

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Rediseño del Sistema de Circulación y
Tratamiento del Agua en la Laguna del campus USFQ**

Mateo Gabriel Vásquez Salas

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 18 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Rediseño del Sistema de Circulación y
Tratamiento del Agua en la Laguna del campus USFQ**

Mateo Gabriel Vásquez Salas

Nombre del profesor, Título académico

Sixto A. Durán-Ballén, PhD

Quito, 18 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Mateo Gabriel Vásquez Salas

Código: 00320344

Cédula de identidad: 1004585145

Lugar y fecha: Quito, 18 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

La gestión eficiente de los recursos hídricos es un desafío crucial en la actualidad, especialmente en entornos académicos que buscan implementar prácticas sostenibles. Este trabajo de fin de carrera se enfoca en el rediseño del sistema de circulación y tratamiento del agua de la laguna del campus de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), con el objetivo de abordar los problemas de balance hídrico y calidad del agua que enfrenta este cuerpo de agua.

A través de un análisis integral, se determinó un déficit hídrico significativo durante los meses secos, causado por altas tasas de evaporación y bajas precipitaciones. Para mitigar este problema, se propuso un sistema de captación de agua lluvia desde el techo del Coliseo Alexandros, complementado con almacenamiento en cisternas. Asimismo, se evaluaron alternativas para mejorar la calidad del agua, incluyendo un humedal de flujo sub-superficial horizontal y un sistema de aireación, que contribuirán a reducir niveles elevados de pH y DQO.

Los resultados de este estudio destacan la viabilidad de las soluciones propuestas, las cuales no solo garantizarán la sostenibilidad de la laguna, sino que también reducirán el consumo de agua potable en el campus, promoviendo un modelo replicable de gestión hídrica. Este proyecto posiciona a la USFQ como líder en prácticas ambientales sostenibles dentro del ámbito académico.

Palabras clave: gestión hídrica, sostenibilidad, balance hídrico, calidad del agua, captación de agua lluvia, tratamiento natural.

ABSTRACT

Efficient water resource management is a critical challenge today, particularly in academic settings seeking to implement sustainable practices. This capstone project focuses on redesigning the water circulation and treatment system for the lagoon on the Universidad San Francisco de Quito (USFQ) campus to address issues of water balance and quality faced by this body of water.

Through a comprehensive analysis, a significant water deficit was identified during dry months, caused by high evaporation rates and low precipitation. To mitigate this issue, a rainwater harvesting system from the roof of the Coliseo Alexandros was proposed, complemented by cistern storage. Additionally, alternatives to improve water quality were evaluated, including a horizontal sub-surface flow constructed wetland and an aeration system, which will help reduce elevated pH and COD levels.

The results of this study highlight the feasibility of the proposed solutions, which will not only ensure the lagoon's sustainability but also reduce potable water consumption on campus, promoting a replicable model of water management. This project positions USFQ as a leader in sustainable environmental practices within the academic sphere.

Keywords: water management, sustainability, water balance, water quality, rainwater harvesting, natural treatment.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 PROBLEMÁTICA	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 METODOLOGÍA.....	15
2. DESARROLLO DEL TEMA	17
2.1 MARCO TEÓRICO	17
2.1.1 Desarrollo Sostenible.....	17
2.1.2 Balance Hídrico	17
2.1.3 Calidad del Agua	18
2.1.4 Método Racional.....	19
2.2 DISPONIBILIDAD HÍDRICA PLUVIAL PARA LA LAGUNA DE LA USFQ	19
2.2.1 Áreas de Drenaje	19
2.2.2 Intensidad de lluvia.....	21
2.2.3 Coeficiente de escorrentía	23
2.2.4 Caudal de escorrentía.....	25
2.3 DEMANDA HÍDRICA DE LA LAGUNA EN MESES DE VERANO	27

2.3.1 Relleno con Agua Potable	27
2.3.2 Infiltración	30
2.3.3 Evaporación	31
2.4 BALANCE HÍDRICO PARA LA LAGUNA	39
2.4.1 Balance Hídrico Diario	39
2.5 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA	43
2.5.1 Diseño para sistema de captación	44
2.6 AHORRO DE AGUA Y ECONÓMICO	46
2.7 CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA	47
2.7.1 Análisis de la calidad del agua	47
2.7.2 Propuestas para tratamiento del agua	50
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
3.1 CONCLUSIONES	55
3.2 RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO A: RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA DE LA LAGUNA COMPLETOS.....	62
ANEXO B: COEFICIENTE DE MANNING	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de áreas de drenaje	21
Tabla 2. Precipitaciones mensuales desde 1994 hasta 2024.....	22
Tabla 3. Precipitaciones promedio mensuales.....	23
Tabla 4. Coeficientes de escorrentía para el método racional	25
Tabla 5. Caudales de escorrentía mensuales del Coliseo Alexandros	26
Tabla 6. Caudales de escorrentía mensuales de Galileo y Newton	26
Tabla 7. Caudales de escorrentía de la laguna.....	27
Tabla 8. Caudal de llave para relleno de laguna	28
Tabla 9. Mediciones de evaporación en gruta junto a laguna	32
Tabla 10. Mediciones de evaporación en terraza Hayek	33
Tabla 11. Tasas de evaporación teóricas con factor 19 de sensibilidad al viento	35
Tabla 12. Datos para calibración local de ecuación de evaporación	36
Tabla 13. Tasas de evaporación teóricas con factor 12.25 de sensibilidad al viento	38
Tabla 14. Resultados de concentraciones de amonio y nitrato en el agua de la laguna.	48
Tabla 15. Resultados de oxígeno disuelto, pH, y DQO en el agua de la laguna.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de drenaje de Coliseo Alexandros	20
Figura 2. Área de drenaje de Techo Edificios Newton y Galileo.....	20
Figura 3. Área de Laguna	20
Figura 4. Precipitaciones promedio mensual.....	23
Figura 5. Valores típicos de coeficientes de escorrentía	24
Figura 6. Hidrograma integrado de todo el año.....	41
Figura 7. Hidrograma integrado de meses de verano	42
Figura 8. Tarifa de agua para consumo no residencial	46
Figura 9. Humedal de flujo superficial.....	52
Figura 10. Humedal de flujo sub-superficial horizontal.....	52
Figura 11. Humedal de flujo subterráneo vertical	53

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial y vital para la vida, con un papel fundamental en el desarrollo sostenible y en el equilibrio de los ecosistemas. Sin embargo, la disponibilidad de este recurso se enfrenta a desafíos significativos debido al cambio climático, el crecimiento demográfico y la contaminación, factores que impactan de manera negativa la calidad y cantidad de agua disponible para el consumo humano y ambiental. Esta situación es especialmente crítica en áreas urbanas, donde el uso intensivo de agua potable para actividades no esenciales contribuye a la presión sobre los sistemas de abastecimiento.

La Universidad San Francisco de Quito (USFQ) ha manifestado su compromiso con la sostenibilidad ambiental a través de diversas iniciativas que buscan reducir el consumo de agua potable en su campus. En este contexto, la laguna del campus se presenta como un área de oportunidad para implementar estrategias de gestión de recursos hídricos más sostenibles. La laguna enfrenta problemas de balance hídrico debido a la evaporación, lo que hace necesario un rediseño del sistema de circulación del agua y la implementación de un sistema de tratamiento natural que optimice su calidad. Por lo que se propone, por un lado, un sistema de captación de agua lluvia desde el techo del coliseo, que permita compensar la evaporación en los meses secos y descargar los excesos de agua en las temporadas de lluvias, y por otro, un tratamiento natural y filtrado biológico para mejorar la calidad del agua.

A través de un análisis de balance hídrico, se estudiarán las pérdidas de agua en la laguna por evaporación y el potencial de recarga con agua de lluvia. También se evaluarán los beneficios ecológicos y económicos derivados de la implementación de un sistema de tratamiento natural. Este enfoque, además de contribuir a la sostenibilidad de la laguna, busca

establecer un modelo replicable de gestión de agua que permita aprovechar de forma eficiente los recursos hídricos en instituciones académicas y otros espacios urbanos, promoviendo una cultura de uso consciente del agua.

1.1 ANTECEDENTES

La gestión sostenible del agua es un tema prioritario en instituciones académicas y comunidades urbanas alrededor del mundo. La Universidad San Francisco de Quito (USFQ) ha emprendido diversas iniciativas para reducir el consumo de agua potable en su campus, incluyendo sistemas de captación de agua lluvia y estrategias de eficiencia hídrica en áreas de alta demanda. A nivel global, numerosos estudios han demostrado que la implementación de sistemas de captación y almacenamiento de agua pluvial puede reducir considerablemente el uso de agua potable en instalaciones sanitarias y sistemas de riego. Específicamente en universidades un estudio realizado en la Universidad Técnica de Pereira muestra que, "la recolección de agua lluvia puede reducir hasta en un 25% la dependencia de agua potable en universidades, utilizando el agua recuperada para usos en sanitarios y riego de áreas verdes" (Henao & Castaño, 2016). Por esta razón, en entornos específicos como campus universitarios, es necesario adaptar estos sistemas para abordar problemas de escasez y fluctuaciones de calidad del agua que surgen de factores como la estacionalidad de las precipitaciones y el cambio climático.

Como se mencionó anteriormente, la laguna del campus USFQ se presenta como un recurso hídrico importante y un componente estético y ecológico del paisaje universitario. Sin embargo, esta enfrenta problemas de balance hídrico y calidad de agua. Ante estas

necesidades, el rediseño del sistema de circulación de agua de la laguna y la implementación de un sistema de tratamiento natural de aguas representan una oportunidad para aplicar técnicas de sostenibilidad hídrica y crear un modelo replicable en otras instituciones educativas. En particular, los sistemas de tratamiento natural y filtración biológica han demostrado ser efectivos en la mejora de la calidad del agua en lagunas universitarias, promoviendo un ambiente más sano y disminuyendo la proliferación de algas (Rahman et al., 2012).

1.2 PROBLEMÁTICA

La Universidad San Francisco de Quito enfrenta desafíos significativos en la gestión de los recursos hídricos del campus, especialmente en su laguna, la cual presenta los siguientes problemas:

- **Evaporación y fluctuación de niveles de agua:** Durante la temporada seca, la laguna experimenta una disminución considerable en su volumen de agua debido a la evaporación, lo que afecta su ecosistema.
- **Calidad del agua:** El agua en la laguna tiende a acumular residuos sólidos y microorganismos que deterioran su calidad, especialmente en temporadas de lluvia cuando se incrementa el aporte de materia orgánica.
- **Falta de un sistema de recirculación y tratamiento natural:** La laguna carece de un sistema eficiente que permita la oxigenación y tratamiento continuo del agua, contribuyendo al crecimiento de algas y la acumulación de sedimentos.

Abordar estos problemas es crucial para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en la laguna y mejorar su estado ecológico, al mismo tiempo que se reduce el uso de agua potable en el campus.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Implementar un sistema de captación de agua lluvia y tratamiento natural de agua para optimizar el uso sostenible de la laguna en el campus de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Revisión de literatura relevante y referencias de otras universidades para el desarrollo sostenible.
2. Revisión de literatura relevante y referencias de sistemas de tratamiento naturales para lagunas.
3. Realizar un estudio de Balance Hídrico para determinar la recarga de agua en debido a la precipitación.
4. Realizar un estudio de Balance Hídrico para determinar las pérdidas de agua debido a la evaporación.
5. Diseñar un sistema de descarga para los excesos de agua en los meses de lluvia.

