

Evaluación de la cantidad de agua lluvia diaria mediante programación lineal para optimizar el uso de agua potable en la industria cuencana (Ecuador)

Evaluation of the quantity of daily rainwater through linear programming to optimize the use of potable water in Cuenca's industry (Ecuador)

PEÑA, David S.¹

LOAYZA, Miryan A.²

Resumen

En Cuenca, Ecuador, la cobertura de agua potable llega a más del 90 % de la población, pero no existe un control en el consumo, por lo que la captación de agua lluvia podría ser una alternativa. La presente investigación evaluó la cantidad de agua lluvia requerida para optimizar el consumo en la industria cuencana. Se consideraron datos de precipitación y del consumo de agua de tres empresas durante los años 2014-2022. Los resultados muestran que el ahorro de agua potable no solventa la inversión requerida para implementar dicha optimización.

Palabras clave: precipitación, agua potable, industria, optimización

Abstract

In Cuenca, Ecuador, drinking water coverage reaches more than 90 % of the population, but there is no control over consumption, which is why rainwater harvesting could be an alternative. This investigation evaluated the amount of rainwater required to optimize consumption in the Cuenca's industry. Rainfall and water consumption data from three enterprises over the years 2014-2022 were considered. The results show that the savings of drinking water does not cover the investment required to implement such optimization.

Key words: precipitation, drinking water, industry, optimization

1. Introducción

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO, 2021) el consumo de agua dulce tiene una tasa de demanda creciente en los últimos años, lo que se adjudica al incremento de la población, al desarrollo económico y cambios en los patrones de consumo. El 69 % del consumo

¹ Gerente de ventas. Administrativo. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. davidpena18@hotmail.com

² Docente. Director de carrera. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. mloayza@ups.edu.ec

total se atribuye a la ganadería y acuicultura, el 19 % a las industrias y el 12 % a los municipios. En cuanto a las industrias, para 2050 se proyecta un incremento de 400 % por la expansión en la producción, en especial en el continente asiático y en la región latinoamericana; de tal manera que las cifras del consumo en la industria compiten con el porcentaje del sector ganadero.

En cuanto a México, el uso del agua replica las estadísticas mundiales, donde el 75% se utiliza para el sector agrícola, con la diferencia de que el consumo público (14,7 %) es mayor que el de la industria (9,6 %), encontrándose entre los tres países del mundo con mayor consumo de agua (Comisión Nacional de Agua, 2020). Según Guerrero, García, & Seguí (2020) existe una presión sobre la distribución de los recursos hídricos en México, a razón de que la demanda de agua es mayor a la suministrada, lo que conlleva a conflictos en cuanto a la toma de decisión para priorizar el suministro de agua, en especial entre los de mayor demanda: sector agrícola e industrial, o el consumo residencial, en consideración a la escasez relativa del líquido vital.

En el caso de Perú, según datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2018), el consumo de agua por diversos sectores económicos es en su mayoría por parte del sector agrícola (85,9 %), en la manufactura y servicios (9,0 %) y la ganadería (5,1 %). Lo anterior, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2021), genera tensión en el uso del agua a razón de que el cambio climático genera que el recurso hídrico sea cada vez más escaso.

Bajo este escenario, es importante que se establezcan alternativas para el consumo eficiente del agua, en especial en las industrias, en consideración de que, si bien el consumo por parte de este sector en América Latina no se compara con países desarrollados, la huella hídrica es mayor debido a la falta de limitantes en el consumo. En efecto, en el caso de Cuenca (Ecuador), según Molina *et al.* (2018) no se realiza un control sobre el nivel de consumo del agua potable, lo que pone en peligro los recursos hídricos con los que cuenta la ciudad. Por ello, es importante que se establezcan campañas de educación ambiental para disminuir el consumo de agua, así como identificar acciones viables que permitan disminuir el consumo, dado que de esto depende la provisión futura del servicio (Martínez, 2019).

De ahí surge la presente investigación, que pretende establecer el uso de agua lluvia como opción alternativa para la reducción del consumo de agua dulce potabilizada, a través de la evaluación de la cantidad de agua de lluvia diaria disponible para la optimización del uso del agua potable en la industria cuencana, de tal manera que se configure como un recurso estratégico y complementario debido a su versatilidad de uso, en especial en actividades que no requieren que el agua cumpla con una calidad equivalente al agua potable.

Para cumplir con el objetivo planteado, la presente investigación se estructuró de la siguiente manera: en la primera sección se aborda la introducción, que contempla los antecedentes y referentes teóricos de los sistemas de captación de agua lluvia y la situación del área de estudio. Subsiguientemente, se presenta la metodología empleada en cuanto al cálculo de variables y planteamiento de modelos matemáticos para la simulación del sistema de captación y uso del agua de lluvia en tres empresas industriales de la ciudad de Cuenca. En la sección tres se presentan los principales resultados y el contraste con autores. Por último, se presentan las principales conclusiones.

1.1. Sistemas de captación de agua lluvia

La lluvia se configura como un mecanismo natural de limpieza que, al ser un recurso natural, se caracteriza por tener bajos niveles de contaminación (Hernández & Chaparro, 2020). Según estos autores, la lluvia es una fuente no convencional de agua, que resulta efectiva siempre que se tenga el cuidado necesario para captar, recolectar y almacenar; se la utiliza con o sin tratamiento para diferentes usos, como en el sector agrícola o para uso sanitario. En las áreas rurales, la captación de agua lluvia para el consumo y el uso agrícola es inevitable, debido a que la creación de redes de agua potable resulta insostenible por la distribución lejana entre las comunidades.

Es así que el uso de agua por la calidad físico – química es aceptable para el uso humano en cuanto a cultivos, mantenimiento de jardines, limpieza, pero no para el consumo directo, donde es necesario un tratamiento específico (López *et al.*, 2017).

En este sentido, un aspecto que se debe considerar para la recolección de agua lluvia, según Avelar *et al.* (2019), es el cálculo del potencial de captación de acuerdo al lugar y tiempo en el que se recolectarán, así como el uso que se podría dar, es decir, establecer la demanda y el tratamiento que se dará al agua lluvia. A decir de Morote & Hernández (2017), el uso de agua lluvia se puede implementar en empresas y hogares como un recurso estratégico y complementario, debido a la versatilidad en el uso, en especial, en actividades que no requieren que el agua cumpla con una calidad equivalente al agua potable.

De acuerdo con Ortiz *et al.* (2020), un sistema de captación de agua de lluvia consiste en identificar el área de captación, el conducto de agua, los depósitos y el sistema de control. En cuanto al área de captación, esta comprende los tejados y cubiertas; los conductos son los que dirigen el agua, y en algunos casos se colocan filtros para eliminar impurezas en caso de requerir; para el almacenamiento, corresponden los depósitos; por último, el control es una opción importante, pues resulta necesaria para mantener la reserva de agua.

En un estudio realizado por Pérez *et al.* (2017) en un municipio de México, se identificó un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) para una población aproximada de 500 habitantes, donde la demanda diaria de agua por persona era de 50 l, que se utilizaba fundamentalmente para consumo o uso doméstico. Para el SCALL, se consideraron diferentes cálculos partiendo de la precipitación pluvial anual, que contribuyeron al análisis de la forma y cantidad de agua de lluvia a conducir. La zona de estudio se dividió en secciones, y en cada una fue necesario el cálculo del volumen mínimo de capacidad de acuerdo a las instalaciones realizadas y según las necesidades de la población.

Por su parte, Solano *et al.* (2017), analizaron un sistema de recolección de agua de lluvia como alternativa a la falta de abastecimiento de agua potable que tiene la Isla Jambelí, en la provincia de Santa Rosa, Ecuador. La propuesta fue un sistema de captación utilizando la cubierta de las viviendas, donde se adaptan elementos de conducción para el almacenaje y tratamiento. Posteriormente, se realizaron diferentes cálculos con el objetivo de que el sistema funcionara de forma adecuada. Así, para determinar la superficie de captación tomaron en consideración una vivienda con un ancho de 7 m, 8 m de largo y un área total de 56 m²; en cuanto a los otros componentes del sistema, se estableció como sistema de conducción un conjunto de tubos de PVC de 6 pulgadas, un tanque interceptor con un volumen de 56 litros, y también un tanque de almacenamiento en el que se determinó la capacidad en función de la demanda.

