un periodo de tiempo determinado y como datos de salidas los volúmenes de agua utilizados en los usos del agua lluvia captada, para la columna de Procesos Constructivos, descritos en la Tabla 13.

Para la determinación del volumen de entrada de agua lluvia, se delimitó la unidad de uso a lo cuantificado en el ejemplo comparativo, usando el cálculo del volumen de almacenamiento por el método de Rippl, Tabla 9, de acuerdo a criterios de selección de este método establecido en la eficiencia de datos, de la Tabla 11, para un periodo de un año y con un área de captación de 50 m²., tomada como base para el ejemplo comparativo. Cabe anotar que el incrementar el área de captación, puede incrementar el volumen de recolección, a su vez incrementando los porcentajes de aprovechamiento de agua lluvia y reduciendo el impacto hídrico.

De acuerdo a la Tabla 10, el volumen de entrada es $V_{Ent} = 33,25 \text{ m}^3 \times 12 \text{ meses} = 399 \text{ m}^3$. La unidad funcional base para el cálculo del balance hídrico es 33 casas de vivienda tradicional, en áreas promedio de 200 m² y con estructura porticada de concreto con losas macizas de bajos espesores.

En la Tabla 14, se realiza el balance hídrico teniendo en cuenta las fuentes y observaciones escritas en las columnas correspondientes.

De la Tabla 14 se obtiene que el porcentaje de reducción por el aprovechamiento de agua lluvia es del 37,3 %, utilizando los 399 m³ de agua lluvia que captada y reemplazando con esta, un volumen que se dejará de tomar de la fuente que originalmente se hacía, reduciendo así el consumo de agua industrial y doméstica.

BALANCE HÍDRICO

Se establece el Balance hídrico del agua usualmente tomada y el balance hídrico con el uso del agua lluvia, dentro del proyecto de construcción de 33 unidades de vivienda unifamiliares entre uno y dos niveles, como unidad funcional, con el fin de cuantificar la reducción de la huella hídrica con el aprovechamiento del agua lluvia.

A partir del volumen captado de agua lluvia y con base en los volúmenes de entrada, se realiza una distribución del uso del agua lluvia a los procesos constructivos.

Del volumen de agua lluvia captado 399 m³, se distribuye solo en procesos constructivos, aquellos que no requieran tratamientos previos para su uso directo y que puedan ser reutilizados, por lo anterior no se tendrán en cuenta los volúmenes de agua necesarios para la fabricación de concretos.

Tabla 14 *Distribución del uso del agua lluvia captada en procesos constructivos*

Proceso constructivo	Distribución de agua lluvia (m³)	% Distribución
Curado de elementos de Concreto	94,3	23,70
Pruebas Hidráulicas	1,36	0,30
Cortes Mampostería	5,80	1,45
Lavado de Llantas	216	54,13
Lavado de Áreas de servicio	10,4	2,60
Evacuación unidades sanitarias	71,11	17,82

Fuente: Distribución de volúmenes de agua lluvia, con criterio de uso de acuerdo al tratamiento y reutilización. Elaboración propia.

En la Tabla 15, se realiza el balance hídrico del agua usualmente utilizada dentro de los procesos de construcción.

Tabla 15 Balance Hídrico Agua de fuente usualmente captada

Índice	Relación	Tipo	Volumen Entrada	Proceso	Tipo	Volumen de salida	Observaciones	Fuente
0,165	m ³ de agua/m ³ de concreto	Agua superficial industrial	527,01 m ³	Mezclas de concretos	Agua en el concreto	527,01 m ³	Se requieren 3194 m ³ de concreto de 3000 PSI para la construcción de 33 casas entre 2 y 3 niveles	Dosificación mezcla de concreto 210 Kg/cm ² . Obra Houzez 1. Construlab. Mayo de 2023.(Laboratorio Construlab, 2023.)
0,1	%	Agua en el concreto	527,01 m ³	Curado de Elementos de concreto	Agua evaporada	52,7 m ³	Mediante el curado se pretende conservar la relación agua /cemento de la mezcla de concreto.	Asumido 10 % de acuerdo con experiencia
0,59	m ³ de agua/m ³ de cemento	Agua superficial industrial	94,3 m ³	Curado de elementos de concreto	Agua Concreto	568,61 m ³	Relación A/C es igual a 0,59, para 3194 m ³ de concreto se necesitan 159.700 Kg de cemento, que requieren	Dosificación mezcla de concreto 210 Kg/cm ² . Obra Houzez 1. Construlab. Mayo de 2023. (Laboratorio

