

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y
MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA EN EL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO
DE AGUAS LLUVIA DEL EDIFICIO DE LA E3T EN EL CAMPUS CENTRAL DE
LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**JUAN CAMILO CHINCHILLA PICO
SERGIO ANDRÉS PAREDES BRIJALDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, UIS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y
MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA EN EL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO
DE AGUAS LLUVIA DEL EDIFICIO DE LA E3T EN EL CAMPUS CENTRAL DE
LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**JUAN CAMILO CHINCHILLA PICO
SERGIO ANDRÉS PAREDES BRIJALDO**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA
PhD en Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, UIS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO DE REFERENCIA	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	19
2.2 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA	20
2.3 MUESTREO	22
2.4 CALIDAD DEL AGUA EN EL SISTEMA	23
2.5 OPCIONES DE TRATAMIENTO	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.1 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA	26
3.1.1 Captación	26
3.1.1.1 Cubiertas Verdes	27
3.1.1.2 Alrededores	29
3.1.2 Conducción al tanque	32
3.1.3 Tanque de almacenamiento	34
3.1.4 Tratamiento del agua	36
3.1.5 Sistema de bombas	37
3.1.6 Aprovechamiento	39
3.2 ENSAYOS DE CALIDAD	42
3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA	48
3.3.1 pH	50
3.3.2 Turbiedad	51
3.3.3 Color	52
3.3.4 Conductividad Eléctrica	52
3.3.5 Hierro Total	53
3.3.6 Nitratos y Nitritos	54

3.3.7 Sulfatos	55
3.3.8 Cloruros	56
3.3.9 Dureza Total	57
3.3.10 Alcalinidad Total	58
3.3.11 Sólidos Totales	58
3.3.12 Plomo	58
3.3.13 Coliformes Totales y E. Coli	59
3.4 PROPUESTA DE TRATAMIENTO	61
3.5 RECOMENDACIONES PARA EL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA	65
4. CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 2. Calificación cualitativa	25
Tabla 3. Síntesis de los resultados del proceso de caracterización	41
Tabla 3. Normativa de ensayos de laboratorio	44
Tabla 4. Eventos de precipitación muestreados	47
Tabla 5. Resultados de aforamientos	47
Tabla 6. Resultados de laboratorio y comparación con normativas.	49
Tabla 7. Comparativa de los parámetros analizados entre el caso de estudio y otras experiencias	50
Tabla 8. Calificación cualitativa de tratamientos	63

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ejemplo esquemático de un SPALL	18
Figura 2. Análisis estadístico de los parámetros de calidad en los estudios recopilados	43

LISTA DE FOTOS

	pág.
Foto 1. Edificio E3T (Cubiertas y alrededores)	19
Foto 2. Localización problema de inundación	27
Foto 3. Terraza verde 5° piso (a) y principal (b).	27
Foto 4. Composición cubierta verde.	28
Foto 5. Tragante cúpula y tubería.	29
Foto 6. Zona frontal del edificio E3T	30
Foto 7. Canaletas, tragante, trampa de sedimentos y sumidero	31
Foto 8. Estado de algunos elementos de captación en los alrededores.	31
Foto 9. Caja de inspección adyacente al cuarto de la planta de emergencia.	33
Foto 10. Caja de inspección adyacente al tanque de almacenamiento.	33
Foto 11. Flotador de mercurio y flotador convencional.	34
Foto 12. Tanque reformado.	35
Foto 13. Tapa de acceso al tanque.	36
Foto 14. Bombas y tanques hidrofloplantaciones en las cubiertas verdes.	37
Foto 15. Tablero alternador y manómetro.	38
Foto 16. Reforma del cuarto de bombas.	39
Foto 17. Llave terminal de la terraza principal.	39
Foto 18. Sanitarios y llave terminal exterior	40

LISTA DE ANEXOS

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

Anexo A. Cuestionarios (Fase de caracterización)

Anexo B. Formato de caracterización

Anexo C. Revisión bibliográfica parámetros de calidad

Anexo D. Planos del sistema de aprovechamiento de aguas lluvia

Anexo E. Registro fotográfico

Anexo F. Resultados de laboratorio

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA EN EL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIA DEL EDIFICIO DE LA E3T EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER*

AUTORES: Juan Camilo Chinchilla Pico
Sergio Andrés Paredes Brijaldo**

PALABRAS CLAVE: Calidad del agua lluvia, parámetros fisicoquímicos, parámetros microbiológicos, tratamiento.

DESCRIPCIÓN

La demanda de agua potable en el mundo es cada vez mayor debido al aumento de la población, incrementando el impacto sobre las fuentes hídricas. Por esto, se han investigado e implementado alternativas para el abastecimiento de agua, siendo una de estas el uso de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvia (SPALL). Uno de los aspectos importantes de estos SPALL es el análisis de la calidad fisicoquímica y microbiológica de las aguas lluvia, con el propósito de potenciar el uso del recurso. En este estudio se realizó la evaluación de la calidad del agua recolectada de uno de estos sistemas, que se encuentra ubicado en el edificio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) en la UIS. Se realizó la caracterización del sistema de aprovechamiento de aguas lluvia, encontrándose zonas de captación en techos verdes y alrededores de la primera planta, conducción en tuberías de PVC y canaletas de concreto, con un tanque de concreto desde donde se distribuye el agua para uso en descarga de sanitarios y riego. Luego de un proceso de muestreo, se evaluó la calidad del agua captada previa al tanque, encontrado que se exceden los niveles de pH, turbiedad, plomo, coliformes totales y E. Coli, de acuerdo a normativas que acogen los dos usos mencionados. Finalmente, se propuso el uso de un desviador de primer flujo junto con un tren de tratamiento (filtración con cartuchos, filtro de carbón activado y cloración) para reducir la contaminación a márgenes aceptables para los usos estipulados.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE WATER IN THE WATER RAISING SYSTEM OF THE E3T BUILDING IN THE CENTRAL CAMPUS OF THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER*

AUTHORS: Juan Camilo Chinchilla Pico
Sergio Andrés Paredes Brijaldo**

KEYWORDS: Quality, rainwater, chemical parameters, microbiological parameters, treatment.

DESCRIPTION

Drinking water demand is increasing with world population, producing a growing negative impact in conventional water sources. For this reason, alternative water sources such as rainwater harvesting systems (RWHS) have been researched and implemented. One of the important aspects of RWHS is the analysis of the physicochemical and microbiological quality of rain water, with the objective of enhancing the use of this resource. In this study water collected from rainwater harvesting system located at UIS's Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) building was assessed. The RWHS consists of green roof and first floor surroundings as catchment areas, PVC plumbing and concrete gutters for conduction, and a concrete storage tank where water is distributed for toilet flushing and irrigation. After a sampling process, water quality was evaluated finding that pH, turbidity, lead, total coliforms, and E. Coli, exceeded the standard values given by normative that contemplate the previous water uses. Lastly, a treatment was proposed including first the use of first flush devices together with additional technologies (cartridge filtration, activated carbon filter and chlorination) to reduce water pollution to acceptable levels for the mentioned water uses.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Doctor in Sanitary and Environmental Engineering.

INTRODUCCIÓN

La crisis del agua es el riesgo mundial más preocupante en la actualidad y para futuras generaciones.¹ Se estima que aproximadamente dos terceras partes de las personas en el mundo enfrentan condiciones de escasez de agua al menos 1 mes al año mientras 500 millones de personas viven en áreas donde el consumo supera los recursos hídricos renovables locales disponibles.² El panorama se agudiza frente al excesivo crecimiento demográfico que se pronostica llevará la población mundial a superar los 8500 millones de habitantes para el 2030.³ Colombia ofrece una perspectiva probable bajo las mismas tendencias, concentrando su población en las cabeceras municipales del país donde actualmente 318 de ellas sufren un riesgo de desabastecimiento en periodos secos.⁴

Bajo el marco establecido por los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el año 2030, donde la disponibilidad del agua limpia es una problemática a resolver, las fuentes no convencionales de agua han despertado el interés de algunas naciones que ven en su desarrollo una alternativa para suplir la demanda de agua potable.⁵ Una de estas fuentes alternativas es el agua lluvia y es desde la antigüedad que las civilizaciones han visto un aliciente para abastecerse del recurso, inclusive

¹ WEF. The Global Risks Report. 11th Edition. 2016

² MEKONNEN, Mesfin and HOEKSTRA, Arjen. Four billion people facing severe water scarcity [en línea]. En: Science Advances, 2(2). 2016. Disponible en Internet: <URL: <http://advances.sciencemag.org/content/2/2/e1500323>>

³ DEPARTAMENTO DE ASUNTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LA ONU. UN, World Population Prospects [en línea]. Nueva York, 2017. Disponible en Internet: <URL: <https://population.un.org/wpp/>>

⁴ IDEAM. Estudio Nacional del Agua. 2014

⁵ TORRES MURILLO, O.M. Identificación de los posibles usos del agua lluvia de escorrentía en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá) [en línea]. 2011, p. 1-181. Disponible en Internet: <URL: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7106>>

levantando estructuras de captación,⁶ pero es hasta tiempos recientes que realmente se ha estado estudiando técnicamente su calidad y usos.⁷ El aprovechamiento de aguas lluvia puede darse para diversas actividades incluyendo las de carácter doméstico, aunque algunos autores sugieren precaución con su reúso para consumo humano.⁸ En Colombia aproximadamente el 8% de los 35987 millones de m³ que representan la demanda de agua está asociada al uso doméstico⁹ y más del 50 % de las actividades que comprenden este uso, no requiere la utilización de agua estrictamente potable, pero sin embargo es utilizada [6] por lo cual esta fuente alternativa es una posible solución para la alta demanda.

Un aspecto importante para el aprovechamiento de las aguas lluvias es identificar parámetros fisicoquímicos y biológicos que definen la calidad de éstas, analizando la variabilidad que puede presentar el agua, debido a las numerosas fuentes de contaminación que los alteran, que comprende factores meteorológicos, localización, presencia animal, área de captación, almacenamiento y demás que se relacionan con su contacto con el sistema de recolección y tratamiento.^{10,11} El

⁶ SUÁREZ BALLÉN, J.A.; GALARZA GARCÍA, M.A. and ORTIZ MOSQUERA, R.O. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia [en línea]. En: VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. João Pessoa (Brasil), 5 a 7 de junio de 2006. Disponible en Internet: <URL: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>>

⁷ CORTÉS, Oscar. Revisión sobre los usos y variables para determinar la calidad del agua pluvial en superficies de cubierta [en línea]. En: Revista De Investigación, 8(2), 2015, 146-159. Disponible en Internet: <URL: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/34>>

⁸ KAHINDA, J.M.; TAIGBENU, A. E. and BOROTO, J. R. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa [en línea]. En: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 32, Issues 15–18, 2007, Pages 1050-1057. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706507000915>>

⁹ IDEAM, Op. Cit.

¹⁰ DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K. and LEIDL, C. Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada [en línea]. En: Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 2009, p. 117-134.

¹¹ TORRES, A.; MÉNDEZ FAJARDO, S.; LÓPEZ-KLEINE, L.; MARÍN, V.; GONZÁLEZ, J.A.; SUÁREZ, J.C.; PINZÓN, J.D. y RUIZ, A. Calidad de aguas lluvias sobre tejados. Evaluación

análisis y la evaluación de la calidad del agua y su variabilidad en sistemas de aprovechamiento domésticos, permite definir los tratamientos más adecuados para garantizar una óptima calidad acorde con sus posibles usos.^{12,13,14}

preliminar de la calidad de la escorrentía pluvial sobre tejados para su posible aprovechamiento en zonas periurbanas de Bogotá [en línea]. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 14 (1). 2011, p. 127-135. Disponible en Internet: <URL: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v14n1/v14n1a16.pdf>>

¹² DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K. and LEIDL, C., Op. Cit.

¹³ HELMREICH, B.A.; HORN, H. and COULOMBWALL, A. Opportunities in rainwater harvesting [en línea]. Desalination 248. 2009, p. 118–124. Disponible en Internet: <URL: https://www.academia.edu/14479351/Opportunities_in_rainwater_harvesting>

¹⁴ ESTUPIÑÁN PERDOMO, J.L. and ZAPATA GARCÍA, J.O. Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá [en línea]. 2010, p. 1–172. Disponible en Internet: <URL: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1265>>

1. MARCO DE REFERENCIA

El aprovechamiento de aguas lluvia es una técnica que plantea como fuente alternativa para suplir la demanda del recurso hídrico, la captación de la esorrentía pluvial, recolectándose de una determinada superficie y posteriormente almacenándose para garantizar su disponibilidad para una futura utilización, que en general se relaciona con usos agrícolas y domésticos (principalmente no para consumo humano).^{15,16,17}

La recolección de aguas lluvia se realiza mediante sistemas descentralizados, que se componen primordialmente de captación, tratamiento, almacenamiento y distribución. El diseño de estos sistemas puede variar significativamente dependiendo de la prioridad o criterios que se planteen, ya sea respecto a uso posterior y calidad de agua, aspectos socioeconómicos, ahorro en costos y energía, almacenamiento.^{18,19,20} La figura 1 presenta un ejemplo esquemático de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvia.

¹⁵ CORTÉS, O., Op. Cit.

¹⁶ DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K. and LEIDL, C., Op. Cit.