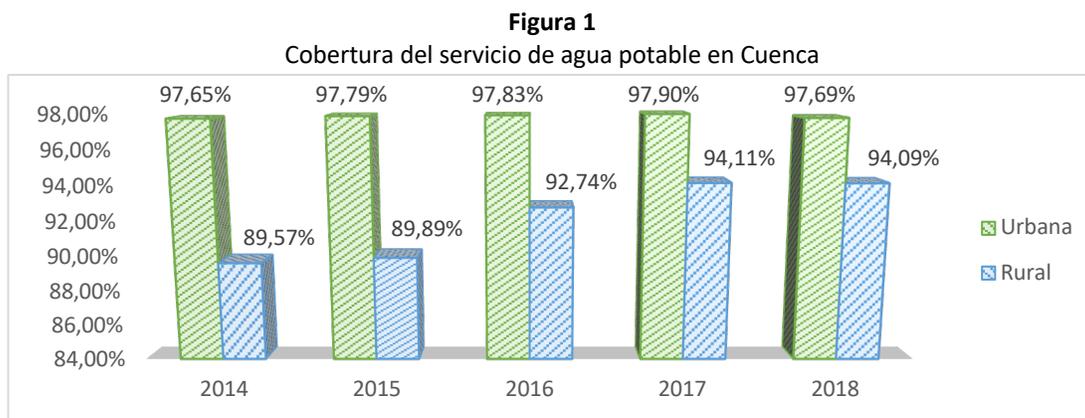
1.2. Características del sistema de agua potable en la ciudad de Cuenca

En la actualidad, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA EP, 2017) es la encargada de gestionar, administrar, operar y mantener el sistema cuencano de agua potable, que a su vez se subdivide en cuatro:

- Yanuncay: el tratamiento se realiza en la planta de Sústag
- Tomebamba: el tratamiento se realiza en la planta de El Cebollar
- Culebrillas: el tratamiento se realiza en la planta de San Pedro del Cebollar
- Machángara: el tratamiento se realiza en la planta de Tixán

El sistema más antiguo de la ciudad de Cuenca es el Tomebamba, con un periodo de operación aproximado de 67 años, mientras que el más actual es Yanuncay, con apenas 9 años (ETAPA EP, 2017). En cuanto a las plantas de tratamiento de agua, en el 2015 fueron reconocidas con la certificación ISO 9001 las de El Cebollar, Sústag y Tixán; de igual manera, ETAPA EP cuenta con un laboratorio de agua potable y saneamiento que sirve para el análisis de la calidad del agua, que también es reconocida con la ISO 9001 (ETAPA EP, 2017).

Por otra parte, se presentan a continuación, en la figura 1, las cifras de cobertura del servicio de agua potable en la ciudad de Cuenca entre los años 2014 y 2018:



Fuente: Elaboración propia basada en de ETAPA EP (2019)

En la figura 1, se observa que en la zona urbana la cobertura se aproxima al 100 %, en contraste con el área rural, para la cual la cobertura era de apenas del 89,57 % en el 2014, mientras que para el año 2018 se incrementó hasta alcanzar un 94,09 %; no obstante, el 6 % de la población aún se encuentra sin un sistema de suministro de agua potable. Es importante mencionar que Cuenca cuenta con mayor cobertura que la que se reporta como promedio a nivel nacional, que es del 87 % (UNICEF, 2019).

2. Metodología

En esta sección se detallan los datos que se recabaron y los cálculos que se realizaron para plantear el modelo de programación lineal que, de acuerdo con López & Castro (2017), se configura como un proceso matemático que permite asignar de forma óptima los recursos escasos. En efecto, en la presente investigación la programación lineal permitió identificar la cantidad efectiva de captación y el almacenaje óptimo, información que permitió identificar el costo de implementación del sistema de recolección de agua lluvia.

2.1. Recolección de datos para el modelo matemático de la cantidad óptima de consumo de agua lluvia

La población en estudio estuvo constituida por una selección de industrias de la ciudad de Cuenca. Para la selección se tomó en consideración la disponibilidad de información sobre el consumo de agua potable de las empresas manufactureras que se encuentran ubicadas en la ciudad de Cuenca, a través de la página WEB de ETAPA. Se tuvo acceso a tres empresas de la industria alimenticia: Lácteos San Antonio C.A., Industria de Alimentos La Europea Cía. Ltda. y Productos Lácteos Nandito. Adicionalmente, se tuvo acceso a los datos de las precipitaciones de la ciudad de Cuenca, que se obtuvieron del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca. A continuación, en el cuadro 1, se detallan las variables del modelo planteado de programación lineal, las que se adaptaron del modelo planteado por Castillo *et al.* (2014):

Cuadro 1
Operacionalización de variables

Tipo de variable	Descripción	Unidad de medida	Nomenclatura
Variable para la función objetivo	▪ Cantidad de agua utilizada para la producción	m ³	X1
	▪ Cantidad de agua para saneamiento	m ³	X2
Variable para las restricciones	▪ Cantidad mínima de agua potable consumida en la producción y para saneamiento por la empresa	m ³	---
	▪ Cantidad máxima de agua potable consumida para la producción y para saneamiento por la empresa	m ³	---
	▪ Cantidad mínima de agua lluvia a ser recolectada		---
	▪ Cantidad máxima de agua lluvia a ser recolectada	m ³	---

Fuente: Elaboración propia basada en Castillo *et al.* (2014)

Para el valor de X1, que corresponde a la cantidad de agua potable consumida por la empresa para la producción, no se realizó ningún cálculo, a razón de que los datos disponibles en la página web de la empresa ETAPA EP están en m³. Para el caso de la variable X2 (Cantidad de agua para saneamiento), dado que la cantidad que se obtiene en el pluviómetro no es la que se va a recolectar en su totalidad, porque existen otros factores, como la escorrentía y el área de captación (Salinas *et al.*, 2016), que influyen y no permiten recolectar todo el valor reportado en precipitaciones. Para este cálculo se consideraron dos factores que, de acuerdo con Kucukkaya *et al.* (2020) y Abdulla & Al-Shareff (2009), fueron el coeficiente de escorrentía, y el coeficiente de eficiencia del sistema, obteniéndose como consecuencia, la siguiente fórmula:

$$VR = (R * F * A * C / 1000)$$

Donde:

VR: valor de agua lluvia a recolectar

R: Precipitación registrada en mm

F: coeficiente de eficiencia

A: área de captación

C: coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía del techo, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013), refiere un valor entre 0,75 y 0,95 para cualquier tipo de techo diferente al de tejas (ver anexo 1), por lo que en la investigación se toma en consideración un valor de 0,85, que corresponde al valor promedio $(0,75 + 0,95 / 2 = 0,85)$ entre el coeficiente de escorrentía mínimo y máximo que refiere la FAO. En tanto que el coeficiente de eficiencia, se considera del 0,9 porque se supone que en las industrias se implementará un sistema de canales instaladas en los techos que servirán como método de transporte del agua lluvia recolectada, donde se estima que se perderá un 10% de lo captado.

Una vez identificadas las variables, se procede a plantear el modelo de programación lineal, que se constituye de una función objetivo que está sujeta a varias restricciones a contemplar para determinar el tamaño óptimo de los recursos (López & Castro, 2017). Las variables que se incluyen en la función objetivo implican el consumo total de agua de lluvia de las empresas, que en la actualidad se realiza solo para el agua potable, y que se pretende implementar para el agua de lluvia. Es importante considerar que el agua de lluvia a recolectar suplirá

al agua potable en actividades de saneamiento y no en el proceso de producción. En consideración de que se requiere optimizar el uso de agua por parte de la empresa, se establece como función objetivo maximizar el uso de agua de lluvia.