Índice	Relación	Tipo	Volumen Entrada	Proceso	Tipo	Volumen de salida	Observaciones	Fuente
							conservar = 94,3 m ³ de Agua	Construlab, 2023.)
0,0001	m ³ de agua/ (m de tubería X diámetro promedio)	Agua superficial industrial	1,36 m ³	Pruebas hidráulicas	Agua de reúso	1,36 m ³	Se requieren 0,0001 m ³ de agua, por m de tubería de diámetro promedio	Cálculo con base en cuantificación de una casa tipo en metros de tubería (310 m) y diámetro promedio (0,39 in) de tubería para esa casa.
0,0007	m ³ agua/m ² mampostería	Agua Superficial Industrial	5,80 m ³	Corte de Mampostería	Agua vertida industrial	5,80 m ³	Para 651 m ² se necesitan 0,48 m ³ de agua. Para 1 casa tipo son necesarios 238,48 m ² de mampostería (ladrillos cerámicos)	agua como componente auxiliar (de cuadro 3 suma de consumos auxiliares (Alaiza, 2004)). Tenor presupuesto Houzez 1
0,09	m ³ de agua/vehículo	Agua Superficial Industrial	216 m ³	Lavado de Llantas	Agua vertida industrial	216 m ³	Se asumen 90 L de agua para lavar las llantas de una	Se estiman que el promedio de volquetas al día es de 10, durante 240

Índice	Relación	Tipo	Volumen Entrada	Proceso	Tipo	Volumen de salida	Observaciones	Fuente
							volqueta, al salir de una obra construcción.	días que dura la construcción de las 33 casas
0,008	m ³ agua/m ² área/día	Agua Superficial Industrial	10,4 m ³	Lavado de áreas de servicios	Agua vertida industrial	10,4 m ³	Se asumen 40 L de agua para lavar un área de 50 m ²	Lavado 5 veces a la semana por 52 semanas (Asumido)
0,018	m ³ persona/día	Agua superficial doméstica	216 m ³	Evacua. unidades sanitarias	Agua vertida doméstica	216 m ³	Se asume 50 trabajadores y 240 días laborales para 33 viviendas	Número promedio de trabajadores en construcción de este tipo

Fuente: Elaboración propia.

A partir del resultado "Porcentaje de Uso de Agua Lluvia" de la Tabla 16, se puede determinar que se reduce en un 37,3 % ,(relación entre el volumen del agua lluvia sobre la sumatoria del agua de uso doméstico y el agua de uso industrial), la extracción de agua superficial usualmente empleada (ya sea de quebrada o de un acueducto) para los procesos constructivos dentro de una obra de construcción de 33 viviendas, con el aprovechamiento del agua lluvia captada en un área de 50 m² , durante un periodo de un año , en la zona del Escobero, del Municipio de Envigado.

Tabla 16 Totales Balance Hídrico Agua Lluvia

Tipo de agua	Entradas (m ³)	Salidas (m ³)	Tipo de Agua
Agua de uso Doméstico	527,01 m ³	1095,62 m ³	Agua en el concreto
Agua de uso Industrial	854,87 m ³	52,70 m ³	Agua Evaporada
Agua en el concreto	216 m ³	1,36 m ³	Agua de reúso
Agua Lluvia	399 m ³	232,20 m ³	Agua vertida Industrial
---	--	216 m ³	Agua vertida doméstica
Total Entrada de agua	1597,88 m³	1597,88 m³	Total Salida de agua
Porcentaje de uso de agua lluvia		37,3 %	

Fuente: Confirmación volúmenes balance hídrico del agua lluvia. Elaboración propia a partir de información de la Tabla 15.