6. Diseñar un sistema de recolección de agua lluvia desde el techo del coliseo y contribuir con más agua hacia la laguna para mitigar la evaporación excesiva en los meses de verano.
7. Diseñar un sistema de tratamiento del agua y filtrado biológico con el fin de optimizar la calidad del agua de la laguna.
8. Proponer una solución técnica para la gestión de la laguna y sistema de tratamiento para contribuir a la sostenibilidad ambiental.
9. Evaluar el impacto de la solución técnica propuesta, en términos de ahorro de agua, y ahorro económico.

1.4 METODOLOGÍA

1. Investigación y recolección de datos referentes al desarrollo sostenible en universidades.
2. Investigación del funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas naturales de fuentes académicas de internet.
3. Análisis de los datos recolectados sobre desarrollo sostenible y tratamiento de aguas naturales para aplicarlos específicamente al caso de la laguna de la Universidad.
4. Recolección de datos referentes al balance hídrico de la Universidad San Francisco de Quito de documentos del repositorio digital de la universidad.
5. Análisis de los datos recolectados de balance hídrico específicamente de la zona de la laguna, para determinar las pérdidas por evaporación de la misma
6. Análisis de los datos recolectados de balance hídrico, para determinar la oferta hídrica de los techos cercanos a la laguna en los meses lluvia.

7. Comparación de los análisis realizados previamente para establecer de qué manera se puede contribuir a las pérdidas de la laguna con ayuda del agua lluvia que se puede recolectar de los techos cercanos a la misma.
8. Diseño de un sistema de recolección de agua lluvia del techo del coliseo (cercano a la laguna) y del sistema de conducción a la laguna.
9. Diseño de un sistema de tratamiento de aguas naturales para mejorar la calidad del agua de la laguna y hacer de la misma sostenible ambientalmente.
10. Análisis del impacto del sistema de recolección y conducción de aguas lluvia desde el techo del coliseo a la laguna, establecer la existencia de un ahorro de agua y por lo tanto económico para la universidad.

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Desarrollo Sostenible

El desarrollo sostenible se refiere a un enfoque de crecimiento que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. Este concepto busca equilibrar el progreso económico con la equidad social y la protección del medio ambiente. En el ámbito de la ingeniería y la gestión de recursos, el desarrollo sostenible implica implementar prácticas y tecnologías que optimicen el uso de recursos naturales, reduzcan el impacto ambiental y promuevan un uso consciente y responsable de los mismos.

De esta manera, la gestión del agua es clave dentro del desarrollo sostenible, adoptando prácticas que optimicen el uso de los recursos hídricos, minimicen el desperdicio y promuevan la reutilización y conservación del agua. Esto es crucial para garantizar un suministro adecuado y de calidad para la población actual y futura, protegiendo a la vez los ecosistemas y adaptándose a desafíos como el cambio climático y la escasez de agua en diversas regiones.

2.1.2 Balance Hídrico

El balance hídrico es un análisis cuantitativo que evalúa la entrada y salida de agua en un sistema específico, como una cuenca, un ecosistema, o una infraestructura de almacenamiento. Este balance considera las distintas fuentes de ingreso de agua, como la precipitación, la infiltración y el aporte de cuerpos de agua cercanos, así como las pérdidas

debidas a la evaporación, transpiración, escorrentía y consumo humano o industrial. El objetivo del balance hídrico es asegurar que el sistema mantenga niveles adecuados de agua para sostener sus funciones y demandas a lo largo del tiempo, evaluando tanto la sostenibilidad como la resiliencia del recurso frente a variaciones estacionales y cambios climáticos. En la gestión de recursos hídricos, el balance hídrico es fundamental para planificar el uso eficiente del agua, prevenir su agotamiento y garantizar la disponibilidad continua del recurso.

2.1.3 Calidad del Agua

La calidad del agua se refiere al conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para un uso específico, como el consumo humano, el riego, la recreación o la preservación de la vida acuática.

La calidad del agua en lagunas artificiales es un aspecto esencial para el mantenimiento de estos cuerpos de agua, ya que influye en su salud ecológica, en la vida acuática y en su estética. En estos sistemas, la calidad del agua puede verse afectada por factores como la acumulación de nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo), el ingreso de materia orgánica, y el crecimiento de algas, que pueden provocar eutrofización, malos olores y pérdida de oxígeno disuelto. El control de la calidad en lagunas artificiales implica monitorear parámetros físicos, químicos y biológicos, tales como la temperatura, el pH, la turbidez, la concentración de oxígeno y la presencia de microorganismos. Además, la implementación de sistemas de recirculación y tratamiento natural, como los biofiltros, ayuda a mantener la claridad del agua y prevenir la proliferación de patógenos. Estos controles no

solo preservan la función recreativa y estética de la laguna, sino que también prolongan la vida útil de la infraestructura y favorecen la sostenibilidad del recurso hídrico.

2.1.4 Método Racional

El método racional se puede definir como un método utilizado para calcular la escorrentía superficial máxima producida por un evento de precipitación. (Gribbin, 2014).

$$Q = ciA$$

En donde,

Q = caudal de escorrentía superficial

i = intensidad de lluvia

A = área de drenaje

c = coeficiente de escorrentía.

2.2 DISPONIBILIDAD HÍDRICA PLUVIAL PARA LA LAGUNA DE LA USFQ

Para determinar la oferta hídrica para la laguna de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ) que se obtiene por la precipitación se deben identificar las tres variables del método racional.

2.2.1 Áreas de Drenaje

Para obtener el área de drenaje se contemplaron los techos aledaños a la laguna y la misma laguna. Para esto es importante mencionar que para medir el área de los techos de los edificios que rodean a la laguna se consideró únicamente el área que tiene una pendiente favorable hacia la laguna y de los que disponen o pueden disponer de canaletas de recolección

de agua. De esta manera, con la herramienta de Google Earth Pro se delimitaron las áreas de la siguiente manera:



Figura 1. Área de drenaje de Coliseo Alexandros

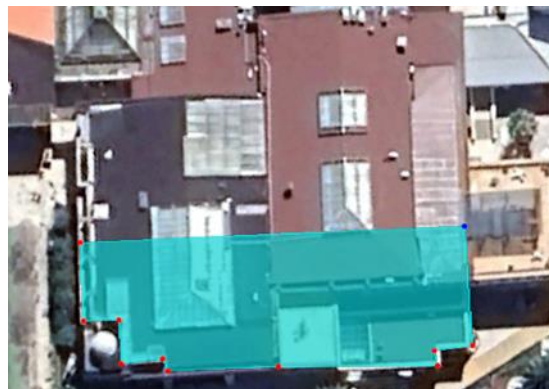


Figura 2. Área de drenaje de Techo Edificios Newton y Galileo

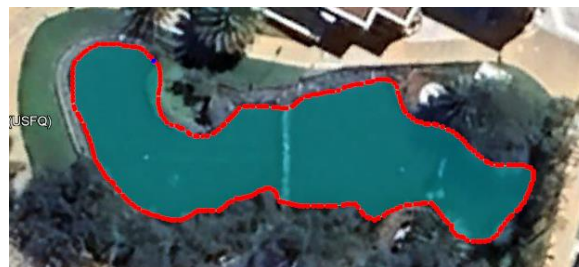


Figura 3. Área de Laguna

En la siguiente tabla se indican los valores del área de drenaje de los techos que pueden contribuir a la oferta hídrica de la laguna, y el área de la laguna:

Lugar	Área de Drenaje (m ²)
Coliseo Alexandros	1245.00
Edificios Galileo y Newton	900.00
Laguna	657.00

Tabla 1. Valores de áreas de drenaje

2.2.2 Intensidad de lluvia

Para determinar el parámetro de intensidad de lluvia se obtuvo datos de precipitaciones mensuales desde 1994 hasta 2022 del proyecto integrador de María Emilia Miño “Disponibilidad Hídrica Pluvial en el campus USFQ”, en la cual se recopilieron datos de tres diferentes estaciones meteorológicas. Para el periodo de 1994-2002 los datos se obtuvieron de la estación meteorológica de Tumbaco; para el periodo de 2003-2013 de la estación La Tola; y para el periodo de 2014-2022 de la Estación de Mediciones Atmosféricas EMA USFQ. Además de esto, se complementaron estos datos con información de 2022 hasta septiembre del 2024, los cuales también fueron proporcionados por la última estación mencionada. En la siguiente tabla se muestran los datos:

		1994-2024											
		Precipitación (mm)											
Estación	Año/Mes	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
TUMBACO - INAMHI	1994	172.60	71.70	150.90	101.70	59.60	0.00	7.00	3.50	19.60	37.90	213.90	43.20
	1995	2.90	61.60	171.90	117.80	64.30	48.10	17.70	27.70	0.00	228.80	286.40	101.50
	1996	85.20	122.30	76.90	81.40	161.70	40.00	24.00	12.40	77.40	124.10	23.00	38.20
	1997	194.20	48.30	167.90	40.30	52.20	42.90	0.00	0.00	115.60	129.80	156.10	48.90
	1998	36.10	60.80	95.50	87.30	-	10.80	20.40	10.00	13.10	87.90	121.10	24.70
	1999	60.20	118.70	-	118.60	32.70	25.60	0.00	41.60	86.70	147.10	125.80	77.50
	2000	118.30	130.40	120.40	139.20	-	-	20.30	6.60	56.50	22.70	51.00	91.10
	2001	38.20	29.40	-	-	33.20	3.00	-	0.00	37.30	6.70	37.20	36.70
	2002	-	63.40	116.10	177.80	50.70	19.20	0.00	0.00	28.20	-	91.40	122.30
LA TOLA - INAMHI	2003	40.10	68.90	58.30	149.80	15.00	32.00	10.30	20.80	84.30	85.30	146.30	47.10
	2004	82.30	27.30	86.20	79.70	47.40	3.40	4.40	0.70	53.80	105.40	177.90	131.00
	2005	52.80	97.70	75.90	58.70	44.00	29.10	9.10	18.80	20.20	87.00	84.00	79.00
	2006	42.40	74.80	211.80	168.00	30.90	45.60	4.60	3.00	11.00	101.30	153.00	166.40
	2007	69.20	42.50	155.60	141.30	50.70	19.70	3.60	13.10	22.30	143.40	185.10	28.60
	2008	86.40	148.20	198.60	135.90	131.70	60.20	2.40	22.10	25.40	186.70	73.80	108.40
	2009	101.40	48.50	152.90	70.30	46.20	29.70	14.90	0.10	9.90	121.50	55.00	96.60
	2010	15.90	83.00	12.10	163.40	100.40	40.70	69.60	29.50	79.10	66.40	170.40	107.60
	2011	34.80	158.90	116.70	233.20	61.40	19.50	46.60	43.30	35.50	77.80	53.10	60.80
	2012	76.90	59.80	95.10	114.40	16.30	8.20	1.50	2.00	53.30	70.20	235.90	59.80
	2013	17.80	159.80	73.10	103.10	95.20	0.30	4.50	36.30	24.40	77.90	51.60	49.80
EMA - USFQ	2014	-	-	-	-	-	12.40	0.30	0.70	55.50	136.60	61.80	25.50
	2015	46.60	76.80	107.20	50.90	48.10	6.20	13.90	0.00	3.80	116.00	54.80	9.10
	2016	83.00	17.40	112.80	148.80	77.50	30.90	0.80	4.70	57.70	56.10	16.10	62.00
	2017	113.20	73.90	220.40	102.70	127.90	66.70	1.20	34.50	26.30	97.00	37.20	90.40
	2018	67.10	109.60	81.70	106.90	91.50	22.60	22.60	13.60	25.80	5.90	146.20	3.90
	2019	50.80	111.90	180.20	85.70	9.70	17.70	8.20	-	-	-	130.10	91.40
	2020	74.90	112.90	99.80	145.00	25.70	39.10	15.90	43.30	78.70	73.80	129.00	101.60
	2021	96.20	74.30	176.80	120.90	89.20	57.30	13.10	41.10	77.10	209.70	99.90	202.30
	2022	81.50	91.90	115.40	131.30	30.70	57.10	31.50	7.80	10.80	94.30	57.00	29.80
	2023	77.40	58.00	111.00	137.50	64.30	0.95	30.10	21.70	7.90	4.40	69.70	128.70
	2024	5.60	120.40	54.70	203.90	54.80	33.20	3.40	5.80	35.80	-	-	-

