

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



PROYECTO DE TITULACIÓN

TEMA: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCION Y REUTILIZACION DE
AGUAS LLUVIAS EN UN EDIFICIO ADMINISTRATIVO DE LA PUCE
IMPLEMENTANDO FILTROS HECHOS CON MATERIALES RECICLADOS”

AUTOR:

GREFA VALENCIA CÉSAR CAMILO

TUTOR:

ING. WILSON CANDO

QUITO DM, FEBRERO DE 2026

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	5
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	7
1.4 HIPÓTESIS.....	8
1.5 ALCANCE.....	8
1.6 OBJETIVOS	9
1.6.1 Objetivo General.....	9
1.6.2 Objetivos Específicos.....	10
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA.....	10
2.2 CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS Y COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA.....	11
2.3 MÉTODO RACIONAL Y PARÁMETROS HIDROLÓGICOS.....	11
2.4 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO DEL AGUA.....	11
2.5 FILTROS Y MATERIALES RECICLADOS	12
2.6 NORMATIVA Y CRITERIOS TÉCNICOS APLICABLES	12
2.7 ESTADO DEL ARTE	12
3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	14
3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	14
3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN Y DETERMINACIÓN DE COORDENADAS.....	16
3.2.1 CHIRPS	16
3.2.2 INAMHI (Estación M0054).....	17
3.3 DEPENDENCIA DE DATOS HISTÓRICOS DE PRECIPITACIÓN	17
3.4 TIEMPO DE RETORNO Y EVENTO DE PRECIPITACIÓN.....	18
3.5 AJUSTE ESTADÍSTICO (DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL)	18
3.6 CÁLCULO DE LAS PRECIPITACIONES DIARIAS MÁXIMAS PROBABLES PARA DISTINTAS FRECUENCIAS.....	19
3.7 COEFICIENTES PARA LA LLUVIA DE 24 HORAS DE DURACIÓN	20
3.8 PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE DURACIÓN DE LLUVIAS	20
3.9 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (IDF).....	21
3.9.1 Fundamento.....	21
3.9.2 Parámetros Obtenidos	22
3.9.3 Regresión General $d - Tr$	23
3.9.4 Tabla de Intensidades (mm/h).....	24
3.10 INTERPRETACIÓN	25
3.11 TORMENTA DE DISEÑO (MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS) HIETOGRAMA.....	25
3.12 CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	35
3.13 DISEÑO.....	36
3.13.1 Análisis Crítico y Dimensionamiento	39

3.13.2	Diseño de la Conducción hacia el Tanque de Almacenamiento	41
3.13.3	Dimensionamiento de los bajantes.....	41
3.13.4	Dimensionamiento del Colector Principal hacia el Tanque.....	42
3.13.5	Diseño de la rejilla de captación en cubierta	43
3.13.5.1	Datos de diseño	43
3.13.6	Cálculo del área libre necesario	44
3.13.7	Selección de dimensiones de la rejilla	45
3.13.8	Sistema de distribución del agua almacenada.....	49
3.13.8.1	Caudal máximo para distribución	49
3.13.9	Caudal de bombeo	49
3.13.10	Diámetro de la tubería de impulsión	49
3.13.11	Pérdida por fricción h_f	50
3.13.12	Pérdidas por accesorios h_k	51
3.13.12.1	Pérdida total del sistema.....	52
3.13.12.2	Potencia requerida	52
4.	CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL.....	53
4.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS HIDROLÓGICOS.....	53
4.2	ANÁLISIS TÉCNICO DEL SISTEMA DISEÑADO.....	54
4.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	56
4.4	EVALUACIÓN AMBIENTAL	59
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
5.1	CONCLUSIONES	62
5.2	RECOMENDACIONES TÉCNICAS, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES	64
6.	BIBLIOGRAFÍA	64
7.	ANEXOS	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1	VISTA SUPERIOR DEL EDIFICIO	14
ILUSTRACIÓN 2	FACHADAS DEL EDIFICIO	15
ILUSTRACIÓN 3	INGRESO DE DATOS CHIRPS	16
ILUSTRACIÓN 4	UBICACIÓN ESTACIÓN INAMHI.....	17
ILUSTRACIÓN 5	HETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO - $Tr = 2$ AÑOS	27
ILUSTRACIÓN 6	HETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO - $Tr = 5$ AÑOS	29
ILUSTRACIÓN 7	HETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO - $Tr = 10$ AÑOS	30
ILUSTRACIÓN 8	HETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO - $Tr = 25$ AÑOS	31
ILUSTRACIÓN 9	HETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO - $Tr = 50$ AÑOS	33
ILUSTRACIÓN 10	HETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO - $Tr = 100$ AÑOS	34
ILUSTRACIÓN 11	ÁREA DE LA CANCHA DE CÉSPED NATURAL	38
ILUSTRACIÓN 12	FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D A TRAVÉS DE RECICLADO DE BOTELLAS PLÁSTICAS	46
ILUSTRACIÓN 13	ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA	47

ILUSTRACIÓN 14 FACHADA LATERAL CON SISTEMA DE CAPTACIÓN Y PREFILTRACIÓN	47
ILUSTRACIÓN 15 DETALLE DEL FILTRO DESMONTABLE	47
ILUSTRACIÓN 16 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL FILTRO PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA	48
ILUSTRACIÓN 17 SISTEMA DE BOMBEO EXISTENTE EN EL EDIFICIO PARA DISTRIBUCIÓN DE AGUA	53

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 INVESTIGACIONES RECIENTES SOBRE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN EDIFICACIONES	13
TABLA 2 PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	18
TABLA 3 PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS POR PERÍODO DE RETORNO.....	19
TABLA 4 COEFICIENTES ADOPTADOS PARA DISTINTAS DURACIONES	20
TABLA 5 INTENSIDADES DE LLUVIA PARA DIFERENTES DURACIONES Y PERÍODOS DE RETORNO .20	
TABLA 6 PARÁMETROS DE AJUSTE DE LA ECUACIÓN IDF OBTENIDOS MEDIANTE REGRESIÓN POTENCIAL	22
TABLA 7 REGRESIÓN POTENCIAL ENTRE EL PERÍODO DE RETORNO (Tr) Y EL COEFICIENTE D DE LA ECUACIÓN IDF	23
TABLA 8 INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN OBTENIDAS A PARTIR DE LAS CURVAS IDF	24
TABLA 9 PARÁMETROS DE LA TORMENTA DE DISEÑO.....	26
TABLA 10 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS - Tr = 2 AÑOS.....	26
TABLA 11 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS - Tr = 5 AÑOS.....	28
TABLA 12 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS - Tr = 10 AÑOS.....	29
TABLA 13 PARÁMETROS DE LA TORMENTA DE DISEÑO - Tr = 25 AÑOS.....	31
TABLA 14 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS - Tr = 50 AÑOS.....	32
TABLA 15 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS - Tr = 100 AÑOS.....	34
TABLA 16 CÁLCULO DE CAUDAL Y VOLUMEN.....	35
TABLA 17 CÁLCULO DEL VOLUMEN MENSUAL DE AGUA LLUVIA POTENCIALMENTE CAPTADA EN LA CUBIERTA DEL EDIFICIO	37
TABLA 18 COSTOS REFERENCIALES DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	58

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción

El crecimiento urbano y la variabilidad climática han incrementado la presión sobre los sistemas convencionales de abastecimiento de agua, especialmente en ciudades donde la demanda supera la capacidad de gestión del recurso hídrico. Organismos internacionales advierten que la seguridad hídrica requiere la implementación de estrategias complementarias que promuevan el uso eficiente del agua y la adaptación al cambio climático, particularmente en edificaciones urbanas (UNESCO, 2023).

En este contexto, la captación y reutilización de aguas lluvias se reconoce como una alternativa técnicamente viable para reducir el consumo de agua potable en usos no potables, tales como riego de áreas verdes y descarga de sanitarios. Diversas guías técnicas señalan que estos sistemas contribuyen a disminuir la escorrentía superficial, mitigar riesgos de inundación y mejorar la sostenibilidad de la infraestructura urbana (Environmental Protection Agency, 2013).

El diseño adecuado de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias requiere una caracterización confiable de la precipitación, particularmente mediante la estimación de intensidades de lluvia asociadas a distintos períodos de retorno. En regiones donde los registros pluviométricos presentan limitaciones espaciales o temporales, los productos de precipitación combinados satélite - estación constituyen una fuente robusta de información hidrológica. En este sentido, CHIRPS es ampliamente utilizado por su cobertura global, continuidad temporal y validación científica (Funk et al., 2015).

Adicionalmente, la incorporación de materiales reciclados y tecnologías de fabricación digital, como la impresión 3D, en componentes de prefiltración pluvial se alinea con los principios de la economía circular y la reducción de residuos. Estudios recientes demuestran que los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias pueden resultar técnicamente viables y ambientalmente beneficiosos, aun cuando su rentabilidad económica directa dependa de las condiciones locales de demanda, precipitación y tarifas de agua (Ghisi & Freitas, 2024).

En este marco, el presente trabajo propone el diseño de un sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias integrado a la infraestructura hidráulica existente de un edificio universitario, de manera que el agua captada funcione como una fuente complementaria al sistema convencional. Esta estrategia permite aportar un porcentaje medible del consumo anual destinado a riego, aprovechar los equipos ya instalados como redes de conducción y sistemas de bombeo y reducir los costos de implementación, sin comprometer la operación del sistema principal.

Adicionalmente, el sistema incorpora elementos de prefiltración diseñados y fabricados mediante tecnología de impresión 3D, empleando materiales plásticos reciclados, con el objetivo de mejorar las condiciones del agua captada para su uso en riego y reducir la carga de sólidos y contaminantes. La combinación de integración hidráulica, manufactura digital y reutilización de materiales fortalece el enfoque de sostenibilidad del proyecto, promoviendo la optimización de recursos, la economía circular y la replicabilidad del sistema en edificaciones institucionales.

1.2 Planteamiento del Problema

Los cambios climáticos globales han intensificado la crisis hídrica a nivel mundial, evidenciando la necesidad de optimizar el uso de los recursos naturales y fortalecer estrategias de gestión sostenible del agua. En la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, el consumo de agua potable destinado a usos no esenciales representa una carga adicional para la infraestructura hidráulica existente y genera costos operativos significativos. A pesar de que, durante determinadas épocas del año, la ciudad de Quito presenta precipitaciones recurrentes, una parte considerable de este recurso se pierde por escorrentía superficial debido a la ausencia de sistemas adecuados de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, lo que deriva en un uso ineficiente del recurso hídrico.

De manera complementaria, la generación de residuos sólidos, en particular materiales plásticos, constituye una problemática ambiental dentro del campus universitario. Si bien existen puntos específicos de recolección, una fracción de estos residuos puede ser reutilizada como materia prima para el desarrollo de tecnologías sostenibles. En este contexto, el uso de materiales reciclados en la fabricación de filtros para la captación inicial de aguas lluvias representa una

alternativa innovadora que contribuye a la reducción de desechos sólidos y al fortalecimiento de modelos de economía circular dentro de la institución.

La integración de la reutilización de materiales reciclados con el aprovechamiento de aguas pluviales plantea una solución técnica e integral que permite reducir el impacto ambiental asociado tanto al consumo de agua potable como a la generación de residuos. Por lo tanto, surge la necesidad de diseñar un sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias que incorpore filtros elaborados con materiales reciclados, conforme a lo planteado en el objetivo general del estudio, con el propósito de optimizar el uso del recurso hídrico, disminuir la dependencia del agua potable y promover una gestión sostenible de la infraestructura universitaria.

1.3 Justificación e Importancia

El acelerado crecimiento poblacional, particularmente en áreas urbanas, ha incrementado de forma significativa la demanda de agua potable, ejerciendo una presión constante sobre los sistemas convencionales de abastecimiento. Esta situación ha generado problemáticas relevantes, entre las que destacan el aumento de los costos asociados al suministro y la reducción de la disponibilidad del recurso hídrico, especialmente en contextos de variabilidad climática y eventos extremos. Frente a este escenario, la recolección y reutilización de aguas lluvias se presenta como una alternativa técnica y sostenible que contribuye a disminuir el consumo de agua potable en usos no esenciales, tales como el riego de áreas verdes, la limpieza de superficies y la descarga de sanitarios, sin comprometer la calidad del servicio ni la salud pública (Campisano et al., 2017).

La ciudad de Quito, debido a su ubicación geográfica y régimen pluviométrico, presenta eventos de precipitación intensos que representan una oportunidad técnica para la implementación de sistemas de captación de aguas lluvias. En este contexto, la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en concordancia con su compromiso institucional hacia la sostenibilidad ambiental, busca fortalecer su infraestructura mediante la incorporación de sistemas alternativos de gestión del recurso hídrico. La implementación de un sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias en un edificio administrativo permite no solo optimizar el uso del agua potable, sino también generar un modelo replicable para otras edificaciones institucionales y urbanas.

Adicionalmente, este estudio propone la incorporación de filtros elaborados con materiales reciclados, tales como polímeros reutilizados (PLA y PETG), mediante tecnología de impresión 3D. Esta estrategia permite integrar principios de economía circular al diseño del sistema, promoviendo la reutilización de residuos plásticos y disminuyendo la generación de desechos sólidos. De esta manera, el proyecto no solo aborda la gestión eficiente del agua, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado a los residuos, alineándose con enfoques contemporáneos de sostenibilidad en la ingeniería civil.

Desde el punto de vista técnico, el trabajo integra análisis hidrológicos, hidráulicos y criterios de sostenibilidad ambiental propios de la ingeniería sanitaria. Para la estimación de caudales de diseño, se emplean datos de precipitación obtenidos de fuentes oficiales y confiables, como CHIRPS e INAMHI, junto con la aplicación del método racional, ampliamente utilizado en el dimensionamiento de sistemas de drenaje urbano. Los resultados esperados se articulan con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el ODS 6, relacionado con la gestión sostenible del agua y el ODS 11, enfocado en el desarrollo de ciudades y comunidades sostenibles, lo que refuerza la importancia ambiental, técnica e institucional del presente estudio (ONU, 2015).

1.4 Hipótesis

La implementación de un sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias con prefiltración mediante filtros fabricados a partir de materiales reciclados permitirá reducir el consumo de agua potable destinado a usos no potables en el edificio administrativo de la PUCE, demostrando su viabilidad técnica, económica y ambiental bajo las condiciones climáticas de Quito.

1.5 Alcance

La presente investigación se enfoca en el diseño técnico, hidrológico e hidráulico de un sistema de captación, conducción, almacenamiento y filtración de aguas lluvias aplicado a un edificio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, destinado al riego de la cancha de fútbol.

Para el desarrollo del diseño se emplearon datos meteorológicos históricos y actuales obtenidos de fuentes oficiales y confiables, tales como CHIRPS e INAMHI, los cuales permitieron

caracterizar el régimen de precipitaciones de la zona de estudio. Se consideró un tiempo de retorno máximo de 100 años para el escenario de diseño más crítico, así como duraciones de precipitación comprendidas entre 10 y 15 minutos, de acuerdo con criterios comúnmente utilizados en el diseño hidráulico de sistemas de drenaje y captación urbana.

El alcance del estudio comprende el dimensionamiento hidrológico e hidráulico de los componentes del sistema, la estimación del volumen anual de agua lluvia aprovechable, el análisis de su aporte frente a la demanda hídrica de riego y la evaluación económica y ambiental del sistema. No se incluyen análisis de calidad bacteriológica ni fisicoquímica avanzada del agua captada, debido a que el sistema fue diseñado exclusivamente para usos no potables, específicamente riego de áreas verdes.