Es importante considerar que no todo el consumo de agua potable diario se utiliza para el proceso productivo, también es usado para la limpieza de la planta de producción, es decir, para actividades de saneamiento; para ello se distingue un valor de 1 %, que se registra en promedio de las facturas de la empresas como un valor de la tarifa para actividades de uso doméstico, siendo estas actividades las que se pretende suplir con el uso de agua lluvia, por tanto, el uso de agua potable tendría que ser menor o igual al 99 % del consumo diario, con ello la función objetivo sería como sigue:

$$FO = Z: (99\% \text{ del consumo de agua potable diario}) X_1 + (1\% \text{ del consumo de agua potable diario}) X_2$$

A partir de la función objetivo que se pretende maximizar, se establece que en programación lineal se debe establecer una serie de restricciones a las variables de la función objetivo que se expresan a través de ecuaciones lineales (Rosete, 2018). En este sentido, se considera como primera restricción que X_1 debe ser menor o igual al 99 % del valor máximo de consumo de agua potable por parte de la empresa. De igual manera, la segunda restricción contempla que X_2 debe ser mayor o igual al consumo mínimo reportado. Como consecuencia, la tercera restricción considera que la suma de X_1 y X_2 debe ser menor o igual al consumo máximo de agua potable y la cuarta restricción considera que la sumatoria sea mayor o igual al consumo mínimo. Si bien la cantidad de agua potable y agua de lluvia deben cumplir con valores mínimos y máximos, es importante que ninguna tenga un valor negativo o cero, por lo que, se plantean las restricciones de no negatividad. Con estos datos, se procedió a realizar el cálculo de los valores óptimos de las variables en RStudio, programa estadístico de código abierto basado en comandos que cuenta con una amplia comunidad (entre universidades y centros de estudios) que hacen que las diferentes funcionalidades se encuentren publicadas para cubrir cualquier necesidad de cálculo estadístico (Avello y Seisdedo, 2017), debido a que facilitó el manejo de datos que en total se obtuvieron cerca de 800 mil registros diarios.

2.2. Datos para el modelo matemático de almacenaje y satisfacción de la demanda de agua de lluvia de las empresas

Para determinar el tamaño de almacenaje requerido, mediante programación lineal, se relaciona la captación de agua de lluvia con diferentes tamaños de almacenamiento disponibles a nivel comercial, entre los que se distingue una capacidad mínima de 2500 litros a 100.000 litros. Es así que se analiza como primera capacidad 2500 litros, el segundo de 5000 litros y los siguientes con una diferencia de 5000, con el objetivo de que se optimicen recursos de análisis de la empresa. Lo anterior se realizó a través del programa estadístico RStudio, en el que se establecieron datos de entrada y salida que simulan el sistema hidrológico, en consideración de las siguientes variables, que forman parte del cuadro 2.

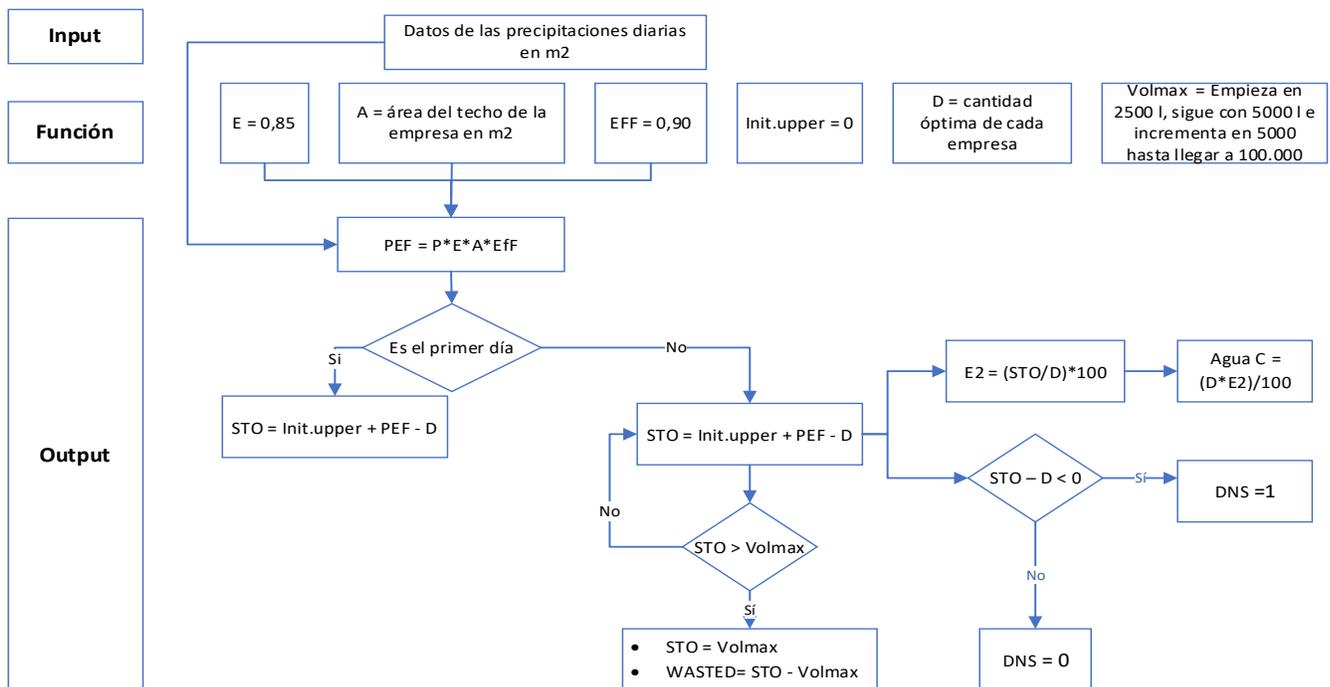
Con los datos de entrada y salida, se procedió a establecer la función objetivo, que se planteó de la siguiente manera, tal como se puede observar con detalle en la figura 6.

Cuadro 2
Detalle del modelo de programación lineal para cada empresa

Datos de entrada	Nomenclatura	Datos de salida	Fórmula de cálculo	Nomenclatura
Precipitación	P	Precipitación efectiva	$P * E * A * EFF$	PEF
Escorrentía	E			
Área de techo	A			
Eficiencia de captación	EFF	Almacenamiento de agua de lluvia	$Init.upper + PEF - D$	STO
Volumen inicial de almacenaje	Init.upper			
Demanda	D	Desperdicio de agua	$STO - Volmax$	WASTED
Volumen del almacenaje	Volmax	Eficiencia del sistema	$(STO/D) * 100$	E2
---	---			
---	---	Agua consumida	$(D * E2) / 100$	Agua C
---	---	Días satisfechos	$1 = \text{es si el STO} - D \text{ es igual a un valor negativo}$ $(\text{Día no satisfecho})$	DNS
---	---		$0 = \text{es si el STO} - D \text{ es igual a un valor positivo}$ (Día satisfecho)	

Fuente: Elaboración propia basada en Peña (2019)

Figura 2
Modelo de programación lineal para el tamaño de almacenaje



Fuente: Elaboración propia basada en Peña (2019)

A continuación, se describen las características del modelo de programación lineal:

1. Cálculo de la precipitación efectiva.

2. El primer día de almacenamiento de agua lluvia corresponde a 0. El siguiente es igual al almacenamiento anterior, más la precipitación efectiva del día y menos la demanda del agua. En el caso de que el almacenamiento sea mayor al volumen máximo del tamaño del tanque establecido, se asigna el valor máximo del tanque.
3. El desperdicio de agua de lluvia será el almacenamiento de esta menos el volumen máximo del tamaño del tanque establecido.
4. La eficiencia del sistema estará dada por el almacenamiento de agua lluvia dividido entre la demanda y multiplicado por 100, para referir como valor porcentual.
5. El agua consumida corresponde a la demanda multiplicada por la eficiencia del sistema y dividida entre 100, para referir como valor porcentual.
6. Los días no satisfechos equivalen a una variable dicotómica, donde el valor de 1 corresponde a si el almacenamiento de agua lluvia menos la demanda origina un valor menor de 0; en caso contrario, de producirse un resultado positivo, el valor asignado será de 0, lo que indica la satisfacción de la demanda con el almacenamiento.

Con el análisis mencionado se obtendrá no solo el tamaño óptimo de almacenaje a partir de los datos de la precipitación y el posible tamaño de almacenaje, también los días en los que se satisface la demanda de agua lluvia de la empresa analizada y la eficiencia con la que se satisface en función del agua lluvia a cosechar y almacenar.