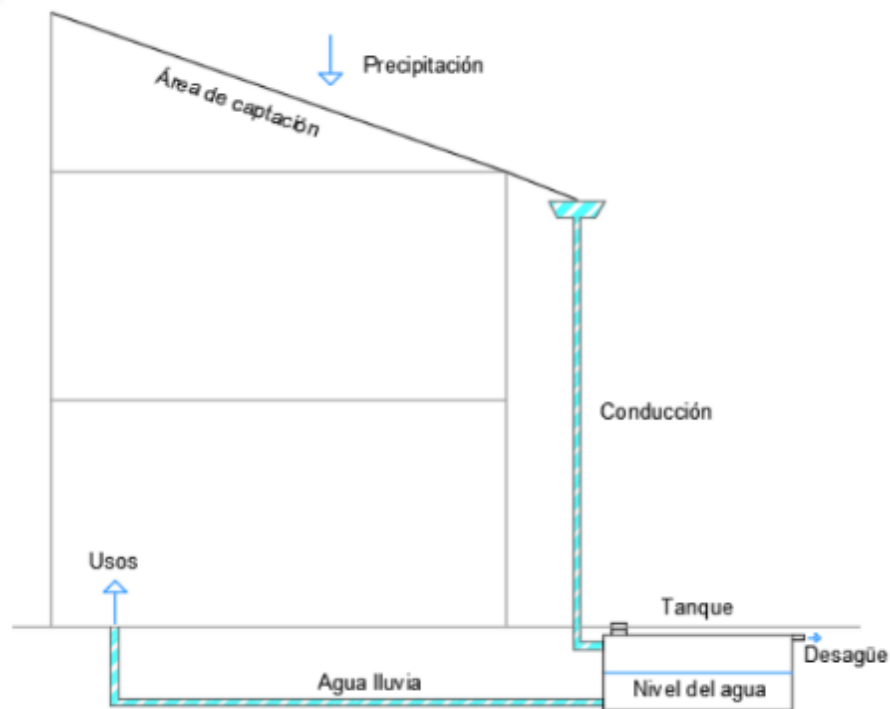
¹⁷ HELMREICH, B.A.; HORN, H. and COULOMBWALL, A., Op. Cit.

¹⁸ DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K. and LEIDL, C., Op. Cit.

¹⁹ ADAPA, S.; BHULLAR, N. and DE SOUZA, S. V. A systematic review and agenda for using alternative water sources for consumer markets in Australia [en línea]. En: J. Clean. Prod., vol. 124, 2016, p. 14–20. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261600264X>>

²⁰ MELVILLE-SHREEVE, P.; WARD, S. and BUTLER, D. Rainwater Harvesting Typologies for UK Houses : A Multi Criteria Analysis of System Configurations [en línea]. En: Water, 8(129). 2016. Disponible en Internet: <URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/8/4/129/pd>>

Figura 1. Ejemplo esquemático de un SPALL



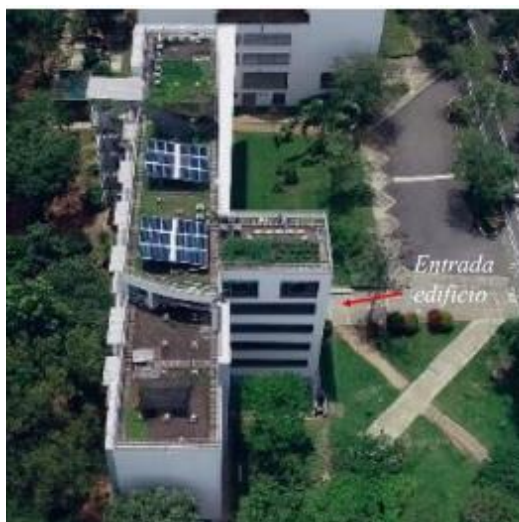
Fuente: CAMPISANO, A.; BUTLER, D.; WARD, S.; BURNS, M.J.; FRIEDLER, E.; DEBUSK, K.; FISHER-JEFFES, L.N.; GHISI, E.; RAHMAN, A.; FURUMAI, H. and HAN, M. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives [en línea]. En: Water Res, 115. 2017. Disponible en Internet: <URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28279940>>

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sistema de aprovechamiento de aguas lluvias bajo estudio pertenece al edificio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) de la sede principal de la Universidad Industrial de Santander en la ciudad de Bucaramanga. Climatológicamente la zona se caracteriza por poseer dos temporadas secas (dic-feb, jun-ago) y dos temporadas lluviosas (mar-may, sep-nov) con un promedio total anual de 1303 mm de precipitación.²¹ La temperatura promedio es de 23 °C con media máxima de 28° C, mínima de 19° C y humedad relativa del aire mayores a 80%.²²

Foto 1. Edificio E3T (Cubiertas y alrededores)



Fuente: Revista Hechos UIS, Teleuis.

²¹ IDEAM. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>>

²² Ibid.

El SPALL ha sido desarrollado como parte de una adecuación realizada a la edificación en el año 2012, en la que uno de los objetivos ha sido la aplicación de conceptos sostenibilidad con el fin de reducir la demanda de energía y aprovechamiento de energías renovables en el sitio. La edificación es una estructura destinada a fines educativos que cuenta con cinco niveles y un sótano, dos cubiertas verdes y en su mayoría compuesta por aulas y oficinas. En las inmediaciones, se encuentran zonas verdes caracterizadas por árboles de entre 10 y 15 metros, en la parte posterior otra edificación educativa cercana de similar altura a un costado, zonas de tránsito peatonal y zonas de tránsito vehicular y parqueaderos en la parte frontal (Foto 1).

2.2 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA

Inicialmente, se desarrolló una etapa de reconocimiento general y recopilación de información competente al sistema de aprovechamiento de aguas lluvias. Como parte de esta etapa, se realizó un primer acercamiento con el personal profesional adjunto a la escuela E3T con el fin de presentar la propuesta de estudio y obtener una realimentación sobre el sistema de aprovechamiento. Posteriormente, se adquirieron los planos correspondientes a los diseños de la redes hidráulicas, sanitarias y pluviales de la última adecuación realizada a la infraestructura de la edificación, con el fin de obtener información más precisa sobre lo proyectado respecto al sistema de aprovechamiento y su configuración. Adicionalmente se realizaron dos visitas técnicas para familiarizarse y reconocer a grandes rasgos los elementos que hacen parte del sistema, inspeccionando las terrazas verdes, el tanque de almacenamiento, el cuarto de bombas y los alrededores del edificio.

Finalizada la revisión general del sistema, se dio inicio a la etapa de caracterización técnica del sistema orientada a obtener información más amplia y detallada de diferentes fuentes para ser evaluada y contrastada. Como primera actividad, se efectuó la elaboración de un cuestionario de 20 preguntas destinada a los técnicos de fontanería, jardinería y mantenimiento de bombas, quienes sostienen un contacto directo y habitual con el sistema de aprovechamiento. Estas preguntas se construyeron con el propósito de adquirir del personal mencionado, información sobre los elementos que componen el sistema de captación, tratamiento, almacenamiento, distribución y aprovechamiento de aguas lluvias y su funcionamiento, estado y mantenimiento (Anexo A).

Una segunda fuente de información corresponde a la realización de visitas técnicas más extensas y detalladas para la verificación, inspección y valoración del sistema. Para orientar estas visitas y registrar lo encontrado se desarrolló un formato de caracterización, basado en la información preliminar de reconocimiento recopilada en la primera etapa y en el cuestionario realizado. El formato presenta cuatro apartados generales correspondientes a información general, donde se registra el sitio de evaluación; caracterización del sistema pluvial/aprovechamiento, en el que se detallan aspectos sobre las zonas de captación, el tanque de almacenamiento, el sistema de bombas, el tratamiento aplicado y los accesorios; caracterización del sistema hidráulico, para la descripción de accesorios y demás instalaciones hidráulicas; e inspección, en el cual se registran resultados y generalidades obtenidas del contraste y verificación de los planos de diseño con lo inspeccionado durante las visitas (Anexo B).

Se llevó a cabo un total de cuatro visitas en el transcurso de dos semanas con el acompañamiento en sus respectivas áreas de los técnicos de fontanería y jardinería de la División de Panta Física de la Universidad. La primera visita

correspondió a la inspección de los componentes de drenaje y aprovechamiento en las terrazas verdes y de los accesorios hidráulicos del edificio; una segunda visita en la cual se revisó el cuarto de bombas, además de los accesorios hidrosanitarios y pluviales en la periferia como pozos, cajas de inspección, medidores y puntos de consumo; una tercera visita donde se inspeccionó el tanque de almacenamiento; y finalmente una cuarta en la que se estudió la vegetación de las terrazas verdes.

Bajo la necesidad de definir una zona de muestreo para la evaluación de calidad del agua y como consecuencia del conflicto presentado entre diferentes fuentes en lo que respecta a la distribución y configuración de las tuberías de drenaje encargadas de llevar el agua lluvia, se decidió ejecutar una prueba de drenajes. La prueba consistió en proporcionar un flujo de agua en puntos clave (tragantes) determinados a partir de los planos, que permitieran asegurar desde donde se está captando agua y si está drenando a los puntos identificados. La verificación de esta prueba se realizó observando el flujo de agua en dos cajas de inspección, siendo la más importante aquella ubicada en la que convergen todas las aguas captadas, justo antes del tanque.

2.3 MUESTREO

Se planteó la creación de un protocolo para la obtención y posterior análisis de muestras de agua lluvia. Este protocolo se definió mediante un análisis de los resultados de la caracterización, la realización de una prueba de drenajes para verificar el recorrido del agua en el sistema y apoyados en experiencias encontradas en estudios recopilados en una revisión bibliográfica. Esta recolección de bibliografía fue realizada recopilando artículos en inglés y español que en su desarrollo efectuaran ensayos de calidad de aguas lluvias en diferentes

condiciones de sitio y con distintas configuraciones de sistemas de aprovechamiento. Seguidamente, fueron consignados en una tabla los diferentes parámetros de calidad de agua analizados en estos estudios, junto a la información que se encontrara disponible del ambiente y lugar de estudio; materiales de captación, conducción y almacenamiento; y el uso dado a las aguas lluvias captadas (Anexo C).

Como puntos importantes a definir en el protocolo se tienen la selección estratégica del punto de muestreo, el planteamiento del proceso para realizar un aforo, la determinación del método de toma de muestras y la designación de los parámetros de calidad de agua lluvia a estudiar.

2.4 CALIDAD DEL AGUA EN EL SISTEMA

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio para las 5 muestras de aguas lluvia y sus respectivos parámetros de calidad, se inició su análisis. Para ello, se buscó comparar estos valores con los dados en normativas y en diversos estudios recopilados con el fin de verificar cómo se encuentra la calidad del agua en el sistema.

En primera instancia, se realizó una revisión de normativas internacionales que dispusieran de valores máximos aceptables que cumplir, en cuanto a las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua, permitiendo que sea segura para los usos requeridos (i.e. Riego agrícola y descarga de sanitarios) y contrastando con lo encontrado en el sistema bajo estudio. En cuanto al uso en descarga de baños se eligió como valores para el cumplimiento los dados por el estándar BS 8515:2009 de la British Standards Institution (BSI) y por las directrices dadas por el Ministerio de Salud de Canadá en el documento “Canadian

Guidelines for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing”. Para el uso en riego se revisó el cumplimiento de los parámetros de calidad frente a los presentados por la OMS en su guía para el uso de aguas residuales en agricultura y en el Decreto Supremo N°015-2015-MINAM de Perú. Así mismo, apoyándose en la búsqueda académica anteriormente realizada (Anexo 3), se realizó una comparación entre la calidad de las aguas lluvia con/sin tratamiento en las diferentes experiencias de los estudios recopilados y en el sistema del edificio E3T, teniendo en cuenta los parámetros fijados.

Además de examinar la calidad en contraste con las referencias mencionadas, también se analizaron posibles factores que determinan los niveles obtenidos de estos parámetros en el agua recolectada, basados en la información investigada durante la fase de caracterización y la literatura estudiada.

2.5 OPCIONES DE TRATAMIENTO

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio que permitieron conocer la calidad de las aguas lluvia recolectadas en el sistema y realizado su pertinente análisis, se efectuó una búsqueda bibliográfica con el fin de consular y proponer tecnologías de tratamiento de aguas. Se tuvieron en cuenta para ello las experiencias recopiladas en el Anexo C, junto a las propuestas dadas por diferentes guías internacionales.^{23,24,25,26} Esto se realizó con el fin de configurar un tren de

²³ WHO. Guidelines for drinking-water quality. 2017.

²⁴ TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. The Texas Manual on Rainwater Harvesting [en línea]. Third Edition. Austin, Texas, 2005. Disponible en Internet: <URL: http://www.twdb.texas.gov/publications/brochures/conservation/doc/RainwaterHarvestingManual_3rdedition.pdf>

²⁵ RAINWATER HARVESTING TASK GROUP. Ontario Guidelines for Residential Rainwater Harvesting Systems. 2010.

²⁶ TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY. Harvesting, Storing, and Treating Rainwater for Domestic Indoor Use. 2007.

tratamiento que pueda reducir la concentración de los parámetros críticos, es decir, aquellos que no cumplen con alguna de las normas que establecen los estándares requeridos para el uso del agua en las actividades en las que se pretende aprovechar (Descarga de inodoros y riego agrícola). El tren de tratamiento se compuso de una etapa de pretratamiento, seguido de un tratamiento primario para finalizar con una desinfección.

Para definir cual tecnología de las propuestas iría en cada etapa del tren de tratamiento, se realizó una calificación cualitativa que evaluó para cada una el aspecto económico y de operación/mantenimiento (O&M), asignándoseles un valor de 1 a 3 (Tabla 1). Para ambos parámetros de evaluación se designó su respectiva calificación numérica bajo criterio propio, basándose en datos, estimaciones o comparaciones encontradas en la literatura indagada. De las tecnologías propuestas para cada etapa del tren de tratamiento se tomó la que obtuvo en total un mayor puntaje.

Tabla 1. Calificación cualitativa

ASPECTOS	DESCRIPCIÓN	VALORES POSIBLES	ASIGNACIÓN
Económico (Costos)	Inversión para la implementación del método de tratamiento	1	Tecnologías asociadas a los costos más altos tendrán una menor calificación y viceversa. En comparación con las demás propuestas de la misma etapa.
		2	
		3	
Operación y mantenimiento (O&M)	Comprende el desarrollo de tareas de monitoreo, reparación y mantenimiento; su frecuencia y el tipo de personal que las ejecuta.	1	Tecnologías que requieran con mayor constancia realizar estas actividades, así como personal altamente capacitado, tendrán un puntaje menor de calificación.
		2	
		3	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA

A continuación, se presenta una descripción del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias como resultado del proceso de caracterización técnica realizada. En el Anexo D se puede observar la esquematización general del sistema de aprovechamiento, ilustrando la distribución desde los puntos de captación hasta el tanque de almacenamiento.