Adicionalmente, como complemento al desarrollo del diseño, se elaboró un prototipo funcional del sistema a escala representativa, orientado a ilustrar el funcionamiento general de los elementos de captación, filtración y conducción. Este prototipo cumple un rol demostrativo y de apoyo a la validación conceptual del diseño propuesto, sin que los resultados obtenidos a partir del mismo formen parte del análisis, discusión o conclusiones de la presente investigación.

El diseño elaborado tiene como finalidad servir como referencia técnica y académica para el desarrollo de futuros proyectos de innovación en infraestructura sostenible, promoviendo la optimización del recurso hídrico y la implementación de soluciones ambientalmente responsables dentro del ámbito universitario.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

- Diseñar un sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias en un edificio administrativo de la PUCE, integrando filtros fabricados mediante impresión 3D con materiales reciclados, para el abastecimiento sostenible del riego de la cancha de fútbol.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Analizar el régimen pluviométrico de la zona de estudio mediante datos históricos de precipitación obtenidos de fuentes oficiales, tales como CHIRPS e INAMHI, con el fin de determinar las intensidades de lluvia representativas para el diseño del sistema.
- Determinar el caudal de diseño del sistema de recolección de aguas lluvias mediante la aplicación del método racional, considerando los parámetros hidráulicos asociados a las superficies de captación.
- Dimensionar los componentes del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias, incluyendo las etapas de captación, filtración, conducción y almacenamiento, de acuerdo con criterios técnicos de diseño hidráulico y sanitario.
- Proponer y diseñar filtros elaborados con materiales reciclados y amigables con el ambiente, fabricados mediante tecnología de impresión 3D, evaluando su desempeño técnico y su viabilidad ambiental.
- Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema propuesto, analizando la eficiencia del proceso de filtración, los costos de implementación y el potencial ahorro en el consumo de agua potable destinado a usos no potables, como el riego de áreas verdes.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo abarcaremos los conceptos teóricos ligados con el diseño de sistemas de captación y reutilización de aguas lluvias, basándonos en fundamentos hidráulicos e hidrológicos generales aplicables a ciudades como Quito y guiado por las normativas vigentes ecuatorianas.

2.1 Conceptos Básicos de Hidráulica e Hidrología

La hidráulica es la rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los fluidos, principalmente el agua en reposo o en movimiento. La hidrología, por su parte, analiza el ciclo del agua, su precipitación, escorrentía, infiltración y evaporación (Pérez Carmona, 2019). Estos principios dentro del sistema de recolección y almacenamiento nos indican el comportamiento del agua de lluvia.

2.2 Captación de Aguas Lluvias y Coeficiente de Escorrentía

La captación se basa en la capacidad que tiene la superficie impermeable, como techos o cubiertas, para su debido almacenamiento. El coeficiente de escorrentía (C) expresa la relación entre la cantidad de agua precipitada y la que efectivamente se recolecta y depende del tipo de superficie. Según Pérez Carmona (2019), en cubiertas de hormigón o teja puede alcanzar valores entre 0,8 y 0,95.

2.3 Método Racional y Parámetros Hidrológicos

El método racional es uno de los procedimientos más utilizados para la estimación del caudal máximo de escorrentía superficial en cuencas pequeñas, especialmente en áreas urbanizadas, debido a su simplicidad y aplicabilidad cuando se dispone de información limitada de precipitación (INAMHI & CHIRPS, 2023).

Este método se expresa mediante la relación:

$$Q = c \times i \times A$$

donde Q es el caudal de diseño (m^3/s), C es el coeficiente de escorrentía adimensional, i es la intensidad de lluvia (mm/h) correspondiente a una duración y tiempo de retorno determinados y A es el área de captación.

En el contexto ecuatoriano, los estudios hidrológicos aplicados a infraestructura urbana suelen considerar tiempos de retorno del orden de 50 años para el diseño de sistemas de drenaje pluvial. No obstante, en la presente investigación se amplía el análisis incorporando también un tiempo de retorno de 100 años, con el fin de evaluar condiciones más críticas y adoptar un enfoque conservador en el diseño. Asimismo, se analizan eventos de precipitación con duraciones comprendidas entre 10 y 15 minutos, coherentes con el tamaño del área de captación y con la respuesta hidrológica esperada en superficies impermeables.

2.4 Sistemas de Almacenamiento y Tratamiento del Agua

El agua recolectada se almacena en cisternas o tanques subterráneos, los cuales deben dimensionarse en función del volumen de captación y de la demanda de usos no potables (APHA, 2020). Es recomendable incorporar dispositivos de rebose para controlar eventos de saturación, así

como sistemas de primer y segundo filtrado. El tratamiento del agua puede incluir filtrado físico y procesos de sedimentación y, en ciertos casos, desinfección (Campisano et al., 2017). En el presente proyecto no se contempla un proceso de desinfección, dado que el agua recolectada se destinará exclusivamente a usos no potables.

2.5 Filtros y Materiales Reciclados

Para la fabricación de los filtros se consideran diversas opciones de materiales reciclados, tales como plásticos triturados y reprocesados en forma de filamento, así como materiales biodegradables y ambientalmente amigables, los cuales pueden ser fabricados mediante tecnología de impresión 3D. Estos materiales, al ser termoplásticos, presentan una adecuada ductilidad y, dependiendo del proceso de fabricación, una porosidad controlada que permite la remoción eficiente de sólidos flotantes sin afectar significativamente el flujo del agua. Estudios recientes han demostrado que este tipo de soluciones contribuye a la reducción de la turbidez y de los costos de operación, además de fomentar principios de economía circular (Ghisi & Freitas, 2024).

2.6 Normativa y Criterios Técnicos Aplicables

El diseño de sistemas de captación y reutilización de aguas lluvias en Ecuador se rige por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), particularmente en lo referente a criterios hidráulicos, así como por las normas INEN aplicables a la calidad del agua y a los materiales de construcción. A nivel internacional, se consideran como referencia los lineamientos del American Concrete Institute (ACI, 2019) y de la American Public Health Association (APHA, 2020), los cuales aportan criterios técnicos para garantizar la calidad del recurso y la seguridad sanitaria en sistemas de aprovechamiento de agua no potable.

2.7 Estado del Arte

En la siguiente tabla se presentan al menos diez investigaciones recientes, publicadas en los últimos cinco años, relacionadas con el tema del presente proyecto. Estas investigaciones priorizan el desarrollo e implementación de sistemas de captación y reutilización de aguas lluvias en entornos urbanos y edificaciones, destacando su aplicación en contextos similares al caso de estudio.

Tabla 1

Investigaciones recientes sobre sistemas de captación y reutilización de aguas lluvias en edificaciones

Autor (Año)	Ubicación	Propuesta / Tipo de Estudio	Principales Resultados
Ghisi & Freitas (2024)	Brasil	Evaluación económica de sistemas de recolección y reutilización de aguas grises y lluvias en edificios multifamiliares.	El sistema fue económicamente viable y redujo el consumo de agua potable.
Liu et al. (2024)	Japón	Análisis temporal de rendimiento de sistemas de captación de lluvia considerando variación de precipitación y demanda.	La eficiencia disminuye con menor precipitación o mayor demanda.
Matos et al. (2024)	Portugal	Caso de estudio de sistema de recolección en edificio industrial utilizando herramienta SAPRA.	Confirmó viabilidad técnica y económica para uso social.
Raimondi (2023)	Italia	Revisión del estado del arte sobre tratamiento y gestión de aguas lluvias.	Resaltó beneficios ambientales y retos de monitoreo.
Szoldrowska (2025)	Europa	Economía circular del agua aplicada a recolección de aguas lluvias urbanas.	Concluyó que RWH puede suplir déficit hídrico urbano.
Chen (2025)	China	Extensión de sistemas descentralizados de captación de lluvias.	Mejora la resiliencia hídrica urbana ante cambio climático.
Pimentel-Rodrigues et al. (2025)	Portugal	Comparación entre RWH y aguas grises en vivienda unifamiliar.	Ambas opciones son viables para usos no potables.
Li et al. (2025)	China	Marco estratégico para recolección y reutilización en paisaje urbano.	Propone estrategias sostenibles integradas.

Ertop (2023)	Turquía	Importancia de RWH en riego y usos domésticos.	Demuestra potencial como fuente alterna ante escasez.
--------------	---------	--	---

Fuente: Elaboración propia

3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque Metodológico

Para la estimación del caudal máximo de escorrentía superficial generado sobre la cubierta del edificio se aplicó el método racional, adecuado para áreas pequeñas, homogéneas y con escurrimiento rápido.

$$Q = C \times i \times A$$

donde:

Q = caudal máximo (m³/s)

C = coeficiente de escorrentía (adimensional)

i = intensidad de lluvia (mm/h)

A = área de aporte (ha)

Este método fue seleccionado por su simplicidad operativa y alta confiabilidad para el modelado hidráulico en superficies impermeables homogéneas. El área de la cuenca de aporte analizada corresponde a la cubierta del Edificio Administrativo de la Universidad, estableciéndose una superficie efectiva de captación de 706,52 m².

Ilustración 1

Vista superior del edificio

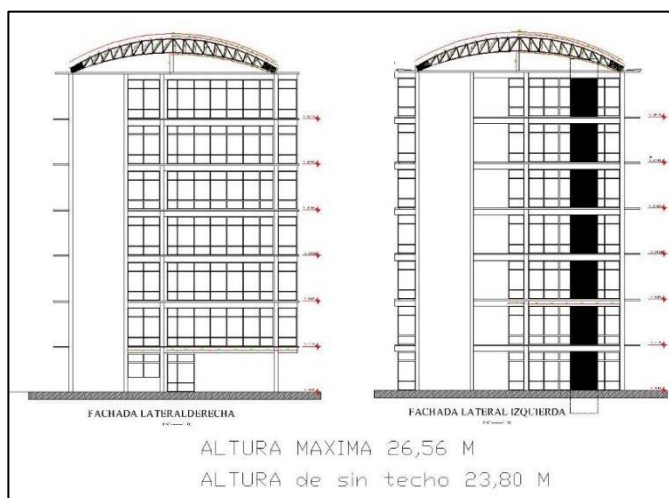


Fuente: (Google Earth, 2025)

Este valor se obtuvo a partir de las dimensiones geométricas levantadas, a las cuales se integró un margen perimetral técnico de 3 m destinado a captar la escorrentía lateral provocada por la acción del viento durante eventos de precipitación intensa de lluvia sobre el área se realizó cruzando los datos de la estación local con los registros satelitales disponibles (CHIRPS e INAMHI, 2025).

Ilustración 2

Fachadas del Edificio



Fuente: Elaboración propia

3.2 Fuentes de Información y Determinación de Coordenadas

Se emplearon dos fuentes principales:

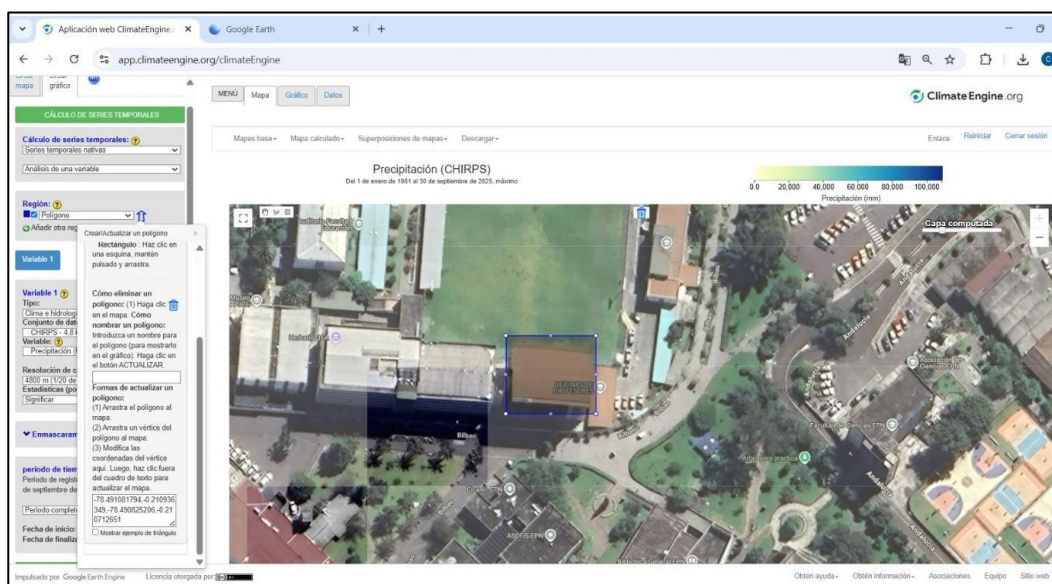
3.2.1 CHIRPS

Producto satelital de precipitación diaria ($0,05^\circ \approx 5 \text{ km}$) que combina observaciones terrestres con imágenes infrarrojas.

- **Latitud:** $-0,2108^\circ$
- **Longitud:** $-78,491^\circ$
- **Período:** 1981 - 2025
- **Altitud:** 2806,09 m s.n.m.
- **Variable usada:** precipitación máxima diaria (24 h).

Ilustración 3

Ingreso de datos CHIRPS



Fuente: (CHIRPS, 2025)

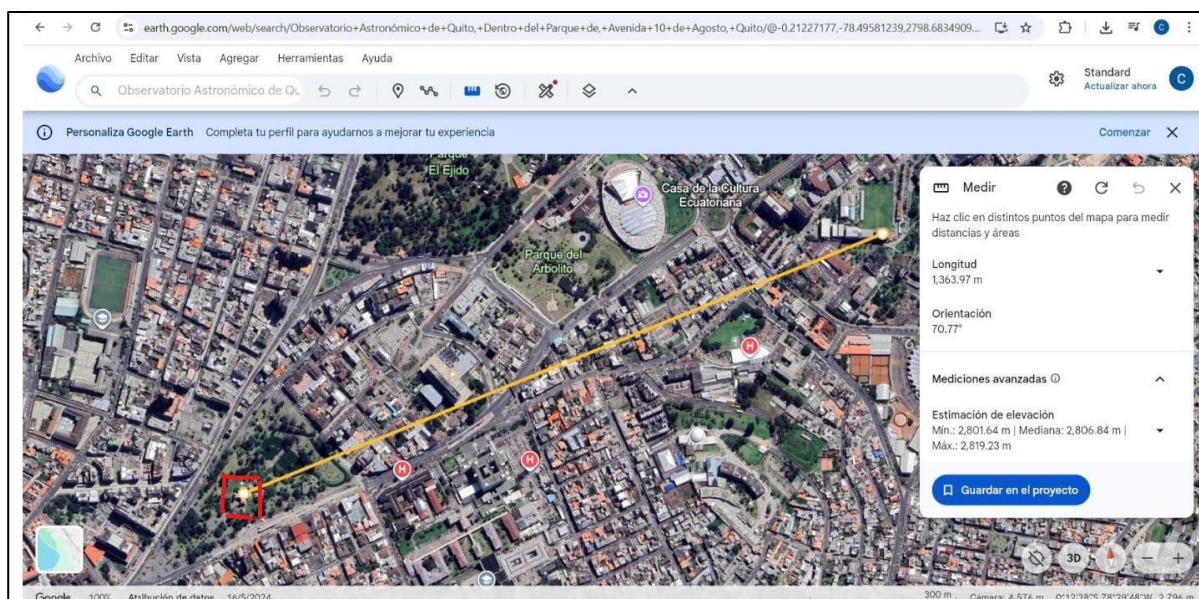
3.2.2 INAMHI (Estación M0054)

Red oficial meteorológica del Ecuador.