Tabla 2. Precipitaciones mensuales desde 1994 hasta 2024

Con estos datos se obtuvo la precipitación promedio mensual, la cual se procederá a utilizar para calcular el caudal de oferta hídrica pluvial para la laguna mediante el método racional. Estos datos se presentan en la siguiente tabla y gráfica:

Mes	Precipitación Promedio (mm)
ENERO	69.79
FEBRERO	84.10
MARZO	121.28
ABRIL	121.22
MAYO	61.18
JUNIO	27.41
JULIO	13.40
AGOSTO	15.49
SEPTIEMBRE	41.10
OCTUBRE	96.49
NOVIEMBRE	109.79
DICIEMBRE	75.46

Tabla 3. Precipitaciones promedio mensuales

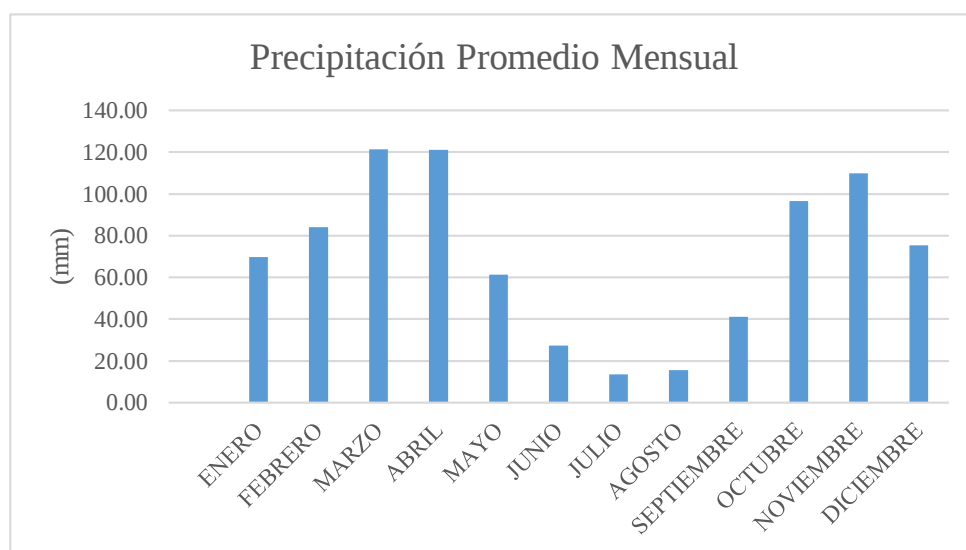


Figura 4. Precipitaciones promedio mensual

2.2.3 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es un valor adimensional que se usa en hidrología para representar a capacidad de un área para generar escorrentía superficial en respuesta a la lluvia.

Este coeficiente toma valores entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 indica que casi toda el agua de la precipitación se convierte en escorrentía (como en superficies impermeables, por ejemplo, pavimento o techos), mientras que un valor más bajo sugiere una mayor infiltración y menor escorrentía, común en áreas con vegetación o suelos altamente permeables. El coeficiente de escorrentía depende de factores como el tipo de suelo, la cobertura del terreno, la pendiente y la capacidad de absorción del área, y es crucial para estimar con precisión el caudal en el método racional.

No hay una manera exacta de determinar el coeficiente de escorrentía, por lo que se utilizó la siguiente tabla obtenida de para elegir un valor apropiado, y así calcular los caudales de la manera más acertada posible:

C-1
Values of *c*, Runoff Coefficient

Character of Surface	Runoff Coefficients
Pavement	
Asphalt and concrete	0.70 to 0.95
Brick	0.70 to 0.85
Roofs	0.75 to 0.95
Lawns, sandy soil	
Flat (2 percent)	0.05 to 0.10
Average (2 to 7 percent)	0.10 to 0.15
Steep (> 7 percent)	0.15 to 0.20
Lawns, heavy soil	
Flat (2 percent)	0.13 to 0.17
Average (2 to 7 percent)	0.18 to 0.22
Steep (> 7 percent)	0.25 to 0.35
Composite <i>c</i>-values:	
Business	
Downtown	0.70 to 0.95
Neighborhood	0.50 to 0.70
Residential	
Single Family	0.30 to 0.50
Multi-units, detached	0.40 to 0.60
Multi-units, attached	0.60 to 0.75
Residential (suburban)	0.25 to 0.40
Apartment	0.50 to 0.70
Industrial	
Light	0.50 to 0.80
Heavy	0.60 to 0.90
Parks, cemeteries	0.10 to 0.25
Playgrounds	0.20 to 0.35
Railroad yards	0.20 to 0.35
Unimproved	0.10 to 0.30

Figura 5. Valores típicos de coeficientes de escorrentía. Fuente: (Gribbin, 2014)

Por lo tanto, con estos valores sugeridos, se estableció que el coeficiente de escorrentía a usarse para los techos tanto del coliseo Alexandros como de los edificios Galidieo y Newton sería de 0.95 mientras que para la laguna en este caso se tendría un valor de 1, ya que es para este recurso hídrico para el cual se busca recolectar agua.

Coeficientes de escorrentía (c)	
Techo	0.95
Laguna	1.00

Tabla 4. Coeficientes de escorrentía para el método racional

2.2.4 Caudal de escorrentía

Para obtener el caudal de escorrentía se utiliza el método racional mencionado previamente, y las variables ya identificadas. Entonces,

$$Q = ciA$$

Donde se usa,

c: *coeficiente de escorrentía (adimensional). Valores en Tabla 4.*

i: *intensidad de lluvia (mm/mes). Valores en Tabla 3.*

A: *área de drenaje (m²). Valores en Tabla 1.*

A continuación, se muestran los caudales de escorrentía mensuales obtenidos de cada una de las zonas establecidas anteriormente.

Para el Coliseo Alexandros se tienen los siguientes resultados:

Mes	Precipitación Promedio (mm)	V (m3)
Enero	69.79	82.55
Febrero	84.10	99.47
Marzo	121.28	143.45
Abril	121.22	143.38
Mayo	61.18	72.36
Junio	27.41	32.41
Julio	13.40	15.84
Agosto	15.49	18.32
Septiembre	41.10	48.61
Octubre	96.49	114.12
Noviembre	109.79	129.86
Diciembre	75.46	89.25
TOTAL ANUAL		989.63

Tabla 5. Caudales de esorrentía mensuales del Coliseo Alexandros

Para los edificios Galileo y Newton:

Mes	Precipitación Promedio (mm)	V (m3)
Enero	69.79	59.67
Febrero	84.10	71.91
Marzo	121.28	103.70
Abril	121.22	103.65
Mayo	61.18	52.31
Junio	27.41	23.43
Julio	13.40	11.45
Agosto	15.49	13.24
Septiembre	41.10	35.14
Octubre	96.49	82.50
Noviembre	109.79	93.87
Diciembre	75.46	64.52
TOTAL ANUAL		715.39

Tabla 6. Caudales de esorrentía mensuales de Galileo y Newton

Para la laguna:

Mes	Precipitación Promedio (mm)	V (m3)
Enero	69.79	45.85
Febrero	84.10	55.26
Marzo	121.28	79.68
Abril	121.22	79.64
Mayo	61.18	40.19
Junio	27.41	18.01
Julio	13.40	8.80
Agosto	15.49	10.18
Septiembre	41.10	27.00
Octubre	96.49	63.39
Noviembre	109.79	72.13
Diciembre	75.46	49.58
TOTAL ANUAL		549.72

Tabla 7. Caudales de esorrentía de la laguna

De estas tablas se puede destacar que del techo del coliseo Alexandros se puede recolectar un volumen de agua lluvia de 989.63 metros cúbicos, de los techos de los edificios Newton y Galileo un total de 715.39 metros cúbicos, y finalmente en la laguna se recolectaría 549.72 metros cúbicos al año. Por lo que, de todas estas fuentes se tendría que para la laguna se podría recolectar un aproximado de 2252.74 metros cúbicos. Es importante recalcar, que se este volumen de agua puede ser recolectado en caso de poder almacenar todo el volumen de agua. Sin embargo, el sistema de almacenamiento es limitado.

2.3 DEMANDA HÍDRICA DE LA LAGUNA EN MESES DE VERANO

2.3.1 Relleno con Agua Potable

Durante los meses de verano, la laguna de la Universidad San Francisco de Quito experimenta una disminución significativa en su nivel debido a las altas temperaturas, la intensa radiación solar y la escasa precipitación. Como resultado, es necesario rellenarla de forma continua para mantener un nivel adecuado. Según el personal encargado de mantenimiento y limpieza, este proceso se realiza aproximadamente durante los cuatro meses de la temporada seca, utilizando dos llaves de agua potable conectadas a mangueras que desembocan en la laguna. Estas llaves se abren dos veces por semana durante cuatro horas cada vez. Con esta información, es posible estimar el volumen de agua utilizado para el relleno y conservación de la laguna.

Para realizar la estimación se midió el caudal de una de las llaves de forma experimental, cuando estaba abierta para el mantenimiento de la laguna. Se midió tres veces el caudal de forma experimental para reducir errores, y se obtuvieron los siguientes datos:

Volumen Recolectado (ml)	Tiempo (s)	Caudal (ml/s)	Caudal (L/s)
1750	9.65	181.35	0.181
1740	9.17	189.75	0.190
1400	7.58	184.70	0.185
Promedio			0.185

Tabla 8. Caudal de llave para relleno de laguna

Una vez obtenido este caudal, con la información mencionada previamente, se realizan los siguientes cálculos. Se sabe que el caudal se define como la relación entre volumen sobre tiempo,

$$Q = \frac{V}{t}$$

De aquí se despeja el volumen y se tiene que,

$$V = Qt$$

$$V = \left(0.185 \frac{L}{s}\right) \left(\frac{3600s}{1hora}\right) \left(\frac{4horas}{día}\right) \left(\frac{2días}{semana}\right) \left(\frac{4semanas}{mes}\right) (4meses) \left(\frac{1m^3}{1000L}\right)$$

$$V = 85.38 m^3 \text{ por llave}$$

Por lo que se tendría que la laguna necesita de aproximadamente 170.74 metros cúbicos de agua para el mantenimiento de su nivel.

Para verificar este valor obtenido de forma experimental, también se procede a calcular un caudal y un volumen estimado con datos teóricos. Para calcular el caudal se usa la siguiente ecuación:

$$Q = vA$$

Donde, se necesita la velocidad del agua en la llave (v) y el área de la manguera (A).

