

06-013

DESIGN OF A RAINWATER HARVESTING SYSTEM AND ITS TREATMENT FOR DEVELOPING COUNTRIES

Martínez Martí, María ⁽¹⁾; Arnal Arnal, José Miguel ⁽²⁾; García Fayos, Beatriz ⁽¹⁾; Sancho Fernández, María ⁽¹⁾

⁽¹⁾ UPV, ⁽²⁾ Universitat Politècnica de València

Water is a vital resource and its demand globally keeps increasing . Water scarcity affects more than 40% of the population, especially in developing countries. Rainwater harvesting is one of the most viable alternatives, due to its low complexity.

This project proposes design and construction of a system for collection and storage of rainwater with low-cost materials, as well as a filter for the treatment of the water collected. The project describes the proposed design and the results of the tests performed at lab (with turbid water) or at field level (with real water) with the installation designed. The results show that rainwater harvesting system is acceptable from the point of view of collecting capacity, and the filter is more effective when working at low filtration rates. These conclusions can be used as a guide to design a system at real scale and represent an alternative to open water intake or extraction from wells.

Keywords: rain harvesting; filter; treatment; drinking water; developing countries

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOGIDA Y TRATAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA PARA PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

El agua es un recurso vital para la vida y su demanda a nivel mundial es creciente. Los problemas por abastecimiento de agua son constantes y su escasez afecta a más del 40% de la población mundial, concentrándose en los países en vías de desarrollo. El aprovechamiento del agua de lluvia supone una alternativa viable para obtención de agua destinada a consumo humano por su baja complejidad. Este trabajo propone el diseño y la construcción de un sistema de recolección del agua de lluvia, versátil y con materiales de bajo coste, así como de un filtro para el tratamiento del agua recogida. El trabajo muestra el diseño realizado así como los principales resultados obtenidos con las pruebas realizadas en el laboratorio (con agua sintética) y en campo (con agua real). Los resultados permiten afirmar que el sistema de cosecha de agua de lluvia es apto en cuanto a capacidad de recolección, y por lo que respecta al filtro doméstico, es más eficaz a velocidades bajas de filtrado. Estas conclusiones permiten fijar las bases para la futura implementación del sistema a escala real, y representa una alternativa a la recogida en vertientes abiertas o recolección en pozos subterráneos.

Palabras clave: cosecha de agua; filtración; tratamiento; potabilización; países en vías de desarrollo

Correspondencia: José Miguel Arnal Arnal jarnala@iqn.upv.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El agua es un bien de primera necesidad y su acceso universal un derecho humano que cada vez está más privatizado. Pese a los esfuerzos nacionales e internacionales de diferentes países para garantizar su acceso, alrededor de 768 millones de personas carecen aún de agua segura (Naciones Unidas, 2019). Actualmente, la problemática del agua en los países en vías de desarrollo se puede dividir en tres grandes grupos: su escasez, su contaminación y el suministro de la misma.

Por lo que respecta a su escasez, de entre todos los factores que afectan a la cantidad de agua disponible destaca el incremento demográfico, el cambio climático, la actividad agrícola intensiva y el uso intensivo del agua como principales aspectos que contribuyen a la falta de este recurso, así como a su descentralización.

El origen de la contaminación de las aguas es muy variado, y en función de éste afectará a unas fuentes u otras de agua. Las aguas residuales domésticas y la contaminación agrícola son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, pues debido a la pobreza del continente africano, el 60% de la población vive en condiciones de tugurios asentados en pequeños núcleos rurales donde los servicios de saneamiento son escasos o inexistentes. Por otra parte, a pesar de tratarse de un continente poco industrializado, las aguas residuales industriales son otro foco causante de la contaminación, así como los lixiviados tóxicos que originan las industrias contaminan las aguas subterráneas.

Finalmente, a pesar de que tanto en las zonas rurales como urbanas el suministro del recurso es deficiente, es en las zonas rurales dónde sufren estrés hídrico de manera más acentuada. Mientras que las infraestructuras de abastecimiento y suministro que existen en zonas urbanas cuentan con más de 20 años con un mantenimiento y gestión deficiente, en las zonas rurales no existen ningún tipo de infraestructuras que canalicen el agua desde fuentes limpias hasta las zonas rurales. Conjuntamente, el 80% de la población vive en este tipo de zonas que, como las fuentes superficiales están comúnmente contaminadas, recurren a aguas subterráneas como segunda alternativa para obtener dicho recurso (Agudo, Hierro, Huete Machado, & Linde, 2015). La localización de los pozos está muy descentralizada y obliga a realizar muchos desplazamientos en busca de agua (migraciones forzadas). Además, la obtención de agua mediante este método implica la perforación de pozos manualmente, factor que encarece el proceso. Todo esto refleja y caracteriza la dificultad de la disponibilidad y suministro del agua en estas zonas del planeta.