IMPACTO HÍDRICO

El índice de impacto hídrico o el indicador de disponibilidad de agua (WIIX), relaciona los volúmenes, calidad del agua extraída y descargada y el grado de escasez del agua en la zona que será utilizada (COSUDE, 2016).

$$WIIX_{extraccion (+)} = E. Q_e. WSI_E \quad (13)$$

$$WIIX_{descarga (-)} = S. Q_s. WSI_S \quad (14)$$

Donde:

WIIX es el Índice de Impacto hídrico (Water Impact Index). (m³ equivalentes)

E es el volumen de agua de la entrada (m³)

S es el volumen de agua de la descarga (m³)

Q_e es el factor de calidad del agua extraída

Q_s es el factor de calidad del agua de la descarga

WSI_E es el índice de estrés de la zona de extracción

WSI_S es el índice de estrés de la zona de la descarga

De acuerdo a (Pfister et al., 2009) , el cálculo del índice de estrés hídrico de la zona se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$WSI = \frac{1}{1 - e^{-6,4WTA \cdot (\frac{1}{0,01} - 1)}} \quad (15)$$

Donde:

WTA es el índice de escasez de la cuenca

Para este ejercicio se tomará 0,2 como el índice de escasez hídrico, valor tomado del Plan de Manejo y Ordenamiento de la cuenca del Río Aburrá, (Universidad de Antioquia et al., 2005), correspondiente al 20% del índice referenciado para una corriente ubicada en la parte alta del Municipio de Envigado con valoración media-alta.

Los factores de calidad del agua, tanto de la extracción como de la descarga (Q_e y Q_s), se calculan con base en la siguiente ecuación

$$Q_{e,s} = \min \left(1; \frac{C_{REF}}{C_{E,S}} \right) \quad (16)$$

Donde:

C_{REF} es la concentración de referencia (mg/L)

$C_{E,S}$ es la concentración del afluente y el efluente (mg/L)

La ecuación 16, indica que se escogerá el menor valor entre 1 y la relación de la concentración de referencia y la concentración de la extracción y de la descarga. Para este ejercicio se consideran los valores de referencia, (C_{REF}), como los valores objetivo de calidad del río Aburrá para la zona sur del valle de Aburrá (Red Río Aburrá -Medellín, 2020, p. 51), los cuales son: Demanda química de oxígeno DQO (mg/L) < 100; grasas y aceites(mg/L) < 20 y Sólidos suspendidos totales SST (mg/L) < 20.

Los valores de concentración de la descarga (C_s) se determinaron de acuerdo a la resolución 0631 de 2015, la cual determina los valores admisibles de vertimiento puntual a fuentes hídricas superficiales, entre los cuales se encuentra el sector de fabricación de artículos de hormigón, cemento y yeso.

Los valores de concentración de la fuente de extracción son tomados con base en información obtenida de la página del observatorio ambiental y agropecuario del municipio de Envigado para las quebradas el Espíritu Santo, Zúñiga y las Palmas (secretaría del medio ambiente [Municipio de Envigado], 2022).

Demanda química de oxígeno DQO (mg/L) < 100, Grasas y aceites(mg/L) < 20 y sólidos suspendidos totales SST (mg/L) < 20.

En la tabla 17, se calculan los valores de los factores de calidad para la descarga y la extracción de agua (Q_s y Q_e), para las fuentes aguas superficiales industriales. En la Tabla 18 se calculan los factores Q_s y Q_e para la fuente superficial doméstica.

Tabla 17 Cálculo de los factores de calidad de agua superficial industrial, para la extracción y la descarga

Parámetros	Entradas			Salidas		
	C	Cref	Cref/C	C	Cref	Cref/C
DQO (mg/L)	1	<100	100	100	100	1
SST (mg/L)	1	<200	200	200	200	1
Grasas y aceites (mg/L)	1	<20	20	20	20	1
Qe (min; 1: Cref/C) E			1	Qs (min; 1: Cref/C) S		1

Nota. Cálculo de factores de calidad del agua superficial industrial con base en colocación de datos con base en fuentes referenciadas y aplicación de la Ecuación (16). Fuente: elaboración propia.

Tabla 18 Cálculo de los factores de calidad del agua superficial doméstica, para la extracción y la descarga

Parámetros	Entradas			Salidas		
	C	Cref	Cref/C	C	Cref	Cref/C
DQO (mg/L)	1	100	100	200	100	0,5
SST (mg/L)	1	200	200	100	200	2
Grasas y aceites (mg/L)	1	20	20	20	20	1
Qe (min; 1: Cref/C) E			1	Qs (min; 1: Cref/C) S		0,5

Nota. Cálculo de factores de calidad del agua superficial doméstica con base en datos de fuentes referenciadas y aplicación de la Ecuación (16). Fuente: elaboración propia.