Para esto en primer lugar, se investigó con el mismo personal de mantenimiento y limpieza y se obtuvo la información que la manguera que conecta la llave con la laguna es de $\frac{1}{2}$ pulgada. Del apéndice F de Mott (2010), se tiene que el área de flujo de la manguera de $\frac{1}{2}$ pulgada es de $1.96 \times 10^{-4} m^2$.

Por otro lado, se tiene que valor el cual es el recomendado para la velocidad del agua en las acometidas según el Municipio de Quito es de 1.5 m/s; sin embargo, es importante recalcar que la llave se abre parcialmente, por lo que se escogió una velocidad estimada de 1 m/s para los cálculos. Con esto se tiene que,

$$Q = \left(1 \frac{m}{s}\right) (1.96 \times 10^{-4} m^2)$$

$$Q = 1.96 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 0.196 \frac{L}{s}$$

Así se obtiene un valor del caudal para una de las llaves. Aplicando los mismos cálculos para obtener el volumen total que se aplicaron anteriormente, se tiene un valor teórico de 180.63 metros cúbicos de agua que demanda la laguna para su mantenimiento.

Al realizar una comparación, se tiene que ambos valores son cercanos por lo que se puede decir que se hicieron estimaciones bastante acertadas y cercanas a la realidad, y para obtener el valor final se realizó un promedio entre ambos resultados. De esta manera, finalmente se tiene que la laguna de la Universidad San Francisco de Quito durante los cuatro meses de verano necesita de 175.69 metros cúbicos de agua.

2.3.2 Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo a través de su superficie, alimentando las capas subsuperficiales como el manto freático y los acuíferos. Este fenómeno depende de factores como la permeabilidad del suelo, la cobertura del terreno y las condiciones climáticas. En cuerpos de agua naturales, como lagunas o estanques, la infiltración puede representar una pérdida significativa de agua si el fondo no está adecuadamente impermeabilizado.

En el caso de la laguna del campus de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), se ha consultado con el Departamento de Mantenimiento y Operaciones, quienes confirmaron

que el fondo de la laguna fue previamente impermeabilizado. Gracias a esta medida, no ocurre infiltración desde este cuerpo de agua hacia el subsuelo, lo que asegura que las pérdidas de agua se deban principalmente a la evaporación y no a fugas hacia el terreno. Esto permite un mejor control del balance hídrico y refuerza la sostenibilidad del recurso dentro del ecosistema del campus.

2.3.3 Evaporación

El proceso de evaporación se puede definir como un fenómeno en el cual el agua en estado líquido se convierte en vapor, pasando a la atmósfera. Este fenómeno depende de varios factores, como la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, la humedad relativa y la superficie del agua. Por esta razón, al menos que se tengan los equipos necesarios para medir de forma precisa la tasa de evaporación, es bastante complejo estimar este fenómeno.

En este caso, al no tener equipos para medir la evaporación, para estimar la tasa de evaporación en la laguna del campus de la USFQ se realizaron procedimientos tanto teóricos como experimentales.

En primer lugar, se realizó una estimación con un proceso experimental, el cual consiste en dejar un recipiente de agua con un nivel conocido expuesto al aire libre y medir la disminución del nivel de agua con el paso del tiempo. Para esto, se dejaron dos recipientes en dos ubicaciones diferentes de la universidad; una se dejó en la gruta junto a la laguna, mientras que otra se colocó en la terraza del Hayek.

Junto a la laguna se realizaron las mediciones durante aproximadamente cinco días consecutivos y se obtuvieron los siguientes resultados:

	Fecha	Hora	Registro	Evap	DTiempo	Tasa	Evap/día
			mm	mm	min	mm/hr	mm/día
Miércoles	16-Oct	10:57 AM	31				3
				1.7	256	0.40	
		3:13 PM	29.3				
				1.3	1107	0.07	
Jueves	17-Oct	8:40 AM	28				5.2
				4.9	413	0.71	
		3:33 PM	23.1				
				0.3	177	0.10	
		6:30 PM	22.8				
Viernes	17-Oct			1.3	1043	0.07	5.9
		10:53 AM	21.5				
				4.6	490	0.56	
		7:03 PM	16.9				
Domingo	20-Oct			9.8	2514	0.23	9.8
		11:57 AM	7.1				
PROMEDIO							6.0

Tabla 9. Mediciones de evaporación en gruta junto a laguna

En este caso se obtuvo una precipitación promedio de 6 mm al día. Es importante mencionar que se presentan variaciones considerables en los distintos días; sin embargo, esto se debe a que para el primer día las mediciones empezaron desde aproximadamente el medio día, por lo que la evaporación producida en la mañana de ese día no se pudo medir. Entonces, para compensar esto, en el último día se consideró la evaporación de todo un día más la mañana del último, por esta razón en la tabla se produce el salto del día viernes al domingo.

De manera similar, se realizó la toma de mediciones en la terraza del Hayek, las cuales se realizaron por tres días consecutivos, y se obtuvo los siguientes resultados:

	Fecha	Hora	Registro	Evap	DTiempo	Tasa	Evap/dia	
			Mm	mm	Min	mm/hr	mm/dia	
Martes	15-Oct	9:55 AM	18.8				8.3	
				6.3	351	1.08		
		3:46 PM	12.5					
				0.8	209	0.23		
		7:15 PM	11.7					
				1.2	931	0.08		
Miercoles	16-Oct	9:46 AM	10.5				6.5	
				1	74	0.81		
		11:00 AM	9.5					
				4.3	213	1.21		
		2:33 PM	5.2					
		Relleno						
		2:34 PM	22					
				1.2	173	0.42		
		5:27 PM	20.8					
Jueves	17-Oct			9	1593	0.34	9.0	
		7:00 PM	11.8					
		Relleno						
		7:03 PM	29					
PROMEDIO							7.9	

Tabla 10. Mediciones de evaporación en terraza Hayek

Por lo tanto, como se observa en la tabla se obtuvo una evaporación diaria promedio de 7.9 mm para esta ubicación.

Por lo que en dos lugares distintos de la universidad se obtuvieron resultados que si presentan una variación considerable ya que en la terraza se tiene una evaporación experimental de 7.9 mm y en la gruta junto a la laguna de 6.0 mm.

Debido a esto, también se realizó una estimación teórica porque es importante comparar y verificar los resultados obtenidos de forma experimental. Para esto se usó el siguiente modelo matemático de Wooding (2024), que considera los factores de temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y área de superficie del agua:

$$g_h = (25 + 19 \times v) \times A \times (X_s - X)$$

Donde,

g_h : *tasa de evaporación (kg/h)*

v : *velocidad del viento (m/s)*

A : *área de la superficie del cuerpo de agua (m²)*

X_s : *humedad máxima con aire saturado (kg/kg)*

X : *humedad relativa del aire (kg/kg)*

La humedad máxima se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$X_s = 3.733 \times 10^{-3} + 3.2 \times 10^{-4} \times T + 3 \times 10^{-6} \times T^2 + 4 \times 10^{-7} \times T^3$$

Donde, T es la temperatura del aire en grados centígrados o Celsius.

En la primera ecuación se tienen dos constantes 25 y 19, los cuales son factores empíricos que se relacionan con el efecto de la velocidad del viento en la evaporación del agua. La constante 25 representa una tasa base de evaporación en condiciones estándar (evaporación mínima), mientras que el 19 ajusta la tasa de evaporación según la velocidad del viento sobre la superficie del agua.

Una vez entendido el modelo, se puede estimar la tasa de evaporación. Para esto se han registrado los datos de temperatura, velocidad del viento, y humedad del aire para cada hora del día. Los datos fueron meteorológicos fueron obtenidos mediante la aplicación del

clima para la ubicación de Cumbayá, revisando cada hora los mismos. Así se obtuvieron los siguientes resultados:

	Hora	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (km/hr)	Velocidad del viento (m/s)	Xs	Humedad relativa	Evaporación (kg/hr)	Evaporación (mm/hr)
0	12:00 a. m.	13.0	2	0.556	0.00928	80%	29.87	0.0455
1	1:00 a. m.	13.0	2	0.556	0.00928	80%	29.87	0.0455
2	2:00 a. m.	11.0	2	0.556	0.00815	76%	12.81	0.0195
3	3:00 a. m.	10.0	2	0.556	0.00763	76%	0.77	0.0012
4	4:00 a. m.	10.0	2	0.556	0.00763	76%	0.77	0.0012
5	5:00 a. m.	9.0	3	0.833	0.00715	71%	1.28	0.0019
6	6:00 a. m.	11.0	2	0.556	0.00815	78%	8.14	0.0124
7	7:00 a. m.	11.0	3	0.833	0.00815	71%	28.13	0.0428
8	8:00 a. m.	17.0	3	0.833	0.01201	66%	145.01	0.2207
9	9:00 a. m.	18.0	7	1.806	0.01280	62%	257.08	0.3913
10	10:00 a. m.	19.0	5	1.389	0.01364	55%	274.81	0.4183
11	11:00 a. m.	22.0	6	1.667	0.01648	36%	479.68	0.7301
12	12:00 p. m.	24.0	11	3.056	0.01867	38%	811.45	1.2351
13	1:00 p. m.	25.0	11	3.056	0.01986	33%	903.53	1.3752
14	2:00 p. m.	21.0	9	2.500	0.01548	48%	508.73	0.7743
15	3:00 p. m.	21.0	9	2.500	0.01548	50%	499.21	0.7598
16	4:00 p. m.	19.0	8	2.222	0.01364	52%	372.73	0.5673
17	5:00 p. m.	18.0	7	1.944	0.01280	65%	256.30	0.3901
18	6:00 p. m.	16.0	7	1.944	0.01126	61%	209.97	0.3196
19	7:00 p. m.	15.0	5	1.389	0.01056	70%	120.13	0.1828
20	8:00 p. m.	14.0	5	1.250	0.01030	88%	49.60	0.0755
21	9:00 p. m.	14.0	2	0.556	0.01050	71%	79.39	0.1208
22	10:00 p. m.	14.0	3	0.833	0.00990	78%	56.30	0.0857
23	11:00 p. m.	13.0	2	0.556	0.00928	79%	32.21	0.0490
						TOTAL	5167.8	7.87

Tabla 11. Tasas de evaporación teóricas con factor 19 de sensibilidad al viento

De esta manera, se determina que la evaporación diaria estimada es de 7.87 mm. Sin embargo, es importante destacar que estos resultados se obtuvieron utilizando los factores empíricos de las ecuaciones 25 y 19, los cuales funcionan adecuadamente en términos generales, pero pueden variar según la ubicación. Considerando que el factor 19 ajusta la tasa de evaporación en función de la velocidad del viento, y que este resultado es muy cercano al valor obtenido mediante mediciones experimentales en la terraza del Hayek (7.9 mm), donde existe una mayor exposición al viento, se puede confirmar que la ecuación ofrece resultados confiables y que el experimento fue realizado correctamente.

No obstante, en la medición experimental llevada a cabo junto a la laguna, una ubicación más favorable y precisa al estar cerca del cuerpo de agua que se analiza, se obtuvo una evaporación de 6 mm al día. Esta diferencia se debe principalmente a la variación en la exposición al viento entre los dos lugares de medición. Esto evidencia que el factor de ajuste relacionado con la velocidad del viento tiene una influencia significativa en la precisión de los resultados. Por lo tanto, una calibración local de este factor permitiría obtener estimaciones más ajustadas a la realidad.