3.1.1 Captación. Se identificaron como zonas de captación de aguas lluvias las superficies correspondientes a las cubiertas verdes y a las superficies cercanas al acceso principal de la edificación. Adicionalmente, es recolectada por el sistema el agua originada de tres unidades condensadoras del sistema de aires acondicionados ubicadas en la quinta planta, además del agua de una pileta lava traperos ubicada en el sótano que es abastecida por el tanque de almacenamiento. Las cantidades de agua generadas por estas dos últimas fuentes adicionales son mínimas comparadas con la proveniente de las superficies de captación en un evento de precipitación (Anexo D). En ocasiones de lluvia fuerte el sumidero más próximo a la entrada del edificio, que dirige la esorrentía del pavimento al alcantarillado, sufre inundaciones y ocasiona que esta agua termine en el tanque del sistema (Foto 2).

Foto 2. Localización problema de inundación



3.1.1.1 Cubiertas Verdes. El edificio cuenta con dos terrazas que implementan un sistema de cubiertas verdes en la totalidad de su superficie. La primera terraza (Foto 3 (a)) de menor extensión con 137 m^2 se encuentra ubicada en el quinto piso y la terraza principal (Foto 3 (b)) tiene un área de 429 m^2 ubicándose en lo más alto. Además de la vegetación y el sistema de drenaje, hay sobre la terraza un sistema de riego automático con tubería PVC, unidades de iluminación por tubos reflectantes solares, paneles fotovoltaicos y unidades de aire acondicionado (Foto 3 (a) y (b)).

Foto 3. Terraza verde 5° piso (a) y principal (b).



Las cubiertas están construidas en concreto y recubiertas con un impermeabilizante de emulsión asfáltica, con superficies levemente inclinadas y canaletas del mismo material para facilitar el drenaje del agua. Sobre estas áreas se encuentra instalado el recubrimiento que constituye el techo verde, comenzando con un geotextil inferior seguido de una geomembrana impermeable en PVC, una lámina drenante, un geotextil superior y finalmente una capa de sustrato con su respectiva vegetación plantada (Foto 4).

Foto 4. Composición cubierta verde.



Parte del agua que cae en esta superficie, se infiltra en el sustrato y escurre por entre las capas del terreno hacia tragantes de rejilla dispuestos en la periferia de la terraza. Se encuentran ubicados ocho tragantes (tres planos y cinco de cúpula) en la terraza principal y dos (uno plano y uno de cúpula) en la terraza del quinto piso, todos ellos (excepto uno en la principal) recubiertos en una malla fina para ayudar con la filtración al paso del agua (Foto 5 (a)). Al retirar uno de los tragantes de cúpula de la terraza principal se evidenció paso de lodos a la tubería de PVC a la que conecta (Foto 5 (b)).

Foto 5. Tragante cúpula y tubería.



En la terraza principal se presentan dos grandes secciones con plantaciones de tomate cherry y berenjena, con el resto de espacio siendo ocupado por pinos enanos, maní, durazno, hierbabuena, limonaria, cebolla larga, girasol, *alternanthera sessilis* y *sedum lemon ball*. La terraza del piso quinto posee cultivo de tomate cherry, *sedum lemon ball*. El tipo de vegetación que puede ser plantada en estas zonas debe ser de raíz corta y a futuro se planea cultivar en adición a lo existente ají pimentón, ají dulce, albahaca, menta y frijol caupí. Además de la presencia de crecimiento de maleza en algunos sitios de ambas superficies y la acumulación de hojas de la copa de un árbol aledaño a la terraza del quinto piso, las zonas de captación se encuentran en buen estado, sin evidentes imperfecciones en la impermeabilización.

3.1.1.2 Alrededores. El sistema de aprovechamiento también capta escorrentía de superficies de concreto y vegetación ubicadas principalmente en la parte frontal de la edificación, en las proximidades del acceso principal (Foto 6). Estas zonas funcionan como andenes para el tránsito de personas que conducen a la edificación y sus respectivas zonas de pasto adyacentes.

Foto 6. Zona frontal del edificio E3T



Las aguas lluvias se captan mediante una serie de canaletas de concreto de sección trapezoidal (Alto: 15 cm, base mayor: 30 cm, base menor: 5 cm) que rodean periferia del sector frontal del edificio, para conducir las hasta tragantes tipo cúpula (Foto 7(a)) y sumideros con rejillas (Foto 7 (b)) que criban el líquido para entregarlo a las diferentes cajas de inspección que pertenecen al sistema pluvial del edificio. Estas canaletas cuentan con pequeños agujeros rectangulares que sirven como trampas de sedimentos en tramos cercanos a los tragantes. Se dispone de 3 sumideros rejillas (una ubicada en la entrada principal y dos en la zona de acceso al cuarto del transformador y planta de emergencia) y cinco tragantes tipo cúpula (Anexo D).

Foto 7. Canaletas, tragante, trampa de sedimentos y sumidero



A pesar de que se realiza una limpieza diaria a las canaletas de concreto, es usual encontrar acumulaciones de tierra, vegetación y ciertos residuos en ellas, problema agudizado especialmente cuando ha ocurrido una precipitación. Las trampas de sedimento no son aseadas adecuadamente, razón por la cual presentan agua estancada con color y residuos acumulados. Los sumideros con rejilla presentan existencia de tierra, hojas y algunos residuos. Todos los tragantes tipo cúpula se encuentran rotos en alguno de sus costados debido al mal manejo en labores de limpieza. Algunos de estos problemas pueden ser visualizados en las Foto 8 (a) y (b).

Foto 8. Estado de algunos elementos de captación en los alrededores.



3.1.2 Conducción al tanque. Las aguas lluvias recolectadas son transportadas hasta el tanque de almacenamiento, por medio de un sistema de tuberías de PVC con diámetros que varían entre 3 pulg, 6 pulg y 8 pulg. Nueve cajas de inspección están situadas y distribuidas (acordé a lo indicado en los planos de diseño) para recibir el agua de los diferentes tragantes/sumideros dispuestos en las superficies de captación.

En una de las cajas de inspección ubicada frente al cuarto de la planta de emergencia (Foto 9), se encontró deposición de tierra y raíces, concentrada principalmente en la boca de las tuberías de entrada y por el camino que recorre el agua hasta la tubería de salida. Las tres tuberías de entrada (provenientes de dos sumideros y un tragante) exhiben sedimento de tierra dentro de ellas. Adicional a las tuberías de agua, se encontró una tubería de respiradero al costado de la caja. Una particularidad se da con solamente una de las tuberías que entregan agua de las terrazas, pues en vez de conectar directamente con la caja revisada, entrega el líquido libremente a la canaleta de concreto adyacente para ingresar finalmente por un tragante de cúpula.

El estado de la caja de inspección que recibe toda el agua captada antes de entregarse al tanque de almacenamiento es mucho más crítico que el de la anterior. La cantidad de lodos y raíces ocupa gran parte del fondo, además de hallar algunas cucarachas provenientes probablemente de la tubería de desagüe de 8 pulgadas en el fondo de la caja que conecta directamente a un pozo. Las tuberías de entrada a esta caja (a excepción de aquella que deposita el agua de una pileta del sótano) y de salida (desagüe y al tanque) también exhiben en su interior abundancia de lodo, provocando finalmente que el agua que llega a la caja sea contaminada y presente impurezas incluso antes de que llegue a este

componente del sistema (Foto 10). También existe una tubería de aireación en esta caja de inspección.

Foto 9. Caja de inspección adyacente al cuarto de la planta de emergencia.



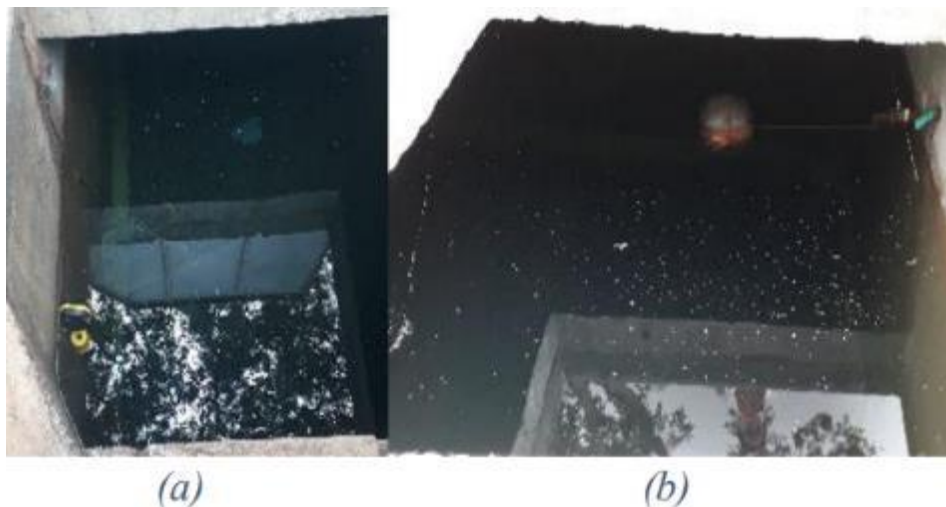
Foto 10. Caja de inspección adyacente al tanque de almacenamiento.



3.1.3 Tanque de almacenamiento. El sistema de aprovechamiento cuenta con un tanque de almacenamiento subterráneo en concreto de 3.8 m de largo, 3.2 m de ancho y 2.2 m de alto. Tiene un nivel máximo de agua de 1.8 m, lo que le da una capacidad de aproximadamente 22000 L y un nivel mínimo de 30 cm, altura a la cual un dispositivo flotador de mercurio (Foto 11 (a)) instalado se encarga de desactivar el sistema de bombas adjunto al tanque para la distribución.

A la fecha de la inspección, el tanque se encuentra funcionando con agua potable suministrada por el acueducto, se mantiene constantemente en su nivel máximo gracias a un flotador mecánico (Foto 10 (b)) instalado en la tubería PVC de 1 pulg que permite el acceso de este tipo de agua. La presencia de aguas lluvias en el tanque de almacenamiento es casi nula, debido a que se evacúa en la caja de inspección adyacente (Foto 10) por el desagüe ubicado en el fondo de esta, este patrón se mantiene excepto en casos de precipitaciones muy fuertes donde se llega al nivel suficiente para alcanzar la tubería que conduce al tanque (Foto 10).

Foto 11. Flotador de mercurio y flotador convencional.



Además del acceso de 1 pulg de agua potable, existe el acceso de aguas lluvias (con la situación ya mencionada) mediante una tubería PVC corrugada de 6 pulg. En cuanto a las salidas, se exhiben la tubería de excesos de 6 pulg, la de 4 pulg de descarga al pozo en el fondo y la de 4 pulg que conduce al sistema de bombas, todas en PVC corrugado. En la parte superior del tanque están instalados dos aireadores de 4 pulg.

Respecto al mantenimiento del tanque, es desocupado y sometido a un lavado con jabón e hipoclorito una vez cada semestre, además de ser abierto e inspeccionado de forma general semanalmente. En el año 2017 el tanque/cuarto de bombas fue sometido a una reforma en la cual se elaboró un encerramiento con un bordillo en concreto para evitar los problemas de acumulación de hojas, tierra y residuos que se venía presentando hasta ese momento (Foto 12).

Foto 12. Tanque reformado.



Teniendo en cuenta que el tanque está constantemente lleno de agua potable, el estado del agua dentro del tanque es clara, con excepción de algunas suciedades superficiales flotando y otras decantadas como raíces, una bolsa de plástico y una roca (Foto 11 (a) y (b)). Cabe resaltar que al momento de la inspección la limpieza

rutinaria aún no había sido efectuada. En la tapa de acceso se observó un gran número de insectos (hormigas) que en parte han caído al agua del tanque, así como desgaste del concreto, óxido en la tapa y entrada de algo de tierra. (Foto 13).

Foto 13. Tapa de acceso al tanque.



3.1.4 Tratamiento del agua. En lo que respecta al tratamiento de las aguas lluvias, no se cuenta con un sistema más allá del cribado que aportan las rejillas en sumideros y tragantes (con malla en las terrazas), además de las trampas de sedimentos en las canaletas de concreto. Aunque el estado de estos elementos en las terrazas es adecuado, en los tragantes y trampas en los alrededores no es así, como se evidenciar en las Foto 8 (a) y (b).

No se reporta que se haya realizado algún tipo de prueba de calidad a las aguas lluvias recolectadas. Se registra por parte del personal de aseo, la presencia de color turbio y presencia de sólidos en el agua de inodoros en algunas ocasiones, luego de algún evento de lluvia fuerte.

3.1.5 Sistema de bombas. El cuarto de bombas se encuentra enterrado junto al tanque de almacenamiento, como parte de la misma estructura de concreto. El sistema encargado de distribuir el agua del tanque hasta la edificación está compuesto por los siguientes elementos: dos tanques de presión hidroflo de 300 litros (Foto 14 (a)), dos bombas eléctricas BARNES modelo 2015 E-10-3 (Foto 14 (b)), un tablero alternador conexión estrella-triángulo de 10 HP (Foto 15 (a)) y un manómetro (Foto 15 (b)).

Foto 14. Bombas y tanques hidrofloplantaciones en las cubiertas verdes.



En cada una de las terrazas se encuentra disponible una llave terminal (Foto 17) para usarse ya sea para el riego manual o mediante sus respectivos sistemas de riego automático instalados.

Foto 15. Tablero alternador y manómetro.



Las bombas funcionan de forma automática y alternada activándose al haber caídas de presión en el sistema como consecuencia del uso de agua en los puntos de consumo. La presión estándar está calibrada a los 60 psi, cuando esta baja a 50 psi se activa el sistema, sube la presión hasta 70 psi hasta que se normaliza a la presión estándar para repetir el ciclo.