- **Latitud:** $-0,2111^{\circ}$
- **Longitud:** $-78,500^{\circ}$
- **Altitud:** 2820 m s.n.m.
- **Ubicación:** Observatorio Astronómico Quito, distancia de 1363,97 m del Edificio.
- **Período:** 1929 - 1982
- **Variable usada:** precipitación máxima diaria (24 h).

Ilustración 4

Ubicación estación INAMHI



Fuente: (GoogleEarth, 2025)

3.3 Dependencia de Datos Históricos de Precipitación

El análisis hidrológico del sistema se basó en datos históricos de precipitación, obtenidos a partir de registros combinados satelital estación (CHIRPS) y datos oficiales disponibles. Si bien

estos productos presentan validación científica y amplia aceptación en estudios hidrológicos, los resultados obtenidos representan condiciones estadísticas de largo plazo, por lo que no contemplan posibles variaciones extremas asociadas a cambios climáticos futuros, anomalías interanuales o eventos atípicos. En consecuencia, las estimaciones de volumen captado y cobertura del consumo deben interpretarse como valores representativos de diseño y no como predicciones deterministas para años específicos.

3.4 Tiempo de Retorno y Evento de Precipitación

Se adoptó un tiempo de retorno (T_r) de 100 años conforme el máximo normal estudiado, el tiempo de concentración (t_c) de la cubierta se estimó en 15 minutos, de acuerdo con la pendiente y longitud de escurrimiento.

3.5 Ajuste Estadístico (Distribución de Gumbel)

Para determinar la magnitud de los eventos de precipitación extrema no registrados, se empleó la distribución de valores extremos Tipo I (Gumbel). Este modelo probabilístico es el estándar hidrológico para predecir la precipitación máxima probable de 24 horas asociada a distintos periodos de retorno, basándose en la media y desviación estándar de la serie histórica compilada.

A continuación, se presentan los parámetros de ajuste calculados a partir de la serie de datos (INAMHI + CHIRPS):

Tabla 2

Parámetros de la distribución de Gumbel

Parámetro	Valor
Media \bar{x}	63,30 mm
Desviación (s)	13,14 mm
Escala $\alpha = s \cdot \pi/6$	10,24 mm

$$\text{Localización } u = \bar{x} - 0,5772 \cdot \alpha \quad 57,38 \text{ mm}$$

Fuente: Elaboración propia

3.6 Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias

Aplicando la ecuación de Gumbel con los parámetros estadísticos definidos anteriormente, se determinaron las precipitaciones máximas probables para distintos periodos de retorno.

La Tabla a continuación resume los valores calculados y corregidos:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-u}{\alpha}}}$$

Tabla 3

Precipitaciones máximas diarias por período de retorno

Periodo	Variable	Precip.	Prob. de	Corrección
Retorno	Reducida	(mm)	ocurrencia	intervalo fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0,3665	61,1368	0,5000	69,0846
5	1,4999	72,7485	0,8000	82,2058
10	2,2504	80,4364	0,9000	90,8931
25	3,1985	90,1501	0,9600	101,8696
50	3,9019	97,3563	0,9800	110,0126
100	4,6001	104,5093	0,9900	118,0955
500	6,2136	121,0387	0,9980	136,7737

Fuente: Elaboración propia

3.7 Coeficientes para la Lluvia de 24 Horas de Duración

Con el objetivo de obtener las intensidades de precipitación para diferentes duraciones a partir de la lluvia máxima diaria, se adoptaron coeficientes de reducción asociados a la duración del evento. Estos coeficientes permiten transformar la precipitación de 24 horas en lluvias equivalentes de menor duración para la construcción de las curvas IDF.

Tabla 4

Coeficientes adoptados para distintas duraciones

Duración (horas)									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Fuente: Elaboración propia

3.8 Precipitaciones Máximas para Diferentes Tiempos de Duración de Lluvias

Con base en la precipitación máxima diaria y su desagregación a distintas duraciones, se determinaron las intensidades de lluvia para diferentes períodos de retorno. Estos resultados permiten caracterizar el comportamiento de eventos intensos de corta y media duración, necesarios para el diseño hidrológico del sistema.

Intensidades de lluvia a partir de P_d máx, según tiempo de duración de la precipitación y su frecuencia

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duración}[hr]}$$

Tabla 5

Intensidades de lluvia para diferentes duraciones y períodos de retorno

Tiempo de duración	Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno Tr
--------------------	---

Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	1440	2.8785	3.4252	3.7872	4.2446	4.5839	4.9206	5.6989
18 hr	1080	3.4926	4.1560	4.5952	4.5275	5.5617	5.9704	6.9147
12 hr	720	4.6056	5.4804	6.0595	6.7913	7.3342	7.8730	9.1182
8 hr	480	5.8722	6.9875	7.7259	8.6589	9.3511	10.0381	11.6258
6 hr	360	7.0236	8.3576	9.2408	10.3567	11.1846	12.0064	13.9053
5 hr	300	7.8756	9.3715	10.3618	11.6131	12.5414	13.4629	15.5922
4 hr	240	8.9810	10.6867	11.8161	13.2430	14.3016	15.3524	17.7806
3 hr	180	10.5930	12.6049	13.9369	15.6200	16.8686	18.1080	20.9720
2 hr	120	13.4715	16.0301	17.7242	19.8646	21.4525	23.0286	26.6709
1 hr	60	20.7254	24.6617	27.2679	30.5609	33.0038	35.4286	41.0321

Fuente: Elaboración propia

3.9 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)

3.9.1 Fundamento

Las curvas IDF relacionan la intensidad (I), la duración (t) y el periodo de retorno (Tr), permitiendo conocer la intensidad máxima probable de una tormenta con duración t y frecuencia Tr , K, m y n son parámetros de ajuste.

Su elaboración siguió cuatro etapas:

1. Obtención de la lluvia máxima 24 h por Gumbel.
2. Desagregación a menores duraciones con factores de Campos Aranda (1978).
3. Regresión $I = dt^{-n}$ para cada Tr (7 datos) con parámetros d y n.
4. Regresión $d = KT^m$ para generalizar la ecuación.

3.9.2 *Parámetros Obtenidos*

La Tabla 6 presenta los parámetros obtenidos a partir de la regresión potencial aplicada a las intensidades de lluvia calculadas para cada período de retorno. El coeficiente d representa la intensidad de referencia asociada a cada período de retorno, mientras que el exponente n caracteriza la relación de decaimiento de la intensidad con la duración del evento. La similitud de los valores de n obtenidos confirma la coherencia del ajuste y permite adoptar un valor promedio para la formulación general de las curvas IDF.

Tabla 6

Parámetros de ajuste de la ecuación IDF obtenidos mediante regresión potencial

Resumen de aplicación de regresión potencial		
Periodo de Retorno (años)	Término cte. De regresión (d)	Coef. de regresión [n]
2	261.17608872741	-0.61638608809
5	310.78097329519	-0.61638608809
10	343.62372314249	-0.61638608809
25	420.28247268160	-0.63362500463
50	415.90539671085	-0.61638608809
100	446.46285885804	-0.61638608809
500	517.07648904568	-0.61638608809
Promedio =	387.90114320875	-0.61884879045

Fuente: Elaboración propia

3.9.3 Regresión General $d - Tr$

En función del cambio de variable realizado, se realiza otra regresión de potencia entre las columnas del periodo de retorno (T) y el término constante de regresión (d), para obtener valores de la ecuación:

$$d = KT^m$$

donde K y m son parámetros de ajuste obtenidos mediante regresión lineal en el espacio logarítmico. La Tabla 7 presenta el desarrollo del ajuste estadístico, incluyendo los valores transformados y los productos necesarios para el cálculo de los coeficientes de regresión.

Tabla 7

Regresión potencial entre el período de retorno (Tr) y el coeficiente d de la ecuación IDF

Regresión potencial						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	261,1761	0,6931	5,5652	3,8575	0,4805
2	5	310,7810	1,6094	5,7391	9,2367	2,5903
3	10	343,6237	2,3026	5,8395	13,4461	5,3019
4	25	420,2825	3,2189	6,0409	19,4450	10,3612
5	50	415,9054	3,9120	6,0305	23,5913	15,3039
6	100	446,4629	4,6052	6,1014	28,0978	21,2076
7	500	517,0765	6,2146	6,2482	38,8301	38,6214
7	692	2715,3080	22,5558	41,5648	136,5044	93,8667
Ln (K) =	5,5467	K =	256,3827	m =	0,1214	

Fuente: Elaboración propia

Término constante de regresión (K) = 256,3827

Coef. de regresión (m) = 0,121390

La ecuación de intensidad válida para la cuenca resulta:

$$d = 256,3827 T^{0,12139}$$

Integrando con $I = d t^{-n}$:

$$I = 256,3827 T^{0,12139} t^{-0,61885}$$

3.9.4 Tabla de Intensidades (mm/h)

A partir de la ecuación general de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), se calcularon las intensidades de lluvia para distintos períodos de retorno y tiempos de duración comprendidos entre 5 y 60 minutos. La Tabla 8 resume los valores obtenidos, los cuales constituyen la base para la selección del evento de diseño y el posterior cálculo de caudales mediante el método racional.

Tabla 8

Intensidades máximas de precipitación obtenidas a partir de las curvas IDF

Tabla de Intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia	Duración en minutos											
Años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	103,01	67,08	52,19	43,68	38,05	33,99	30,89	28,44	26,44	24,78	23,36	22,13
5	115,13	74,97	58,33	48,82	42,52	37,99	34,53	31,79	29,56	27,69	26,10	24,74
10	125,23	81,55	63,45	53,11	46,26	41,32	37,56	34,58	32,15	30,12	28,40	26,91
25	139,97	91,15	70,92	59,35	51,70	46,18	41,98	38,65	35,93	33,67	31,74	30,07
50	152,25	99,15	77,14	64,56	56,24	50,24	45,66	42,04	39,09	36,62	34,52	32,71
100	165,62	107,85	83,92	70,23	61,17	54,65	49,67	45,73	42,52	39,83	37,55	35,58
500	201,35	131,12	102,02	85,38	74,37	66,44	60,39	55,60	51,69	48,43	45,66	43,26

Fuente: Elaboración propia

3.10 Interpretación

La Tabla 8 presenta las intensidades máximas de lluvia obtenidas a partir de las curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF) para diferentes períodos de retorno y tiempos de duración comprendidos entre 5 y 60 minutos. Se observa que, para un mismo período de retorno, la intensidad de lluvia disminuye conforme aumenta la duración del evento, lo cual responde al comportamiento físico esperado de las precipitaciones intensas. De igual manera, para una duración fija, las intensidades incrementan con el aumento del período de retorno, reflejando la mayor severidad asociada a eventos de baja probabilidad de ocurrencia.

Para fines de diseño se adoptó un período de retorno de 100 años, por corresponder al escenario más crítico analizado y proporcionar un mayor margen de seguridad hidráulica frente a eventos extremos. Esta selección resulta adecuada para sistemas de captación pluvial en edificaciones institucionales, donde se prioriza la confiabilidad del sistema y la reducción del riesgo de fallas por sobrecarga durante tormentas excepcionales.

Considerando una duración representativa de 15 minutos, correspondiente a eventos intensos de corta duración típicos en áreas de captación reducidas, la intensidad de diseño adoptada es de:

$$I = 83,92 \frac{mm}{h} ; T_r = 100 \text{ años} ; t = 15 \text{ min}$$

Este valor se emplea posteriormente en el cálculo del caudal de diseño mediante el método racional, asegurando que el sistema propuesto sea capaz de operar adecuadamente bajo condiciones hidrológicas extremas y garantizando un desempeño seguro y confiable a lo largo de su vida útil.

3.11 Tormenta de Diseño (Método de Bloques Alternos) HIETOGRAMA

La tormenta de diseño representa la variación temporal de una lluvia extrema y se construyó mediante el método de bloques alternos, el cual ordena los incrementos de precipitación (ΔP) de mayor a menor y los distribuye simétricamente alrededor del centro del evento, ubicando el máximo incremento en el intervalo central.

Las intensidades de lluvia se obtuvieron a partir de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), considerando una duración total de 15 minutos y un intervalo de cálculo de 1 minuto. Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema frente a distintos niveles de severidad, se elaboraron tormentas de diseño para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 100 años, manteniendo constante la duración y variando únicamente la magnitud de la precipitación.

Tabla 9

Parámetros de la Tormenta de Diseño

Parámetro	Valor
Duración total (Td)	15 min
Intervalo (Δt)	1 min

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las tablas de cálculo y los hietogramas correspondientes a cada período de retorno:

- **Datos Base $T_r = 2$ años**

Hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 2 años, obtenido mediante el método de bloques alternos para una duración total de 15 minutos.

Tabla 10

Distribución temporal de la precipitación mediante el método de bloques alternos - $T_r = 2$ años

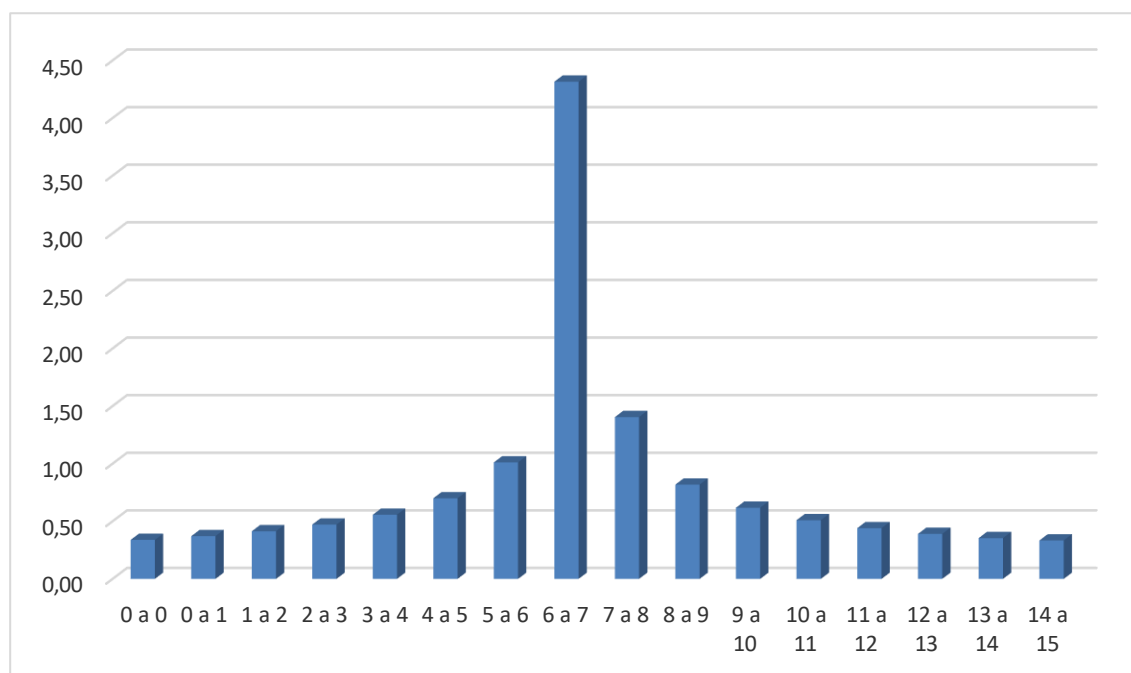
t (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Número	Orden	Hietograma (mm)	Intervalo (min)
0.0010	20043.67	0.33	0.33	1	15	0.34	0 a 0
1	278.72	4.65	4.32	2	13	0.37	0 a 1
2	181.55	6.05	1.40	3	11	0.41	1 a 2
3	141.28	7.07	1.01	4	9	0.47	2 a 3
4	118.24	7.88	0.82	5	7	0.56	3 a 4

5	103.00	8.58	0.70	6	5	0.70	4 a 5
6	92.01	9.20	0.62	7	3	1.01	5 a 6
7	83.64	9.76	0.56	8	1	4.32	6 a 7
8	77.01	10.27	0.51	9	2	1.40	7 a 8
9	71.59	10.74	0.47	10	4	0.82	8 a 9
10	67.0741	11.18	0.44	10	6	0.62	9 a 10
11	63.23	11.59	0.41	10	8	0.51	10 a 11
12	59.92	11.98	0.39	10	10	0.44	11 a 12
13	57.02	12.36	0.37	10	12	0.39	12 a 13
14	54.47	12.71	0.35	10	14	0.35	13 a 14
15	52.19	13.048	0.34	10	16	0.33	14 a 15

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 5

Hietograma de la tormenta de diseño - Tr = 2 años



Fuente: Elaboración propia

- **Datos Base $T_r = 5$ años**

Hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 5 años, obtenido mediante el método de bloques alternos para una duración total de 15 minutos.