Para realizar esta calibración se tomaron dos periodos similares, número similares de horas y mismo ciclo del día, en la toma de las mediciones de evaporación. Para la bandeja colocada en la gruta junto a la laguna se tomó el periodo de 8:40 am a 3:33 pm del jueves 17 de octubre, la cual tiene una evaporación de 0.71 mm/hr; mientras que para la bandeja colocada en el Hayek se tomó el periodo de 9:55 am a 3:46 pm de martes 15 de octubre, la cual tiene una evaporación de 1.08 mm/hr. Ya establecidos los periodos y datos a usar, se realiza la calibración de la siguiente manera. Primero, se transforman los datos de evaporación de mm/hr a kg/hr para poder utilizar la ecuación del modelo matemático explicado anteriormente:

	Periodo referencia Hayek Martes 15 Octubre 9:55 am a 3:46 pm	Periodo referencia Hayek Martes 15 Octubre 9:55 am a 3:46 pm
Evaporación (mm/hr)	1.08	0.71
Evaporación (kg/hr)	709.56	466.47

Tabla 12. Datos para calibración local de ecuación de evaporación

Con estos datos se realiza el siguiente proceso. Se simplifica la ecuación, debido a que todos los demás factores serían los mismos para ambos lugares y periodos:

$$g_h = (25 + 19 \times v)$$

Y se despeja para la variable v que sería la velocidad del viento, que sigue siendo igual en ambas ubicaciones, pero con una diferente exposición a este fenómeno:

$$v = \frac{g_h - 25}{19}$$

Se reemplaza el dato que corresponde a la ubicación del Hayek, en donde ya se comprobó previamente que los datos tanto experimentales como teóricos tiene una son bastante cercanos. Y se obtiene una “velocidad del viento” con la cual se ajustará el factor de sensibilidad.

$$v = \frac{709.56 - 25}{19} = 36.029$$

Ahora, con este dato obtenido, se busca ajustar el factor de sensibilidad al viento, por lo que se despeja al mismo de la ecuación inicial, y se usa la tasa de evaporación de la ubicación junto a la laguna:

$$f_{sv} = \frac{g_h - 25}{v} = \frac{466.47 - 25}{36.029}$$

$$f_{sv} = 12.25$$

Una vez realizada la calibración, se obtuvo un factor de sensibilidad al viento para la zona de la laguna de 12.25 y al utilizar este factor en el modelo matemático, se obtienen los siguientes resultados:

	Hora	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (km/hr)	Velocidad del viento (m/s)	Xs	Humedad relativa	Evaporación (kg/hr)	Evaporación (mm/hr)
0	12:00 a. m.	13.0	2	0.556	0.00928	86%	14.18	0.0216
1	1:00 a. m.	13.0	2	0.556	0.00928	83%	20.45	0.0311
2	2:00 a. m.	11.0	2	0.556	0.00815	76%	11.46	0.0174
3	3:00 a. m.	10.0	2	0.556	0.00763	76%	0.69	0.0010
4	4:00 a. m.	10.0	2	0.556	0.00763	76%	0.06	0.0001
5	5:00 a. m.	9.0	3	0.833	0.00715	71%	0.18	0.0003
6	6:00 a. m.	11.0	2	0.556	0.00815	78%	7.28	0.0111
7	7:00 a. m.	11.0	3	0.833	0.00815	71%	24.25	0.0369
8	8:00 a. m.	17.0	3	0.833	0.01201	66%	125.03	0.1903
9	9:00 a. m.	18.0	7	1.806	0.01280	62%	204.25	0.3109
10	10:00 a. m.	19.0	5	1.389	0.01364	55%	224.68	0.3420
11	11:00 a. m.	22.0	6	1.667	0.01648	36%	384.45	0.5852
12	12:00 p. m.	24.0	11	3.056	0.01867	38%	609.95	0.9284
13	1:00 p. m.	25.0	11	3.056	0.01986	33%	679.16	1.0337
14	2:00 p. m.	21.0	9	2.500	0.01548	48%	390.32	0.5941
15	3:00 p. m.	21.0	9	2.500	0.01548	50%	383.01	0.5830
16	4:00 p. m.	19.0	8	2.222	0.01364	52%	289.56	0.4407
17	5:00 p. m.	18.0	7	1.944	0.01280	65%	202.00	0.3075
18	6:00 p. m.	16.0	7	1.944	0.01126	61%	165.48	0.2519
19	7:00 p. m.	15.0	5	1.389	0.01056	70%	98.21	0.1495
20	8:00 p. m.	14.0	5	1.250	0.01030	88%	41.02	0.0624
21	9:00 p. m.	14.0	2	0.556	0.01050	71%	71.02	0.1081
22	10:00 p. m.	14.0	3	0.833	0.00990	78%	48.54	0.0739
23	11:00 p. m.	13.0	2	0.556	0.00928	79%	28.81	0.0439
						TOTAL	4024.0	6.12

Tabla 13. Tasas de evaporación teóricas con factor 12.25 de sensibilidad al viento

Con la calibración realizada, se obtiene que la tasa de evaporación diaria de la laguna es de 6.12 mm, lo cual es bastante cercano al valor de evaporación experimental obtenido de 6.0 mm al día.

Una vez realizadas las estimaciones experimentales y teóricas para ambas ubicaciones, y tras su correspondiente calibración local y análisis, se puede confirmar que los resultados obtenidos son bastante cercanos a la realidad. Para determinar una tasa promedio diaria que se utilizará en el balance hídrico, se calculó el promedio entre el valor teórico y el experimental de la zona junto a la laguna. Como se mencionó anteriormente, esta ubicación es más favorable, ya que el punto de análisis está más próximo al cuerpo de agua de interés. De esta manera, se obtuvo una tasa de evaporación promedio diaria de 6.06 mm.

2.4 BALANCE HÍDRICO PARA LA LAGUNA

Una vez se ha analizado tanto la oferta hídrica, como la demanda para la laguna considerando los factores de precipitación y el relleno con agua potable. Así mismo, como las fuentes de pérdida para este cuerpo de agua que sería la evaporación. Se puede realizar el estudio del balance hídrico para este cuerpo de agua, para determinar el déficit hídrico existente en la misma, y la forma en la que se puede cubrir el mismo, sin la utilización del agua potable.

2.4.1 Balance Hídrico Diario

Se procedió a realizar un balance hídrico con el objetivo de identificar el déficit existente en este cuerpo de agua. Para ello, se utilizaron los datos diarios de precipitación registrados durante los últimos cuatro años, proporcionados por la Estación de Mediciones Atmosféricas EMA USFQ. Además, se aplicó la tasa de evaporación calculada previamente en los días en los que no se registraron precipitaciones (0 mm).

El balance hídrico, considerando los datos de los últimos cuatro años, se basó únicamente en la comparación entre el volumen de agua recolectado y el evaporado. Los resultados revelaron un déficit significativo en la laguna, lo que explica la necesidad de rellenarla con agua potable durante los meses de verano.

Por lo tanto, se procedió a realizar un análisis de estos datos para determinar el volumen necesario de almacenamiento extra que se necesita incorporar en el sistema de circulación de agua de la laguna, para satisfacer el déficit hídrico que se presenta en la época de sequía. Para esto se realizó un promedio diario de todos los días del año, tanto para los

datos de precipitación como para los de evaporación de estos último cuatro años, y se transformó a unidades de volumen de agua con el área de la laguna.

Además de esto, para el balance hídrico se incluyó el volumen de agua recolectado por los techos de los edificios Newton y Galileo, dado a que se conoce que el sistema de captación de estos techos, ya está conectado directamente a la laguna. De esta manera se tendría un déficit hídrico más preciso y cercano a la realidad. Por otra parte, con estos datos promedio de precipitación, también se obtuvo nuevamente el volumen de agua recolectado por el techo del Coliseo Alexandros, el cual sería en este caso el caudal de oferta para el almacenamiento.

Con todos estos datos incorporados en el balance hídrico anual, se determinó el volumen del almacenamiento requerido. Para esto, se realiza un análisis mediante hidrogramas integrados o de suma, como se explica en la sección 4.7 del capítulo 4 del libro de McGhee (1991), en los cuales se utilizaría los datos diarios de todo un año promedio. Este enfoque consiste en el trazo dos curvas, una que representa la demanda acumulada, y otra que represente el volumen de agua acumulado, obteniendo el volumen de reserva requerido con la distancia vertical entre las curvas mencionadas.

En este caso se realizaron dos análisis, uno para el año completo, y otro únicamente para la época de verano, tomando todos los días de los meses de junio, julio, agosto y septiembre, que son los meses en los que hay menores niveles de precipitación, como se determinó previamente en la sección de oferta hídrica.

Para realizar el análisis del año completo, se calculó el déficit hídrico total anual obteniendo un valor de 374.99 metros cúbicos. Este déficit se dividió entre los 365 días del

año para determinar la demanda diaria de agua necesaria para mantener el nivel de la laguna. A partir de este valor, se construyó la curva de demanda acumulada.

Paralelamente, con los datos del volumen de agua que puede recolectarse del techo del Coliseo Alexandros, se generó la curva de volumen acumulado de agua disponible. Posteriormente, se desplazó la curva de demanda acumulada hasta que esta fuera tangente a uno de los picos de la curva de volumen acumulado, siguiendo la metodología de hidrogramas integrados descrita en el libro de McGhee mencionada previamente. El resultado de este análisis se presenta en la siguiente gráfica:

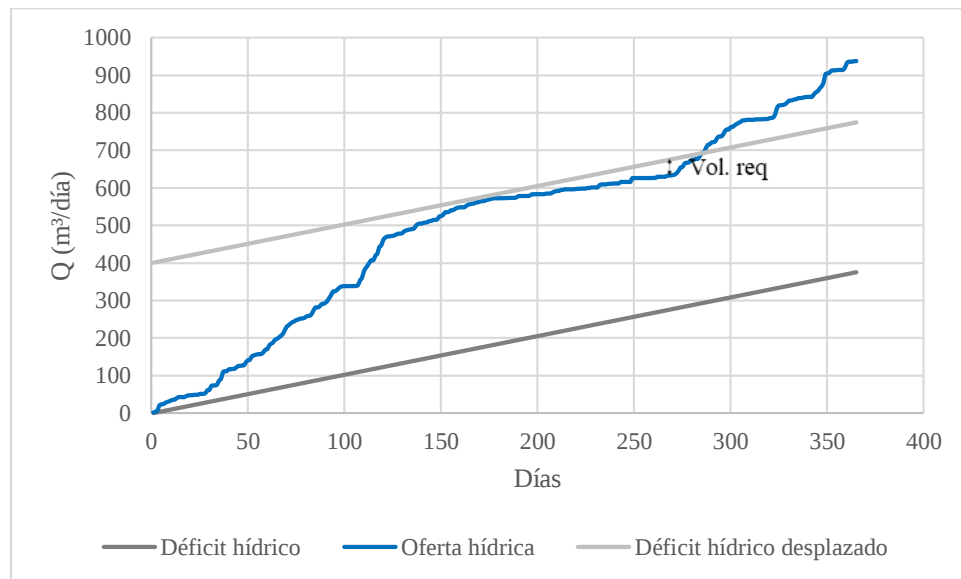


Figura 6. Hidrograma integrado de todo el año

Y se obtuvo que el volumen de almacenamiento requerido, para satisfacer el déficit hídrico durante los meses de sequía es de 43.03 metros cúbicos.

Para el análisis específico de la época de verano, se siguió un procedimiento similar al utilizado para el análisis anual, con algunos ajustes relevantes. En primer lugar, se determinó un déficit hídrico total de 194 metros cúbicos correspondiente a los cuatro meses

de verano. Para calcular la demanda diaria de agua, este déficit se dividió entre los 122 días que comprenden este período, lo que permitió trazar la curva de demanda acumulada.