Se considerarán el análisis del impacto hídrico, las entradas y salidas producidas por las fuentes superficiales de aguas industriales y aguas domésticas, a partir de la información presentada anteriormente y considerando la línea base como el uso del 100% de agua superficial y en segunda opción el impacto por el uso del 37,3% del agua lluvia en la construcción de las viviendas.

Mediante la obtención del impacto hídrico de la extracción y el impacto hídrico de la evacuación, aplicado para ambas fuentes de agua se cuantifica la cantidad de reducción en la afectación hídrica por el aprovechamiento del agua lluvia en la zona del proyecto.

Tabla 19 Cálculo del Impacto hídrico causado por el uso de las fuentes usualmente utilizadas, Línea Base

Tipo de agua	Volumen de entrada (m ³) Tabla 16	Volumen de descarga (m ³) Tabla 16	Factor de calidad de la entrada (Qe) Tabla 18 y Tabla 19	Factor de calidad de la salida (Qs) Tabla 18 y Tabla 19	Índice de estrés hídrico (WIS) Ecuación 15	Índice de impacto hídrico (WIIX en m ³ equivalentes) Ecuación 13 y Ecuación 14.
Superficial industrial	854,77	232,21	1	1	0,04	21,83
Superficial doméstica	216	216	1	0,5	0,04	3,78
Impacto hídrico causado por el uso del agua captada de la fuente hídrica (m³ equivalentes)						25,61

Nota. Cálculo del impacto hídrico del agua usualmente utilizada en procesos constructivos con base en entradas y salidas de Tabla 16, factores de calidad de Tabla 18 y Tabla 19 y aplicación de Ecuaciones (13) y (14). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Cálculo del impacto hídrico causado por el uso del agua lluvia almacenada (37,3% del consumo total)

Tipo de agua	Volumen de entrada (m ³) Tabla 16	Volumen de descarga (m ³) Tabla 16	Factor de calidad de la entrada (Qe) Tabla 18 y Tabla 19	Factor de calidad de la salida (Qs) Tabla 18 y Tabla 19	Índice de estrés hídrico (WIS) Ecuación 15	Índice de impacto hídrico (WIIX en m ³ equivalentes) Ecuación 13 y Ecuación 14.
Superficial industrial	527,01	232,21	1	1	0,04	10,33
Superficial doméstica	144,18	216	1	0,5	0,04	1,26
Impacto hídrico causado por el uso del agua captada de la fuente hídrica (m³ equivalentes)						11,59

Nota. Cálculo del impacto hídrico del agua lluvia utilizada en procesos constructivos con base en entradas y salidas de Tabla 16, factores de calidad de Tabla 18 y Tabla 19 y aplicación de Ecuaciones (13) y (14). Fuente: Elaboración Propia

De la diferencia entre el impacto hídrico causado por el uso del agua superficial de la cuenca (25,61 m³ equivalentes), Tabla 19 y el impacto hídrico causado por el uso del agua lluvia (11,59 m³ equivalentes), Tabla 20, se obtiene la reducción del impacto hídrico en 14,02 m³ equivalentes, al dividir este valor por la unidad funcional, 33 viviendas, se obtiene una reducción de 0,35 m³ equivalentes de agua por vivienda.

CONCLUSIONES

La elección de una metodología con la que se pueda obtener un volumen de captación de agua lluvia para un periodo determinado de tiempo y con un área de captación establecida, no solo depende de la información cuantitativa que se tenga, sino que también del estado de madurez del proyecto donde se pretenda implementar esta metodología de aprovechamiento.

Es recomendable hacer uso de las metodologías, de forma complementaria; el uso de una sola metodología no muestra, en su totalidad el panorama exacto de las variables óptimas del sistema de aprovechamiento.

Para el uso del agua lluvia captada dentro de la mezcla de concretos, deben ser revisados los parámetros físico-químicos que permitan comparar la calidad del agua, de acuerdo a la norma NTC 3459.