En vista de esta problemática es necesario buscar soluciones viables para procurar el acceso al agua potable y mejorar la calidad de esta accesible a la población más desfavorecida.

Frente a la falta de disponibilidad de agua, las posibles soluciones pasan por el tratamiento del agua proveniente de fuentes superficiales (CDC, 2015), métodos novedosos para la obtención de agua subterránea y agua atmosférica (FAO, 2000). Debido a que, de entre las posibilidades, la cosecha de agua de lluvia es la única solución que es complementaria a los recursos de agua subterránea y/o superficial y además se encuentra una alternativa descentralizada, se selecciona ésta como la opción más favorable para este estudio (RainWater Harvesting, 2012).

De entre todas las configuraciones posibles de cosecha de agua de lluvia, la técnica en la que se basa este estudio es la microcaptación (Fondo internacional de desarrollo agrícola, 2013), pues a diferencia de la macrocaptación y captación del agua atmosférica (niebla), permite la captura y almacenamiento de un volumen considerable de agua de lluvia sin necesidad de invertir en infraestructuras que encarezcan su implementación (Kawsay, 2015).

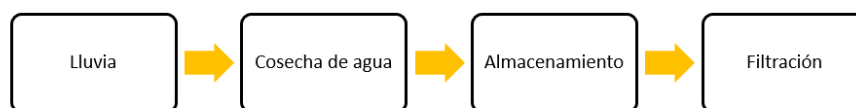
2. Objetivos

El objetivo del proyecto es el diseño de un sistema de recogida y tratamiento de agua de lluvia eficiente y de bajo coste para países en vías de desarrollo.

3. Metodología

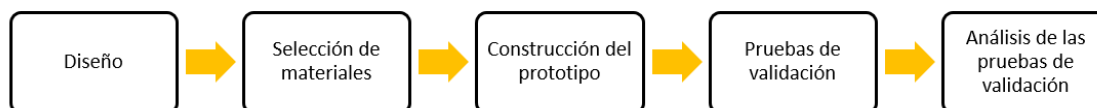
Para la realización del proyecto se precisa lluvia, después su cosecha mediante el dispositivo diseñado y por ultimo su tratamiento incluyendo el almacenamiento y filtración. Las etapas que lo componen son las que se muestran en el diagrama de bloques descrito en la Figura 1.

Figura 1: Diagrama de bloques general del proyecto



Para su implementación, se tendrán en cuenta la siguiente secuencia (figura 2):

Figura 2: Diagrama de bloques específico para cada etapa



3.1 Sistema de cosecha de agua de lluvia: diseño, construcción y validación

En primer lugar se realizará el diseño mediante el programa Autodesk Inventor Professional 2019, que permitirá visualizar y simular de manera más fácil el montaje y configuración de la cosecha de agua. Las hipótesis que se tendrán en cuenta son:

- El sistema de cosecha de agua de lluvia debe de ser ligero y de fácil manejo.
- Debe poder montarse y desmontarse y transportarse, de manera que se pueda cambiar de lugar o armarse en un sitio y colocar en otro sin ningún tipo de problema.
- Su diseño está pensado para poder construirse sin necesidad de poseer, en general, unos materiales en concreto, adaptable a los materiales autóctonos de la zona.

Por lo que respecta a la elección de materiales, estos además de cubrir las necesidades del sistema, deben ser asequibles económicamente. Una vez se tenga claro el diseño y los materiales de construcción se procederá a la materialización del prototipo. Para a la construcción del prototipo, se seguirán los siguientes pasos:

- Aprovechamiento de las herramientas necesarias para la construcción del prototipo.
- Adecuación de los materiales a las dimensiones especificadas según el diseño finalmente propuesto.
- Ensamblaje de las piezas que componen el sistema y montaje final

Finalmente, se realizarán las pruebas de validación consistentes en imitar el efecto de la lluvia sobre el sistema de cosecha mediante la instalación de tres micro aspersores de 180° equidistantes al sistema, de manera que cada micro-aspersor disperse el agua en forma de micro-gotas hacia los tres paneles, cubriendo éstos por ambas caras. Una vez se tiene todo conectado, se tomarán datos del caudal de lluvia lanzado al sistema y del volumen que es capaz de recoger el sistema en un tiempo determinado.