En cuanto a la curva de volumen acumulado de agua, se utilizaron los datos correspondientes al volumen que puede recolectarse del techo del Coliseo Alexandros, como se realizó en el análisis anual. No obstante, en este caso, se asumió que el almacenamiento comenzaría completamente lleno al inicio del verano. Para esta consideración se basó en la información disponible, que indica que la universidad ha adquirido una cisterna con capacidad de 45 metros cúbicos, destinada a integrarse en el sistema de recolección de agua lluvia para la laguna. Cabe recalcar que para este análisis no se realizó el desplazamiento de la curva de demanda acumulada. Con estos ajustes en la metodología, se obtuvo la siguiente gráfica:

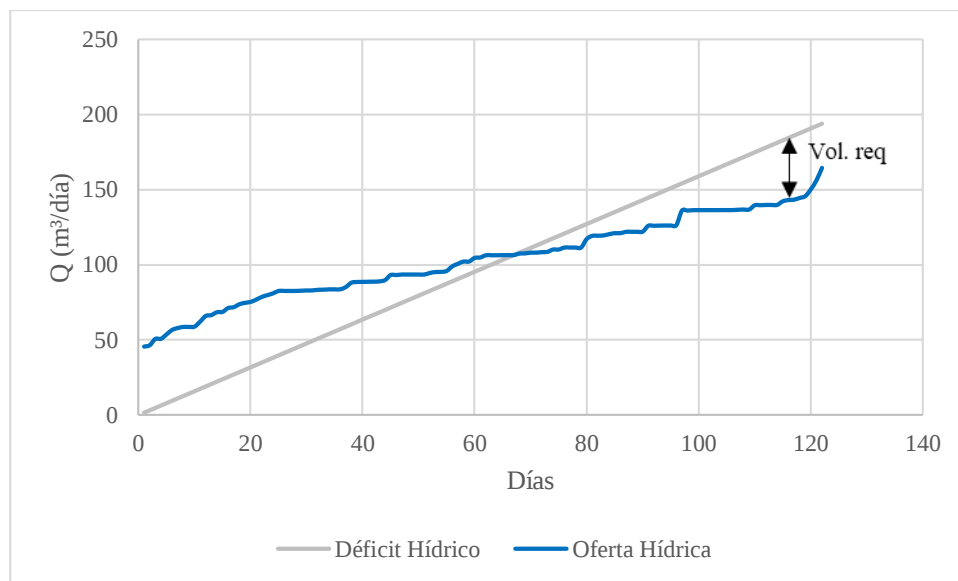


Figura 7. Hidrograma integrado de meses de verano

Para este análisis se obtuvo que el volumen de almacenamiento requerido para mantener el nivel de la laguna es de 43.65 metros cúbicos.

Ambos análisis arrojaron resultados consistentes, con un volumen requerido cercano a los 43 metros cúbicos, lo cual confirma la validez y precisión del procedimiento realizado. Además, estos resultados permiten concluir que la cisterna de 45 metros cúbicos adquirida por la universidad es adecuada para cubrir el déficit hídrico de la laguna durante las épocas de sequía. Este dimensionamiento asegura que el sistema de almacenamiento sea suficiente para mantener el nivel del agua en condiciones óptimas.

2.5 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA

Una vez finalizado el análisis del balance hídrico, es fundamental considerar cómo se recolectará el agua lluvia de los techos aledaños a la laguna para su aprovechamiento durante los meses de déficit hídrico. Esto permitirá contrarrestar los efectos de la alta evaporación y mantener controlado el nivel del agua en la laguna.

Para ello, se propone un plan de captación de agua lluvia compuesto por tres componentes principales:

- Captación: corresponde al área de los techos aledaños a la laguna, que han sido establecidas previamente, cada una debe contar una pendiente y una superficie apropiadas para facilitar el flujo del agua de lluvia hacia el sistema de recolección.
- Recolección y conducción: este incluye canaletas ubicadas en los bordes inferiores del techo, que es donde el agua de lluvia se concentra. Estas canaletas deben ser de un material liviano, impermeable y de fácil ensamblaje, lo que ayudará a evitar fugas y a garantizar un flujo eficiente hacia el sistema de almacenamiento.

- Almacenamiento: el componente destinado a almacenar el agua lluvia recolectada, la cual se usará durante los meses de sequía. En este caso es importante mencionar que la Universidad ya ha adquirido cisternas de 45 metros cúbicos que serán utilizadas para este sistema de captación.

Dado que el agua recolectada no estará destinada al consumo humano, no será necesario implementar mecanismos interceptores o filtros avanzados, simplificando así el diseño.

2.5.1 Diseño para sistema de captación

Para el componente de captación, en la sección de oferta hídrica ya se delimitaron las áreas de recolección correspondientes a cada uno de los techos y se calculó el caudal de escorrentía utilizando el Método Racional.

En cuanto al almacenamiento, como se mencionó previamente, la universidad ya dispone de una cisterna con una capacidad aproximada de 45 metros cúbicos, que será destinadas específicamente para este sistema de captación. Esta capacidad resulta adecuada para satisfacer el volumen de almacenamiento necesario, tal como se determinó en el análisis previo, garantizando así un manejo eficiente del déficit hídrico de la laguna.

No obstante, para el componente de recolección y conducción, será necesario instalar canaletas en los techos previamente identificados. Es importante destacar que algunos techos de la universidad ya cuentan con sistemas similares, incluidos los analizados en este estudio. Por lo tanto, la implementación del sistema debe considerar las características y las

instalaciones existentes en cada techo. Con esta información, se podrá determinar la manera más eficiente de integrar o mejorar el sistema de conducción.

A continuación, se presenta la ecuación necesaria para calcular el área de flujo de estos dispositivos de conducción, la cual es la ecuación de Manning obtenida de Gribbin (2014):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_o^{\frac{1}{2}} \cdot A$$

Donde,

Q: caudal máximo en la canaleta.

n: coeficiente de rugosidad del material de la canaleta. (Ver Anexo B)

R: radio hidráulico.

A: área de flujo de la sección transversal.

So: pendiente de la canaleta.

El radio hidráulico es la relación entre el área de flujo de la sección transversal y el perímetro mojado (Mott, 2010):

$$R = \frac{A}{PM}$$

El perímetro mojado (PM) se puede definir como la longitud de la superficie de contacto entre el líquido y las paredes del conducto o cauce por donde fluye.

2.6 AHORRO DE AGUA Y ECONÓMICO

La implementación del sistema de captación de agua lluvia para mantener el nivel de la laguna durante los meses de sequía tiene como principal objetivo eliminar la necesidad de rellenarla con agua potable, práctica que actualmente se realiza según lo mencionado anteriormente.

De acuerdo con el análisis realizado en la sección de demanda hídrica, se estima que, durante los cuatro meses de verano, cuando se lleva a cabo este procedimiento, se utilizan aproximadamente 176 metros cúbicos de agua potable.

Con el cuadro N°2 del pliego tarifario de EPMAPS, el cual se muestra a continuación:

CUADRO 2		
Categoría	Cargo fijo	Tarifa USD por m ³
 Consumo no Residencial	USD 2,10	\$ 0,72

Figura 8. Tarifa de agua para consumo no residencial

Se tiene que la tarifa por metro cúbico para consumo no residencial es de 0.72 centavos de dólar. Por lo tanto, al dejar de utilizar esta agua, la universidad se estaría ahorrando aproximadamente 127 USD.

2.7 CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA

2.7.1 Análisis de la calidad del agua

La calidad del agua de la laguna de la Universidad San Francisco de Quito es un tema de gran relevancia, ya que este cuerpo de agua alberga diversas especies animales, como peces, tortugas, ranas y renacuajos. Por ello, es fundamental que el agua se mantenga en condiciones adecuadas para preservar la vida de estos organismos.

La preocupación sobre la calidad del agua surgió debido a la coloración anómala que esta presenta. En respuesta, se llevaron a cabo investigaciones en colaboración con el departamento de ingeniería ambiental para evaluar si la laguna es apta para albergar a estas especies y determinar qué parámetros podrían mejorarse para garantizar un entorno saludable.

En primer lugar, desde el departamento de ingeniería ambiental se señaló que la posible fuente de contaminación de la laguna, responsable de su coloración, pueden ser los fertilizantes que se usan en las áreas verdes de alrededor de la laguna, lo que provocaría altas concentraciones de nitratos y amonios en el agua y derivaría en la coloración verde del agua. Por lo que, de forma simultánea, mientras este departamento se encargaba de realizar análisis con muestras de agua de la laguna para determinar estos parámetros, se investigó sobre el uso de fertilizantes en la universidad.

Para esto, se realizó una consulta con Planta Física y el departamento de mantenimiento y operaciones de la Universidad, en donde se obtuvo la información de que los fertilizantes únicamente se utilizan en la zona de los cuadrángulos de manera muy

controlada, y se planifica únicamente cuando se tiene algún evento en la zona que pueda provocar el deterioro del área verde; con respecto a las zonas aledañas a la laguna se obtuvo que hace bastante tiempo ya no se utiliza ningún tipo de fertilizante para evitar este mismo tema de la posible contaminación del agua.

Esta información se corroboró con los estudios realizados por el departamento de ingeniería ambiental, en los cuales se obtuvo que no hay niveles altos de amonio o nitratos en la laguna, lo cual confirma lo investigado, y a su vez descarta a los fertilizantes como responsable de la coloración del agua. A continuación, se muestran los resultados de estos estudios:

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS			USEPA Método de diazotización 25505; Método HACH 8507		USEPA Método de diazotización 25505; Método HACH 8507	
Nº	MATRIZ	CÓDIGO EXTERNO DE LA MUESTRA	Amonio (mg NH ₄ ⁺ /L)		Nitrato (mg NO ₃ /L)	
			Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
1	Agua	Laguna USFQ1 (dragon)	0.102848	-	2.21	-
2	Agua	Laguna USFQ2 (frente pagoda)	0.089992	-	1.77	-
3	Agua	Laguna USFQ3 (detrás pagoda)	0.102848	-	3.10	-
4	Agua	Laguna USFQ4 (desfogue pagoda)	0.102848	-	1.33	-
Normativa de Referencia		Tabla 2ª - TULSMA	N/A		13	

Tabla 14. Resultados de concentraciones de amonio y nitrato en el agua de la laguna.

Con la información obtenida, y en colaboración con el departamento de ingeniería ambiental, se decidió realizar un estudio más exhaustivo que incluyera diversos parámetros para evaluar la calidad del agua de la laguna. Este análisis más detallado, comparado con los criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre establecidos en la Tabla 2 del TULSMA, permitió concluir que la calidad del agua de la laguna es adecuada para la preservación de las especies que alberga. Asimismo, se determinó que la coloración del agua se debe únicamente a la presencia de microalgas.