Tabla 11

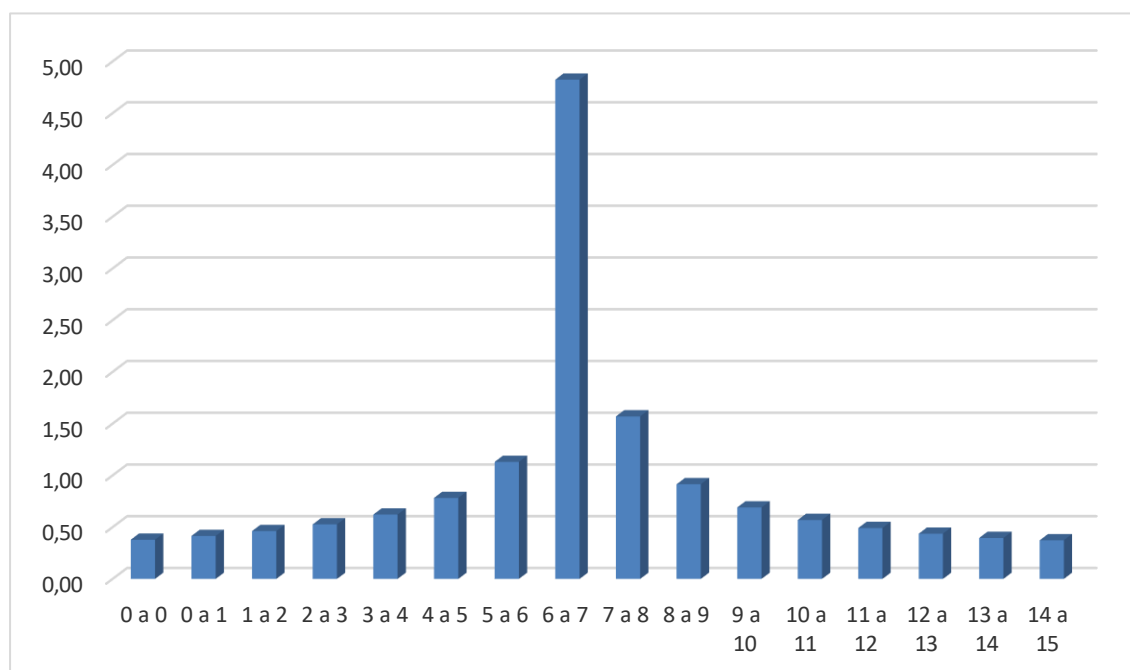
Distribución temporal de la precipitación mediante el método de bloques alternos - $T_r = 5$ años

t (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Número	Orden	Hietograma (mm)	Intervalo (min)
0.0010	22401.82	0.37	0.37	1	15	0.38	0 a 0
1	311.51	5.20	4.82	2	13	0.41	0 a 1
2	202.91	6.77	1.57	3	11	0.46	1 a 2
3	157.90	7.90	1.13	4	9	0.53	2 a 3
4	132.16	8.81	0.91	5	7	0.62	3 a 4
5	115.11	9.59	0.78	6	5	0.78	4 a 5
6	102.83	10.29	0.69	7	3	1.13	5 a 6
7	93.48	10.91	0.62	8	1	4.82	6 a 7
8	86.07	11.48	0.57	9	2	1.57	7 a 8
9	80.02	12.00	0.53	10	4	0.91	8 a 9
10	74.9655	12.50	0.49	10	6	0.69	9 a 10
11	70.67	12.96	0.46	10	8	0.57	10 a 11
12	66.97	13.39	0.44	10	10	0.49	11 a 12
13	63.73	13.81	0.41	10	12	0.44	12 a 13
14	60.87	14.21	0.40	10	14	0.40	13 a 14
15	58.33	14.584	0.38	10	16	0.37	14 a 15

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 6

Hietograma de la tormenta de diseño - $T_r = 5$ años



Fuente: Elaboración propia

- **Datos Base $T_r = 10$ años**

Hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 10 años, obtenido mediante el método de bloques alternos para una duración total de 15 minutos.

Tabla 12

Distribución temporal de la precipitación mediante el método de bloques alternos - $T_r = 10$ años

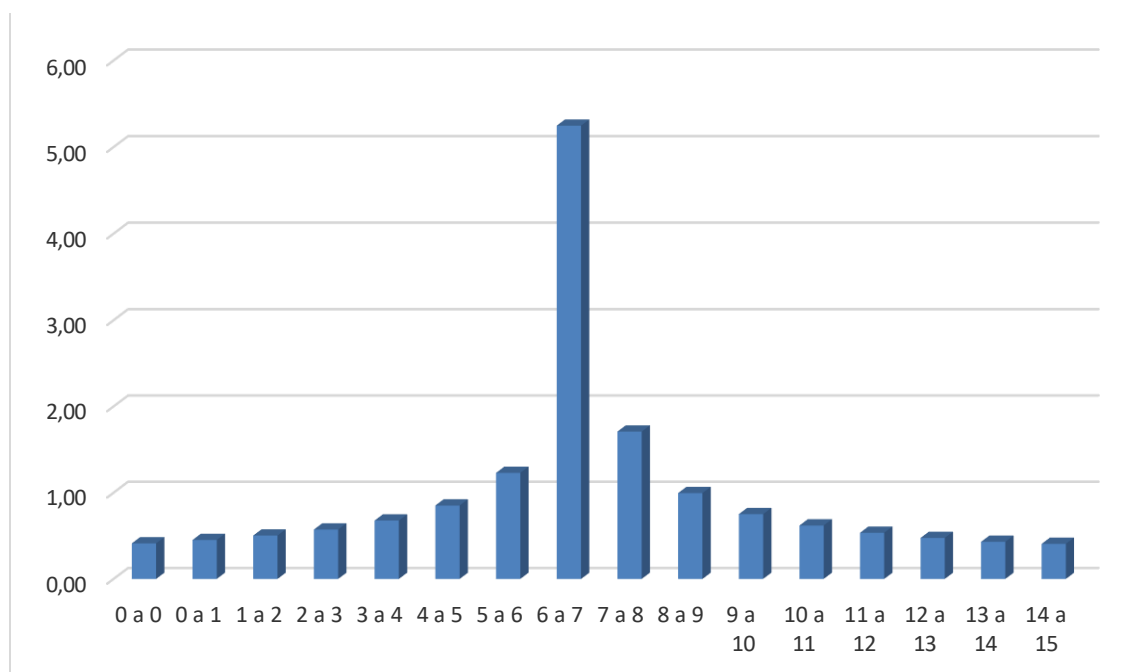
t (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Número	Orden	Hietograma (mm)	Intervalo (min)
0.0010	24368.31	0.41	0.41	1	15	0.41	0 a 0
1	338.85	5.65	5.25	2	13	0.45	0 a 1
2	220.73	7.36	1.71	3	11	0.50	1 a 2
3	171.76	8.59	1.23	4	9	0.57	2 a 3

4	143.76	9.59	1.00	5	7	0.68	3 a 4
5	125.22	10.44	0.85	6	5	0.85	4 a 5
6	111.86	11.19	0.75	7	3	1.23	5 a 6
7	101.68	11.86	0.68	8	1	5.25	6 a 7
8	93.62	12.48	0.62	9	2	1.71	7 a 8
9	87.04	13.06	0.57	10	4	1.00	8 a 9
10	81.5461	13.59	0.53	10	6	0.75	9 a 10
11	76.88	14.10	0.50	10	8	0.62	10 a 11
12	72.85	14.57	0.48	10	10	0.53	11 a 12
13	69.33	15.02	0.45	10	12	0.48	12 a 13
14	66.22	15.45	0.43	10	14	0.43	13 a 14
15	63.45	15.864	0.41	10	16	0.41	14 a 15

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7

Hietograma de la tormenta de diseño - $Tr = 10$ años



Fuente: Elaboración propia

• **Datos Base $T_r = 25$ años**

Hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 25 años, obtenido mediante el método de bloques alternos para una duración total de 15 minutos.

Tabla 13

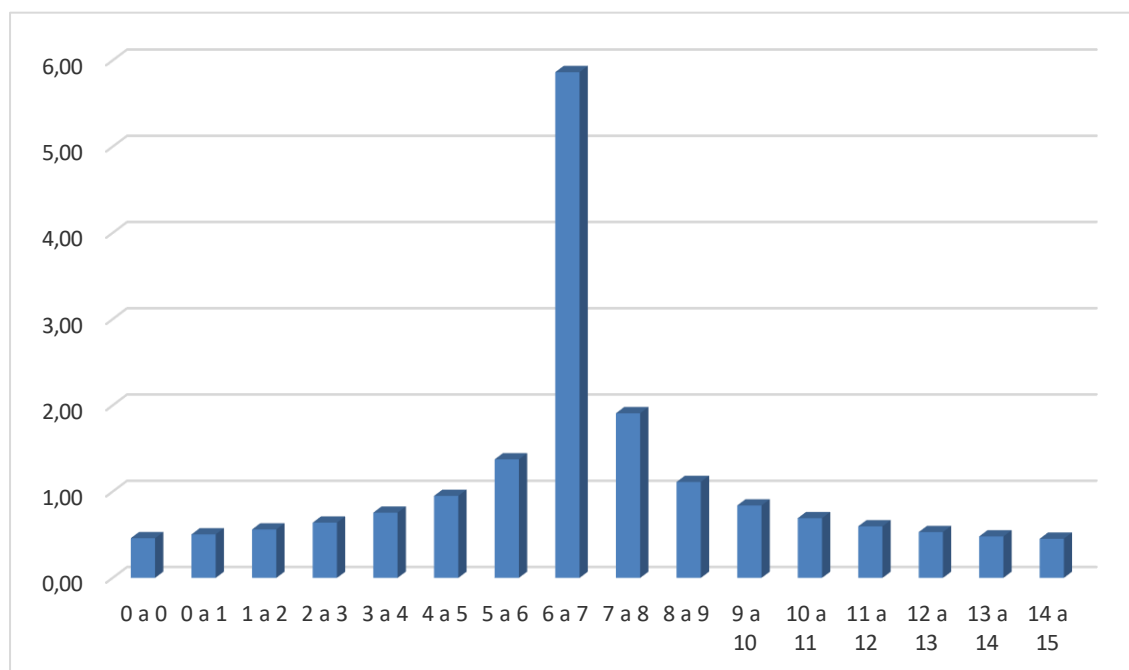
Parámetros de la Tormenta de Diseño - $T_r = 25$ años

t (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Número	Orden	Hietograma (mm)	Intervalo (min)
0.0010	27235.26	0.45	0.45	1	15	0.46	0 a 0
1	378.72	6.32	5.86	2	13	0.50	0 a 1
2	246.69	8.23	1.91	3	11	0.56	1 a 2
3	191.97	9.60	1.37	4	9	0.64	2 a 3
4	160.67	10.71	1.11	5	7	0.76	3 a 4
5	139.95	11.66	0.95	6	5	0.95	4 a 5
6	125.02	12.50	0.84	7	3	1.37	5 a 6
7	113.65	13.26	0.76	8	1	5.86	6 a 7
8	104.63	13.95	0.69	9	2	1.91	7 a 8
9	97.28	14.59	0.64	10	4	1.11	8 a 9
10	91.1401	15.19	0.60	10	6	0.84	9 a 10
11	85.92	15.75	0.56	10	8	0.69	10 a 11
12	81.42	16.28	0.53	10	10	0.60	11 a 12
13	77.48	16.79	0.50	10	12	0.53	12 a 13
14	74.01	17.27	0.48	10	14	0.48	13 a 14
15	70.92	17.730	0.46	10	16	0.45	14 a 15

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 8

Hietograma de la tormenta de diseño - $T_r = 25$ años



Fuente: Elaboración propia

- **Datos Base $T_r = 50$ años**

Hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 50 años, obtenido mediante el método de bloques alternos para una duración total de 15 minutos.

Tabla 14

Distribución temporal de la precipitación mediante el método de bloques alternos - $T_r = 50$ años

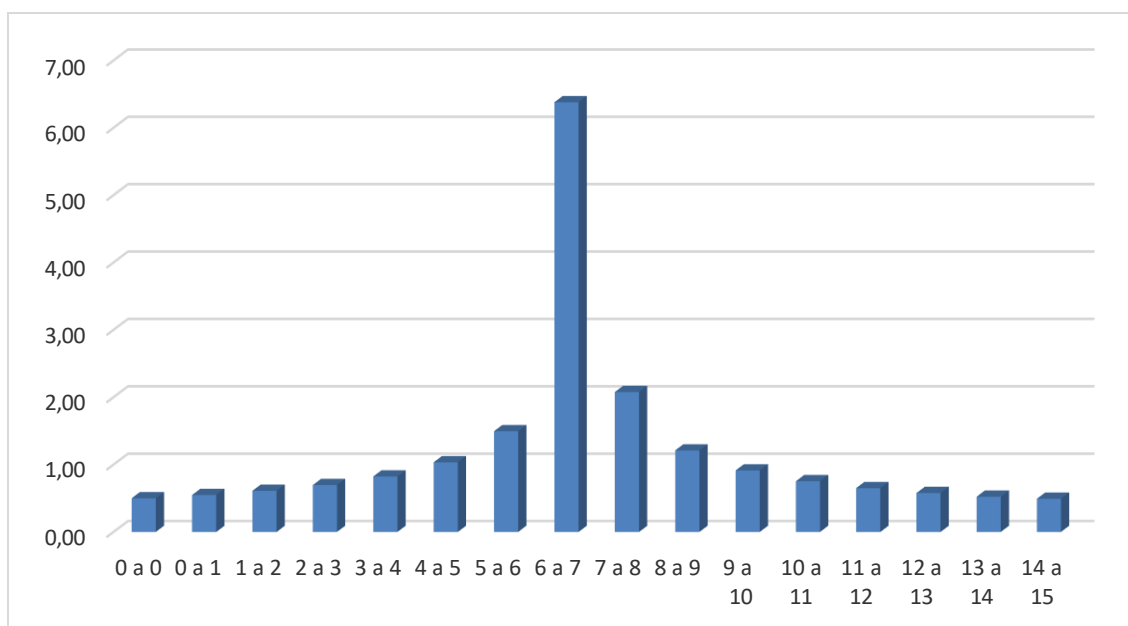
t (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Número	Orden	Hietograma (mm)	Intervalo (min)
0,0010	29626,05	0,49	0,49	1	15	0,50	0 a 0
1	411,96	6,87	6,38	2	13	0,55	0 a 1
2	268,35	8,95	2,08	3	11	0,61	1 a 2
3	208,82	10,44	1,50	4	9	0,70	2 a 3
4	174,77	11,65	1,21	5	7	0,82	3 a 4
5	152,24	12,69	1,03	6	5	1,03	4 a 5
6	136,00	13,60	0,91	7	3	1,50	5 a 6

7	123,62	14,42	0,82	8	1	6,38	6 a 7
8	113,82	15,18	0,75	9	2	2,08	7 a 8
9	105,82	15,87	0,70	10	4	1,21	8 a 9
10	99,14	16,53	0,65	10	6	0,91	9 a 10
11	93,46	17,14	0,61	10	8	0,75	10 a 11
12	88,56	17,71	0,58	10	10	0,65	11 a 12
13	84,28	18,26	0,55	10	12	0,58	12 a 13
14	80,51	18,79	0,52	10	14	0,52	13 a 14
15	77,14	19,287	0,50	10	16	0,49	14 a 15

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9

Hietograma de la tormenta de diseño - $T_r = 50$ años



Fuente: Elaboración propia

- **Datos Base $T_r = 100$ años**

Hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 100 años, obtenido mediante el método de bloques alternos para una duración total de 15 minutos.