Como parte de la ya mencionada reforma realizada en el año 2017, se realizó la elevación de la tapa de acceso al cuarto con una rejilla metálica (Foto 16). Este cambio fue ejecutado debido a que al estar la tapa a ras del suelo (como la del tanque), no existía ventilación se producía acumulación de humedad que terminaban generando problemas en los componentes eléctricos del sistema. Adicionalmente a esta reforma, fue instalado un bypass que conecta la red de agua del acueducto a la tubería después del sistema de bombas, con el fin de evitar problemas de abastecimiento que se presentaban al momento de averías o de realizar tareas de mantenimiento.

Foto 16. Reforma del cuarto de bombas.



3.1.6 Aprovechamiento. Uno de los usos que se le da al agua proveniente del tanque de almacenamiento es el riego de las

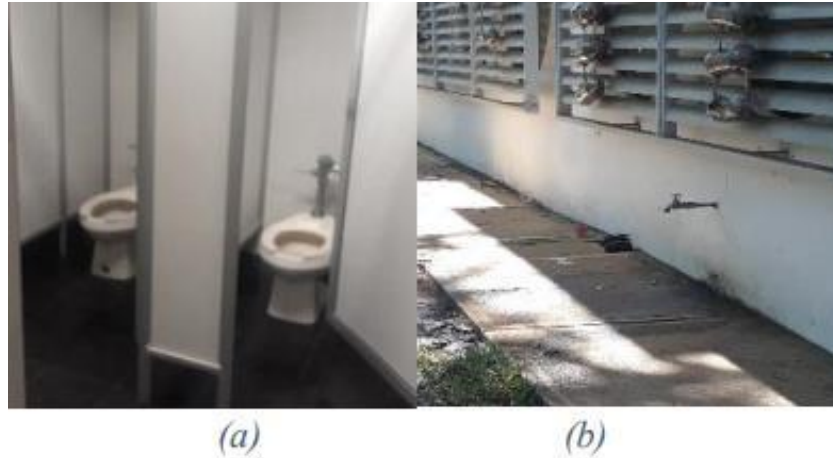
Foto 17. Llave terminal de la terraza principal.



El agua del tanque también se destina para la descarga de 33 inodoros (Foto 18 (a)) en el edificio. Dos de ellos instalados en el sótano, siete en cada piso del primero al cuarto (tres para el baño de mujeres y cuatro para el de hombres) y tres

en el quinto piso. Por último, se identificó un grifo en la parte exterior del edificio, ubicado en la esquina noroeste, cerca al tanque de almacenamiento (Foto 18 (b)).

Foto 18. Sanitarios y llave terminal exterior



La Tabla 2 presenta una síntesis de los resultados derivados del proceso de caracterización del sistema.

Tabla 2. Síntesis de los resultados del proceso de caracterización

SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIA - EDIFICIO E3T UIS	
ZONAS DE CAPTACIÓN	• 2 Terrazas verdes: Una principal de 429 m² y una en el 5° piso de 137 m² ▸ <i>Vegetación actual</i> : Tomate cherry, berenjena, pinos enanos, maní, durazno, hierbabuena, limonaria, cebolla larga, girasol, alternanthera sessilis y sedum lemon ball. ▸ <i>Vegetación a futuro</i>: Ají pimentón, ají dulce, albahaca, menta y frijol caupí. • Perímetro de edificio (pastos, senderos/zonas de concreto)
CONDUCCIÓN	• Tuberías PVC • Canaletas de concreto trapezoidales (periferia) • Cajas de inspección en concreto
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	• Tanque subterráneo de concreto (Largo: 3.8 m ; Ancho: 3.2 m ; Alto: 2.2 m) • Capacidad: 22000 L - Nivel máximo: 1.8 m • Mantenimiento semestral (Vaciado y limpieza) • Entradas: ▸ Agua acueducto (flotador mecánico) ▸ Agua lluvia (no abastece actualmente) • Salidas: ▸ Desagüe ▸ Excesos ▸ Al sistema de bombas
SISTEMA DE BOMBEO	• 2 bombas BARNES 2015 E-10-3 de funcionamiento alterno automático (50 - 70 psi) • 2 Tanques de presión hidroflo 300 L • Apagado automático con flotador de mercurio en el tanque (nivel mínimo: 30 cm)
APROVECHAMIENTO	• Riego de vegetación en terrazas verdes (2 llaves terminales) • Descarga de inhodoros (33 unidades) • Llave terminal en el exterior del edificio (uso no asignado)
TRATAMIENTO	• Cribado: ▸ Rejillas rectangulares (3 en la periferia) ▸ Tragantes planos (4 en las terrazas) ▸ Tragantes de cúpula (6 en las terrazas, 5 en la periferia)
PRINCIPALES PROBLEMAS ENCONTRADOS	• Ingreso de escorrentía de vías adyacentes al sistema, causado por inundación de una poceta de desagüe al presentarse precipitaciones fuertes. • Elementos de conducción perimetrales en mal estado (presencia de residuos) • Elementos de cribado rotos (tragantes de cúpula) • Evacuación al desagüe del agua de la gran mayoría de precipitaciones, impidiendo su ingreso al tanque. Esto tiene el sistema funcionando exclusivamente con agua del acueducto.

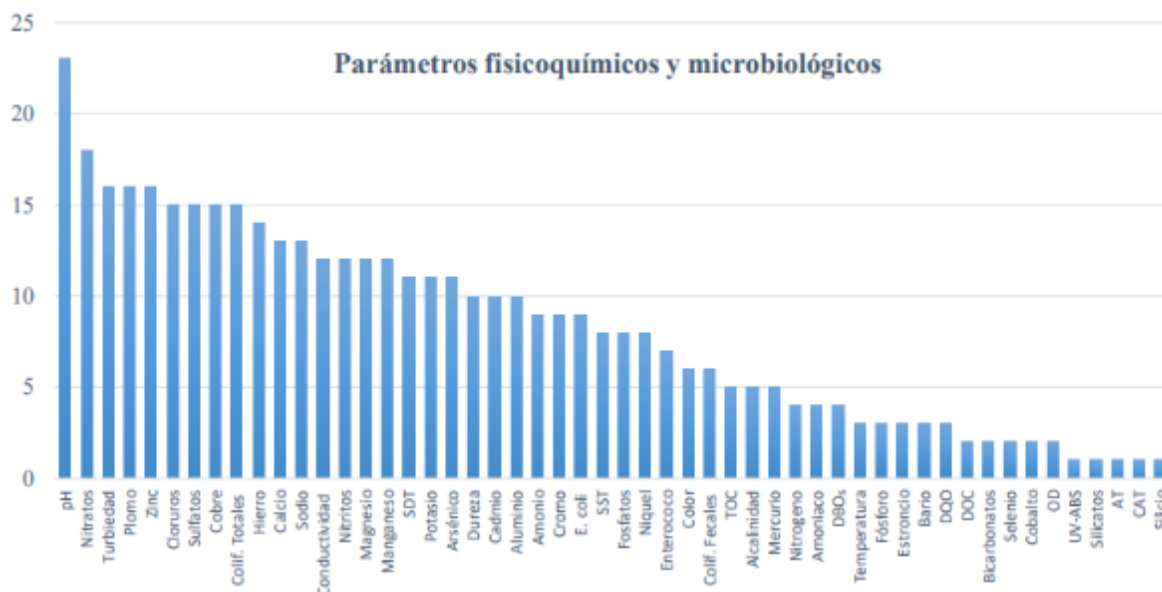
3.2 ENSAYOS DE CALIDAD

Se consolidó e implementó el siguiente protocolo: Definición del número de muestras, consolidación de una tabla resumen de la revisión bibliográfica efectuada, designación de los parámetros de calidad a analizar, selección estratégica y adecuación de un punto de muestreo y finalmente la determinación y realización del proceso de recolección de muestras.

Para el análisis de calidad del agua captada en el sistema de aprovechamiento, se estableció la recolección de muestras de agua en 5 eventos de precipitación. Por razones presupuestales este muestreo fue realizado en un único punto del sistema. Además, se planteaba originalmente la toma de 10 muestras, pero debido a situaciones de restricción de tiempo, agravadas por la coincidencia con una corta temporada de lluvias y la anormalidad en el campus universitario, se restringió el trabajo con cinco muestras.

De la revisión bibliográfica realizada, se obtuvieron 24 artículos, a partir de los cuales se sintetizaron en una tabla los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos estudiados en ellos y sus respectivos resultados (Anexo C). Se obtuvieron 52 parámetros diferentes analizados en los 24 artículos, siendo pH el de mayor interés estando presente en 23 ocasiones según lo muestra el análisis estadístico (Figura 2).

Figura 2. Análisis estadístico de los parámetros de calidad en los estudios recopilados



Para cada lluvia se definió examinar del agua captada: pH, color (aparente), conductividad eléctrica, alcalinidad total, dureza total, sólidos totales, turbiedad, nitritos, nitratos, sulfatos, cloruros, hierro, plomo, coliformes totales y E. coli. Los parámetros analizados, fueron procesados en el Laboratorio de Consultas Industriales de la Escuela de Química UIS (LQCI), siguiendo los Métodos Estándar (Tabla 3). Se incluyó el plomo debido a que, entre los demás metales, la revisión bibliográfica mostró su relevancia en cuanto al riesgo que representa su presencia en el agua y su relación con el sistema bajo estudio.

Tabla 3. Normativa de ensayos de laboratorio

Parámetro	Método/Norma
pH	Potenciómetro/SM 4500-H ⁺ B
Turbiedad	Nefelométrico/SM2130 B
Color	Espectrofotométrico/SM 2120 B
Conductividad	Conductivimétrico/SM 2510
Hierro	Espectrofotométrico/SM 3500-Fe
Nitratos	Espectrofotométrico/RODIER
Nitritos	Espectrofotométrico/SM 4500-B
Sulfatos	Espectrofotométrico/SM 4500 E
Cloruros	Argentométrico/SM 4500-Cl ⁻ B
Dureza Total	Titrimétrico-EDTA/SM 2340 C
Alcalinidad Total	Titrimétrico/SM 2320 B
Sólidos Totales	Gravimétrico/SM 2540 B
Plomo	Absorción Atómica – Horno de grafito/SM 3050 E
Coliformes Totales	Filtración por membrana/SM 9222B
E. coli	Filtración por membrana/SM 9222B

Los parámetros, a excepción del plomo forman parte un paquete de estudio de calidad del agua ofrecido por el LQCI por el cual se optó tras considerarlo adecuado para el muestreo. Como complemento, se solicitó el estudio de un metal como parámetro adicional de análisis, siendo este el plomo. Junto al zinc, el plomo es el metal más analizado en los artículos compilados en la revisión bibliográfica, estando presente en 16 de ellos. Ha sido priorizado frente al zinc debido a que este último, es de mayor relevancia en sistemas con superficies de captación metálicas y su presencia en el agua no se encuentra limitada por razones de salud a

diferencia del plomo, según estándares como los establecidos por Colombia, Estados Unidos, Canadá y la OMS.^{27,28,29,30} Además, resulta de importancia controlar el contenido de plomo del agua recolectada debido principalmente a uno de los usos en los que se busca aprovechar, el riego de cultivos que incluye plantas que proveen para alimentación (Tomate, berenjena, etc.). El uso de agua contaminada con plomo para este propósito representa un riesgo potencial para la salud, teniendo en cuenta que especies vegetales pueden ser contaminadas mediante procesos de absorción y por ende la contaminación de animales o humanos que lo reciben.³¹

Apoyados en los resultados de la prueba de drenaje realizada para la caracterización del sistema, se seleccionó como ubicación de muestreo la caja de inspección adyacente al tanque. Esta localización es la más adecuada si se desea que las muestras tomadas sean representativas de todo el sistema, pues en esta caja convergen todas las aguas recolectadas de las diferentes zonas de captación. Todo esto bajo la limitación que representa el hecho de que el tanque se encuentre funcionando con agua del acueducto hasta su nivel máximo y que la cantidad de aguas lluvias que llegan es mínima. Debido a la dificultad que

²⁷ MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano (Resolución 2115) [en línea]. Bogotá, 2007. Disponible en Internet: <URL: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf>

²⁸ HEALTH CANADA. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality- Summary Table [en línea]. Canadá, 2017. Disponible en Internet: <URL: https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/sum_guide-res_recom-eng.pdf>

²⁹ USEPA. National Primary Drinking Water Regulations. Washington D.C., 2009.

³⁰ WHO. Lead poisoning and health. WHO fact sheets, 2018.

³¹ COYAGO, E. and BONILLA, S. Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano [en línea]. En: La Granja Revista de Ciencias de la Vida, 23 (1). 2016, p. 35–46. Disponible en Internet: <URL: <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/23.2016.04>>

representa retirar la tapa de concreto de 80 cm por 80 cm cada vez que ocurra un evento de precipitación, la caja fue dejada abierta, encerrada con su debida señalización y cubierta con una lona plástica fácilmente removible para evitar el ingreso de residuos externos.

Con el fin de no incluir la primera descarga de lluvia que se encuentra más contaminada por el lavado que realiza a las superficies y elementos de captación, se inició con el proceso de muestreo en un momento posterior a los primeros 10 minutos desde el inicio de la precipitación.^{32,33,34} Para las muestras de análisis de los parámetros fisicoquímicos en cada uno de los eventos de lluvia, se recolectó una muestra en un recipiente PET (Poli-tereftalato de etileno) de 600 ml, tras realizar llenado y descarte del contenido dos veces. Adicionalmente, para las muestras destinadas al análisis microbiológico en cada precipitación, se colmaron sin proceso de purga, 4 recipientes de polipropileno de 30 ml previamente esterilizados. Para los casos en que estas muestras no pudieran ser llevadas inmediatamente al laboratorio, se mantuvieron refrigeradas (aproximadamente 4°C) hasta entregarse.