Sin embargo, se identificaron algunos aspectos a considerar, como niveles de pH ligeramente alcalinos, que oscilaron entre 8.7 y 9.6, aunque aún dentro del rango permitido, y niveles elevados de DQO (Demanda Química de Oxígeno). A pesar de esto, no representan un riesgo, ya que el oxígeno disuelto está dentro de los valores adecuados para la vida acuática. En la siguiente tabla se muestran estos resultados:

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS								
			SM 4500 O		SM 4500 H		SM 5220 D / HACH 8000	
N°	MATRIZ	CÓDIGO EXTERNO DE LA MUESTRA	Oxígeno disuelto (mg/L)		pH		DQO (mg/L)	
			Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
1	Agua	Laguna USFQ1 (dragon)	8.18	0.09	8.81	0.12	63.00	-
2	Agua	Laguna USFQ2 (frente pagoda)	5.90	0.50	8.72	0.05	55.00	-
3	Agua	Laguna USFQ3 (detrás pagoda)	7.01	0.02	8.92	0.01	62.00	-
4	Agua	Laguna USFQ4 (desfogue pagoda)	7.04	0.01	8.80	0.00	64.00	-
5	Agua	Laguna USFQ5 (dragon)(13.11.24)			9.55	0.04		
Normativa de Referencia		Tabla 2ª - TULSMA	> 80% saturación		6.5 - 9		40	

Tabla 15. Resultados de oxígeno disuelto, pH, y DQO en el agua de la laguna.

El departamento de ingeniería ambiental señaló que estos problemas menores podrían estar relacionados con el alimento proporcionado a los animales de la laguna. No obstante, tras consultar nuevamente con Planta Física, se confirmó que no se suministra ningún tipo de alimento externo. Según estudios previos del departamento de veterinaria, las especies mantienen su propio ciclo alimenticio dentro del ecosistema de la laguna, lo que hace innecesario el aporte de alimentos desde fuentes externas.

Con toda la información recolectada y con el apoyo del departamento de ingeniería ambiental, se concluyó que los valores ligeramente elevados de pH y DQO en la laguna se deben principalmente a la limitada circulación del agua y a la escasez de lluvias. Esta situación provoca un ligero estancamiento, ya que, sin las precipitaciones necesarias, el nivel del agua no aumenta, impidiendo que el ciclo de recirculación se complete adecuadamente.

2.7.2 Propuestas para tratamiento del agua

Aunque, como se mencionó previamente, el agua de la laguna se encuentra en condiciones adecuadas para preservar la vida animal que alberga (todos los resultados de los criterios analizados se presentan en el Anexo A), existen ciertos parámetros que están ligeramente por encima de lo óptimo, específicamente el pH y el contenido de DQO. Estos valores se atribuyen principalmente al estancamiento del agua, ocasionado por la escasez de lluvias.

Por lo tanto, la solución más adecuada para abordar estos inconvenientes sería implementar un sistema de recolección y almacenamiento de aguas lluvias. Este sistema permitiría mantener el nivel de la laguna cuando disminuya, especialmente durante la época de verano. De esta manera, el pH del agua podría reducirse gracias a la acidez del agua lluvia, y se favorecería una circulación adecuada del agua, lo que, a su vez, contribuiría a disminuir los niveles de DQO (Demanda Química de Oxígeno).

Además, otro método de tratamiento de agua que puede ayudar a mitigar estos inconvenientes es la aireación. La aireación es un proceso que consiste en introducir oxígeno en el agua para aumentar su concentración de oxígeno disuelto, facilitando la descomposición de materia orgánica por microorganismos aerobios. Este proceso puede realizarse mediante métodos mecánicos (difusores, agitadores) o naturales (como cascadas). En este caso, este método se puede implementar con dispositivos que la laguna ya posee.

En primer lugar, la cascada que forma parte del sistema de recirculación del agua debería mantenerse encendida durante más tiempo. Esto generaría una mayor circulación y movimiento del agua, promoviendo al mismo tiempo un proceso natural de aireación.

Por otro lado, la laguna cuenta con fuentes de aireación superficiales, pero estas no se utilizan de manera eficiente, ya que no existe una programación o planificación adecuada para su operación. Implementar un uso estratégico de estos dispositivos contribuiría a mejorar la calidad del agua al reducir tanto el pH como los niveles de DQO, favoreciendo así un ambiente más saludable para las especies que habitan la laguna.

Además, se propone la implementación de un biofiltro en la parte trasera de la Pagoda, específicamente en la zona donde termina la circulación del agua proveniente de la laguna, justo antes de ingresar al sistema de recirculación. Este biofiltro funcionaría como un humedal artificial, definido como un sistema ingenieril diseñado para depurar o purificar el agua utilizando procesos y recursos naturales. Estos sistemas se estructuran en tres componentes fundamentales que facilitan la eliminación o reducción de contaminantes.

En primer lugar, el área destinada para la construcción del humedal debe estar confinada y correctamente impermeabilizada para evitar filtraciones de agua contaminada. Además, esta superficie debe diseñarse con una ligera pendiente que facilite el flujo del agua. El segundo componente principal es el sustrato, colocado sobre la zona impermeabilizada. Este sustrato puede estar compuesto por materiales como arena, grava o piedra, y su función principal es proporcionar soporte a las especies vegetales que se plantarán. Finalmente, se tienen las plantas, seleccionadas según el tipo de humedal que se pretenda construir, las cuales se colocan sobre el sustrato.

El funcionamiento de estos sistemas se basa en una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren simultáneamente, logrando un tratamiento del agua altamente eficiente. Esto permite la eliminación de contaminantes tanto orgánicos como

inorgánicos. En términos generales, el sustrato actúa como un filtro para retener sólidos y materia orgánica, mientras que las plantas favorecen procesos biológicos clave, como la adsorción, oxigenación e interacción con microorganismos. Estos procesos descomponen los compuestos orgánicos y eliminan agentes patógenos y otros contaminantes. Existen 3 tipos de humedales:

- Los humedales de flujo superficial con plantas flotantes, los cuales son de poca profundidad y el agua se desplaza a baja velocidad a través de estos y se encuentra expuesta directamente a la atmósfera.

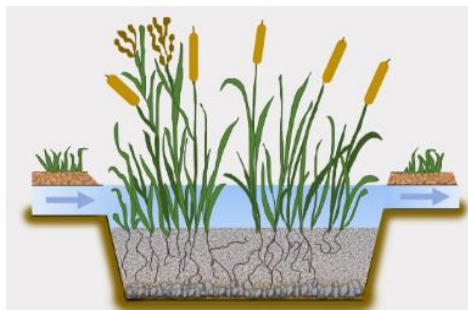


Figura 9. Humedal de flujo superficial. Fuente: (Montenegro-Rosero et al., 2019)

- Flujo sub-superficial horizontal, en estos la circulación del agua es subterránea de manera horizontal a través del sustrato del humedal.



Figura 10. Humedal de flujo sub-superficial horizontal. Fuente: (Montenegro-Rosero et al., 2019)

- Flujo subterráneo vertical, flujo del agua es en dirección vertical a través del sustrato a una velocidad mucho más lenta, pero resisten cargas mucho más altas de contaminantes.

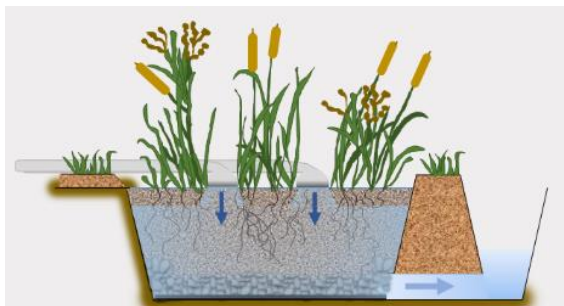


Figura 11. Humedal de flujo subterráneo vertical. Fuente: (Montenegro-Rosero et al., 2019)

Para el primer tipo de humedales se usan plantas superficiales como lirios acuáticos, y para los dos últimos se pueden sembrar especies vegetales como papiro, carrizo, tule.

Con toda esta información, se sugiere la implementación de un humedal de flujo sub-superficial horizontal. Este sistema permite que el agua circule de manera subterránea y horizontal a través del sustrato del humedal, ofreciendo varias ventajas. En primer lugar, facilita la filtración y retención de sólidos y desechos orgánicos provenientes de los animales que habitan la laguna, como excrementos, orina y restos de piel, además de otros residuos que puedan ingresar desde el entorno. Asimismo, la capacidad de clarificación de este tipo de humedales es significativamente más eficiente en comparación con los de flujo superficial, lo que ayudaría a resolver el problema principal: la coloración y el aspecto del agua.

Este sistema es también ideal por su mayor rapidez en el flujo de agua y su menor complejidad operativa en comparación con los humedales de flujo subterráneo vertical.

En cuanto a la vegetación a plantar sobre el humedal, su selección puede basarse en las preferencias del responsable del proyecto o de la universidad, tomando en cuenta factores económicos y estéticos. Existe una amplia gama de especies vegetales adecuadas para este propósito, como el papiro, carrizo, tule, platanillo, alocaia, entre otras, todas ellas disponibles en catálogos especializados en la construcción de humedales o biojardineras.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 CONCLUSIONES

En primer lugar, se determinó tanto la oferta hídrica, proveniente de los techos de las edificaciones cercanas a la laguna; como la demanda hídrica, correspondiente al agua potable utilizada en a los meses de verano para el relleno y mantenimiento del nivel de agua de la laguna. Esto permitió establecer la cantidad de agua que ingresa al cuerpo de agua y realizar un análisis detallado del balance hídrico, con el objetivo de identificar estrategias para reemplazar la cantidad de agua potable usada para satisfacer la demanda, mediante la recolección de agua lluvia. Asimismo, se identificó que la evaporación es la única fuente de pérdidas en la laguna, un factor clave que debe considerarse en el balance hídrico para confirmar la existencia de un déficit.

El análisis reveló que los techos de los edificios pueden generar grandes volúmenes de agua recolectable. Sin embargo, el almacenamiento representa un desafío, dado que no es viable acumular cantidades tan grandes de agua de manera convencional. A pesar de ello, se identificó una solución adecuada para abordar este inconveniente. Por otro lado, las mediciones experimentales y teóricas realizadas para estimar la evaporación de la laguna arrojaron resultados consistentes. Este análisis permitió establecer que la evaporación diaria promedio es de aproximadamente 6.06 mm, un dato crucial para calcular con mayor precisión el déficit hídrico y dimensionar de manera óptima los sistemas de recolección y almacenamiento.

El análisis del balance hídrico de la laguna del campus de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ) permitió identificar un déficit hídrico significativo, especialmente durante los meses de verano, con un déficit de 194 metros cúbicos para esta temporada y de 375 metros cúbicos para todo el año. Este déficit, atribuido a la elevada evaporación y a la baja precipitación, subraya la necesidad de implementar sistemas eficientes de captación y almacenamiento de agua lluvia para garantizar la sostenibilidad del cuerpo de agua.

El diseño propuesto, que incluye un sistema de captación desde el techo del Coliseo Alexandros y el uso de cisternas de almacenamiento, se presenta como una solución viable para satisfacer las demandas de agua durante los meses secos. A través de dos análisis de hidrogramas integrados, realizados tanto para la temporada de verano como para el año completo, se confirmó que la cisterna de 45 metros cúbicos adquirida por la universidad es suficiente para cubrir el volumen de almacenamiento necesario. Este sistema no solo asegura el mantenimiento del nivel del agua de la laguna, sino que también contribuye a reducir el uso de agua potable, promoviendo un enfoque más sostenible y alineado con los principios de conservación y eficiencia hídrica.

La integración del sistema de captación y almacenamiento de agua lluvia con las soluciones de tratamiento propuestas representa un paso significativo hacia la sostenibilidad hídrica del campus. Estas medidas no solo optimizan el uso de recursos naturales al reducir el consumo de agua potable en 176 metros cúbicos anuales durante la época seca, sino que también disminuyen los costos asociados, con un ahorro estimado de 127 USD al año. Más allá de los beneficios económicos, el proyecto promueve prácticas sostenibles que fortalecen el compromiso de la universidad con el desarrollo ambiental.