No se recomienda hacer uso del agua lluvia, como fuente para consumo humano. No obstante, pueden ser revisados los parámetros de acuerdo a la norma 2115 de 2007 (Resolución-631-2015, 2015), del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio de la República de Colombia y realizar un tratamiento por medio de sistemas que aseguren obtener el agua apta para consumo humano.

El tratamiento de filtración lenta con arena, propuesto en este trabajo, puede ser considerado para el tratamiento del agua lluvia para su utilización como integrante de la mezcla del concreto, revisando exhaustivamente la calidad del agua de acuerdo a la norma NTC 3459.

El utilizar agua lluvia captada en un área de 50 m², dentro de un proyecto de vivienda, con 33 unidades utilizadas, dentro de la zona del escobero parte alta del municipio de Envigado, Antioquia, reduce el impacto hídrico en un 54,7% de la zona y mediante la acumulación y utilización de esta agua en procesos constructivos como el curado de elementos de concreto, el lavado de llantas, la evacuación de unidades sanitarias, cortes de elementos de mampostería y pruebas hidráulicas, reducen la extracción del agua superficial en un 37,3%.

Si es aumentada el área de captación para el agua lluvia puede ser obtenido un mayor volumen de acumulación y así mismo dependiendo de la zona donde se desarrolle el proyecto de construcción puede ser reducido el impacto hídrico con el aprovechamiento del agua lluvia para su uso en procesos constructivos, tales como curado de elementos de concreto, el lavado de llantas, la evacuación de unidades sanitarias, cortes de elementos de mampostería y pruebas hidráulicas, que usualmente se hacen con agua captada de una cuenca en particular.

REFERENCIAS

Alaiza, D. (2004). *Cuantificación del Consumo de Agua en el Proceso Constructivo de Viviendas Unifamiliares Tipo. Estrategias de Minimización*. 1096–1107. <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/59470/Dubravicc%2Carturo28espa%29.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Ali, B., Kurda, R., de Brito, J., & Alyousef, R. (2021). A review on the performance of concrete containing non-potable water. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/app11156729>

Ballén Suárez, J. A., Galarza García, M. Á., & Ortiz Mosquera, R. O. (2006). Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. *International Symposium on Hydraulic Structures - XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.

Bedoya-Montoya, C. M., & Medina-Restrepo, C. A. (2016). El concreto elaborado con aguas lluvia como aporte ambiental desde la construcción/Concrete prepared with rain water as an environmental contribution from the construction/O concreto elaborado com águas de chuva como aporte ambiental desde a construção. *Revista Facultad de Ingeniería*, 25(41), 31–39. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/el-concreto-elaborado-con-aguas-lluvia-como/docview/1865420450/se-2?accountid=39560>

Biswas, B. K., & Mandal, B. H. (2014). Construction and Evaluation of Rainwater Harvesting System for Domestic Use in a Remote and Rural Area of Khulna, Bangladesh. *International Scholarly Research Notices*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/751952>

Cambio Climático, A. Y. (n.d.). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020 Datos y cifras*. www.unesco.org/water/wwap.
Camelo Capador, M. F. (2017). *Aprovechamiento de agua lluvia en el desarrollo de obra civil*.

Chaúque, B. J. M., Benetti, A. D., Corção, G., Silva, C. E., Gonçalves, R. F., & Rott, M. B. (2021). A new continuous-flow solar water disinfection system inactivating cysts of *Acanthamoeba castellanii*, and bacteria. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 20(1), 123–137. <https://doi.org/10.1007/s43630-020-00008-4>

Cheng, C. L., Liao, M. C., & Lee, M. C. (2006). A quantitative evaluation method for rainwater use guideline. *Building Services Engineering Research and Technology*, 27(3), 209–218. <https://doi.org/10.1097/01.iop.0000217795.30085.7a>

COSUDE. (2016). *MANUAL DE APLICACIÓN DE EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA ACORDE A LA norma ISO 14046*. <http://suizagua.org>
(COSUDE), A. S. para el D. y la C. (2016). *Manual de Aplicación para evaluación de la huella hídrica norma iso 14046*. 112.