Debido a la configuración particular que presenta el sitio de muestreo, donde se presentan dos entradas de agua (una hacia el norte y otra hacia el sur), se realizó un proceso de aforo para lograr que las muestras llevadas a laboratorio sean lo más representativas posible. Para el aforo se utilizaron 2 recipientes plásticos, los

³² NTALE, Henry K. Improving the quality of harvested rainwater by using first flush interceptors/retainers [en línea]. XI IRCSA Conference - Proceedings 2003. Disponible en Internet: <URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.738.3170&rep=rep1&type=pdf>>

³³ TSAKOVSKI, S.; TOBISZEWSKI, M.; SIMEONOV, V.; POLKOWSKA, Z. and NAMIESNIK, J. Chemical composition of water from roofs in Gdansk, Poland [en línea]. Environmental Pollution Volume 158, Issue 1. 2010, p. 84–91. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749109003911>>

³⁴ PACEY, Arnold and CULLIS, Adrian. Rainwater Harvesting: The Collection of Rainfall and Runoff In Rural Areas. Intermediate Technology Publications, 1986.

cuales fueron llenados 1 en cada salida de agua y cronometrados respectivamente, para seguidamente medir sus volúmenes con una probeta y calcular los caudales. Finalmente, con los caudales obtenidos se calculó una proporción de agua proveniente de cada tubería para llenar los 5 recipientes (4 de 30 ml y 1 de 600 ml) necesarios para ensayar en laboratorio.

La Tabla 4 presenta los eventos de lluvia de los cuales se realizó la toma de muestras y los respectivos resultados de aforamientos. La Tabla 5 presenta los caudales obtenidos en los conductos que convergen en el punto de monitoreo.

Tabla 4. Eventos de precipitación muestreados

Evento	Hora	Día	Mes	Año
1	01:30	05	11	2018
2	00:00	07	11	2018
3	22:50	18	11	2018
4	16:50	22	11	2018
5	15:45	13	12	2018

Tabla 5. Resultados de aforamientos

Evento	Caudal [l/s]		Proporción de la muestra [%]	
	Norte	Sur	Norte	Sur
1	0.103	0	100	0
2	0.567	0.311	65	35
3	0.329	0.057	85	15
4	0.371	0.056	87	13
5	0.004	0	100	0

3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para las 5 muestras de aguas lluvia recolectadas en el sitio de estudio. En la Tabla 6 se presenta un análisis estadístico de estos resultados junto con un chequeo del cumplimiento frente a estándares de calidad dados por normativas para los usos definidos. Un análisis estadístico que resume lo encontrado en la revisión bibliográfica (Anexo C) en experiencias con y sin tratamiento es presentado en la Tabla 7 frente a los resultados del caso de estudio.

Tabla 6. Resultados de laboratorio y comparación con normativas.

Parámetro	Unidad	Muestra					Prom.	Coef. Var.	Doméstico (baños)		Riego agrícola	
		N°1	N°2	N°3	N°4	N°5			BS 8515 (2009)	Health Canada ² (2010)	OMS ¹ (2006)	N° 015-2015 Perú
pH	pH	6.36	6.56	6.51	6.41	6.22	6.41	0.021	6.0 - 8.0	-	6.5 - 8.0	6.5-8.5
Turbiedad	NTU	35	35	29	50	26	35,00	0.264	< 10	5 [2]	-	-
Color	UPC	190	225	157	225	148	189,00	0.193	-	-	-	100*
Conductividad	µS/cm	97.8	120.1	243,0	240,0	136.7	167.52	0.412	-	-	700	2500
Hierro Total	mg Fe/L	0.35	0.40	0.30	0.41	0.21	0.33	0.246	-	-	5	5
Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /L	1.09	1.04	4.5	1,00	0.50	1.63	0.999	-	-	-	100**
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /L	0.10	0.09	0.11	0.07	0.05	0.08	0.287	-	-	-	10
Sulfatos	mg SO ₄ ⁻² /L	11.77	10.14	5.31	34.46	1.78	12.69	1.008	-	-	-	1000
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	4.97	6.21	13.25	11.59	10.77	9.36	0.383	-	-	150	500
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	54	48	140	132	66	88,00	0.504	-	-	-	-
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	56.35	60.44	53.27	61.95	57.37	57.88	0.059	-	-	-	-
Sólidos Totales	mg/L	148	200	272	224	108	190.40	0.337	-	-	-	-
Plomo	mg Pb/L	0.35	0.42	0.39	0.42	0.45	0.41	0.093	-	-	5.0	0.05
Coliformes Totales	UFC/100 ml	604	4890	1960	908	1116	1896	0.922	1000	200 [0]	-	1000
E. coli	UFC/100 ml	156	3780	1740	376	405	1291	1.181	250	200 [0]	-	100

Color verde: Cumple , Color rojo: No cumple , Color Amarillo: No corroborable , Color gris: No presente en la norma (Chequeos realizados con los promedios)

*Color verdadero

** Valor reportado y comparado como Nitratos (mg NO₃⁻/L) + Nitritos (mg NO₂⁻/L)

1. WHO: Degree of restriction on use = None

2. Valores máximos, [mediana]

Tabla 7. Comparativa de los parámetros analizados entre el caso de estudio y otras experiencias

Parámetro	Unidades	Resultados de laboratorio			Sin tratamiento*			Con tratamiento*		
		Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
pH	pH	6.412	6.22	6.56	6.716 (41)	4.4	8.3	6.972 (32)	5.3	8.31
Turbiedad	NTU	35	26	50	4.929 (30)	0.33	24	4.55 (19)	0.3	20
Color	UPC	189	148	225	27.638 (12)	0.4	95	17.591 (11)	7.1	32.8
Conductividad	µS/cm	167.52	97.8	243	67.404 (24)	10	170	67.959 (17)	24.8	234
Hierro Total	mg Fe/L	0.334	0.21	0.41	0.203 (26)	0	1.69	0.115 (18)	0.005	0.5
Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /L	1.626	0.5	4.5	3.004 (33)	0.19	18	1.633 (23)	0.02	8.21
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /L	0.084	0.05	0.11	0.064 (17)	0	0.3	0.041 (12)	0	0.11
Sulfatos	mg SO ₄ ⁻² /L	12.692	1.78	34.46	4.983 (34)	0	19.7	6.121 (14)	0.11	15.7
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	9.358	4.97	13.25	12.017 (30)	0.82	143.695	4.9775 (12)	0	12.5
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	88	48	140	44.963 (20)	0.92	344.52	20.935 (6)	11.011	40
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	57.876	53.27	61.95	32.433 (3)	19.6	50	23.027 (10)	8.2	44.7
Sólidos Totales	mg/L	190.4	108	272	-	-	-	-	-	-
Plomo	mg Pb/L	0.406	0.35	0.45	0.038 (27)	0	0.266	0.007 (24)	0.0008	0.01945
Coliformes Totales	UFC/100 ml	1895.6	604	4890	12519 (12)	0	137000	311.091 (22)	0	1600
E. coli	UFC/100 ml	1291.4	156	3780	388.625 (8)	0	1640	23.333 (9)	0	205

*Calculado a partir del anexo 3

() Número de datos con los cuales se calculó el promedio

Nota: Algunos artículos consultados proporcionan más de un dato

3.3.1 pH. Este parámetro fue el más relevante de acuerdo a la revisión de literatura (Anexo C), estando presente en el mayor número de estudios en comparación con los demás. Las muestras tomadas revelan un pH que varía entre 6.22 y 6.56 con un promedio de 6.41, encontrándose en rangos por debajo de valores considerados neutrales.³⁵ Respecto a los valores presentados en la Tabla 7 para experiencias con tratamiento (6.97) y sin tratamiento (6.71), se puede observar que los resultados obtenidos en las muestras se encuentran por debajo de estos niveles esperados. Para el uso en descarga de baños la guía canadiense no reporta límites para el pH, mientras el BSI propone valores entre 6.0 y 8.0 que son

³⁵ VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M. and BALASUBRAMANIAN, R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs, Water Res., 46(4). 2012, p. 1337–1345.

cumplidos en todas las muestras. Ambas normas seleccionadas para fines de riego establecen un pH mínimo de 6.5, por lo cual 3 de las 5 muestras están por debajo de este criterio. Cabe resaltar que las muestras fueron tomadas en una de las cajas de inspección del sistema y el pH tiende a aumentar durante su permanencia en tanques de almacenamiento de concreto.^{36,37,38}

3.3.2 Turbiedad. Los valores de turbiedad varían entre 26 NTU y 50 NTU con un promedio de 35 NTU. Los anteriores resultados se encuentran por encima de lo encontrado en la literatura, donde se tienen mediciones en promedio de 4.93 NTU sin tratamiento y 4.55 NTU con tratamiento, inclusive se exceden los valores máximos de 24 NTU y 20 NTU respectivamente. Los máximos establecidos para este parámetro por las normativas seleccionadas para el uso en descarga de sanitarios (BSI: 10 NTU y Canadá: 5 NTU) son superados, mientras las que corresponden a uso agrícola no establecen límite alguno. Generalmente, los techos verdes cuentan con geotextiles que permiten retener partículas finas, siendo una de las razones por las cuales en este tipo de sistemas se tiene una buena calidad de agua en cuanto a turbiedad se refiere.^{39,40} Los elevados niveles de turbiedad, para un sistema con techos verdes como es el caso de estudio, se debe posiblemente a la captación adicional que se realiza en el sistema de la esorrentía en las zonas de parqueadero y sus alrededores, que empeoran la calidad del agua que ingresa por procesos de arrastre de todo tipo de

³⁶ DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K. and LEIDL, C., Op. Cit.

³⁷ SÁNCHEZ, A.S.; COHIM, E. and KALID, R.A.. Sustainability of Water Quality and Ecology A review on physicochemical and microbiological contamination of roof- harvested rainwater in urban areas," vol. 6, pp. 119–137, 2015.

³⁸ YIP, J.; LEONG, C. NAN, M.; EONG, P. and HERMAWAN, A- Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. J. Clean. Prod., vol. 143, p. 64–75, 2017.

³⁹ SADAT, S.; HASHEMI, G.; BIN, H. and AQEEL, M. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics : A review. vol. 52. 2015, p. 669–679

⁴⁰ MÉNDEZ, C. B., et al. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. Vol. 5, 2011.

contaminantes (residuos, vegetación y partículas) y erosión del suelo.^{41,42}

3.3.3 Color. El promedio de color fue de 189 UPC, con un mínimo de 148 UPC en la muestra 5 y un máximo de 225 en las muestras 2 y 4. En comparación con la recopilación bibliográfica los valores de color del caso de estudio se encontraron por encima de los máximos en las experiencias sin tratamiento (95 UPC) y con tratamiento (32.8 UPC). Para la descarga de inodoros las normativas no tienen limitación en cuanto el color, al igual que la OMS para su guía de reúso de agua para fines agrícolas. El Decreto Supremo N°015 del 2015 propone un máximo de 100 UPC de color verdadero, por lo cual no es directamente comparable con el color aparente medido. El color en el agua se debe a la presencia de materias orgánica y metales (ej. Hierro). Aunque altos valores de color no representan un riesgo directo para salud puede ser el primer indicador de problemas de contaminación en el agua, además su variación puede estar asociada tanto al material de captación como a la variabilidad temporal en los eventos de lluvia.^{43,44,45}

3.3.4 Conductividad Eléctrica. La conductividad eléctrica para el caso de estudio exhibe un valor mínimo de 97.80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (muestra 1) y un máximo de 243 (muestras 3), dando con un promedio de 167.52 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que indica que efectivamente, el sistema contribuye significativamente al aumento de este parámetro que se encuentra por los 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el agua lluvia en el

⁴¹YOUNG, J. YANG, J.; HAN, M. and CHOI, J. Science of the Total Environment Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. Vol. 408. 2010, p. 896–905.

⁴²WHO. Guidelines for Drinking-water Quality, Op. Cit.

⁴³Ibid.

⁴⁴HEALTH CANADA. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality- Summary Table. Ottawa, Ontario, Canadá, 2017.

⁴⁵TORRES, A.; MÉNDEZ FAJARDO, S.; LÓPEZ-KLEINE, L.; MARÍN, V.; GONZÁLEZ, J.A.; SUÁREZ, J.C.; PINZÓN, J.D. y RUIZ, A., Op. Cit.

ambiente.^{46,47} Los resultados de laboratorio para la conductividad fueron mayores que los promedios para experiencias sin tratamiento (67.40 $\mu\text{S/cm}$) y con tratamiento (67.96 $\mu\text{S/cm}$), pero los resultados de las muestras 1,2 y 5 se encuentran dentro del rango entre mínimos y máximos en la Tabla 7 que corresponden a la revisión bibliográfica. Para descarga de baños el agua es apta pues no se establecen límites para la conductividad, mientras que para el uso agrícola se dan máximos de 700 $\mu\text{S/cm}$ según la OMS y de 2500 $\mu\text{S/cm}$ para el Decreto Supremo N°015-2015, los cuales son cumplidos satisfactoriamente. La alta conductividad presentada era previsible pues, a pesar de que fueron evitadas las primeras descargas de lluvia (10 min), el agua recolectada en los techos verdes tiene esta tendencia debido a la disolución de minerales que se encuentran en el sustrato.⁴⁸

3.3.5 Hierro Total. El agua lluvia analizada en las 5 muestras mostró un promedio de contenido de hierro de 0.33 mg/l, un mínimo de 0.21 mg/l y un máximo de 0.41 mg/l para las muestras 5 y 4 respectivamente. Respecto a lo observado en la revisión bibliográfica los promedios para sistemas sin tratamiento (0.203 mg/l) y con tratamiento (0.115 mg/l) están por debajo de lo conseguido en las muestras de laboratorio, aunque se encuentran por debajo del máximo registrado de 1.69 mg/L sin tratamiento. Las normativas para uso en sanitarios no establecen límites para el contenido de hierro. Para riego se propone un máximo de 5 mg/l por parte de ambas normativas consultadas, cumpliéndose satisfactoriamente esta limitación en todas las muestras. El agua lluvia por lo general carece de la presencia de minerales como el hierro, estos son introducidos en el proceso de captación, por

⁴⁶ MÉNDEZ, C.B., et al., Op. Cit.