3.2 Tratamiento del agua recogida: filtración

Tras recoger el agua de lluvia mediante el sistema propuesto, se procede a realizar su tratamiento mediante un filtro doméstico. El prototipo que se va a construir se basa en un filtro de arena lento (Bioconstrucción, 2017). Se elaborará a pequeña escala en el laboratorio para poder realizar los ensayos de validación, pero podría extrapolarse a tamaños más grandes para tratar el volumen de agua de una familia o pequeña comunidad.

Primero se diseñará el filtro doméstico mediante Renders en 3D con el programa Autodesk Inventor Professional 2019. Una vez se tenga claro cuál será la configuración del filtro a implementar se estudiará los siguientes parámetros característicos: selección del material filtrante, granulometrías del material filtrante, altura del lecho filtrante y velocidades de filtración (Ramirez, 2019). Posteriormente, se procederá a la construcción y puesta en marcha del filtro doméstico. Para ello, en función de la configuración finalmente elegida, será necesario el aprovisionamiento del material necesario así como la elaboración del agua turbia sintética (50 NTU) que sustituirá al agua de lluvia real en las pruebas de validación (Carrasquero, y otros, 2018). El filtro doméstico se ensayará a distintas velocidades de filtración y con diferentes alturas del lecho filtrante para estudiar cuál aporta mejor calidad final de agua filtrada.

4. Resultados

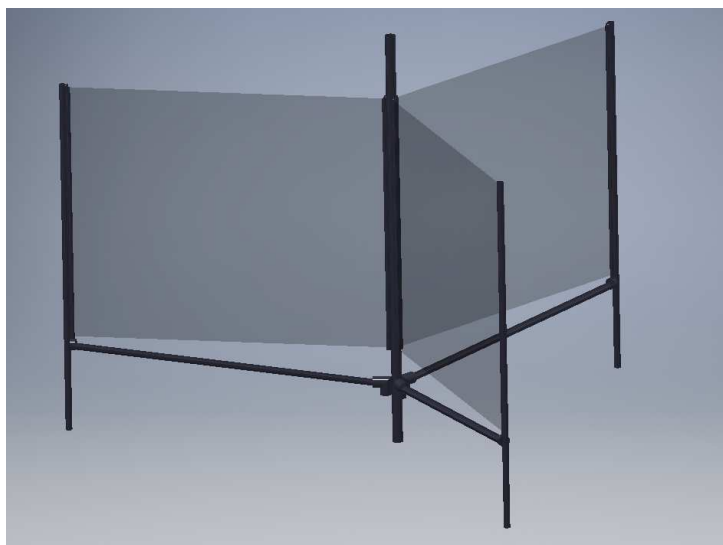
4.1 Cosecha de agua de lluvia

A continuación, se muestra el diseño final mediante representaciones en 3D, así como la elección de los materiales idóneos para su construcción.

4.1.1 Diseño del sistema de agua de lluvia y selección de materiales

La estructura estará compuesta por tres paneles verticales alrededor de un mástil principal, abarcando los 360° grados a su alrededor, con una separación de 120° entre cada uno de ellos (ver Figura 3).