2.3. Costos de implementación y factibilidad del sistema de recolección de agua lluvia

Para identificar los costos del sistema de recolección de agua de lluvia, a cada tamaño de almacenamiento se le adjudica su valor comercial en el mercado, así como los costos que implicaría la instalación del sistema y su mantenimiento. La sumatoria de estos rubros implica el costo total a invertir en cada tamaño de sistema de almacenamiento. Para identificar la factibilidad de la implementación del sistema, se considera el ahorro en dólares que implicaría para las empresas disminuir el consumo de agua potable al sustituirlo por agua de lluvia. Por ello, se consideró la tarifa mensual del consumo industrial de USD 1,24 por m³, en la ciudad de Cuenca. En cuanto a la cantidad de agua de lluvia requerida, si bien se estableció un valor óptimo, cada almacenamiento presenta una eficiencia diferente, por lo que se multiplicó la cantidad de agua de lluvia a recolectar por la eficiencia de cada tamaño de análisis y por el valor monetario de cada m³. Por último, en cuanto al periodo de recuperación de la inversión del sistema, se dividió el costo total de implementación para el ahorro, lo que implicaría el valor en años en los que esta se recuperará.

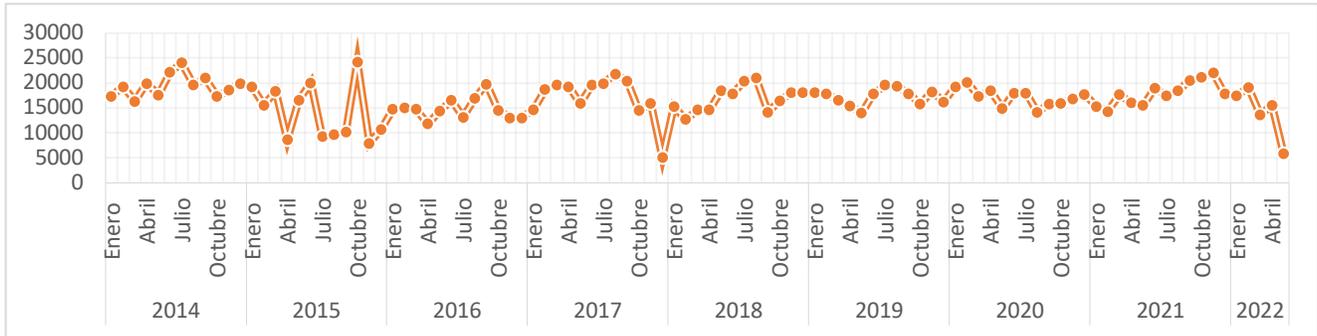
3. Resultados y discusión

En el siguiente ítem se presentan la descripción de la precipitación efectiva a recolectar y los principales resultados de los modelos matemáticos en cuanto a la cantidad óptima de consumo de agua lluvia para cada empresa, el análisis del tamaño de almacenaje y la satisfacción de la demanda que implicaría, así como el costo de implementación.

Consumo de agua potable de las industrias

A continuación, en la figura 3, se presentan los datos históricos del consumo de la empresa Lácteos San Antonio en los años 2014-2022 y la estadística descriptiva de estos datos.

Figura 3
Demanda de agua (en m³) de la empresa Lácteos San Antonio durante los meses de enero del 2014 a marzo del 2022



Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

Cuadro 3
Estadística descriptiva del consumo de agua potable mensual y diario de la empresa Lácteos San Antonio

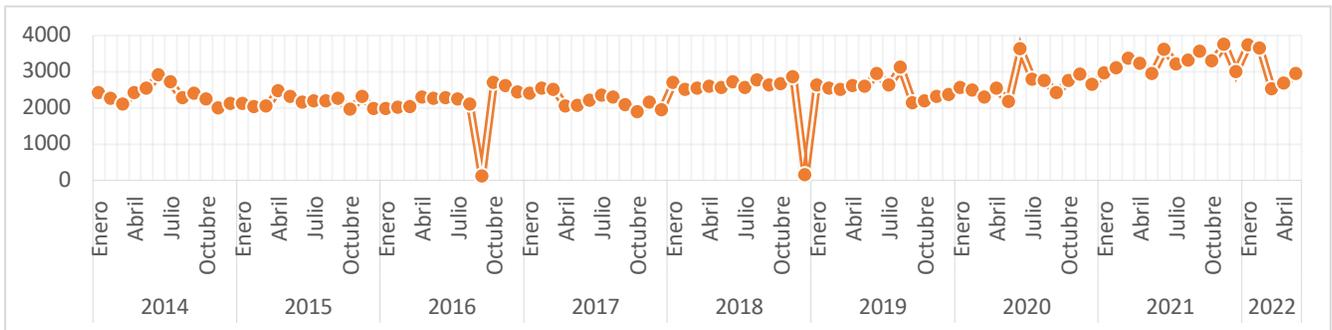
Tiempo	Mín. (m ³)	Máx. (m ³)	Media (m ³)	Desviación estándar(m ³)
Mensual	5.121,00	24.247,00	16.729,95	3.496,95
Diario	170,70	808,23	557,67	116,57

Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

En la figura 3 se observa que el consumo de agua potable de la empresa Lácteos San Antonio tiene diferentes fluctuaciones. En cuanto a la estadística descriptiva mostrada en el cuadro 2, se evidencia que el consumo de agua potable mensual alcanza un valor mínimo de 5.121 m³ y máximo de 24.247 m³, lo que representa un valor promedio mensual de 16.729,95 m³ ± 3.496,95 m³. De forma diaria, se evidencia que el consumo de agua potable de la empresa Lácteos San Antonio muestra un rango entre 170,70 m³ y 808,23 m³, con un valor promedio de 557,67 m³ ± 116,57.

En la siguiente figura se presentan los datos históricos del consumo de la empresa Industria de Alimentos La Europea en los años 2014-2022 y la estadística descriptiva de estos datos.

Figura 4
Demanda de agua (en m³) de la Industria de Alimentos La Europea Cía. Ltda. durante los meses de enero del 2014 a marzo del 2022



Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

Cuadro 4

Estadística descriptiva del consumo de agua potable mensual y diario de la empresa La Europea

Tiempo	Mín. (m ³)	Máx. (m ³)	Media (m ³)	Desviación estándar(m ³)
Mensual	110,00	3.743,00	2.491,88	553,26
Diario	3,67	124,77	83,06	18,44

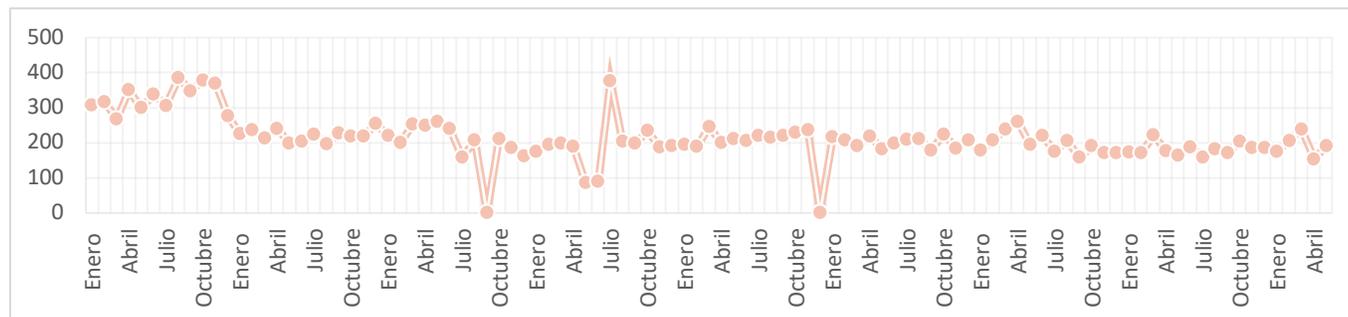
Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

Por otra parte, en la figura 4 se evidencia que la demanda de agua de la empresa La Europea también presenta fluctuaciones. Lo anterior se corrobora en la estadística descriptiva del cuadro 3, donde el consumo de agua potable mensual mínimo es de 110 m³ y el máximo de 3743 m³, estimándose por lo tanto que La Europea consume en promedio mensual de 2.491,88 m³.

En la siguiente figura 5 se presentan los datos históricos del consumo de la empresa Productos Lácteos Nandito en los años 2014-2022 y la estadística descriptiva de estos datos.