Tabla 15

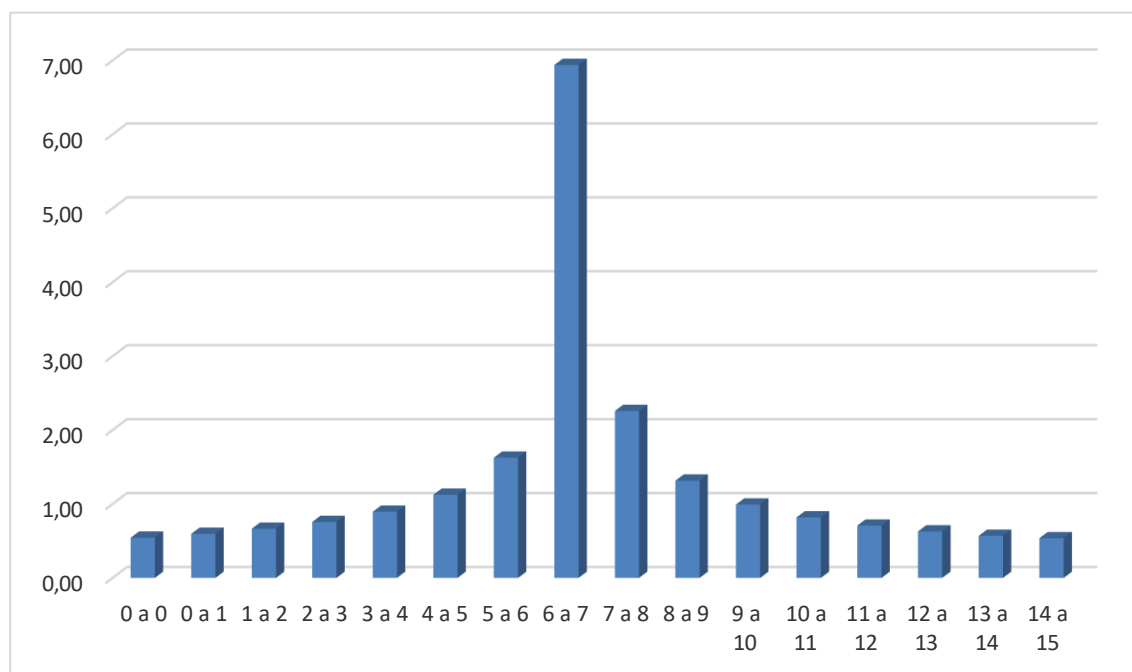
Distribución temporal de la precipitación mediante el método de bloques alternos - $Tr = 100$ años

t (min)	I (mm/h)	P (mm)	ΔP	Número	Orden	Hietograma (mm)	Intervalo (min)
0.0010	32226.71	0.54	0.54	1	15	0.54	0 a 0
1	448.13	7.48	6.94	2	13	0.60	0 a 1
2	291.91	9.74	2.26	3	11	0.66	1 a 2
3	227.15	11.36	1.63	4	9	0.76	2 a 3
4	190.12	12.68	1.32	5	7	0.90	3 a 4
5	165.60	13.80	1.13	6	5	1.13	4 a 5
6	147.93	14.80	0.99	7	3	1.63	5 a 6
7	134.48	15.69	0.90	8	1	6.94	6 a 7
8	123.81	16.51	0.82	9	2	2.26	7 a 8
9	115.11	17.27	0.76	10	4	1.32	8 a 9
10	107.8435	17.98	0.71	10	6	0.99	9 a 10
11	101.67	18.64	0.66	10	8	0.82	10 a 11
12	96.34	19.27	0.63	10	10	0.71	11 a 12
13	91.68	19.87	0.60	10	12	0.63	12 a 13
14	87.57	20.44	0.57	10	14	0.57	13 a 14
15	83.91	20.980	0.54	10	16	0.54	14 a 15

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 10

Hietograma de la tormenta de diseño - $Tr = 100$ años



Fuente: Elaboración propia

3.12 Cálculo del Caudal de Diseño

El caudal de diseño para el sistema de captación de aguas lluvias se determinó mediante el método racional, el cual es aplicable a áreas de captación pequeñas y superficies impermeables, como cubiertas de edificaciones. Este método se expresa mediante la ecuación:

$$Q = C \times i \times A$$

Para el análisis se consideró un coeficiente de escorrentía $C = 0,90$, correspondiente a cubiertas metálicas, y un área de captación de $706,52 \text{ m}^2$. Las intensidades de lluvia fueron obtenidas a partir de las curvas IDF desarrolladas previamente para distintos períodos de retorno.

El volumen asociado al evento crítico se calculó considerando una duración de 15 minutos, mediante la expresión:

$$V = Q \times t$$

Tabla 16

Cálculo de Caudal y Volumen

Años	i mm/h	C	A m ²	Q m ³ /s	Volumen m ³
2	52.19			0.00922	8.30
5	58.33			0.01030	9.27
10	63.45			0.01121	10.09
25	70.91	0.9	706.52	0.01252	11.27
50	77.14			0.01363	12.26
100	83.91			0.01482	13.34

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño del sistema se adoptó el período de retorno de 100 años, obteniéndose un caudal máximo de:

$$Q = 0,01482 \frac{m^3}{s}$$

y un volumen asociado al evento crítico de 13,34 m³. Este valor se utiliza posteriormente para el dimensionamiento de los componentes del sistema de captación y almacenamiento, garantizando un adecuado nivel de seguridad hidráulica frente a eventos extremos.

3.13 Diseño

Para determinar el potencial de recolección de agua pluvial del sistema, se aplicó el método del balance volumétrico basado en la ecuación fundamental de captación descrita por Chow et al. (2010):

$$V = P \times A \times C$$

Donde:

- V: Volumen mensual de agua captada (m³)
- P: Precipitación mensual acumulada (m). Se utilizaron los registros satelitales validados de la estación virtual CHIRPS correspondientes al año hidrológico 2024, por ser la serie más representativa de las condiciones climáticas recientes en la zona de estudio.

- A: Área de captación efectiva (m²)
- C: Coeficiente de escorrentía

A partir de los datos procesados, se calculó el volumen recuperable mes a mes. Es importante notar que, para efectos de cálculo, la precipitación en milímetros (mm) se convirtió a metros (m) dividiendo por 1000.

Con el fin de obtener una estimación más representativa del potencial de captación de agua lluvia, se emplearon datos pluviométricos mensuales promedio obtenidos a partir de una serie histórica del producto satelital CHIRPS, lo que permite reducir el efecto de anomalías climáticas asociadas a años individuales. El uso de promedios multianuales proporciona una base más confiable para el diseño del sistema de captación y su análisis operativo a lo largo del año.

Tabla 17

Cálculo del volumen mensual de agua lluvia potencialmente captada en la cubierta del edificio

Mes	Precipitación (mm) [CHIRPS]	Precipitación (m)	Área (m ²)	Coef. (C)	Volumen Captado (m ³)
Enero	82.57	0.08257	706.52	0.9	52.50
Febrero	46.99	0.04699	706.52	0.9	29.88
Marzo	24.38	0.02438	706.52	0.9	15.50
Abril	33.35	0.03335	706.52	0.9	21.21
Mayo	39.79	0.03979	706.52	0.9	25.30
Junio	10.86	0.01086	706.52	0.9	6.91
Julio	6.62	0.00662	706.52	0.9	4.21
Agosto	18.01	0.01801	706.52	0.9	11.45
Septiembre	22.45	0.02245	706.52	0.9	14.28
Octubre	22.8	0.0228	706.52	0.9	14.50
Noviembre	18.85	0.01885	706.52	0.9	11.99
Diciembre	74.16	0.07416	706.52	0.9	47.16

Fuente: Elaboración propia

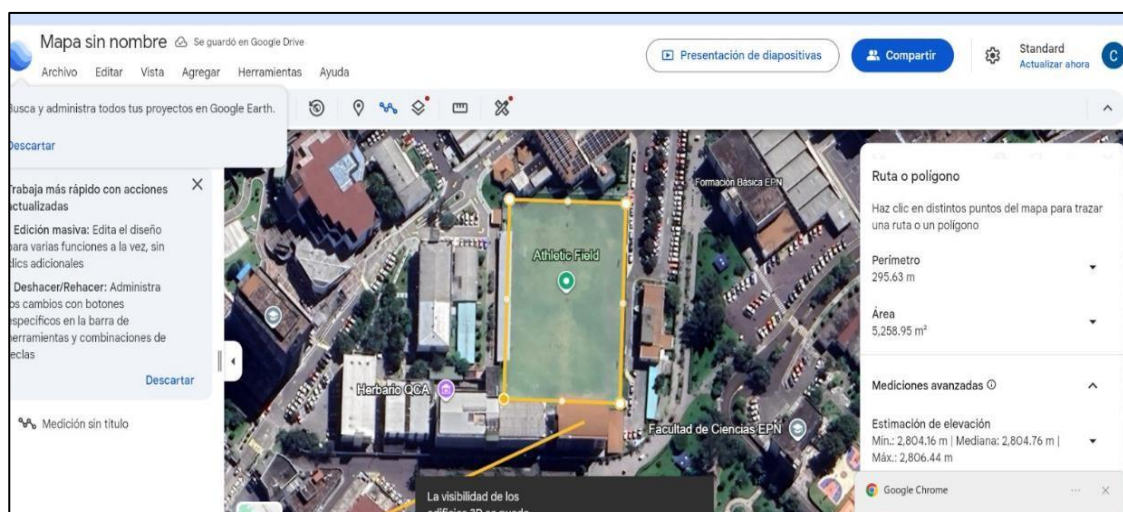
El volumen total anual promedio de captación estimado es de 254,86 m³/año, observándose una marcada estacionalidad en la distribución de las precipitaciones, con mayores aportes durante

los meses lluviosos y valores mínimos en la época seca. En particular, se identifica un pico de captación durante los meses de mayor precipitación y un mínimo crítico en los meses de verano, lo cual condiciona la operación del sistema como una fuente complementaria de riego, mas no como un sistema de abastecimiento continuo.

Además, podemos determinar el volumen de agua necesario para el mantenimiento de la cancha de césped natural, se inició con la delimitación de la superficie de juego mediante la herramienta de georreferenciación Google Earth, obteniendo un área efectiva de 5,258.95 m².

Ilustración 11

Área de la cancha de césped natural



Fuente: (Google Earth, 2025)

Para establecer la lámina de riego adecuada, se tomaron como referencia los "Lineamientos Técnicos para el Diseño de Canchas Deportivas de Fútbol", los cuales estipulan que el césped requiere típicamente entre 25 y 30 mm de agua por semana para compensar la evapotranspiración y asegurar la tracción de la superficie.

Basado en esta normativa, se adoptó el valor de 25 mm por semana como parámetro de diseño, el cálculo del volumen requerido se realizó multiplicando el área total por la lámina de riego establecida, obteniendo así el caudal semanal necesario. Finalmente, para fines de

dimensionamiento del sistema de almacenamiento, este valor se proyectó a un volumen mensual promedio, considerando la distribución de semanas a lo largo del año.

$$Volumen_{semanal} = \text{Área} \times \text{Altura}$$

$$Volumen_{semanal} = 5,258.95 \times 0,025 = 131,47 \text{ m}^3$$

$$Volumen_{anual} = 131,47 \frac{\text{m}^3}{\text{semana}} \times 52 \text{ semanas} = 6836,44 \text{ m}^3$$

Una vez determinada la demanda hídrica anual de la cancha y estimado el volumen potencial de captación pluvial en la cubierta del edificio, se procede a realizar el balance hídrico para establecer el porcentaje de la demanda que puede ser satisfecho mediante el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias.

Para ello, se relaciona el volumen total captado anualmente (obtenido en la Tabla 17) con el volumen total requerido para el riego, aplicando la siguiente relación:

$$\% \text{ Cobertura} = \frac{\text{Volumen Potencial Captado Anual}}{\text{Volumen Requerido de Riego Anual}} \times 100$$

$$\% \text{ Cobertura} = \frac{254,86 \text{ m}^3}{6836,44 \text{ m}^3} \times 100 = 3,73\%$$

El sistema de captación de aguas lluvias es capaz de cubrir el 3.73% de la demanda hídrica total anual de la cancha de césped natural. Si bien este porcentaje indica que el sistema pluvial no puede funcionar como fuente única de abastecimiento, su aporte representa un volumen considerable de ahorro de agua potable (254,860 litros), validando su implementación como un sistema auxiliar o complementario que contribuye a la sostenibilidad del proyecto y reduce la presión sobre la red de agua de la institución.

3.13.1 Análisis Crítico y Dimensionamiento

Con el fin de garantizar que el sistema de almacenamiento pueda recibir sin desbordamientos el volumen generado por la tormenta de diseño, se adopta como criterio de dimensionamiento que el volumen del tanque sea mayor que el volumen de la tormenta crítica,

incorporando además un margen de seguridad para volumen muerto, sedimentación y posibles incertidumbres en los parámetros hidrológicos.

Se plantea lo siguiente:

$$V_{tanque} \geq \gamma \times V_{tormenta}$$

donde:

V_{tanque} es el volumen útil del tanque

$V_{tormenta}$ es el volumen generado por la tormenta de diseño

γ es un factor de seguridad

Para el dimensionamiento del volumen de almacenamiento se adoptó un factor de seguridad $\gamma = 1,20$, que introduce un 20 % adicional sobre el volumen calculado de la tormenta de diseño. Este margen permite considerar el volumen muerto destinado a sedimentación, así como las incertidumbres asociadas a la estimación hidrológica (curvas IDF, tiempo de retorno y coeficiente de escorrentía) y a las pérdidas por operación del sistema. El valor adoptado se encuentra dentro del rango usual (10 - 30 %) empleado en el diseño de tanques de almacenamiento y estructuras hidráulicas con volúmenes de reserva.

$$V_{tanque\ min} = 1,20 \times 13,34 \approx 16,01\ m^3$$

Por lo tanto, el tanque de almacenamiento deberá tener una capacidad mínima del orden de 16 m³ para satisfacer este criterio. En función del volumen mínimo calculado y de la oferta disponible en el mercado, se selecciona un tanque prefabricado comercial de 20 000 litros, equivalente a:

$$V_{tanque} = 20\ m^3$$

Este volumen cumple holgadamente la condición de diseño, este tanque permitirá:

- Almacenar completamente el volumen generado por la tormenta crítica de 15 minutos.
- Dispones de un volumen adicional aproximado de 6,7 m³ que puede considerarse como margen de seguridad ante variaciones de intensidad o duración de la lluvia.