Figura 3: Render en 3D. Cosecha de agua. Vista general

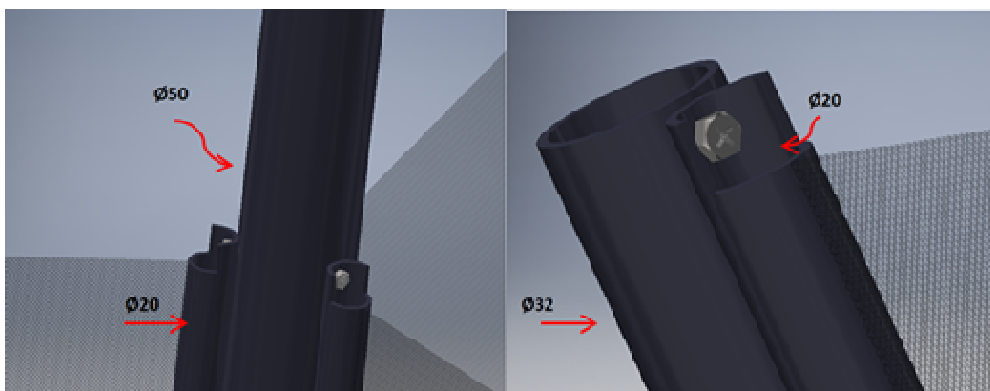


Estos paneles estarán formados por una lona (tela de mosquitera de 1,5mm) (véase Figura 3), de manera que su tamaño de poro deje pasar el aire evitando así que se produzca un efecto vela, pero a su vez que retenga las gotas de lluvia al chocar con ésta y deslicen por gravedad hasta unos canalones colocados justo al final de dicha tela. Estos canalones poseerán una pendiente mínima necesaria (aproximadamente de 5°) para que el agua circule a través de las canaletas hasta su almacenamiento.

La tela no se amarrará directamente al mástil principal (diámetro 50mm.), si no que irá atada previamente a los tubos más finos (diámetro 20mm.). De esta manera, si se considerara oportuno, se podría dejar un poco de holgura entre ellos con el fin de, con ayuda de los tensores, regular más fácilmente la tensión de la tela e incluso su inclinación para hacerla más efectiva. De la misma forma, en los extremos, los tubos pequeños (diámetro 20mm.) irán sujetos a tubos más gruesos (diámetro 32mm.) para poder darle a la tela su correspondiente altura, además de las características antes mencionadas (véase la Figura 4).

Toda la estructura será de PVC. Es ligero, resistente, impermeable y con elevada resistencia a la intemperie, además de ser químicamente inocuo. Su excelente relación calidad/precio hace que sea un material idóneo capaz de resistir las condiciones climatológicas para las que está pensado y muy asequible (Asoven, 2018).

Figura 4: Render en 3D. Cosecha de agua. Vista conexión tubos



4.1.2 Construcción y validación del sistema de cosecha de agua de lluvia

Una vez se adecúan los materiales a las dimensiones deseadas se procede a su montaje, según el diseño detallado en la figura 3. El resultado es un sistema de 2 metros de alto cuyos paneles son de 1,5x1,25 metros cada uno, que se puede ver en la figura 5.

Figura 5: Prototipo cosecha de agua de lluvia



Los resultados obtenidos en las pruebas de validación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Resultados de las pruebas de validación. Cosecha de agua

	Caudal de entrada	Duración del ensayo	Volumen recogido	Rendimiento
	L/min	min	L	%
Ensayo 1	17,10	1	1,86	10,90%
Ensayo 2	17,10	4	4,85	7,10%
Ensayo 3	7,40	5	15,63	42,20%
Ensayo 4	7,25	5	12,88	35,50%
Ensayo 5	6,75	5	11,25	33,30%
Ensayo 6	7,50	5	16,25	43,30%

Se observa que para los ensayos con menor caudal de entrada se obtienen mayores rendimientos, porque el volumen recogido de agua es mayor por minuto y porque además, la cantidad suministrada de agua es menor, lo que impide la saturación del sistema de recogida. Se alcanzan valores muy positivos en los ensayos 3 y 6, del orden de 42-43% de rendimiento.

Se ha de tener en cuenta que estas pruebas de validación pretendían demostrar el funcionamiento del sistema de cosecha de agua de lluvia con resultados orientativos, pues

no se puede dar un valor final de rendimiento hasta que el sistema no se pruebe en las condiciones climatológicas para las que fue diseñado.

4.2 Filtración

4.2.1 Diseño del filtro doméstico y selección de materiales

Se propone como elemento de contención para el filtro una botella de polietileno de tereftalato, PET, con una capacidad de 1,5 o 2L. Por lo que respecta al material filtrante, estará compuesto por un medio dual de arena fina y gruesa y una capa de grava de mayor granulometría (Bruni & Spuhler, 2018). Las características del lecho filtrante se recogen en la tabla 2.

El filtro se conectará a la entrada de suministro de agua mediante mangueras de silicona de pequeño diámetro. Constará de una conexión en la parte superior de la botella (A) para la entrada del agua a filtrar, una salida (B) para evacuar el agua de lavado y una conexión en la parte inferior de la botella (válvulas C y D) que actuará como entrada o salida en función de si el filtro está en operación de filtrado o en operación de lavado (véase Figura 6).