Figura 5

Demanda de agua (en m³) de la empresa Productos Lácteos Nandito durante los meses de enero del 2014 a marzo del 2022



Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

Cuadro 5

Estadística descriptiva del consumo de agua potable mensual y diario de la empresa Productos Lácteos Nandito

Tiempo	Mín. (m ³)	Máx. (m ³)	Media (m ³)	Desviación estándar(m ³)
Mensual	86,00	385,00	216,22	55,83
Diario	2,87	12,83	7,21	1,86

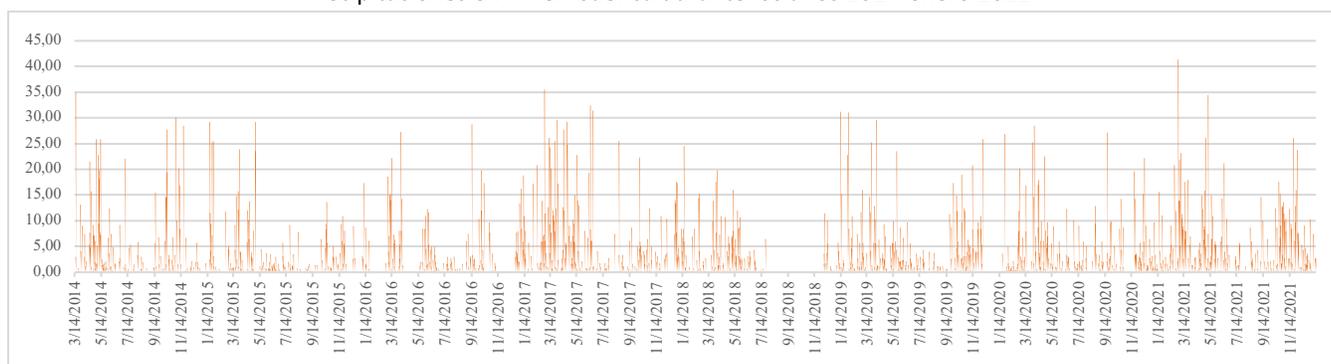
Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

Por último, al evaluar el consumo de agua potable de Lácteos Nandito se evidencia que el consumo es menor que en las otras dos empresas evaluadas, dado que el consumo de agua potable registra un valor de entre 86 y 3485 m³, de lo que se infiere un valor diario entre 2,87 y 12,83 m³;

Reporte de precipitaciones en la ciudad de Cuenca

En el siguiente apartado se presenta las precipitaciones reportadas en la ciudad de Cuenca y la cantidad efectiva de agua lluvia a recolectar para cada una de las empresas de análisis, para ello se consideró el tamaño del techo de empresa y el reporte de precipitaciones. A continuación, se presenta una figura con los datos en milímetros de las precipitaciones.

Figura 6
Precipitaciones en m² en Cuenca durante los años 2014-enero 2022



Fuente: Elaboración propia basada en Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca (2022)

En la figura 6 se observa que todos los meses se tiene registro de precipitaciones en la ciudad de Cuenca, pero se presentan fluctuaciones, lo que evidencia que no todos los meses se puede captar la misma cantidad de agua de lluvia. Por lo tanto, se debería considerar una restricción en cuanto a la disponibilidad máxima y mínima que se tiene de agua de lluvia, pero en consideración al área de captación y los factores que influyen en la recolección. A continuación se presentan los resultados del cálculo de la precipitación efectiva a captar en cada empresa de análisis.

Cuadro 6
Estadística descriptiva de las precipitaciones diarias
en m³ y el volumen a ser recolectado en las empresas

Empresa	Tamaño del techo	Tiempo	Mín. (m ³)	Máx. (m ³)	Media (m ³)	Desviación estándar(m ³)
Lácteos San Antonio C.A.	5292,14	Precipitación m ³	0	218.56	11.84	25.88
		Volumen diario a ser recolectado	0	167.20	9.05	19.80
La Europea Cía. Ltda.	6040,53	Precipitación m ³	0,00	249,45	13,51	29,53
		Volumen diario a ser recolectado	0,00	190,83	10,33	22,59
Productos Lácteos Nandito	397,07	Precipitación m ³	0.00	16.40	0.89	1.94
		Volumen diario a ser recolectado	0.00	12.54	0.68	1.49

Fuente: Elaboración propia basada en Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca (2022)

En el cuadro 5 se observa que tanto la cantidad total de precipitaciones como el volumen a ser recolectado tienen como valor mínimo 0, pero el valor máximo a ser es menor en el caso de la cosecha de agua lluvia dado que se consideran factores que influyen para no recolectar el total como la escorrentía y eficiencia del sistema.

3.1. Consumo óptimo de agua lluvia de las industrias

En el siguiente apartado se presentan las características de la función objetivo y restricciones para cada empresa de análisis, conforme a lo establecido en la metodología. En consideración del porcentaje que se estableció en la función objetivo, se estiman los siguientes valores en función del valor mínimo y máximo de consumo que permitirán establecer las restricciones:

Cuadro 7

Cálculo del valor del porcentaje de consumo diario de agua potable y agua lluvia para establecer las restricciones

		Consumo diario (m ³)	Saneamiento (1 %)	Producción (99 %)
Lácteos San Antonio C.A.	Mín.	170,70	1,71	168,99
	Máx.	808,23	8,08	800,15
Industria de Alimentos La Europea Cía. Ltda.	Mín.	3,67	0,04	3,63
	Máx.	124,77	1,25	123,52
Productos Lácteos Nandito	Mín.	2,87	0,03	2,84
	Máx.	12,83	0,13	12,70

Fuente: Elaboración propia basada en ETAPA EP (2022)

A partir de las variables de la función objetivo para cada empresa, se procede a plantear las siguientes restricciones:

Cuadro 8

Detalle de las restricciones del modelo de programación lineal para identificar el consumo óptimo de agua lluvia y potable en función de los recursos limitados

Función objetivo	$FO = Max Z: 0,99 X_1 + 0,01 X_2$		
Empresa	Lácteos San Antonio C.A.	Industria de alimentos la europea Cía. Ltda.	Productos Lácteos Nandito
Restricción 1	$X_1 \leq 800,15$	$X_1 \leq 123,52$	$X_1 \leq 12,70$
Restricción 2	$X_1 \geq 168,99$	$X_1 \geq 3,63$	$X_1 \geq 2,84$
Restricción 3	$X_1 + X_2 \leq 808,23$	$X_1 + X_2 \leq 124,77$	$X_1 + X_2 \leq 12,83$
Restricción 4	$X_1 + X_2 \geq 170,70$	$X_1 + X_2 \geq 3,67$	$X_1 + X_2 \geq 2,87$
Restricción 5	$X_1 > 0$	$X_1 > 0$	$X_1 > 0$
Restricción 6	$X_2 > 0$	$X_2 > 0$	$X_2 > 0$
Restricción 7	$X_2 \leq 167,20 m^3$	$X_2 \leq 190,83 m^3$	$X_2 \leq 12,54 m^3$

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se procedió a realizar el cálculo de los valores óptimos de las variables en RStudio, a continuación, se presentan los resultados:

Cuadro 9

Resultados del modelo de programación lineal para consumo óptimo de agua lluvia y agua potable

	Agua lluvia	Agua potable
Lácteos San Antonio C.A.	8,08	800,15
Industria de alimentos la europea Cía. Ltda.	1,25	123,52
Productos Lácteos Nandito	0,13	12,70