⁴⁷ YOUNG, J. YANG, J.; HAN, M. and CHOI, J., Op. cit.

⁴⁸ MÉNDEZ, C.B., Op. Cit.

procesos como la corrosión de elementos metálicos en el sistema.^{49,50} Los techos verdes no presentan una diferencia significativa entre el contenido de hierro antes y después de la primera descarga, con valores por debajo del estándar de la USEPA de 0.2 mg/l, a diferencia de otros materiales de captación como aluminio galvanizado o concreto.⁵¹

3.3.6 Nitratos y Nitritos. En promedio se obtuvo una concentración de nitratos de 1.63 mg $\text{NO}_3^- \text{N/l}$, con un máximo de 4.50 mg $\text{NO}_3^- \text{N/l}$ en la muestra número 3 y un mínimo de 0.5 mg $\text{NO}_3^- \text{N/l}$ en la muestra 5. Se tiene un valor promedio de 3 mg $\text{NO}_3^- \text{N/l}$ para experiencias sin tratamiento y de 1.63 mg $\text{NO}_3^- \text{N/l}$, coincidiendo este último con el presentado en el caso de estudio. Las normativas que contemplan el uso de agua para descarga de inodoros no establecen algún tipo de limitante para este parámetro, posiblemente debido a que el nitrato solo es problemático si se ingiere.⁵² En cuanto al uso para riego agrícola, la OMS no propone valores para el nitrato, mientras que la normativa peruana limita su concentración a 100 mg $\text{NO}_3^- \text{N/l}$ + mg $\text{NO}_2^- \text{N/l}$, concentración que es cumplida en todos los casos.

El contenido de nitritos en las muestras recolectadas presentó una concentración promedio de 0.08 mg $\text{NO}_2^- \text{N/l}$, partiendo desde 0.05 mg $\text{NO}_2^- \text{N/l}$ hasta 0.11 mg $\text{NO}_2^- \text{N/l}$. Los resultados se encuentran por encima de los promedios calculados para estudios sin (0.084 mg $\text{NO}_2^- \text{N/l}$) y con tratamiento (0.041 mg $\text{NO}_2^- \text{N/l}$). Tampoco se dispone de un valor máximo planteado por las normativas consultadas para el uso en sanitarios. En cuanto al uso del agua para riego de

⁴⁹ WHO. Guidelines for drinking-water quality, Op. cit.

⁵⁰ Ibid.

⁵¹ MÉNDEZ, C.B., Op. Cit.

⁵² WHO. Las Preguntas Comunes y sus Respuestas Sobre el Nitrato y el Agua Potable. WHO Fact Sheets, 2012.

cultivos la OMS no propone límite, pero la normativa peruana lo establece como 10 mg $\text{NO}_2^-/\text{N/l}$, valor que es satisfactoriamente cumplido por todas las muestras.

El nitrato y el nitrito hacen parte del ciclo del nitrógeno, por lo tanto, están ligados en su origen en el agua, aunque el último se encuentre en menores concentraciones.⁵³ La actividad agrícola (fertilizantes) y la oxidación de nitrógeno presente en excrementos animales son posibles causas de contaminación de nitrato/nitrito; además, una de las principales fuentes de exposición del ser humano al nitrato es a través de vegetales.⁵⁴ La vegetación y el suelo en los techos verdes pueden consumir nitratos, esto sumado al hecho de que en las zonas verdes del caso de estudio no se usan fertilizantes ni ningún tipo de componente químico para el crecimiento de las plantas, hace que no sea de esperar valores muy altos de estos parámetros, a pesar de que es posible que exista arrastre de excretas de animales (aves/roedores) y otros contaminantes de origen antropogénico depositados en algunas zonas de captación.^{55,56,57} Mayores concentraciones de nitratos han sido encontradas en tanques de concreto respecto a otros materiales, razón por la cual es posible que existan cambios de este parámetro una vez el agua se deposite en el tanque.⁵⁸

3.3.7 Sulfatos. La concentración de sulfatos en la muestra varió de 1.78 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ hasta 34.46 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$, resultando entre los 5 ensayos un promedio de 12.69

⁵³ WHO. Guidelines for drinking-water quality, Op. cit.

⁵⁴ Ibid.

⁵⁵ SÁNCHEZ, A.S.; COHIM, E. and KALID, R.A., Op. Cit.

⁵⁶ MÉNDEZ, C.B., et. al, Op. Cit.

⁵⁷ CZEMIEL, J.; BENGTTSSON, L. and JINNO, K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [en línea]. Ecological Engineering, vol. 35, No. 3. 2008, p. 369– 380. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857408002024>>

⁵⁸ ACHADU, O.; AKO, F. and DALLA, C. Quality Assessment of Stored Harvested Rainwater in Wukari , North-Eastern Nigeria?: Impact of Storage Media. IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology, vol. 7. 2013, p. 2319-2399.

mg $\text{SO}_4^{-2}/\text{l}$. El sulfato presente en el agua lluvia del sistema bajo estudio se encuentra en promedio por encima de lo recopilado para estudios sin tratamiento (4.983 mg $\text{SO}_4^{-2}/\text{l}$) y con tratamiento (6.121 mg $\text{SO}_4^{-2}/\text{l}$). No se establecen límites para el contenido de sulfatos en las aguas para uso en sanitarios. La OMS no restringe la concentración de sulfato para el riego agrícola, mientras que la normativa peruana establece un valor de 1000 mg $\text{SO}_4^{-2}/\text{l}$, el cual es ampliamente respetado por los resultados en todas las muestras. Los diferentes mecanismos de deposición atmosférica y escorrentía en zonas urbanizada con tráfico de carretera y demás actividades de origen antropogénico, son en gran medida responsables de la presencia de sulfatos en aguas lluvia recolectadas.^{59,60,61,62} Para aguas en tanques de concreto se han encontrado mayores concentraciones de sulfato, por lo cual es posible que este parámetro varíe al ser almacenada.⁶³

3.3.8 Cloruros. La medición de cloruros en las muestras de agua lluvia recolectada variaron desde 4.97 mg Cl^{-}/l hasta 13.25 mg Cl^{-}/l , con un promedio de 9.36 mg Cl^{-}/l . Este promedio ha estado por debajo del obtenido por los estudios con experiencias sin tratamiento (12.017 mg Cl^{-}/l) y por encima del dado

⁵⁹ OZEKI, Toru; KOIDE, Kunichika & KIMOTO, Takashi. Evaluation of Sources of Acidity in Rainwater Using a Constrained Oblique Rotational Factor Analysis [en línea]. Environmental science & technology. 29. 1995, p. 1638-45. Disponible en Internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/221777024_Evaluation_of_Sources_of_Acidity_in_Rainwater_Using_a_Constrained_Oblique_Rotational_Factor_Analysis>

⁶⁰ AIKAWA, M.; KAJINO, M.; HIRAKI, T. and MUKAI, H. The contribution of site to washout and rainout?: Precipitation chemistry based on sample analysis from 0.5 mm precipitation increments and numerical simulation [en línea]. Atmospheric Environment, Volume 95. 2014, p.165-174. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014004610>>

⁶¹ GIKAS, G.D. and TSIHRINTZIS, V.A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater [en línea]. Journal of Hydrology, vols. 466–467. 2012, p. 115–126. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412006993>>

⁶² EVANS, C.A.; COOMBES, P.J. and DUNSTAN, R.H. Wind, rain and bacteria?: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater [en línea]. Water Research, vol. 40, No. 1. 2006, p. 37–44. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313540500624X>>

⁶³ ACHADU, O.; AKO, F. and DALLA, C., Op. cit.

por estudios que examinan sistemas con tratamiento ($4.978 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$). La BSI y la norma canadiense que contemplan el uso de agua en descarga de sanitarios no proponen concentraciones de cloruros. Los estándares propuestos para la concentración de cloruros por la OMS ($150 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$) y la norma peruana ($\text{mg Cl}^-/\text{l}$) para el uso agrícola son ampliamente cumplidas. Generalmente el cloruro deriva de sales, teniendo como posibles fuentes el agua drenada en riegos y las heces animales.^{64,65}

3.3.9 Dureza Total. La dureza en las aguas lluvia recolectadas en el sistema bajo estudio presentó un promedio de $88 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$, con un mínimo de $54 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$ y un máximo de $140 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$. En comparación en lo encontrado en la revisión bibliográfica, la dureza promedio en el sistema de aprovechamiento se encuentra por encima de los valores sin tratamiento ($44.963 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$) y con tratamiento ($20.935 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$), posiblemente debido a la escorrentía del suelo.⁶⁶ No se establece ningún límite para la dureza en las normativas consultadas para regular ambos usos no potables tenidos en cuenta. Generalmente, las aguas lluvias presentan niveles bajos de dureza en comparación con aguas superficiales.^{67,68} Según los resultados obtenidos, no deberían presentarse problemas de corrosión e incrustaciones debido a la dureza.⁶⁹

⁶⁴ HEALTH CANADA, Op. cit.

⁶⁵ PANNO, S.V.; HACKLEY, Keith C.; HWANG, H.H.; GREENBERG, S.; KRAPAC, I.G.; LANDSBERGER, S.; and O'KELLY, D.J. Source identification of sodium and chloride contamination in natural waters: Preliminary results [en línea]. Illinois Groundwater Consortium. 2002, p. 1–25. Disponible en Internet: <URL: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/55186>>

⁶⁶ WHO. Hardness in Drinking-water Background document for development of Drinking-water Quality [en línea]. 2011. Disponible en Internet: <URL: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/hardness.pdf>

⁶⁷ SÁNCHEZ, A.S.; COHIM, E. and KALID, R.A., Op. Cit.

⁶⁸ WHO. Hardness in Drinking-water Background document for development of Drinking-water Quality, Op. cit.

⁶⁹ HEALTH CANADA, Op. cit.

3.3.10 Alcalinidad Total. La alcalinidad presentó la menor variación entre las 5 muestras analizadas con un mínimo de 53.27 mg CaCO_3/l y un máximo de 61.95 mg CaCO_3/l , resultando en un promedio de 57.88 mg CaCO_3/l . Este promedio registrado es superior a los 32.43 mg CaCO_3/l anotados en la Tabla 7 como promedio para aguas lluvia sin tratamiento y a los 23.027 mg CaCO_3/l para aquellas con tratamiento. Al igual que para la dureza, este parámetro no es limitado por las normas para agua de uso no potable para descarga de inodoros y riego agrícola. Niveles bajos de alcalinidad pueden fomentar la corrosión en los elementos del sistema de distribución.⁷⁰

3.3.11 Sólidos Totales. Los sólidos totales presentes en el agua variaron desde 108 mg/l hasta 202 mg/L con un promedio de 190.8 mg/l. Este parámetro no ha sido encontrado en ninguna normativa o estudio revisado, en su lugar, se reportan valores de sólidos suspendidos totales o sólidos disueltos totales.

3.3.12 Plomo. El promedio en la concentración de plomo para las 5 muestras analizadas se situó en 0.41 mg Pb/l, con un mínimo de 0.35 mg Pb/l en la muestra 1 y un máximo de 0.45 mg Pb/l en la muestra 5. Los anteriores valores se encuentran por encima de cualquier resultado encontrado en los estudios recopilados, tanto para aguas lluvia sin tratamiento (máximo: 0.266 mg Pb/l) y con tratamiento (máximo: 0.019 mg Pb/l). Las normativas para uso del agua en descarga de sanitarios no establecen un máximo recomendado para concentraciones de plomo. En cuanto al uso agrícola, se cumple en su totalidad el estándar de máximo 5.0 mg Pb/l propuesto por la OMS, pero se excede el límite de 0.05 mg Pb/l que da la normativa peruana en las 5 muestras.

⁷⁰ WHO. Guidelines for drinking-water quality, Op. cit.

No se hace evidente la fuente principal de estas cantidades del material en el proceso de caracterización del sistema. Esta alta concentración del material puede tener diferentes orígenes, como por ejemplo la pintura usada para señalizar las vías de la universidad, de donde la escorrentía es recogida por problemas de inundación en eventos fuertes de precipitación. Aunque no se tiene certeza en cuanto a si la pintura tiene plomo añadido, pinturas que proclaman no tenerlo también pueden contener trazas de este material.⁷¹ La pintura con plomo constituye una de las principales fuentes de contaminación, al igual que la contaminación en tuberías/accesorios en sistemas de distribución.⁷² Las condiciones locales pueden representar otro factor contribuyente a de plomo en el agua, la presencia de industrias (ej. Cementeras) y tráfico vehicular mediante mecanismos de deposición atmosférica.^{73,74} Es posible que el descarte de los 10 primeros minutos de lluvia no haya sido suficiente para reducir de forma significativa la alta concentración de metales como el plomo que pueden estar en estos primeros milímetros de lluvia.^{75,76,77}

3.3.13 Coliformes Totales y E. Coli. Fueron detectados Coliformes totales en las 5 muestras analizadas, con un mínimo de 604 UFC/100 ml en la muestra 1, un máximo de 4890 UFC/100 ml en la muestra 2 y un promedio general de 1896 UFC/100 ml. Estos resultados se encuentran por debajo del promedio de 12519

⁷¹ RED DE DESARROLLO SOSTENIBLE (RDS). Plomo en pinturas. 2017.

⁷² HUSTON, R.; CHAN, Y.C.; CHAPMAN, H.; GARDNER, T. and SHAW, G. Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia [en línea]. Vol. 6, 2011.

⁷³ TORRES, Andrés; MÉNDEZ, Sandra; LÓPEZ, Liliana; MARÍN, Valentina; GONZÁLEZ, Jorge; SUÁREZ, Juan Camilo; PINZÓN, Julián David y RUIZ, Alejandra, Op. cit.

⁷⁴ HUSTON, R.; CHAN, Y.C.; CHAPMAN, C.; GARDNER, T. and SHAW, G., Op. cit.