Figura 6: Render en 3D del filtro doméstico

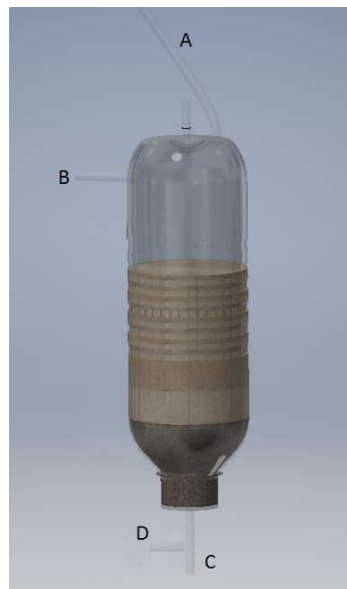


Tabla 2: Características del lecho filtrante

Arena
- Arena fina: 600-800 μm
- Finos: 100-400 μm
- h_{capa} : 13cm \pm 5 cm
Grava
Tamizado (5-0,8 mm)
• Grava: 5-2 mm
• h_{capa} : 3 cm

4.2.2 Construcción y validación del filtro doméstico

Una vez se tienen todos los orificios necesarios y las conexiones se procede al llenado del filtro por la base, empezando con la arena y terminando con la grava. Posteriormente, se cierra con el tapón junto con la boquilla inferior y se conecta una manguera junto con una conexión en T y las válvulas C y D para cerrar el filtro. Las válvulas implementadas en este filtro serán pinzas Hoffman.

Finalmente, se coloca el filtro sobre un soporte y se sustenta mediante una pinza con nuez y una abrazadera metálica. Una vez el filtro está en posición vertical se coloca una varilla de vidrio para la lectura de nivel (véase la Figura 7).

Figura 7: Montaje filtro doméstico



Por lo que respecta a las pruebas de validación, se comienza por la puesta a punto del filtro, en modo operación de lavado, que consiste en llenar el filtro por la base con agua clarificada para evitar la formación de caminos preferentes y favorecer el asentamiento de la grava en el fondo del filtro (WordPress, 2008). Proceso que finalizará cuando el agua salga por la parte superior completamente limpia.

Una vez ha finalizado el proceso de lavado del filtro, se conecta la entrada del tanque de agua sintética al filtro y se cierra la válvula de salida del agua de lavado. Mediante las válvulas se regulará el caudal de entrada y salida para mantener el volumen constante dentro del filtro. En modo operación de filtrado se realizarán los ensayos con diferentes configuraciones, variando el nivel del lecho y la velocidad de filtrado. Cabe destacar que después de cada ensayo se realiza un lavado del filtro. Alternar estos dos modos de operación es lo que se conoce como ciclo de filtrado.

Tras la realización de diversos ensayos con múltiples configuraciones se obtienen los resultados adjuntos en la tabla 3. En ella, se analizan la influencia del tipo de lecho (presencia de finos) y la velocidad de filtrado en el rendimiento del sistema (turbidez final).

Tabla 3: Resultados de filtración

	Velocidad de filtrado	Turbidez final	Rendimiento
	L/min	NTU	%
Arena y grava (sin finos)	0,0044	26,0	47,90%
Arena y grava con 2cm de finos	0,0287	37,0	21,90%
Arena y grava con 5cm de finos	0,0541	37,0	23,07%
Arena y grava con 5cm de finos	0,0028	28,5	40,75%
Arena y grava con 5cm de finos	0,0054	23,5	52,63%

Tal y como se puede observar, a mayor velocidad de filtración, menor rendimiento, debido al menor tiempo de residencia del agua en el filtro. Además, se observa que la variación de la composición del filtro no proporciona resultados concluyentes, ya que los mejores rendimientos se obtienen para arena y grava sin finos (47.90 %) y arena y grava con 5 cm de finos (52.63 %), siempre que la velocidad de filtración sea baja (0.004-0.005 L/min).

Respecto a la calidad del filtrado, la turbidez está por encima de los 5 NTU (OMS, 2017) (valor recomendado por la OMS), si bien se partía de una agua de 50 NTU preparada con caolín. Habría que realizar mayor número de ensayos y con agua real para validar los resultados obtenidos. Una de las soluciones sería aumentar la altura del lecho, lo que aumentaría el tiempo de residencia y permitiría mejorar los resultados de turbidez final.