Fuente: Elaboración propia

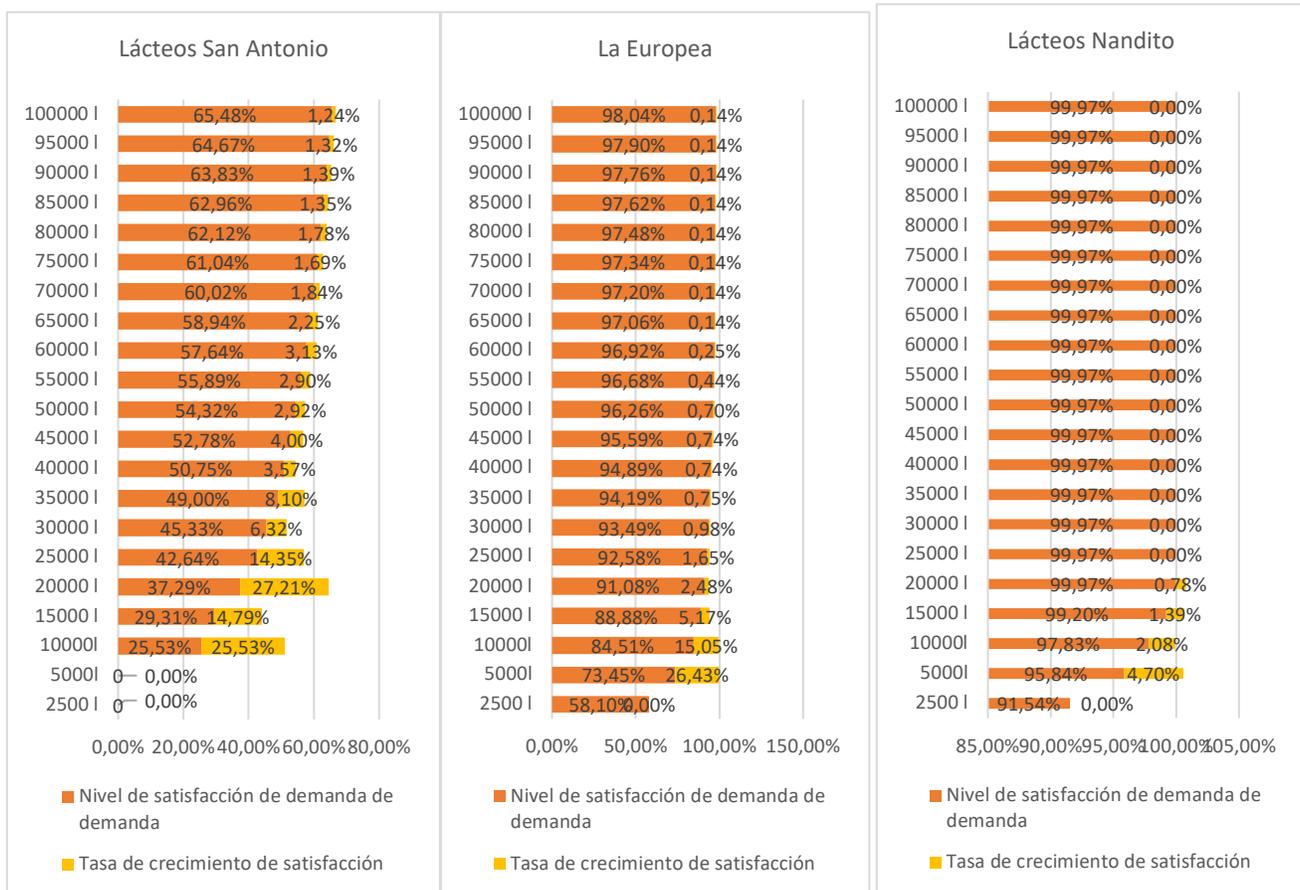
El cuadro 9 muestra los resultados de la programación lineal, indicando que en el caso de Lácteos San Antonio el valor óptimo de consumo de agua potable diario es de 800,15 m³, y el de agua de lluvia de 8,08 m³. En el caso de La Europea, el valor de consumo óptimo diario de agua de lluvia es de 1,25 m³, y el de agua potable de 123,52 m³. Por último, para Lácteos Nandito el valor es de 0,13 m³ para el agua de lluvia y 12,70 m³ el del agua potable.

Con estos resultados se infiere que la empresa Lácteos San Antonio deberá contar con una capacidad de almacenaje diario de por lo menos 8,08 m³ y de 242,40 m³ mensuales; de igual manera, La Europea requiere de 1,25 m³ diarios y 37,5 m³ mensuales; mientras que Lácteos Nandito cubre sus requerimientos con un almacenaje diario de 0,13 m³ y de 3,9 m³ mensual.

3.2. Almacenaje óptimo y satisfacción de la demanda

A continuación, la figura 7 muestra los detalles del análisis de diferente tamaño de almacenaje para cada empresa:

Figura 7
Comparación de la satisfacción de la demanda de almacenamiento
entre 2500 litros y 100.000 litros de las empresas de análisis



Fuente: Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca (2022)

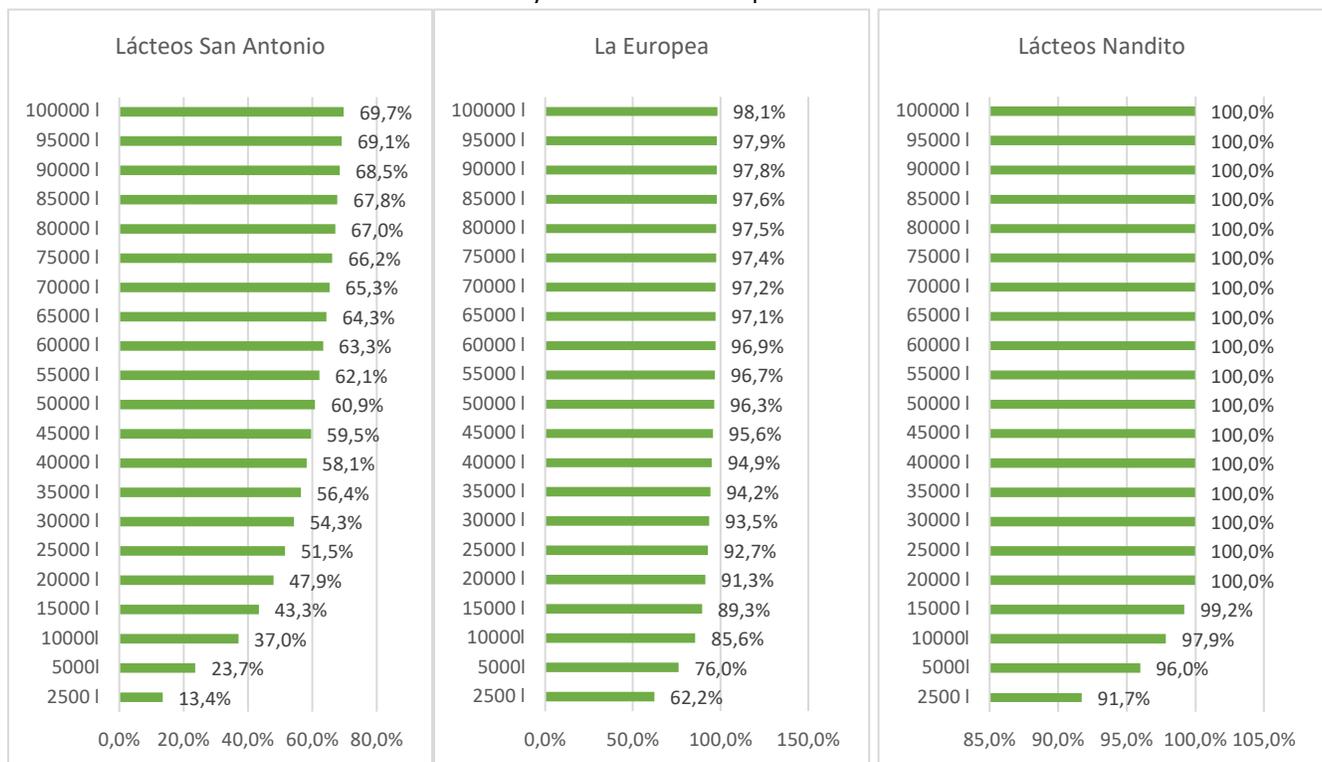
En la figura 7, de acuerdo con la satisfacción de la demanda del sistema de agua de lluvia para Lácteos San Antonio, se observa que conforme incrementa el tamaño de almacenamiento la satisfacción de la demanda es mayor (barras color tomate); sin embargo, este valor -a partir de 55.000 l- empieza a satisfacer la demanda en un porcentaje menor a pesar de que se cuenta cada vez con más de 5000 l. La diferencia entre la satisfacción es apenas entre 1 % y 2 %. Tal es el caso del almacenaje de 35.000 l con una demanda satisfecha del 49,00 %, en comparación con un almacenamiento de 50.000 l que a pesar que evidencia una diferencia de 15000 l solo satisface el 54,32 %, es decir, un 5,32 % de satisfacción adicional. En el caso del almacenamiento de 100.000 l la satisfacción es del 65,48 %, con una diferencia del 16 % en comparación con el de 35.000 l.

En cuanto a La Europea que por el área de captación se configura como una empresa mediana, reporta menor consumo de agua, por lo que con un tamaño de almacenaje de 10.000 l resulta más efectivo, en consideración de que permite satisfacer el 84,51 %, en comparación con un almacenaje de 20.000 l que apenas cubre el 91,08 %, lo anterior evidencia que conforme incrementa el tamaño de almacenaje, la diferencia en la satisfacción de la demanda es mínima.