Los estudios realizados en colaboración con el departamento de ingeniería ambiental confirmaron que, aunque el agua de la laguna cumple con los parámetros básicos para la preservación de la vida acuática, existen valores ligeramente elevados de pH y demanda química de oxígeno (DQO) debido a la limitada circulación del agua. Para abordar estos problemas, se propusieron dos soluciones complementarias: la implementación de un sistema de aireación mediante el uso de la cascada y las fuentes superficiales existentes, y la construcción de un humedal de flujo sub-superficial horizontal. Estas intervenciones garantizarán una mejora continua en la calidad del agua, reduciendo la acumulación de materia orgánica y estabilizando el pH.

El proyecto no solo asegura la preservación del ecosistema de la laguna, sino que también posiciona a la USFQ como un referente en la gestión hídrica sostenible dentro del ámbito académico. La metodología empleada, basada en principios de diseño sostenible y técnicas de tratamiento natural, es altamente replicable y puede ser adaptada a otras instituciones académicas o contextos urbanos con necesidades similares. Además, sienta las bases para futuras investigaciones y mejoras en la gestión de recursos hídricos. Se recomienda monitorear continuamente la calidad del agua y el desempeño de las soluciones implementadas, así como explorar la posibilidad de integrar tecnologías adicionales como paneles solares para alimentar las bombas de agua o sistemas de monitoreo automatizados que optimicen la gestión hídrica en tiempo real.

3.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda siempre realizar una calibración local de los modelos de matemáticos utilizados, ya que los valores teóricos y experimentales pueden presentar variaciones debido a las condiciones específicas del campus. Esto asegurará mayor precisión en los cálculos de balance hídrico y permitirá realizar ajustes más exactos en las soluciones propuestas.

Es fundamental implementar un programa de monitoreo continuo de los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua de la laguna, tales como pH, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno (DQO) y nutrientes. Este seguimiento permitirá mantener condiciones óptimas para la preservación de la vida acuática y detectar posibles problemas de calidad en etapas tempranas. En cuanto a los sistemas de aireación existentes, como fuentes y cascadas, se sugiere optimizar su operación mediante un cronograma de mantenimiento que maximice su eficiencia, mejorando la oxigenación y circulación del agua, lo que contribuirá a reducir los niveles de DQO y pH. Por otro lado, la implementación del humedal de flujo sub-superficial horizontal debe iniciarse con pruebas piloto que permitan ajustar su diseño a las condiciones particulares de la laguna, optimizando así su desempeño en la eliminación de contaminantes.

Además, sería beneficioso ampliar el sistema de captación de agua lluvia integrando otros edificios cercanos al Coliseo Alexandros, incrementando la oferta hídrica para la laguna y disminuyendo la dependencia del agua potable. También, se recomienda promover este tipo de sistemas alrededor de la universidad, y utilizarlos no solo para la laguna; sino también para implementar el agua recolectada en sistemas de riego.

En el ámbito de la investigación, se sugiere promover estudios adicionales sobre los efectos del cambio climático en las tasas de evaporación y los patrones de precipitación en el campus de la USFQ. Asimismo, explorar tecnologías alternativas, como sistemas fotovoltaicos para alimentar las bombas y sensores inteligentes para monitorear en tiempo real el balance hídrico, podría potenciar aún más la sostenibilidad del proyecto. Por último, es imprescindible establecer un programa de mantenimiento preventivo para todos los componentes del sistema, como canaletas, cisternas y dispositivos de tratamiento. Esto garantizará su funcionamiento adecuado y evitará fallas operativas que puedan comprometer la eficacia del sistema en el largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cazorla, María; Trujillo, Melissa (2024), “*Datos de precipitación EMA-USFQ (Quito, Ecuador) 2021-2024*”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/xnmk6rm4dd.1
- Estupiñán Perdomo, J. L., & Zapata García, H. O. (2010). *Requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Glynn, J. E., & Gary, W. H. (1999). *Ingeniería ambiental* (2da ed.). Prentice Hall.
- Gribbin, J. E. (2007). *Introduction to hydraulics and hydrology with applications for stormwater management* (3ra ed.). Thomson Delmar Learning.
- Henao Cárdenas, J., & Castaño Arango, Y. (2016). *Gestión ambiental universitaria a partir del aprovechamiento de agua pluvial. Caso de estudio, Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11059/6481>
- López, J. (2003). *Elementos para el diseño de acueductos y alcantarillados*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Mariño Cárdenas, M. E. (2023). *Disponibilidad hídrica pluvial en el campus USFQ*. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.
- McGhee, T. J. (1991). *Abastecimiento de agua y alcantarillado* (6ta ed.). McGraw-Hill.

Molina Recalde, M. F. (2024). *Demanda hídrica en el campus USFQ y estrategias para la utilización del agua lluvia*. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.

Montenegro-Rosero, K., Fernández, L., Villamar-Ayala, C., & Espinoza-Montero, P. (2019). *Humedales artificiales y celdas de combustibles microbianas como sistemas individuales y combinados para el tratamiento de aguas residuales: una revisión*. infoANALÍTICA, 7(2). <https://doi.org/10.26807/ia.v7i2.100>

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6ta ed.). Pearson Educación.

Peña Cardoso, D. S. (2019). *Evaluación de la factibilidad de cosechar agua lluvia en la ciudad de Cuenca, como método de gestión ambiental para ahorrar agua potable* (Trabajo de titulación). Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas, Carrera de Ingeniería Ambiental, Cuenca, Ecuador.

Rahman, A., Keane, J., & Imteaz, M. A. (2012). 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.2011.12.002>

Wooding, S. Evaporation Rate Calculator. Available at: <https://www.omnicalculator.com/physics/evaporation-rate>. Accessed: Dec 01, 2024.

ANEXO A: RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA DE LA LAGUNA

COMPLETOS

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS			SM 2510 B		SM 4500 O	
Nº	MATRIZ	CÓDIGO EXTERNO DE LA MUESTRA	Conductividad eléctrica (uS/cm)		Oxígeno disuelto (mg/L)	
			Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
1	Agua	Laguna USFQ1 (dragon)	247.43	4.13	8.18	0.09
2	Agua	Laguna USFQ2 (frente pagoda)	250.30	1.77	5.90	0.50
3	Agua	Laguna USFQ3 (detrás pagoda)	249.73	0.42	7.01	0.02
4	Agua	Laguna USFQ4 (desfogue pagoda)	250.33	0.09	7.04	0.01
5	Agua	Laguna USFQ5 (dragon)(13.11.24)				
Normativa de Referencia		Tabla 2ª - TULSMA	N/A		> 80% saturación	

SM 4500 H		SM 2550 B		ISO 7027		SM 2510 A	
pH		T (°C)		Turbidez (NTU)		Sólidos totales disueltos (mg/L)	
Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
8.81	0.12	19.97	0.05	6.74	0.18	161.00	2.83
8.72	0.05	19.07	0.05	5.99	0.06	163.33	0.47
8.92	0.01	19.13	0.05	6.47	0.06	162.33	0.47
8.80	0.00	18.83	0.05	7.10	0.24	163.00	0.00
9.55	0.04						
6.5 - 9		N/A		N/A		N/A	

Método SM 2120 C. Spectrophotometric-Single-Wavelength Method		USEPA Método de diazotización 25505; Método HACH 8507		USEPA Método de diazotización 25505; Método HACH 8507	
Color Aparente (Pt-Co)		Amonio (mg NH ₄ ⁺ /L)		Nitrato (mg NO ₃ ⁻ /L)	
Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
174.00	0.00	0.102848	-	2.21	-
174.00	0.00	0.089992	-	1.77	-
172.00	0.00	0.102848	-	3.10	-
199.00	0.00	0.102848	-	1.33	-
N/A		N/A		13	

USEPA método SPADNS 2; Método 10225		USEPA método SPADNS 2; Método 10225		SM 5220 D / HACH 8000	
Fosfato (mg PO ₄ ³⁻ /L)		Sulfato (SO ₄ ²⁻)(mg/L)		DQO (mg/L)	
Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
1.61	-	43	-	63.00	-
1.09	-	41	-	55.00	-
0.05	-	22	-	62.00	-
2.24	-	48	-	64.00	-
N/A		N/A		40	

APHA. (2012). 2320-ALKALINITY TITRATION METHOD En APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association		Método colorimétrico de calmagita 8030 HACH	
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)		Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	
Promedio	Std Dev	Promedio	Std Dev
153.90	1.90	8.24	5.59
N/A		N/A	

ANEXO B: COEFICIENTE DE MANNING

Roughness Coefficients (Manning's n)

I. CLOSED CULVERTS:	
A. Concrete pipe	0.012–0.015
B. Corrugated-metal pipe or pipe-arch (annular unpaved):	
1. 2 $\frac{2}{3}$ by $\frac{1}{2}$ in corrugation riveted pipe	0.024
2. 3 in by 1 in corrugation	0.027
3. 5 in by 1 in corrugation	0.025
4. 6 in by 2 in corrugation (field bolted)	0.033
C. Vitrified clay pipe	0.012–0.014
D. Cast-iron pipe, uncoated	0.013
E. Steel pipe	0.009–0.011
F. Brick	0.014–0.017
G. Monolithic concrete:	
1. Wood forms, rough	0.015–0.017
2. Wood forms, smooth	0.012–0.014
3. Steel forms	0.012–0.013
H. Cemented rubble masonry walls:	
1. Concrete floor and top	0.017–0.022
2. Natural floor	0.019–0.025
I. Laminated treated wood	0.015–0.017
J. Vitrified clay liner plates	0.015
K. Polyvinyl chloride (PVC)	0.007–0.011
II. OPEN CHANNELS, LINED (Straight Alignment):	
A. Concrete, with surfaces as indicated:	
1. Formed, no finish	0.013–0.017
2. Trowel finish	0.012–0.014
3. Float finish	0.013–0.015
4. Float finish, some gravel on bottom	0.015–0.017
5. Gunite, good section	0.016–0.019
6. Gunite, wavy section	0.018–0.022
B. Concrete, bottom float finished, sides as indicated:	
1. Dressed stone in mortar	0.015–0.017
2. Random stone in mortar	0.017–0.020
3. Cement rubble masonry	0.020–0.025
4. Cement rubble masonry, plastered	0.016–0.020
5. Dry rubble (riprap)	0.020–0.030
C. Gravel bottom, sides as indicated:	
1. Formed concrete	0.017–0.020
2. Random stone in mortar	0.020–0.023
3. Dry rubble (riprap)	0.023–0.033
D. Brick	0.014–0.017
E. Asphalt:	
1. Smooth	0.013
2. Rough	0.016
F. Wood, planed, clean	0.001–0.013
G. Concrete-lined excavated rock:	
1. Good section	0.017–0.020
2. Irregular section	0.022–0.027
III. OPEN CHANNELS, EXCAVATED (Straight Alignment, Natural Lining):	
A. Earth, uniform section:	
1. Clean, recently completed	0.016–0.018
2. Clean, after weathering	0.018–0.020
3. With short grass, few weeds	0.022–0.027
4. In gravelly soil, uniform section, clean	0.022–0.025
B. Earth, fairly uniform section:	
1. No vegetation	0.022–0.025
2. Grass, some weeds	0.025–0.030
3. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030–0.035
4. Sides clean, gravel bottom	0.025–0.030
5. Sides clean, cobble bottom	0.030–0.040

Fuentes: Gribbin, J. E. (2007)