Para el diseño, se tendrá en cuenta que la velocidad óptima de filtrado es de 0,706 LPM/m² (litros por metro cuadrado por minuto), calculada a partir de la velocidad de filtrado (0,0054L/min) y el área transversal del filtro doméstico. Finalmente, el prototipo diseñado en una jornada de funcionamiento del filtro de 8 horas podría tratar 2,6 litros de agua. Si se considera que el filtro trabaja durante 24 horas se obtendrían 7,8L de agua de lluvia filtrada al día.

5. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos y pruebas de validación y con la información aportada en los apartados anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El sistema de cosecha de agua de lluvia funciona correctamente.
- El diseño obtenido es muy versátil dado que está pensado para tener formas y dimensiones variables ajustables a los recursos existentes en las zonas a implementar.
- El filtro doméstico responde satisfactoriamente a velocidades mínimas de filtrado, del orden de 0,706 LPM/m².
- Bajo las condiciones ensayadas es posible tratar hasta 7,8L/día.
- Para obtener resultados concluyentes más fiables, sería necesario realizar pruebas de validación tanto del sistema de cosecha de agua como del filtro doméstico con agua de lluvia real.

6. Referencias

Agudo, A., Hierro, L., Huete Machado, L., & Linde, P. (07 de 2015). Los juegos del agua. EL PAÍS.

Asoven. (12 de 09 de 2018). Asoven PVC. Obtenido de <https://www.asoven.com/pvc/que-es-el-pvc-ventajas-fabricacion-e-impacto-ambiental/>

Bioconstrucción. (01 de 03 de 2017). Ecocosas. Obtenido de <http://ecocosas.com/>

Bruni, M., & Spuhler, D. (2018). Gestión de agua y saneamiento sostenible. Obtenido de Filtración lenta de arena: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-lenta-de-arena>

Carrasquero, S., Martínez, M., María Gabriela, C., Yoselín, L., Altamira, D., & Gilberto, C. (2018). Remoción de turbidez usando semillas de Tamarindus indica como coagulantes en la potabilización de aguas. Bases de la Ciencia, 19-43.

CDC. (2015). Centers for Disease Control and Prevention. Obtenido de Water Treatment: <https://www.cdc.gov>

FAO. (2000). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de <https://fao.org>

Fondo internacional de desarrollo agrícola. (2013). Captacion y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago, Chile: FAO.

Hadyniak, B. (10 de 09 de 2016). El aumento de la contaminación del agua en Asia, África y América Latina pone en riesgo a 323 millones de personas. ABC, pág. <https://www.abc.es/>.

Kawsay, S. (2015). Proyecto de desarrollo rural integral sostenible en la provincia de chimborazo. Obtenido de Para cosechar agua de lluvia: <https://jica.go.jp>

Naciones Unidas. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. Obtenido de <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>

OMS. (02 de 2017). Agua, saneamiento e higiene. Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/es/

RainWater Harvesting. (2012). RainWater Harvesting. Obtenido de <http://www.rainwaterharvesting.org>

Ramirez, F. (2019). El agua potable . Obtenido de Filtración: <http://www.elaguapotable.com>

WordPress. (2008). Hidrometálica. Obtenido de <https://hidrometalica.com/>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



La realización de este trabajo está íntimamente relacionado con el **Objetivo n°6** de los ODS: **Agua limpia y saneamiento**. Concretamente se basa en la meta 6.a del objetivo 6: “De aquí a 2030, ampliar (...) el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de

capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización”. Con la elaboración del proyecto se propone un nuevo sistema de captación que mejora el acceso al recurso, y su tratamiento posterior con un filtro doméstico que mejora su calidad final. Colabora en procurar el acceso a agua potable para aquellas familias que carezcan de este recurso hídrico.

La falta de este recurso acentúa el hambre, la desnutrición y la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas por la de falta de higiene. Entre las distintas manifestaciones de la pobreza figuran el hambre y la malnutrición, y es el sector de la agricultura – que proporciona el principal medio de vida en los países en vías de desarrollo – el que supone un gasto elevado de este recurso hídrico. Es por ello que, mediante la implementación de este sistema también se contribuye al cumplimiento del **Objetivo nº2: Hambre cero**. Aprovechar el agua de lluvia como sistema de riego para cultivos disminuye los procesos de sobreexplotación, planteados en el Objetivo nº2, y su almacenamiento permite subsanar los problemas en caso de sequía.