De igual manera, en Lácteos Nandito muestra que los días satisfechos en el suministro son mayores al 90 % a partir del tamaño de almacenaje mínimo de 2500 l, pero no se evidencian diferencias significativas con el almacenaje mayor. En las tres empresas se puede optar por una alternativa de almacenaje menor para reducir costos, debido a la poca diferencia en la satisfacción de la demanda.

A continuación, en la figura 8, se presenta el análisis comparativo de la eficiencia del sistema para cada empresa.

Figura 8
Comparación de eficiencia entre almacenamiento
entre 2.500l y 100.000l en las empresas de análisis



Fuente: Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca (2022)

En la empresa Lácteos San Antonio se muestra que con un almacenaje entre 50.000 l o 100.000 l se lograría cubrir la demanda diaria de agua lluvia e incluso almacenarla, pero se debería analizar en cuanto al costo de implementación del sistema. En la empresa La Europea la eficiencia es mayor, conforme incrementa el tamaño de almacenaje, pero a partir de 20.000 l la diferencia en la eficiencia no es significativa. Al analizar los resultados de la empresa Lácteos Nandito, se identifica que la eficiencia del sistema en el almacenaje de 2500 l hasta 2000 l es de entre el 92 % y 99,2 %, pero, a partir de 25000 l es del 100 %; lo anterior es debido a que el consumo de agua de lluvia es menor que en las dos empresas anteriores, por tanto, podría optarse por un almacenaje pequeño a un menor costo, pero que cubriría gran parte de la demanda.

3.3. Costo de implementación del sistema

En los siguientes párrafos se presenta un análisis de costos de acuerdo a cada sistema de captación y almacenaje para cada empresa de análisis.

Cuadro 10
Detalle de las opciones de compra de almacenamiento de agua de lluvia para la empresa Lácteos San Antonio

Capacidad (litros)	Costo tanque (USD)	Costo de recolección, bombeo y distribución (USD)	Costo de mantenimiento (USD)	Costo total (USD)	Ahorro al año (USD)	Periodo de recuperación de la inversión (años)
USD2.500,00	USD 560,00	5,850,00	USD 20,00	USD 6.430,00	USD 464,99	13,83
5000l	USD 1.512,00	USD5,850,00	USD 80,00	USD 7.442,00	USD 773,62	9,62
10000l	USD 2.464,00	USD5,850,00	USD 120,00	USD 8.434,00	USD 1.213,06	6,95
15000 l	USD 3.976,00	USD5,850,00	USD 160,00	USD 9.986,00	USD 1.402,84	7,12
20000 l	USD 4.928,00	USD5,850,00	USD 200,00	USD 10.978,00	USD 1.526,13	7,19
25000 l	USD 6.440,00	USD5,850,00	USD 240,00	USD 12.530,00	USD 1.616,37	7,75
30000 l	USD 7.392,00	USD5,850,00	USD 280,00	USD 13.522,00	USD 1.676,90	8,06
35000 l	USD 8.904,00	USD5,850,00	USD 320,00	USD 15.074,00	USD 1.713,71	8,80
40000 l	USD 9.856,00	USD5,850,00	USD 360,00	USD 16.066,00	USD 1.736,17	9,25
45000 l	USD 11.368,00	USD5,850,00	USD 400,00	USD 17.618,00	USD 1.747,49	10,08
50000 l	USD 12.320,00	USD5,850,00	USD 440,00	USD 18.610,00	USD 1.755,00	10,60
55000 l	USD 13.832,00	USD5,850,00	USD 480,00	USD 20.162,00	USD 1.759,40	11,46
60000 l	USD 14.784,00	USD5,850,00	USD 520,00	USD 21.154,00	USD 1.761,42	12,01
65000 l	USD 16.296,00	USD5,850,00	USD 560,00	USD 22.706,00	USD 1.760,07	12,90
70000 l	USD 17.248,00	USD5,850,00	USD 600,00	USD 23.698,00	USD 1.755,75	13,50
75000 l	USD 18.760,00	USD5,850,00	USD 640,00	USD 25.250,00	USD 1.747,34	14,45
80000 l	USD 19.712,00	USD5,850,00	USD 680,00	USD 26.242,00	USD 1.736,77	15,11
85000 l	USD 21.224,00	USD5,850,00	USD 720,00	USD 27.794,00	USD 1.724,40	16,12
90000 l	USD 22.176,00	USD5,850,00	USD 760,00	USD 28.786,00	USD 1.709,25	16,84
95000 l	USD 23.688,00	USD5,850,00	USD 800,00	USD 30.338,00	USD 1.691,98	17,93
100000 l	USD 24.640,00	USD5,850,00	USD 840,00	USD 31.330,00	USD 1.673,93	18,72

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 10 se evidencia que, si se considera solo el ahorro de agua potable para solventar la inversión en la empresa Lácteos San Antonio, el tiempo para recuperar la inversión sería de entre 7 y 18 años.

A continuación, se presenta el análisis de costo del sistema de recolección de agua lluvia para la empresa La Europea.

Por otra parte, en la empresa La Europea se evidencia que a partir del almacenaje de 65.000 l el ahorro no permite soportar la inversión; pero en el almacenaje menor a este valor se identifica un tiempo de recuperación de la inversión de entre 19 y 1008 años. Lo anterior evidencia que solo con el ahorro en agua potable no se podría soportar la inversión.

Cuadro 11

Detalle de las opciones de compra de almacenamiento de agua de lluvia para la empresa La Europea

Capacidad (litros)	Costo tanque (USD)	Costo de recolección, bombeo y distribución (USD)	Costo de mantenimiento (USD)	Costo total (USD)	Ahorro al año (USD)	Periodo de recuperación de la inversión (años)
2.500 l	USD 560,00	USD 5.850,00	USD 20,00	6.430,00	USD 326,88	USD 19,67
5000 l	USD 1.512,00	USD 5.850,00	USD 80,00	USD 7.442,00	USD 344,20	USD 21,62
10000 l	USD 2.464,00	USD 5.850,00	USD 120,00	USD 8.434,00	USD 357,81	USD 23,57
15000 l	USD 3.976,00	USD 5.850,00	USD 160,00	USD 9.986,00	USD 338,13	USD 29,53
20000 l	USD 4.928,00	USD 5.850,00	USD 200,00	USD 10.978,00	USD 309,34	USD 35,49
25000 l	USD 6.440,00	USD 5.850,00	USD 240,00	USD 12.530,00	USD 277,20	USD 45,20
30000 l	USD 7.392,00	USD 5.850,00	USD 280,00	USD 13.522,00	USD 241,99	USD 55,88
35000 l	USD 8.904,00	USD 5.850,00	USD 320,00	USD 15.074,00	USD 205,89	USD 73,21
40000 l	USD 9.856,00	USD 5.850,00	USD 360,00	USD 16.066,00	USD 169,79	USD 94,62
45000 l	USD 11.368,00	USD 5.850,00	USD 400,00	USD 17.618,00	USD 133,70	USD 131,78
50000 l	USD 12.320,00	USD 5.850,00	USD 440,00	USD 18.610,00	USD 97,26	USD 191,34
55000 l	USD 13.832,00	USD 5.850,00	USD 480,00	USD 20.162,00	USD 59,60	USD 338,27
60000 l	USD 14.784,00	USD 5.850,00	USD 520,00	USD 21.154,00	USD 20,97	USD 1.008,82
65000 l	USD 16.296,00	USD 5.850,00	USD 560,00	USD 22.706,00	USD -18,25	USD -1.244,15
70000 l	USD 17.248,00	USD 5.850,00	USD 600,00	USD 23.698,00	USD -57,47	USD -412,36
75000 l	USD 18.760,00	USD 5.850,00	USD 640,00	USD 25.250,00	USD -96,69	USD -261,15
80000 l	USD 19.712,00	USD 5.850,00	USD 680,00	USD 26.242,00	USD -135,91	USD -193,09
85000 l	USD 21.224,00	USD 5.850,00	USD 720,00	USD 27.794,00	USD -175,13	USD -158,71
90000 l	USD 22.176,00	USD 5.850,00	USD 760,00	USD 28.786,00	USD -214,35	USD -134,30
95000 l	USD 23.688,00	USD 5.850,00	USD 800,00	USD 30.338,00	USD -253,57	USD -119,65
100000 l	USD 24.640,00	USD 5.850,00	USD 840,00	USD 31.330,00	USD -292,79	USD -107,01

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 12 se muestra el análisis de costo del sistema de recolección de agua lluvia para la empresa Lácteos Nandito.