⁷⁵ TORRES, Andrés; MÉNDEZ, Sandra; LÓPEZ, Liliana; MARÍN, Valentina; GONZÁLEZ, Jorge; SUÁREZ, Juan Camilo; PINZÓN, Julián David y RUIZ, Alejandra, Op. cit.

⁷⁶ MÉNDEZ, C.B., et. al, Op. cit.

⁷⁷ KUS, B.; KANDASAMY, J.; VIGNESWARAN, S. and SHON, H.K. Water quality characterisation of rainwater in tanks at different times and locations. No. 2006, 2010.

UFC/100 ml calculado para aguas lluvia captadas sin tratamiento, pero por encima de 311 UFC/100 ml promediados para aguas lluvia luego de recibir algún tipo de tratamiento. El estándar BS 8515 propone un límite de 1000 UFC/100 ml para aguas para uso en inodoros, el cual no se cumple en promedio, pero si en 2 de las 5 muestras. El máximo de 200 UFC/100 ml recomendado por la guía canadiense para el uso de agua en sanitarios no es respetado por ninguna de las muestras. La OMS no presenta guía para el contenido de coliformes en el agua para uso agrícola, mientras que el Decreto Supremo 015-2015 del Perú propone coliformes totales por debajo de 1000 UFC/100 ml, límite que no es cumplido en promedio, pero si por 2 muestras individuales.

En cuanto a la presencia de E. Coli, se encontraron niveles mínimos de 156 UFC/100 ml en la muestra 1 hasta máximos de 3780 UFC/100 ml en la muestra 2 (coincidiendo con lo visto para coliformes), con un promedio general de 1291 UFC/100 ml. De las muestras analizadas, 4 no cumplen el estándar de la BSI de 250 UFC/100 ml, ni el máximo de 200 UFC/100 ml propuesto por la guía canadiense para el uso en baños. En cuanto al uso para riego agrícola la normativa peruana establece un máximo de 100 UFC/100 ml, que no cumple ninguna de las muestras tomadas en el sistema.

Los parámetros microbiológicos se encuentran afectados generalmente por la limpieza de las áreas de captación en el sistema,⁷⁸ por lo cual era de esperar la presencia de coliformes totales y E. Coli en el agua captada, teniendo en cuenta el estado de las zonas de captación de los alrededores y algunos elementos del sistema como consecuencia de ello (Algunas cajas de inspección y tuberías). Teniendo en cuenta especialmente las anteriores condiciones mencionadas, junto

⁷⁸ SAZAKLI, E.; ALEXOPOULOS, A. and LEOTSINIDIS, M. Rainwater harvesting quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. Vol. 41. 2007, p. 2039–2047.

a posibles contaminaciones en el techo verde, es claro que, durante el proceso de captación, el agua lluvia entra en contacto con heces animales, derivando en la detección de Coliformes y en particularmente E. Coli.^{79,80,81}

3.4 PROPUESTA DE TRATAMIENTO

La Turbiedad, el pH, el plomo, los coliformes totales y E. Coli., fueron los parámetros críticos que no cumplieron alguno de los 4 estándares normativos que se propusieron para los 2 tipos de usos que se le darán al agua lluvia aprovechada por el sistema. Tras una revisión de posibles tecnologías de tratamiento en relación al control de los parámetros críticos, se llegó a la proposición de las siguientes tecnologías:

- Pretratamiento: Filtración (cartuchos).
- Tratamiento primario: Membrana (UF) - Osmosis inversa - Filtro de carbón activado.
- Desinfección: Cloración - Ozonización - Radiación UV.

Se considera la filtración por cartuchos como una buena opción para el pretratamiento del agua en el sistema, es usada ampliamente y recomendada en varias ocasiones por su economía y versatilidad (diferentes configuraciones y tamaños de poro), a pesar de tener que ser cambiados regularmente.^{82,83,84,85} Otra

⁷⁹ TORRES, C.B., et. al.

⁸⁰ ADAPA, S.; BHULLAR, N. and DE SOUZA, S.V., Op. cit.

⁸¹ WHO. Guidelines for Drinking-water Quality, Op. cit.

⁸² TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD, Op. cit.

⁸³ RAINWATER HARVESTING TASK GROUP, Op. cit.

⁸⁴ TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY, Op. cit.

⁸⁵ LEE, M.; KIM, M.; KIM, Y. and HAN, M. Consideration of rainwater quality parameters for drinking

técnica de filtración recomendada fue la filtración lenta en arena, pero no es adecuada para el caso debido a que trata turbiedades menores a 10 NTU.⁸⁶

Para el tratamiento primario que busca la reducción de los parámetros críticos con énfasis en los metales pasados, las membranas UF, la osmosis inversa y los filtros de carbón activado resultan como opciones adecuadas.^{87,88,89,90} Como tratamiento de desinfección la cloración, la ozonización y la radiación UV son los más usados. Estas tres tecnologías resultan muy eficaces al momento de neutralizar los tipos de microorganismo que fueron analizados en este estudio (Coliformes totales y E. Coli.).⁹¹

En todo caso, se ha considerado la instalación de un sistema de descarga de la primera lluvia, teniendo en cuenta que se intentó evitar el muestreo de estos primeros minutos de precipitación, además que estos dispositivos son de funcionamiento sencillo y pueden llegar a resultar muy efectivos mejorando la calidad del agua recolectada en términos de turbiedad, metales y microorganismos.^{92,93,94} Adicionalmente, se propone la instalación de un elemento

purposes?: A case study in rural Vietnam. J. Environ. Manage., vol. 200. 2017, p. 400–406.

⁸⁶ WHO. Guidelines for drinking-water quality, Op. cit.

⁸⁷ BRADY, F.J. and JAFEREY, I.M. Ultrafiltration membrane technology can be an efficient and economical choice for removing heavy metals from industrial wastewater. Environmental Protection, 2003.

⁸⁸ BARAKAT, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. 2011, p. 361-377.

⁸⁹ ABDULRAZAK, S. and SANI, K.H. Evaluation of removal efficiency of heavy metals by low-cost activated carbon prepared from African palm fruit. Appl. Water Sci., vol. 7, No. 6. 2017, p. 3151–3155.

⁹⁰ EARTH TECH CANADA INC. Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual. 2005

⁹¹ STUMP, B.; MCBROOM, M. and RAY, D. Demographics, practices and water quality from domestic potable rainwater harvesting systems. J. Water Supply. Reseach Technol. – AQUA. 2012, p. 261–272.

⁹² MÉNDEZ, C.B., et. al, Op. cit.

⁹³ KUS, B. KANDASAMY, J.; VIGNESWARAN, S. and SHON, H.K., Op. cit.

⁹⁴ SISTEMA DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA REGIÓN DE FLANDES. Ultrafiltración [en línea]. 2010. Disponible en Internet: <URL:

de entrada del agua lluvia al tanque que permita su ingreso de forma suave, pues es posible que en el estado actual la caída de agua en el tanque genere alguna resuspensión de sólidos. Cabe recordar que el sistema de aprovechamiento de aguas lluvia, ya cuenta con algunos cribados con mallas planas y en cúpula en los accesos tanto en las terrazas verdes como en las zonas y alrededores (Algunos en mal estado y con necesidad de mantenimiento). En cuanto al pH, es de esperar que su almacenamiento en el tanque de concreto estabilice los niveles dentro de los rangos requeridos, según lo observado en numerosas experiencias.^{95,96,97}

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la calificación cualitativa de las propuestas tecnológicas de tratamiento, siendo seleccionadas las que obtenga mayor puntuación.

Tabla 8. Calificación cualitativa de tratamientos

Tratamiento	O&M	Costos	Σ
Membrana (UF)	2	2	4
Filtro Carbón Activado	2	3	5
Osmosis Inversa	1	1	2
Ozonización	1	1	2
UV	2	2	4
Cloración	2	3	5

<https://emis.vito.be/en/techniekfiche/ultrafiltration>>

⁹⁵ SUSTAINABILITY OF SEMI-ARID HYDROLOGY AND RIPARIAN AREAS (SAHRA). Activated Carbon Filter [en línea]. 2005. Disponible en Internet: <URL: <http://web.sahra.arizona.edu/programs/akyw/carbon.html>>

⁹⁶ SÁNCHEZ, A.S.; COHIM, E. and KALID, R.A., Op. Cit.

⁹⁷ YIP, J.; LEONG, C.; NAN, M.; EONG, P. and HERMAWAN, A., Op. cit.

Las membranas de ultrafiltración tienen un costo medio entre los otros tratamientos primarios, pero pueden representar un alto costo de operación debido a la saturación de suciedad que ocurre en ellas, por lo cual requiere mantenimiento regular.^{98,99} El tratamiento mediante filtros de carbón activado es una tecnología con costos más bajos que las otras opciones contempladas. Estos filtros conllevan un bajo gasto en mantenimiento/operación, pero deben ser reemplazados (generalmente sólo el cartucho) periódicamente para garantizar el funcionamiento.^{100,101} Los sistemas de ósmosis inversa son los más sofisticados, acarreado por ello un elevado costo. Requieren de un cambio del filtro cada vez que estos se terminan por obstruir y se recomiendan mantenimientos preventivos cada 4 meses por parte de técnicos.^{102,103,104}

La ozonización es un poderoso desinfectante que neutraliza efectivamente una mayor variedad de microorganismos, lo que viene acompañado de altos costos en comparación a las otras dos opciones. Esta tecnología requiere un monitoreo constante por parte de personal altamente cualificado.^{105,106} En cuanto a costos para desinfección UV se encuentran en medio de las otras dos tecnologías tomadas en cuenta para esta etapa. Sistemas de desinfección UV requieren relativamente poco mantenimiento, a excepción de una limpieza regular de la cubierta protector y un cambio de bombillas cada 14 meses

⁹⁸ BARAKAT, M.A., Op. cit.

⁹⁹ SUSTAINABILITY OF SEMI-ARID HYDROLOGY AND RIPARIAN AREAS (SAHRA), Op. cit.

¹⁰⁰ EARTH TECH CANADA INC., Op. cit.

¹⁰¹ NSW GOVERNMENT-HEALTH. Rainwater Treatment Guide. Australia, 2005.

¹⁰² TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD, Op. cit.

¹⁰³ AQUAFILL. Reverse Osmosis System Maintenance [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.aquafil.com.au/reverse-osmosis-system-maintenance/>>

¹⁰⁴ RAMÍREZ RODRÍGUEZ, W. Consideraciones básicas y viabilidad de procesos de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como alternativa para el tratamiento de agua en Colombia. 2006.

¹⁰⁵ TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD, Op. cit.

¹⁰⁶ STUMP, B.; MCBROOM, B. and RAY, D.

aproximadamente.^{107,108,109} Aunque existen altos costos en dosificadores automáticos de cloro, si se considera un proceso manual los costos son significativamente bajos y no se requiere personal altamente capacitado. En estas condiciones se requeriría de una dosis mensual del desinfectante, lo que sería un proceso regular y frecuente pero sencillo de realizar.¹¹⁰

Finalmente, el tren de tratamiento propuesto estaría compuesto por una etapa de pretratamiento realizada por *filtración con cartuchos*, una etapa de tratamiento primario con *filtros de carbón activado* y una etapa de desinfección con *cloración*.

3.5 RECOMENDACIONES PARA EL MEJORAMIENTO DEL SISTEMA

Tras haber realizado el proceso de caracterización se manifestaron falencias en la gestión de la información respecto al sistema de aprovechamiento, por lo cual, se hace necesario la implementación de estrategias que permitan estar al corriente sobre su estado, funcionamiento, novedades y mantenimiento para evitar inconvenientes futuros si se desea poner en marcha el abastecimiento con aguas lluvia e instalar un sistema de tratamiento. Lo anterior puede aportar solución a problemas actuales como el mal estado en el que se encuentran algunos elementos del sistema (ej. canaletas, tuberías y rejillas), debido al desconocimiento o la baja frecuencia con la que se realizan las tareas de mantenimiento en estos componentes.

Es importante también dar solución al inconveniente de inundaciones que se presentan en la entrada del edificio, ya sea ampliando el tamaño del tragante u

¹⁰⁷ TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD, Op. cit.

¹⁰⁸ STUMP, B.; MCBROOM, B. and RAY, D.

¹⁰⁹ AQUAFILL, Op. cit.

¹¹⁰ TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD, Op. cit.

optimizando el ingreso de agua a la tubería de desagüe, para así evitar la entrada de aguas de escorrentía no deseada al sistema que pueden afectar negativamente la calidad (Foto 2). Teniendo en cuenta que la calidad del agua no piensa alcanzar estándares potables, es de suma relevancia para la salud de la comunidad universitaria que hace uso de la edificación y sus alrededores, ubicar una clara señalización que indique la prohibición del consumo en las llaves terminales que hacen parte del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, una vez entre este en funcionamiento. Para este momento en que el sistema entre en operación con aguas lluvia, debe modificarse el desagüe presente en la caja de inspección adyacente al tanque, puesto que esta no cumple su cometido de evitar excesos, sino que se deshace directamente de la totalidad del agua de la mayoría de las precipitaciones. Adicionalmente, para garantizar un adecuado funcionamiento se debe modificar el sistema de ingreso de agua potable de tal que este sólo sea activado en casos en que el tanque con aguas lluvia se encuentre en niveles bajos, es decir, para no desabastecer los puntos hidráulicos en ningún momento.

Partiendo de los resultados obtenidos y las recomendaciones dadas en el presente estudio, se considera pertinente continuar la realización de investigaciones en este caso, con el fin de crear unas bases sólidas que permitan la correcta implementación y mejoramiento del sistema de aprovechamiento actual. Se considera pertinente estudiar con más detalle la presencia de plomo en las aguas lluvia recolectadas y de esta manera, determinar con mayor certeza las posibles fuentes de contaminación de este metal y como evitarlas. Además, es posible ahondar en un diseño a detalle del sistema de tratamiento que pueda proporcionar especificaciones para su adecuada implementación y funcionamiento de acuerdo al caso particular, esto junto a un análisis de viabilidad económica que permita conocer los costos y ahorros asociados al funcionamiento y la realización de las pertinentes modificaciones. Por último, se cree conveniente evaluar la

posibilidad de efectuar una prueba piloto que compruebe experimentalmente la efectividad del tratamiento propuesto y la idoneidad de la calidad del agua resultante.