3.13.2 Diseño de la Conducción hacia el Tanque de Almacenamiento

Para el dimensionamiento de las tuberías de conducción se consideran los siguientes datos:

- Caudal de diseño (tormenta de 15 minutos $T_r = 100$ años)

$$Q_{diseño} = 0,01482 \frac{m^3}{s}$$

- Área de captación en cubierta $A_c = 706,52 \text{ m}^2$
- Coeficiente de escorrentía $C = 0,90$
- Material de las tuberías PVC
- Coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0,011$
- Pendiente mínima de tuberías horizontales $S = 1\% = 0,01$

Se plantea disponer dos bajantes de cubierta que dividen aproximadamente en partes iguales el área de aportación, conectadas a un colector principal enterrado que descarga en el tanque de 20 000 L.

3.13.3 Dimensionamiento de los bajantes

Al dividir el caudal de diseño entre dos bajantes, el caudal por cada uno es:

$$Q_{bajante} = \frac{Q_{diseño}}{2} = \frac{0,01482}{2} = 0,00741 \frac{m^3}{s}$$

En el diseño de sistemas de evacuación y recolección de aguas lluvias en edificaciones, el dimensionamiento de las bajantes no se inicia a partir de un diámetro teórico, sino desde diámetros comerciales mínimos comúnmente utilizados en la práctica constructiva. En este contexto, el diámetro nominal DN 110 mm se considera el valor mínimo recomendado y más extendido para bajantes pluviales, debido a su amplia disponibilidad comercial, facilidad de instalación y menor susceptibilidad a obstrucciones por sólidos o material arrastrado desde la cubierta.

Se verifica el diámetro de una tubería circular que trabaje a flujo lleno usando la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{2} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

donde:

- $A = \frac{\pi D^2}{4}$ es el área de la sección
- $R = \frac{D^4}{4}$ es el radio hidráulico para tubería circular a sección llena
- D es el diámetro interior de la tubería

Para un diámetro nominal de 110 mm ($D = 0,11$ m) y pendiente $S = 0,01$

$$Q_{110} = 0,00787 \frac{m^3}{s}$$

Como $Q_{110} > Q_{bajante}$ lo que nos dice que el DN 110 mm es suficiente para cada bajante.

La velocidad de escurrimiento en cada bajante se estima como:

$$A_{110} = \frac{\pi(0,11)^2}{4} = 0,00950 \text{ m}^2$$

$$V_{110} = \frac{Q_{bajante}}{A_{110}} = \frac{0,00741}{0,00950} = 0,78 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad se encuentra dentro del rango usualmente recomendado para evitar sedimentaciones excesivas y desgastes elevados (aprox. 0,6 - 3,0 m/s), por lo que el diámetro adoptado resulta adecuado.

3.13.4 Dimensionamiento del Colector Principal hacia el Tanque

El colector principal recibe el caudal total de diseño:

$$Q_{colector} = Q_{diseño} = 0,01482 \frac{m^3}{s}$$

Se ensaya un diámetro de 160 mm

- Área:

$$A_{160} = \frac{\pi(0,16)^2}{4} = 0,02011 \text{ m}^2$$

Para un diámetro nominal de 160 mm ($D = 0,16$ m) y pendiente $S = 0,01$

$$Q_{160} = 0,0214 \frac{m^3}{s}$$

Como $Q_{160} > Q_{colector}$ el diámetro DN 160 mm proporciona una capacidad hidráulica superior a la requerida.

$$V_{110} = \frac{Q_{bajante}}{A_{160}} = \frac{0,0214}{0,02011} = 0,74 \frac{m}{s}$$

La velocidad resultante también se encuentra dentro del rango recomendado para tuberías pluviales, por lo que el diámetro propuesto es adecuado desde el punto de vista hidráulico y operativo, por lo tanto, se adopta un diámetro de 160 mm para el colector principal con una pendiente del 1% que conduce el agua desde la unión de las dos bajantes hasta la entrada del tanque de 20000 L.

3.13.5 Diseño de la rejilla de captación en cubierta

3.13.5.1 Datos de diseño

Para cada bajante se dispone una rejilla de captación en la cubierta (sumidero de techo), que conduce el agua hacia la tubería vertical DN 110 mm. Se consideran los siguientes datos de diseño:

- **Caudal de diseño por bajante**

$$Q_{bajante} = 0,0741 \frac{m^3}{s}$$

- **Número de bajantes: 2**
- **Altura máxima admisible de empozamiento sobre la rejilla:**

$$h = 0,03 \text{ m}$$

La altura de empozamiento sobre la rejilla de captación se adopta como un parámetro de diseño que permite garantizar el ingreso del caudal de lluvia hacia la bajante, sin generar condiciones de encharcamiento excesivo en la superficie de la cubierta. En la práctica del diseño

de sumideros de techo y sistemas de drenaje superficial, se consideran láminas máximas de agua del orden de 2 a 5 cm, de manera que se disponga de una carga hidráulica suficiente para el funcionamiento del orificio de entrada, pero manteniendo niveles de agua reducidos que no afecten la seguridad ni la apariencia de la cubierta.

- Afluencia por orificio (rejilla funcionando como entrada sumergida).
- Coeficiente de descarga típico para orificios con rejilla:

$$Cd = 0,60$$

Se busca determinar el área libre mínima de paso de la rejilla, de manera que el caudal de diseño pueda ingresar sin que el nivel de lámina supere la altura de empozamiento adoptada.

3.13.6 Cálculo del área libre necesario

Se modela el funcionamiento de la rejilla como un orificio sumergido:

$$Q = CdA_{libre}\sqrt{2gh}$$

donde:

- Q : caudal de diseño por rejilla
- Cd : coeficiente de descarga
- A_{libre} : área libre efectiva de paso
- g : 9,81
- h : carga de agua sobre la rejilla

Despejando el área libre mínima:

$$A_{libre} = \frac{Q}{Cd\sqrt{2gh}}$$

Sustituyendo valores:

$$A_{libre} = \frac{0,00741}{0,60 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,03}} = 0,016 \text{ m}^2$$

3.13.7 Selección de dimensiones de la rejilla

Las rejillas comerciales no ofrecen el 100 % de área libre, ya que parte de la superficie corresponde a las barras o nervios. Típicamente, la relación de área libre de una rejilla pluvial oscila entre el 50 % y el 60 % del área total en planta.

Adoptando una relación de área libre del 60%:

$$A_{total} = \frac{A_{libre}}{0,60} = \frac{0,016}{0,60} = 0,0267 \text{ m}^2$$

Si se adopta una rejilla cuadrada, la longitud de lado necesaria es:

$$L = \sqrt{A_{total}} = \sqrt{0,0267} = 0,163 \text{ m}$$

Para ajustarse a productos comerciales estándar y disponer de un margen adicional de seguridad, se selecciona una rejilla pluvial cuadrada de:

$$A_{200 \times 200} = 0,20 \times 0,20 = 0,040 \text{ m}^2$$

La rejilla de 200 x 200 mm cumple con holgura el caudal de diseño por bajante y limita el empozamiento a alturas inferiores o iguales a los 3 cm adoptados.

Con el objetivo de ajustarse a dimensiones estándar, facilitar su integración al sistema de captación y disponer de un margen adicional de seguridad hidráulica, se selecciona una rejilla pluvial cuadrada de 200 x 200 mm, con un área total de 0,040 m², la cual supera ampliamente el área mínima requerida. Esta configuración garantiza la evacuación del caudal de diseño por bajante y limita el empozamiento superficial a alturas iguales o inferiores a los 3 cm, criterio adoptado para evitar acumulaciones significativas sobre la cubierta.

Para cada bajante se propone el uso de rejillas pluviales fabricadas mediante tecnología de impresión 3D, empleando materiales plásticos reciclados o bioplásticos aptos para exposición a la intemperie, tales como PLA reciclado o PETG. Estos materiales presentan propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones hidráulicas de baja carga, buena resistencia a la humedad y estabilidad dimensional, además de permitir su reprocesamiento a partir de residuos plásticos posconsumo.

Ilustración 12

Filamento para impresora 3D a través de reciclado de botellas plásticas



Fuente: (TYLMANDESING, 2022)

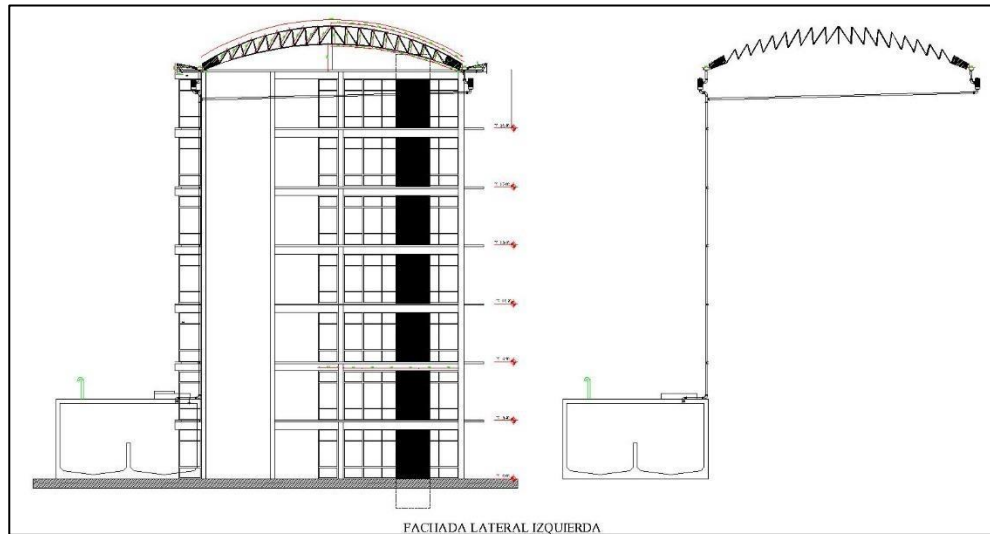
La aplicación de impresión 3D en la fabricación de rejillas pluviales permite incorporar principios de economía circular, al transformar residuos plásticos en componentes funcionales de infraestructura hidráulica, reduciendo la generación de desechos y la huella ambiental asociada a la producción de elementos comerciales convencionales. Adicionalmente, la fabricación aditiva posibilita la optimización geométrica del diseño, ajustando el patrón de nervaduras, el porcentaje de área libre y la porosidad superficial, lo que incrementa la eficiencia hidráulica y facilita el mantenimiento del sistema.

En este contexto, el uso de rejillas pluviales impresas en 3D no solo cumple con los requerimientos hidráulicos del sistema de captación, sino que constituye una solución técnica innovadora y ambientalmente sostenible, alineada con los objetivos del proyecto y con las estrategias actuales de gestión sostenible del recurso hídrico en edificaciones urbanas.

El trazado del sistema de conducción fue definido considerando las condiciones geométricas reales de la edificación, las cuales se representan en la fachada izquierda. Los cambios de dirección y conexiones fueron dispuestos de forma que se reduzcan turbulencias y se facilite la inspección y mantenimiento del sistema.

Ilustración 13

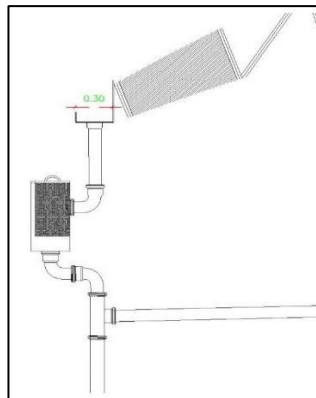
Esquema general del sistema



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 14

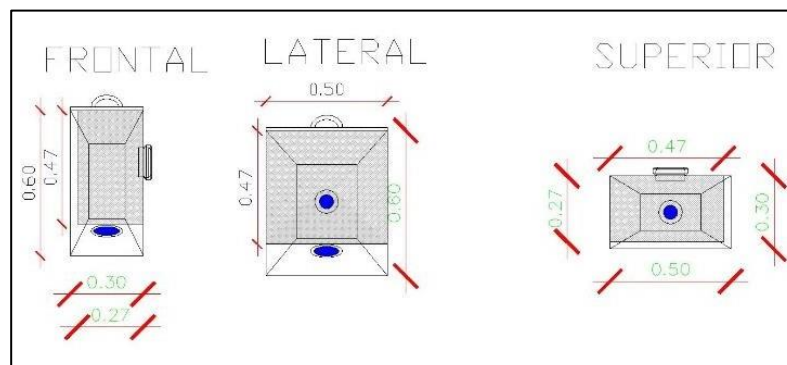
Fachada lateral con sistema de captación y prefiltración



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 15

Detalle del filtro desmontable

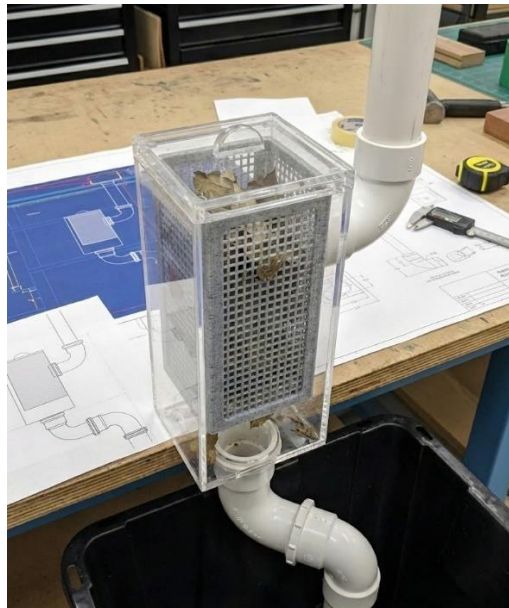


Fuente: Elaboración propia

En el presente proyecto, el término *rejilla* se refiere al elemento superficial de captación, mientras que el *filtro* corresponde al dispositivo desmontable de prefiltración ubicado aguas abajo de la rejilla.

Ilustración 16

Esquema conceptual del filtro para la captación de agua lluvia



Fuente: Generado por IA mediante Google Nano Banana Pro (2025)

3.13.8 Sistema de distribución del agua almacenada

3.13.8.1 Caudal máximo para distribución

Tomaremos como máximo diario el volumen de la tormenta crítica de 15 minutos que puede entrar al tanque:

$$V_{tormenta} = 13,34 \text{ m}^3$$

Si asumimos que ese volumen se capta en un solo día, el caudal máximo diario equivalente es:

$$Q_{max} = \frac{V_{tormenta}}{86400} = \frac{13,34}{86400} = 0,000154 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Este valor representa el caudal medio diario máximo que el sistema puede aportar, en función exclusiva de la precipitación captada.

3.13.9 Caudal de bombeo

Se calcula el caudal de bombeo Q_b , el cual depende del número de horas diarias durante las cuales se prevé operar la bomba. Considerando un tiempo de funcionamiento de $N = 4$ horas al día, el caudal de bombeo se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_b = Q_{max} \frac{24}{N} = 0,000926 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,93 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

El caudal de bombeo calculado representa el caudal instantáneo que la bomba debe suministrar para evacuar, en un periodo de 4 horas, el volumen máximo diario disponible en el tanque.

3.13.10 Diámetro de la tubería de impulsión

El diámetro de la tubería de impulsión se determina a partir del caudal de bombeo obtenido y de la velocidad de diseño en la tubería. De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-11, para líneas de succión e impulsión de sistemas hidráulicos se recomienda que la velocidad del flujo se mantenga dentro del rango de 0,65 a 1,5 m/s, a fin de limitar pérdidas de carga y evitar fenómenos indeseables como cavitación o golpes de ariete, para el presente diseño se adopta una velocidad de 1,5 m/s.