Diehl de Souza, T., & Ghisi, E. (2020). Harvesting rainwater from scaffolding platforms and walls to reduce potable water consumption at buildings construction sites. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120909. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120909>

Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: Towards a generalised approach. *Urban Water*, 1(4), 323–333. [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00026-1](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00026-1)

Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Bosman, R. (2018). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. *Water Resources and Industry*, 19, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2017.11.002>

Hernández Avilés, D. M., & Chaparro, T. (2020). Tratamiento de agua lluvia con fines de consumo humano. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 97–107. <https://doi.org/10.18359/rcin.4409>

Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldana, M., & Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. www.earthscan.co.uk

Hosseinian, S. M., & Ghahari, S. M. (2021). The relationship between structural parameters and water footprint of residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123562>

Krishna, H. J. (n.d.). *Texas Water Development Board The Texas Manual on Rainwater Harvesting The Texas Manual on Rainwater Harvesting*.

Laboratorio Construlab. (n.d.). *Diseño de mezcla de concreto Proyecto Houzez Concreto 210 Kgr/cm²*.

Lani, N. H. M., Yusop, Z., & Syafiuddin, A. (2018). A review of rainwater harvesting in Malaysia: Prospects and challenges. In *Water (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/w10040506>

Lima. (2004). *GUÍA DE DISEÑO PARA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA*.

Liu, L., Fu, Y., Wei, Q., Liu, Q., Wu, L., Wu, J., & Huo, W. (2019). Applying bio-slow sand filtration for water treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4). <https://doi.org/10.15244/pjoes/89544>

López Hernández, N. A., Palacios-Vélez, O. L., Anaya-Garduño, M., Chávez-Morales, J.,

Rubiños-Panta, J. E., & García-Carrillo, M. (2017). Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia: alternativa de abastecimiento hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1433–1439. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i6.314>

Lozano, D. M., Juan, A., & Rodríguez, P. (n.d.). *METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS CON UN MECANISMO DE SEPARACIÓN DE PRIMER FLUJO VARIABLE Proyecto de grado realizado por.*

Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Environmental impact of water-use in buildings: Latest developments from a life-cycle assessment perspective. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 261). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110198>

Matos, C., Santos, C., Pereira, S., Bentes, I., & Imteaz, M. (2013). Rainwater storage tank sizing: Case study of a commercial building. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.04.004>

McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H. J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernandez-Ibañez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. In *Journal of Hazardous Materials* (Vols. 235–236, pp. 29–46). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>

Medina, C. A. (2013). Concreto confeccionado con Aguas lluvia: Un Aporte a la disminución del impacto ambiental generado por la industria de la construcción. *Universidad Nacional de Colombia*, 1–48.

Resolucion-631-2015, Resolución 631 de 2015 (2015).

Mora-Barrantes, J. C., Sibaja- Brenes, J. P., & Borbón- Alpizar, H. (2021). Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica en el agua de lluvia y de niebla. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>

ONU (2015) *Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 2030*. (n.d.).

Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science and Technology*, 43(11), 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>

Red Río Aburrá -Medellín. (2020). *CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES RIO ABURRA*.

Rivero-Camacho, C., & Marrero, M. (2022). Water Footprint of the Life Cycle of Buildings: Case Study in Andalusia, Spain. In R. Jingzheng (Ed.), *Advances of Footprint Family for Sustainable Energy and Industrial Systems* (pp. 135–165). Springer.

Roblero, R., & Flores, J. (2022). Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 11, 111–124. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.197>

Rojas, E. C. M. de C., Rocha, N. C. M. de C., & Redondo, G. (Universidad C. M. de C. (2017). *EFRAIN ROJAS*.

Romero, M. (2008). Tratamientos Utilizados En La Potabilización De Agua. *Boletín Electrónico Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar*, 08.

Universidad de Antioquia, AMVA, CORNARE, & CORANTIOQUA. (2005). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ*.

Zdeb, M., Zamorska, J., Papciak, D., & Słyś, D. (2020). The quality of rainwater collected from roofs and the possibility of its economic use. *Resources*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/resources9020012>

Zeule, L. de O., Serra, S. M. B., & Teixeira, J. M. C. (2020). Best practices for the rational use of water in construction sites in Brazil. *Environmental Quality Management*, 29(4), 73–85. <https://doi.org/10.1002/tqem.21693>