4. CONCLUSIONES

- Las zonas de captación del sistema de aprovechamiento están compuestas por 2 terrazas verdes, de 429 m² y 137 m² respectivamente, y las áreas perimetrales del edificio. El agua es conducida por una serie de tuberías de PVC, canaletas de concreto y cajas de inspección de concreto. Se cuenta con un tanque de almacenamiento subterráneo de concreto de 27 m² con capacidad de 22000 L. Un sistema automático de 2 bombas alternadas distribuye el agua hasta los puntos hidráulicos donde es usada para descarga de inodoros y riego agrícola. Como único sistema de tratamiento se tienen elementos de cribado en los puntos de captación. Los principales problemas fueron: el mal estado de elementos del sistema (averiados o sucios), las inundaciones causadas en una poceta de alcantarillado pluvial que genera el ingreso de esorrentía de vías vehiculares al sistema y el desagüe en una caja que impide el paso del agua del sistema al tanque.
- De los 15 parámetros de calidad estudiados 5 (pH, turbiedad, plomo, coliformes totales y E. Coli.) no cumplieron alguno o ninguno de los estándares en las 4 normativas. El pH se encontró ligeramente por debajo del nivel requerido para uso agrícola. Los residuos en elementos del sistema y el ingreso ocasional de agua no deseada contribuyen a que la turbiedad supere los niveles máximos de las normativas. Estas ocurrencias también favorecen la presencia de coliformes totales y E. Coli. Por encima de las cantidades límite para uso agrícola y en descarga de sanitarios. Se encontraron altos niveles de plomo en comparación con otras experiencias y la normativa peruana para uso en sanitarios, causado posiblemente por pinturas, contaminación atmosférica o tuberías y accesorios.

- Como primeras medidas se planteó el uso de un desviador de primera descarga y un dispositivo que ingrese el agua calmadamente al tanque. Se definió como parte del tren de tratamiento el uso de filtración por cartuchos, junto con filtros de carbón activado para finalmente realizar una desinfección con cloro. Con estos tratamientos se espera controlar la turbiedad y la presencia de plomo y microorganismos en el agua. Se espera que el pH suba a niveles aceptables durante el almacenamiento del agua en el tanque.
- Aunque el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del edificio E3T no se encuentre actualmente en funcionamiento, la infraestructura existente posee el potencial para permitir el ahorro de agua potable y contribuir con el objetivo de sostenibilidad que se busca en conjunto con las demás estrategias implementadas en la renovación de la edificación. Esto es posible mediante el uso de tecnologías de tratamiento en concordancia a la calidad del agua lluvia captada y la ampliación del tema de estudio con el fin de tener una alternativa óptima para suplir lo usos requeridos.

BIBLIOGRAFÍA

ABDULRAZAK, S. and SANI, K.H. Evaluation of removal efficiency of heavy metals by low-cost activated carbon prepared from African palm fruit. Appl. Water Sci., vol. 7, No. 6. 2017, p. 3151–3155.

ACHADU, O.; AKO, F. and DALLA, C. Quality Assessment of Stored Harvested Rainwater in Wukari , North-Eastern Nigeria?: Impact of Storage Media. IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology, vol. 7. 2013, p. 2319-2399.

ADAPA, S.; BHULLAR, N. and DE SOUZA, S. V. A systematic review and agenda for using alternative water sources for consumer markets in Australia [en línea]. En: J. Clean. Prod., vol. 124, 2016, p. 14–20. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261600264X>>

AIKAWA, M.; KAJINO, M.; HIRAKI, T. and MUKAI, H. The contribution of site to washout and rainout?: Precipitation chemistry based on sample analysis from 0.5 mm precipitation increments and numerical simulation [en línea]. Atmospheric Environment, Volume 95. 2014, p.165-174. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014004610>>

AQUAFILL. Reverse Osmosis System Maintenance [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.aquafil.com.au/reverse-osmosis-system-maintenance/>>

BARAKAT, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater.

2011, p. 361-377.

BRADY, F.J. and JAFEREY, I.M. Ultrafiltration membrane technology can be an efficient and economical choice for removing heavy metals from industrial wastewater. Environmental Protection, 2003.

CAMPISANO, A.; BUTLER, D.; WARD, S.; BURNS, M.J.; FRIEDLER, E.; DEBUSK, K.; FISHER-JEFFES, L.N.; GHISI, E.; RAHMAN, A.; FURUMAI, H. and HAN, M. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives [en línea]. En: Water Res, 115. 2017. Disponible en Internet: <URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28279940>>

CORTÉS, Oscar. Revisión sobre los usos y variables para determinar la calidad del agua pluvial en superficies de cubierta [en línea]. En: Revista De Investigación, 8(2), 2015, 146-159. Disponible en Internet: <URL: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/34>>

COYAGO, E. and BONILLA, S. Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano [en línea]. En: La Granja Revista de Ciencias de la Vida, 23 (1). 2016, p. 35–46. Disponible en Internet: <URL: <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/23.2016.04>>

CZEMIEL, J.; BENGTSSON, L. and JINNO, K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [en línea]. Ecological Engineering, vol. 35, No. 3. 2008, p. 369-380. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857408002024>>



DEPARTAMENTO DE ASUNTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LA ONU. UN, World Population Prospects [en línea]. Nueva York, 2017. Disponible en Internet: <URL: <https://population.un.org/wpp/>>

DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K. and LEIDL, C. Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada [en línea]. En: Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 2009, p. 117-134.

EARTH TECH CANADA INC. Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual. 2005

ESTUPIÑÁN PERDOMO, J.L. and ZAPATA GARCÍA, J.O. Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá [en línea]. 2010, p. 1–172. Disponible en Internet: <URL: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1265>>

EVANS, C.A.; COOMBES, P.J. and DUNSTAN, R.H. Wind , rain and bacteria?: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater [en línea]. Water Research, vol. 40, No. 1. 2006, p. 37–44. Disponible en Internet: <URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313540500624X>>

GIKAS, G.D. and TSIHRINTZIS, V.A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater [en línea]. Journal of Hydrology, vols. 466–467. 2012, p. 115–126. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412006993>>

HEALTH CANADA. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality- Summary

Table [en línea]. Canadá, 2017. Disponible en Internet: <URL: https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/sum_guide-res_recom-eng.pdf>

HELMREICH, B.A.; HORN, H. and COULOMBWALL, A. Opportunities in rainwater harvesting [en línea]. Desalination 248. 2009, p. 118–124. Disponible en Internet: <URL: https://www.academia.edu/14479351/Opportunities_in_rainwater_harvesting>

HUSTON, R.; CHAN, Y.C.; CHAPMAN, H.; GARDNER, T. and SHAW, G. Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia [en línea]. Vol. 6, 2011.

IDEAM. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>>

IDEAM. Estudio Nacional del Agua. 2014

KAHINDA, J.M.; TAIGBENU, A. E. and BOROTO, J. R. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa [en línea]. En: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 32, Issues 15–18, 2007, Pages 1050-1057. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706507000915>>

KUS, B.; KANDASAMY, J.; VIGNESWARAN, S. and SHON, H.K. Water quality characterisation of rainwater in tanks at different times and locations. No. 2006, 2010.

LEE, M.; KIM, M.; KIM, Y. and HAN, M. Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes?: A case study in rural Vietnam. J. Environ. Manage., vol. 200. 2017, p. 400–406.

MEKONNEN, Mesfin and HOEKSTRA, Arjen. Four billion people facing severe water scarcity [en línea]. En: Science Advances, 2(2). 2016. Disponible en Internet: <URL: <http://advances.sciencemag.org/content/2/2/e1500323>>

MELVILLE-SHREEVE, P.; WARD, S. and BUTLER, D. Rainwater Harvesting Typologies for UK Houses : A Multi Criteria Analysis of System Configurations [en línea]. En: Water, 8(129). 2016. Disponible en Internet: <URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/8/4/129/pdf>>

MÉNDEZ, C. B., et al. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. Vol. 5, 2011.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano (Resolución 2115) [en línea]. Bogotá, 2007. Disponible en Internet: <URL: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegralDelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf>

NSW GOVERNMENT-HEALTH. Rainwater Treatment Guide. Australia, 2005.

NTALE, Henry K. Improving the quality of harvested rainwater by using first flush interceptors/retainers [en línea]. XI IRCSA Conference - Proceedings 2003. Disponible en Internet: <URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.738.3170&rep=rep1&type=pdf>>

OZEKI, Toru; KOIDE, Kunichika & KIMOTO, Takashi. Evaluation of Sources of Acidity in Rainwater Using a Constrained Oblique Rotational Factor Analysis [en línea]. Environmental science & technology. 29. 1995, p. 1638-45. Disponible en Internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/221777024_Evaluation_of_Sources_of_Acidity_in_Rainwater_Using_a_Constrained_Oblique_Rotational_Factor_Analysis>

PACEY, Arnold and CULLIS, Adrian. Rainwater Harvesting: The Collection of Rainfall and Runoff In Rural Areas. Intermediate Technology Publications, 1986.

PANNO, S.V.; HACKLEY, Keith C.; HWANG, H.H.; GREENBERG, S.; KRAPAC, I.G.; LANDSBERGER, S.; and O'KELLY, D.J. Source identification of sodium and chloride contamination in natural waters: Preliminary results [en línea]. Illinois Groundwater Consortium. 2002, p. 1–25. Disponible en Internet: <URL: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/55186>>

RAINWATER HARVESTING TASK GROUP. Ontario Guidelines for Residential Rainwater Harvesting Systems. 2010.

RAMÍREZ RODRÍGUEZ, W. Consideraciones básicas y viabilidad de procesos de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como alternativa para el

tratamiento de agua en Colombia. 2006.

RED DE DESARROLLO SOSTENIBLE (RDS). Plomo en pinturas. 2017.

TSAKOVSKI, S.; TOBISZEWSKI, M.; SIMEONOV, V.; POLKOWSKA, Z. and J. NAMIESNIK. Chemical composition of water from roofs in Gdansk, Poland. Environmental Pollution

SADAT, S.; HASHEMI, G.; BIN, H. and AQEEL, M. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics : A review. vol. 52. 2015, p. 669–679

SÁNCHEZ, A.S.; COHIM, E. and KALID, R.A.. Sustainability of Water Quality and Ecology A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas,” vol. 6, pp. 119–137, 2015.

SAZAKLI, E.; ALEXOPOULOS, A. and LEOTSINIDIS, M. Rainwater harvesting quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. Vol. 41. 2007, p. 2039–2047.

SISTEMA DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA REGIÓN DE FLANDES. Ultrafiltración [en línea]. 2010. Disponible en Internet: <URL: <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/ultrafiltration>>

STUMP, B.; MCBROOM, M. and RAY, D. Demographics, practices and water quality from domestic potable rainwater harvesting systems. J. Water Supply. Reseach Technol. – AQUA. 2012, p. 261–272.

SUÁREZ BALLÉN, J.A.; GALARZA GARCÍA, M.A. and ORTIZ MOSQUERA, R.O.

Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia [en línea]. En: VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. João Pessoa (Brasil), 5 a 7 de junio de 2006. Disponible en Internet: <URL: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>>

SUSTAINABILITY OF SEMI-ARID HYDROLOGY AND RIPARIAN AREAS (SAHRA). Activated Carbon Filter [en línea]. 2005. Disponible en Internet: <URL: <http://web.sahra.arizona.edu/programs/akyw/carbon.html>>

TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY. Harvesting , Storing , and Treating Rainwater for Domestic Indoor Use. 2007.

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. The Texas Manual on Rainwater Harvesting [en línea]. Third Edition. Austin, Texas, 2005. Disponible en Internet: <URL: http://www.twdb.texas.gov/publications/brochures/conservation/doc/RainwaterHarvestingManual_3rdedition.pdf>

TORRES MURILLO, O.M. Identificación de los posibles usos del agua lluvia de escorrentía en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá) [en línea]. 2011, p. 1-181. Disponible en Internet: <URL: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7106>>

TORRES, A.; MÉNDEZ FAJARDO, S.; LÓPEZ-KLEINE, L.; MARÍN, V.; GONZÁLEZ, J.A.; SUÁREZ, J.C.; PINZÓN, J.D. y RUIZ, A. Calidad de aguas lluvias sobre tejados. Evaluación preliminar de la calidad de la escorrentía pluvial

sobre tejados para su posible aprovechamiento en zonas periurbanas de Bogotá [en línea]. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 14 (1). 2011, p. 127-135. Disponible en Internet: <URL: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v14n1/v14n1a16.pdf>>

USEPA. National Primary Drinking Water Regulations. Washington D.C., 2009.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M. and BALASUBRAMANIAN, R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs, Water Res., 46(4). 2012, p. 1337–1345. Volume 158, Issue 1. 2010, p. 84–91. Disponible en Internet: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749109003911>>

WEF. The Global Risks Report. 11th Edition. 2016

WHO. Guidelines for drinking-water quality. 2017.

WHO. Hardness in Drinking-water Background document for development of Drinking-water Quality [en línea]. 2011. Disponible en Internet: <URL: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/hardness.pdf>

WHO. Las Preguntas Comunes y sus Respuestas Sobre el Nitrato y el Agua Potable. WHO Fact Sheets, 2012.

WHO. Lead poisoning and health. WHO fact sheets, 2018.

YIP, J.; LEONG, C. NAN, M.; EONG, P. and HERMAWAN, A- Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. J. Clean. Prod., vol. 143, p. 64–



75, 2017.

YOUNG, J. YANG, J.; HAN, M. and CHOI, J. Science of the Total Environment
Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested
rainwater and reservoir water as alternative water resources. Vol. 408. 2010, p.
896–905.