Dentro de este rango recomendado se utiliza la siguiente expresión para calcular el diámetro inicial de la tubería:

$$d = 1,284 \times \sqrt{\frac{Q_b}{V}}$$

donde:

- d es el diámetro interno de la tubería
- Q_b es el caudal de bombeo
- V es la velocidad de diseño

$$d = 1,284 \times \sqrt{\frac{0,000926}{1,5}} = 0,032 \text{ m}$$

El diámetro teórico obtenido es del orden de 32 mm. Considerando los diámetros comerciales disponibles de tuberías de PVC presión, se selecciona el diámetro nominal DN 32 mm, con el cual la velocidad de escurrimiento resultante es cercana a:

$$V = \frac{Q_b}{A_{32}} = 1,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Valor que se encuentra dentro del rango recomendado por la normativa NEC, confirmando la adecuación hidráulica del diámetro seleccionado.

3.13.11 Pérdida por fricción h_f

Las pérdidas por fricción corresponden a la pérdida de energía que experimenta el agua al circular por una tubería debido al rozamiento con las paredes internas del conducto. Estas pérdidas dependen principalmente de la longitud y el diámetro de la tubería, la velocidad del flujo y las características del material del conducto. En el diseño de sistemas de bombeo, las pérdidas por fricción se evalúan mediante la ecuación de Darcy-Weisbach y deben ser compensadas por la bomba para asegurar el transporte adecuado del caudal de diseño.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

donde:

- f : factor de fricción de Darcy Weisbach
- L : longitud de la tubería
- D : diámetro interno
- V : velocidad

Para una tubería de PVC nueva con rugosidad muy baja y flujo turbulento, se adoptan valores típicos:

$$f = 0,018 - 0,020$$

Tomamos un valor conservador:

$$f = 0,020$$

Para el cálculo de las pérdidas por fricción en la línea de impulsión se adoptó una longitud total de tubería de $L=50$ m. Este valor corresponde a una estimación del recorrido hidráulico entre el tanque de almacenamiento y el punto de entrega del sistema de riego, considerando un trazado razonable dentro del área de estudio y la disposición general de la infraestructura existente. Dado que el presente trabajo se desarrolla a nivel de diseño técnico y análisis de factibilidad, la longitud adoptada se considera representativa para la estimación de pérdidas de carga y la selección preliminar de los componentes del sistema.

$$h_f = 0,020 \left(\frac{23,80}{0,032} \right) \left(\frac{1,15^2}{2 \times 9,81} \right) = 1,002 \text{ m}$$

3.13.12 Pérdidas por accesorios h_k

$$h_k = k \times \frac{V^2}{2g}$$

El sistema contará con el siguiente esquema:

- Entrada al sistema $k \approx 0,5$
- 4 codos de 90 en PVC $k \approx 0,30$
- 1 válvula de compuerta abierta $k \approx 0,20$

- 1 válvula check $k \approx 2$
- Salida libre en el punto de entrega $k \approx 1$

Suma total:

$$k_{total} = 0,5 + 1,20 + 0,20 + 2 + 1 = 4,90 \approx 5$$

$$h_k = 5 \times \frac{1,15^2}{2 \times 9,81} = 0,34 \text{ m}$$

3.13.12.1 Pérdida total del sistema

$$h_{pérdidas} = h_f + h_k = 2,11 + 0,34 = 2,45 \text{ m}$$

De modo que, para la línea de impulsión DN 32 mm (50 m de longitud y disposición de accesorios descrita), las pérdidas de carga totales son del orden de 2,4 - 2,5 m.

3.13.12.2 Potencia requerida

$$Potencia \text{ Bombeo} = \frac{Q_b \times H_b}{76 \times \eta}$$

$$Potencia \text{ Bombeo} = \frac{0,93 \times 2,45}{76 \times 0,60} = \frac{2,28}{45,6} = 0,05 \text{ HP}$$

La potencia hidráulica calculada es del orden de 0,05 HP. No obstante, por criterios de disponibilidad comercial, confiabilidad operativa y para asegurar un margen suficiente de operación frente a variaciones de caudal y pérdidas adicionales no consideradas explícitamente, se recomienda la selección de una bomba centrífuga comercial de al menos 0,5 HP, la cual resulta ampliamente suficiente para cubrir el caudal y la altura dinámica total establecidos.

Adicionalmente, se constató que en la infraestructura existente de la Universidad ya se dispone de una bomba instalada de 2 HP, utilizada actualmente en el sistema hidráulico del edificio. Este sistema de bombeo alimenta también la red de aspersores utilizada para el riego de áreas verdes del campus, por lo que desde el punto de vista técnico presenta una capacidad muy superior a la requerida por el sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias propuesto.

Ilustración 17

Sistema de bombeo existente en el edificio para distribución de agua



Fuente: Elaboración propia

En este sentido, mediante la incorporación de una válvula de control y una conexión adecuada al sistema de captación, la bomba existente de 2 HP resulta suficiente para impulsar el agua de lluvia almacenada hacia la red de aspersores, permitiendo su aprovechamiento para riego sin necesidad de instalar un nuevo equipo de bombeo. Esta alternativa facilita la integración del sistema propuesto con la infraestructura hidráulica actual, reduce los costos de implementación y refuerza el enfoque de optimización de recursos y sostenibilidad planteado en el proyecto.

4. CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL

4.1 Presentación de resultados hidrológicos

Los resultados hidrológicos del presente estudio se obtuvieron a partir del análisis de datos históricos de precipitación provenientes del producto satelital CHIRPS, el cual integra información de sensores remotos y estaciones meteorológicas y cuenta con amplia validación científica y aceptación en estudios hidrológicos, especialmente en regiones donde la disponibilidad de registros subhorarios es limitada. Para el diseño del sistema se consideraron eventos de corta duración y tiempos de retorno de hasta 100 años, en concordancia con un enfoque conservador para infraestructuras de captación pluvial.

A partir de las series de precipitación de CHIRPS se estimaron las intensidades de lluvia correspondientes a diferentes tiempos de retorno, las cuales sirvieron como insumo para la aplicación del método racional en el cálculo del caudal de diseño. Para el área de captación analizada (706,52 m²) y un coeficiente de escorrentía de 0,90, se obtuvo un caudal máximo de diseño del orden de 0,01482 m³/s para el evento crítico, valor utilizado para el dimensionamiento de los elementos del sistema de captación, conducción y almacenamiento.

De manera complementaria, se realizó una comparación entre las intensidades derivadas de CHIRPS y las curvas IDF oficiales del INAMHI, evidenciándose diferencias más significativas en eventos de corta duración, particularmente para una duración de 15 minutos y un tiempo de retorno de 100 años, en los cuales las intensidades del INAMHI resultaron mayores. Esta comparación permitió contextualizar los resultados y analizar la incertidumbre asociada a la fuente de datos, sin que ello implique una modificación de los valores adoptados para el diseño, los cuales se basan exclusivamente en información CHIRPS.

Adicionalmente, el análisis del volumen anual de agua lluvia captada, estimado en aproximadamente 254,86 m³/año, permitió evaluar la disponibilidad real del recurso. Al contrastar este valor con la demanda hídrica de riego de la cancha de fútbol, se determinó que el sistema es capaz de cubrir únicamente una fracción de dicha demanda, confirmando que el aprovechamiento de aguas lluvias funciona como un sistema complementario dentro de la gestión hídrica del campus universitario.

Finalmente, es importante señalar que, si bien los datos utilizados presentan validación científica y amplia aceptación, los resultados obtenidos representan condiciones estadísticas de largo plazo. En consecuencia, no contemplan posibles variaciones extremas asociadas a cambios climáticos futuros, anomalías interanuales o eventos atípicos, por lo que las estimaciones de volumen captado y cobertura de la demanda deben interpretarse como valores representativos de diseño y no como predicciones deterministas para años específicos.

4.2 Análisis técnico del sistema diseñado

El análisis técnico del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias se realizó con base en los resultados hidrológicos obtenidos a partir de datos de precipitación del producto

satelital CHIRPS, los cuales fueron utilizados como insumo principal para el diseño hidráulico del sistema. La evaluación consideró la coherencia entre los componentes de captación, conducción, almacenamiento y distribución, así como la relación entre la oferta hídrica disponible y la demanda prevista para riego.

Desde el punto de vista hidrológico, el sistema fue dimensionado empleando el método racional, adoptando un tiempo de retorno de 100 años y una duración crítica de 15 minutos, criterios consistentes con el tamaño del área de captación y con un enfoque conservador para infraestructuras pluviales. A partir de las intensidades derivadas de CHIRPS se obtuvo un caudal máximo de diseño de $0,01482 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual sirvió de base para el dimensionamiento de los distintos elementos del sistema.

El sistema de captación, compuesto por rejillas pluviales diseñadas específicamente para este proyecto y fabricadas mediante impresión 3D con materiales termoplásticos reciclados, presenta un área libre suficiente para evacuar el caudal de diseño, manteniendo alturas de empozamiento reducidas sobre la cubierta. Desde el punto de vista técnico, este tipo de solución resulta viable debido a las bajas solicitaciones hidráulicas y mecánicas a las que se encuentra sometida, además de facilitar las labores de limpieza y mantenimiento periódico.

En cuanto al sistema de conducción, los diámetros adoptados para las bajantes y tuberías garantizan velocidades de flujo dentro de los rangos recomendados por la normativa, evitando tanto procesos de sedimentación como pérdidas excesivas de energía. El análisis de pérdidas por fricción y accesorios en la línea de impulsión evidenció una altura de carga reducida, lo que permitió la selección de una bomba de baja potencia, adecuada para transportar el caudal disponible desde el tanque de almacenamiento hasta el punto de entrega para riego.

El tanque de almacenamiento seleccionado, con un volumen de 20 m^3 , fue dimensionado en función del volumen generado por la tormenta de diseño obtenida a partir de los datos CHIRPS, incorporando un margen de seguridad apropiado. Desde el punto de vista técnico, esta capacidad resulta suficiente para regular los aportes instantáneos de lluvia y evitar desbordamientos durante eventos críticos; sin embargo, no permite la acumulación de grandes volúmenes a largo plazo, debido a la limitada oferta anual de agua lluvia disponible.

Al comparar el volumen anual estimado de agua lluvia captada (254,86 m³/año) con la demanda hídrica requerida para el riego de una cancha de fútbol, se concluye que el sistema no es capaz de cubrir la totalidad de dicha demanda. No obstante, cumple adecuadamente su función como sistema complementario, permitiendo reducir parcialmente el consumo de agua potable y contribuir a una gestión más eficiente del recurso hídrico dentro del campus universitario.

Finalmente, es importante señalar que el estudio no incluyó análisis de calidad bacteriológica ni fisicoquímica avanzada del agua captada, debido a que el sistema fue diseñado exclusivamente para usos no potables, específicamente riego de áreas verdes. En consecuencia, el alcance del tratamiento se limitó a procesos de prefiltración física orientados a la remoción de sólidos gruesos y material particulado. Esta exclusión es coherente con los objetivos del sistema y con las normativas aplicables al uso de aguas lluvias para riego, no siendo necesaria la evaluación de potabilidad.

4.3 Evaluación económica

Para la evaluación económica del sistema se incorporó el cálculo del consumo anual estimado de agua del edificio, con el fin de compararlo con el volumen máximo probable anual de agua lluvia que puede captarse mediante el sistema propuesto. Esta comparación permite cuantificar el potencial de reducción del consumo de agua potable y estimar el beneficio económico asociado bajo condiciones de diseño.

Dado que el edificio presenta un uso mixto (oficinas y aulas), se adoptó una dotación diaria representativa basada en la Norma Hidrosanitaria NHE Agua. Considerando una ocupación promedio de 200 personas y una dotación adoptada de 50 L/persona·día, el consumo diario estimado resulta:

$$Q_d = 200 \times 50 = 10 \frac{m^3}{día}$$

Asumiendo un régimen de 200 días laborables al año, la demanda anual del edificio se estima como:

$$Q_d = 10 \times 200 = 2000 \frac{m^3}{año}$$

Por otro lado, el volumen anual máximo probable de agua lluvia captada en la cubierta, calculado a partir de los registros pluviométricos analizados, se estimó en:

$$V_{lluvia} = 254,86 \frac{m^3}{año}$$

En consecuencia, el aporte máximo anual del sistema respecto a la demanda anual del edificio se expresa como:

$$\%cobertura = \frac{V_{lluvia}}{Q_a} \times 100 = \frac{254,86}{2000} \times 100 = 12,7 \%$$

Este valor representa la reducción potencial máxima del consumo de agua potable atribuible al sistema, bajo el supuesto de que el volumen anual de captación estimado sea efectivamente alcanzado. Es importante señalar que este ahorro corresponde a un escenario teórico de diseño, y no considera posibles variaciones climáticas interanuales, cambios en el régimen de precipitaciones ni períodos de sequía que puedan afectar la disponibilidad real de agua lluvia en años futuros.

La evaluación económica del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias se realizó con el objetivo de analizar la viabilidad financiera de su implementación, considerando los costos asociados a la instalación de los principales componentes y los beneficios derivados de la reducción parcial del consumo de agua potable destinada al riego. Los costos de implementación incluyen principalmente el tanque de almacenamiento de 20 m³, las tuberías de conducción, el sistema de bombeo y las rejillas pluviales fabricadas mediante impresión 3D, así como los elementos accesorios necesarios para su funcionamiento.

Dado que el presente estudio corresponde a un diseño técnico y análisis de factibilidad, los costos fueron estimados a partir de precios referenciales de mercado y no incluyen costos de obra civil mayor ni gastos asociados a construcción o montaje especializado.

Desde el punto de vista operativo, el sistema presenta costos de mantenimiento bajos, ya que los procesos de tratamiento se limitan a filtración física y limpieza periódica de rejillas y filtros, sin requerir procesos de desinfección ni consumos energéticos significativos. El consumo

eléctrico asociado al bombeo es reducido, debido al bajo caudal de operación y a la pequeña altura dinámica total requerida, lo que se traduce en costos de operación marginales.

En términos de beneficios económicos, el aprovechamiento de aguas lluvias permite una reducción parcial del consumo de agua potable, especialmente para riego. Si bien este ahorro no es suficiente para justificar el sistema únicamente desde un criterio de retorno económico directo, sí representa una disminución acumulativa de los costos de consumo de agua a lo largo de la vida útil del sistema, particularmente cuando se integra a infraestructura existente.

Al comparar los costos de implementación con los ahorros potenciales generados, se concluye que el sistema no presenta una rentabilidad económica inmediata ni un período de recuperación corto. No obstante, su implementación resulta económicamente razonable cuando se analiza como parte de una estrategia institucional de gestión sostenible del recurso hídrico, especialmente en contextos educativos, donde el valor demostrativo, académico y ambiental del proyecto adquiere mayor relevancia que la rentabilidad financiera directa.

En consecuencia, el sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias propuesto se considera económicamente viable desde una perspectiva de costo-beneficio ampliada, en la que se integran no solo los ahorros monetarios directos, sino también los beneficios asociados a la reducción del consumo de agua potable, la optimización de infraestructura existente, la sensibilización ambiental y la replicabilidad del modelo en otras edificaciones del campus universitario.

Tabla 18

Costos referenciales de implementación del sistema

Componente	Descripción	Valor referencial (USD)
Tanque de almacenamiento	Tanque vertical de polietileno con protección UV, capacidad 20 m ³	3400
Tubería PVC incluye mano de obra	Tubería PVC	2000

Bomba	Bomba Jet 0,5 HP	115
Filtros	Impresión 3D	10 por unidad

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, para estimar el beneficio económico anual, se adoptó una tarifa referencial obtenida a partir de una factura residencial disponible, correspondiente a un consumo de 41 m³ con un valor total de USD 43,10, lo que equivale a una tarifa promedio aproximada de 1,05 USD/m³. Con base en el volumen anual máximo probable de agua lluvia captada (254,86 m³/año), el ahorro económico anual estimado sería del orden de USD 268/año. Este valor se utiliza únicamente como referencia preliminar, dado que las tarifas pueden variar según el tipo de usuario (residencial, comercial o institucional) y la estructura tarifaria vigente.

Adicionalmente al escenario base de implementación, se plantea un escenario alternativo en el cual el caudal de agua lluvia captado se incorpore directamente al sistema hidráulico existente del edificio, aprovechando la cisterna y el sistema de bombeo actualmente instalados. En este esquema, el agua de lluvia funcionaría como un aporte complementario al almacenamiento existente, reduciendo o eliminando la necesidad de adquirir un tanque adicional de gran capacidad. Desde el punto de vista económico, este enfoque permitiría una disminución significativa del costo inicial de implementación, al prescindir de la compra de un tanque de almacenamiento de 20 m³, que representa el componente de mayor peso dentro de la inversión total. Asimismo, la integración con la infraestructura existente mejora la viabilidad económica del sistema y refuerza el criterio de optimización de recursos, sin afectar la funcionalidad hidráulica ni la seguridad operativa del sistema de riego.

Este escenario es particularmente adecuado para edificaciones institucionales que ya disponen de sistemas de almacenamiento y bombeo, y destaca el carácter flexible, adaptable y sostenible de la solución propuesta.

4.4 Evaluación ambiental

La evaluación ambiental del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias considera sus impactos positivos sobre el uso eficiente del recurso hídrico, la reducción de la

escorrentía superficial y la incorporación de principios de sostenibilidad en el diseño de infraestructura urbana. La literatura científica respalda que la captación de agua lluvia constituye una estrategia efectiva para disminuir el consumo de agua potable y mitigar impactos ambientales asociados a la gestión convencional del recurso hídrico en edificaciones (Rahman, 2014; Carollo et al., 2022).

Diversos estudios han evidenciado que los sistemas de captación y almacenamiento de aguas lluvias pueden generar reducciones significativas en la demanda de agua potable, con rangos de ahorro que oscilan típicamente entre el 30 % y el 60 % del consumo total, dependiendo del área de captación, la capacidad de almacenamiento y los patrones de uso del edificio (Rahman, 2014). De manera similar, investigaciones recientes indican que el ahorro de agua no potable en edificaciones urbanas puede variar entre el 29 % y el 62 %, en función de las condiciones climáticas y del diseño del sistema (Carollo et al., 2022).

Si bien estos valores corresponden a una amplia gama de escalas y tipologías de edificios, proporcionan un marco cuantitativo de referencia que permite contextualizar los resultados obtenidos en el presente estudio. En este caso, el sistema diseñado alcanza una cobertura estimada del 12,7 % del consumo anual del edificio, valor coherente con edificaciones de tamaño medio y superficies de captación moderadas, y consistente con sistemas de aprovechamiento pluvial concebidos como fuentes complementarias y no sustitutivas del abastecimiento convencional.

Desde la perspectiva de la gestión de escorrentía urbana, la captación de aguas lluvias contribuye a reducir el volumen de agua que escurre superficialmente sobre áreas impermeables, disminuyendo la carga hidráulica sobre los sistemas de drenaje y el riesgo de encharcamientos o sobrecargas locales. Estudios realizados en contextos urbanos han reportado reducciones del volumen de escorrentía de hasta un 20 %, dependiendo del régimen de precipitaciones y de la eficiencia del sistema de captación (Steffen, 2013).

Adicionalmente, la captación y utilización de agua lluvia presenta beneficios indirectos sobre la calidad del agua y los ecosistemas receptores, al reducir el arrastre de sedimentos, nutrientes y contaminantes desde superficies impermeables hacia ríos y quebradas. Este efecto ha

sido ampliamente reconocido como un beneficio ambiental asociado a los sistemas de aprovechamiento pluvial en entornos urbanos (Nandi, 2022).

Un componente ambiental relevante del sistema propuesto es la incorporación de rejillas y filtros fabricados mediante impresión 3D, utilizando materiales plásticos reciclados o bioplásticos, como PLA o PETG. La fabricación aditiva permite transformar residuos plásticos postconsumo en componentes funcionales de infraestructura hidráulica, reduciendo la generación de desechos sólidos y la demanda de materiales vírgenes. Estudios sobre impresión 3D con plásticos reciclados destacan su potencial para disminuir la huella ambiental, promover esquemas de economía circular y extender el ciclo de vida de los materiales, especialmente en aplicaciones de baja sollicitación mecánica (Baechler et al., 2013; Ngo et al., 2018).

En este sentido, el uso de filtros impresos en 3D no solo cumple una función hidráulica dentro del sistema de captación, sino que refuerza el enfoque ambiental del proyecto al integrar soluciones tecnológicas sostenibles, replicables y de bajo impacto ambiental. Esta estrategia resulta particularmente pertinente en el contexto universitario, donde el proyecto puede servir como herramienta demostrativa y educativa para la promoción de prácticas de gestión sostenible del agua y de los residuos.

Finalmente, la implementación del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias se alinea directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, en particular con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), al fomentar el uso eficiente y responsable del recurso hídrico, y con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al contribuir al manejo integral del agua en áreas urbanas. La integración de soluciones basadas en captación pluvial y reutilización de materiales reciclados en edificaciones universitarias fortalece, además, la generación de conciencia ambiental y la adopción de prácticas sostenibles dentro de la comunidad académica.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El análisis y diseño del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias permitió demostrar la viabilidad técnica de su implementación en un edificio administrativo universitario. A partir del análisis hidrológico y del dimensionamiento hidráulico, se definieron de manera coherente los componentes principales del sistema, incluyendo áreas de captación, caudales de diseño, volúmenes de almacenamiento y requerimientos de bombeo. El diseño propuesto responde adecuadamente a las condiciones climáticas locales y a las características físicas de la edificación, garantizando un funcionamiento seguro frente a eventos de lluvia intensa y permitiendo el aprovechamiento del recurso hídrico para usos no potables, particularmente riego.
- El análisis hidrológico, basado en datos satelitales CHIRPS y el ajuste estadístico mediante la distribución de Gumbel, permitió caracterizar de forma confiable los eventos de precipitación extrema en el área de estudio. La obtención de curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF) y la construcción de hietogramas de diseño para distintos períodos de retorno proporcionaron una base sólida para el dimensionamiento del sistema. La adopción de un período de retorno de 100 años como criterio de diseño constituye una decisión conservadora y adecuada para infraestructura institucional, asegurando un nivel elevado de seguridad hidráulica frente a eventos extremos y fortaleciendo la robustez del sistema propuesto.
- El análisis económico y de balance hídrico evidenció que el sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias no presenta una rentabilidad financiera inmediata ni un periodo de recuperación corto al evaluarse únicamente desde el ahorro en tarifa. No obstante, el sistema permite cubrir el 12,7% de la demanda anual operativa del edificio lo que representa una reducción significativa en el consumo de agua potable. Adicionalmente, al evaluar su aporte para el mantenimiento de áreas deportivas, se determinó que el volumen captado contribuye con el 3,73% de la demanda hídrica total de la cancha de fútbol. Este aporte complementario valida la implementación del sistema bajo un enfoque

de gestión sostenible, logrando un ahorro acumulativo de recursos hídricos y reduciendo la presión sobre la red institucional tanto para usos sanitarios como de riego. Asimismo, la posibilidad de integrar el sistema con la infraestructura existente, en particular mediante el uso de una bomba ya instalada en el edificio, reduce significativamente los costos de implementación y mejora la viabilidad económica global del proyecto. En este contexto, el sistema resulta económicamente justificable cuando se analiza bajo un enfoque de gestión eficiente del recurso hídrico y no únicamente como una inversión de retorno financiero directo.

- La incorporación de rejillas y filtros fabricados mediante impresión 3D a partir de materiales plásticos reciclados o bioplásticos constituye un aporte relevante en términos de sostenibilidad ambiental y eficiencia técnica del sistema de captación de aguas lluvias. Esta estrategia permite reducir el uso de materiales convencionales, valorizar residuos plásticos y disminuir la huella ambiental asociada a la fabricación, transporte y disposición final de componentes comerciales tradicionales. Asimismo, la tecnología de impresión 3D proporciona una elevada flexibilidad geométrica, lo que facilita la adaptación del diseño de los elementos de prefiltración a las condiciones hidráulicas específicas del sistema, optimizando su desempeño, mejorando la calidad del agua destinada a riego y simplificando las labores de mantenimiento y reposición. Desde una perspectiva de sostenibilidad integral, esta solución se alinea directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), al fomentar el uso eficiente del recurso hídrico mediante la reutilización de aguas lluvias; con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al integrar tecnologías sostenibles en la infraestructura urbana existente; y con el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al promover principios de economía circular a través del aprovechamiento de materiales reciclados. En conjunto, esta propuesta refuerza el carácter innovador, ambiental y académico del proyecto, constituyendo una solución sostenible y replicable para edificaciones institucionales.

5.2 Recomendaciones técnicas, económicas y ambientales

- Se recomienda implementar el sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias de manera integrada con la infraestructura hidráulica existente del edificio, particularmente el sistema de bombeo y la red de riego por aspersión, incorporando dispositivos de control y mantenimiento que permitan ajustar su operación frente a variaciones estacionales de precipitación. Asimismo, se sugiere realizar un seguimiento operativo inicial que permita validar en campo los parámetros hidráulicos de diseño y optimizar el desempeño del sistema en condiciones reales de funcionamiento.
- Desde el punto de vista económico, se recomienda priorizar la reutilización de infraestructura y equipos existentes, así como la fabricación local de componentes mediante impresión 3D, con el fin de reducir costos de implementación y dependencia de insumos comerciales. Adicionalmente, se sugiere que la evaluación económica del sistema sea actualizada periódicamente considerando tarifas reales del servicio de agua potable y posibles escenarios futuros, permitiendo valorar el sistema bajo un enfoque de costo - beneficio ampliado y de largo plazo.
- En términos ambientales, se recomienda consolidar el uso de materiales reciclados y bioplásticos en la fabricación de rejillas y filtros mediante impresión 3D, fortaleciendo los principios de economía circular y reduciendo la huella ambiental asociada a la infraestructura hidráulica. La adopción y replicabilidad del sistema en edificaciones institucionales contribuye de manera directa al uso eficiente del recurso hídrico, a la reducción de la escorrentía urbana y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 6, ODS 11 y ODS 12, promoviendo una gestión sostenible e integral del agua y los materiales.

6. BIBLIOGRAFÍA

Baechler, C., DeVuono, M., & Pearce, J. M. (2013). Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. *Rapid Prototyping Journal*, 19(2), 118–125.

<https://doi.org/10.1108/13552541311302978>

- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research, 115*, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Campos Aranda, D. F. (1978). *Análisis de la precipitación y escorrentía en cuencas urbanas*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Carollo, M., Becciu, G., & Ravazzani, G. (2022). Benefits of rainwater harvesting for urban water management: A case study. *Sustainability, 14*(3), 1489. <https://doi.org/10.3390/su14031489>
- Climate Hazards Center. (s. f.). *CHIRPS: Rainfall estimates from rain gauge and satellite observations*. University of California, Santa Barbara. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Environmental Protection Agency. (2013). *Rainwater harvesting: Conservation, credit, codes, and cost literature review and case studies*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/npdes/rainwater-harvesting-conservation-credit-codes-and-cost-literature-review-and-case-studies>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations (CHIRPS). *Scientific Data, 2*, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Ghisi, E., & Freitas, D. A. (2024). Economic feasibility of rainwater harvesting and greywater reuse in a multifamily building. *Water, 16*(11), 1580. <https://doi.org/10.3390/w16111580>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2025). *Base pluviométrica oficial del Ecuador*. INAMHI.

Nandi, S., Bera, A. K., & Mukhopadhyay, A. (2022). Rainwater harvesting for domestic use: Sustainability assessment and water security benefits. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130138.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130138>

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.

<https://sdgs.un.org/2030agenda>

Rahman, A., Keane, J., & Imteaz, M. A. (2014). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.002>

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

<https://doi.org/10.1111/jawr.12038>

UN-Water. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023*.

<https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023>

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water*.

<https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en/download>

7. ANEXOS

Anexo 1. Aspersor utilizado en el sistema de riego de la cancha

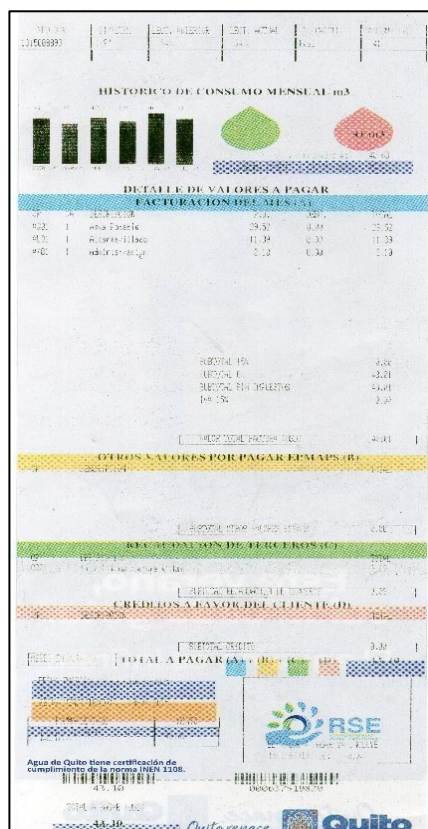


La figura muestra un aspersor de riego actualmente utilizado en la cancha, conectado a la red de distribución de agua existente. Este dispositivo permite la aplicación uniforme del agua sobre el área verde mediante un mecanismo de rotación y regulación del caudal, siendo compatible con sistemas de riego presurizados. El aspersor forma parte de la infraestructura hidráulica instalada y puede ser alimentado tanto por el sistema convencional de abastecimiento como por el sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias propuesto, sin requerir modificaciones sustanciales.

Anexo 2. Cisterna existente para almacenamiento de agua en la Universidad

La figura muestra la cisterna existente utilizada para el almacenamiento de agua en la infraestructura hidráulica de la Universidad. Este elemento forma parte del sistema actual de abastecimiento y distribución, y constituye un punto estratégico para la integración del sistema de recolección y reutilización de aguas lluvias propuesto. La utilización de esta cisterna permite aprovechar infraestructura ya instalada, optimizar la capacidad de almacenamiento disponible y reducir los costos asociados a la implementación de nuevos sistemas de acumulación de agua.

Anexo 3. Planilla referencial de consumo y facturación de agua potable



La figura presenta una planilla de consumo y facturación de agua potable utilizada como referencia para estimar el costo unitario del consumo de agua en el análisis económico del sistema propuesto. A partir de un consumo registrado de 41 m³ y un valor total facturado de USD 43,10, se determinó una tarifa promedio aproximada de USD 1,05/m³, empleada exclusivamente con fines comparativos y de estimación preliminar del ahorro económico asociado al aprovechamiento de aguas lluvias. Se aclara que esta planilla corresponde a un usuario residencial y no a una edificación institucional; por lo tanto, el valor obtenido se utiliza únicamente como referencia orientativa, considerando que las tarifas pueden variar según el tipo de usuario y la estructura tarifaria vigente del prestador del servicio.