Por último, en el cuadro 12 se muestra que la empresa Lácteos Nandito no podría sustentar la inversión a partir de 5000 l, y en el caso de 2500 l se pagaría en 84 años. Con ello, también se evidencia que solotomando en cuenta el valor del ahorro de agua potable no se podría sustentar la inversión en un sistema de recolección de agua de lluvia. En este contexto, la inversión dependería de la empresa y de la situación financiera en la que se encuentre.

Cuadro 12

Detalle de las opciones de compra de almacenamiento de agua de lluvia para la empresa Lácteos Nandito

Capacidad (litros)	Costo tanque (USD)	Costo de recolección, bombeo y distribución (USD)	Costo de mantenimiento (USD)	Costo total (USD)	Ahorro al año (USD)	Periodo de recuperación de la inversión (años)
2500 l	USD 560,00	USD 2125,00	USD 20,00	USD 2705,00	33,23	81,41
5000l	USD 1512,00	USD2125,00	USD 80,00	USD 3717,00	USD -24,31	-152,9
10000l	USD 2464,00	USD2125,00	USD 120,00	USD 4709,00	USD -63,21	-74,5
15000 l	USD 3976,00	USD2,125,00	USD 160,00	USD 6261,00	USD -102,43	-61,13
20000 l	USD 4928,00	USD2,125,00	USD 200,00	USD 7253,00	USD -141,99	-51,08
25000 l	USD 6440,00	USD2,125,00	USD 240,00	USD 8805,00	USD -181,99	-48,38
30000 l	USD 7392,00	USD2,125,00	USD 280,00	USD 9797,00	USD -221,99	-44,13
35000 l	USD 8904,00	USD2,125,00	USD 320,00	USD 11349,00	USD -261,99	-43,32
40000 l	USD 9856,00	USD2,125,00	USD 360,00	USD 12341,00	USD -301,99	-40,87
45000 l	USD 11368,00	USD2,125,00	USD 400,00	USD 13893,00	USD -341,99	-40,62
50000 l	USD 12320,00	USD2,125,00	USD 440,00	USD 14885,00	USD -381,99	-38,97
55000 l	USD 13832,00	USD2,125,00	USD 480,00	USD 16437,00	USD -421,99	-38,95
60000 l	USD 14784,00	USD2,125,00	USD 520,00	USD 17429,00	USD -461,99	-37,73
65000 l	USD 16296,00	USD2,125,00	USD 560,00	USD 18981,00	USD -501,99	-37,81
70000 l	USD 17248,00	USD2,125,00	USD 600,00	USD 19973,00	USD -541,99	-36,85
75000 l	USD 18760,00	USD2,125,00	USD 640,00	USD 21525,00	USD -581,99	-36,99
80000 l	USD 19712,00	USD2,125,00	USD 680,00	USD 22517,00	USD -621,99	-36,2
85000 l	USD 21224,00	USD2,125,00	USD 720,00	USD 24069,00	USD -661,99	-36,36
90000 l	USD 22176,00	USD2,125,00	USD 760,00	USD 25061,00	USD -701,99	-35,7
95000 l	USD 23,688,00	USD2,125,00	USD 800,00	USD 26613,00	USD -741,99	-35,87
100000 l	USD 24,640,00	USD2,125,00	USD 840,00	USD 27605,00	USD -781,99	-35,3

Fuente: elaboración propia

3.4. Discusión

En la investigación se evidenció que las precipitaciones en la ciudad de Cuenca no son lineales, por el contrario presentan diferentes fluctuaciones que hacen que la planificación de un sistema de recolección de agua sea necesaria, en función del área de captación y el destino que se le otorgará. En cuanto al área de captación de las tres empresas industriales evaluadas en la ciudad de Cuenca, se identificó que en una superficie de 5292,14 m², 6040,13 m² y 397,07 m², respectivamente, se pueden recolectar correspondientemente como máximo 167,20 m³, 190 m³ y 12,54 m³ en un día de lluvia, la que fácilmente se podría utilizar en actividades que suplementen el uso de agua potable.

Por otra parte, en cuanto al consumo de agua potable se identificó que al comparar dos empresas (Lácteos San Antonio y La Europea) se evidencia que existe una gran diferencia de consumo de agua potable, a pesar de que las dos tienen un tamaño muy similar, en cuanto a infraestructura. De igual manera, se evidenció un factor en común en el análisis del sistema de recolección de agua que implicó que un tamaño de almacenaje mayor no garantizaba un incremento en la satisfacción de la demanda o en la eficiencia del sistema. Por lo que, no se podrían estandarizar los resultados en cuanto al sistema de recolección de agua lluvia, sin realizar previo un análisis detallado.

Estos resultados concuerdan con la investigación de Pérez (2019), quien diseñó un sistema de recolección de agua lluvia para dos municipios de Colombia, en función de las precipitaciones y el sistema de captación; entre los principales hallazgos destaca que el área de captación y la demanda de agua lluvia son variables determinantes en un sistema de captación, por tal razón es importante que en cada espacio que se desee implementar un sistema de recolección de agua lluvia se debe realizar un estudio independiente, incluso con la metodología apropiada de acuerdo a la realidad en la que se desarrolla.

En lo referente al costo de implementación del sistema de recogida de agua de lluvia, representa un valor entre 6.000 USD y 30.000 USD para las empresas Lácteos San Antonio y La Europea, pero para la empresa Lácteos Nandito corresponde a un valor entre 2.000 USD y 27.000 USD, lo anterior debido a la diferencia en el costo del sistema de bombeo y abastecimiento. A pesar de que Lácteos San Antonio y La Europea tienen los mismos costos, en el caso de La Europea la inversión que se recupera con el ahorro en el consumo solo se sustenta hasta un tamaño de almacenaje de entre 2500 l y 65.000 l, mientras que en Lácteos San Antonio cualquier tamaño de instalación se amortiza en un periodo de entre 6 y 13 años. Por otra parte, en la empresa Lácteos Nandito el precio del sistema de recolección, bombeo y distribución es menor, pero debido al tamaño y el consumo menor, el sustento de la inversión es para el tamaño de menor capacidad de almacenaje, pero que satisface más del 90 % de la demanda.

Con ello es importante considerar que, independientemente de si resulta o no rentable, representa una acción que contribuye al desarrollo sostenible en consideración de que el agua potable de Cuenca se estima que incrementa el valor por la disminución de fuentes y el incremento de la población (Molina et al., 2018).

Por otra parte, se identificó que en una empresa industrial de alimentos el agua lluvia puede suplementar la demanda de agua potable en el uso de actividades domésticas, pero no en el proceso productivo, por lo que se estableció como objetivos sustituir apenas el 1% del total del consumo de agua potable. En este sentido, es importante considerar que el agua lluvia no es apta para el consumo, por lo tanto se prevé la demanda en diferentes actividades como inodoros, riego de jardines, limpieza de espacios según Ramírez & Buriticá (2021). A pesar de que el agua lluvia reemplazaría el agua potable en pocas actividades, significa un ahorro y un aporte al desarrollo sostenible (Salazar, 2019).

En este contexto, las pocas posibilidades de reemplazo del agua lluvia por el agua potable en las empresas de análisis originó que el ahorro económico no permita soportar la inversión en un sistema de captación de agua lluvia. En tanto que el ahorro en el consumo de agua potable solo permitiría cubrir la inversión del sistema mientras mayor sea el consumo de agua lluvia. De no ser el caso, la empresa debería considerar el sistema como un proyecto de inversión y lo financia con recursos propios o de externos.

En este aspecto, es importante considerar que, independientemente de si resulta o no rentable, representa una acción que contribuye al desarrollo sostenible en consideración de que el agua potable de Cuenca se estima que incrementa el valor por la disminución de fuentes y el incremento de la población (Molina et al., 2018).

En concordancia se evidencia el estudio de León, Córdoba, & Carreño (2016), quienes realizaron una revisión bibliográfica sobre la captación y aprovechamiento de agua de lluvia en zonas urbanas y aeropuertos. Los resultados muestran que el agua de lluvia se utiliza en diferentes necesidades básicas como inodoros, orinales, lavado de pisos y riego de jardines, donde se aplican métodos que permiten la planificación que considere la capacidad óptima de recolección y almacenamiento. Entre los principales beneficios se distingue la disminución del consumo de agua potable, por tanto, muestra beneficios tanto económicos como ambientales, así como en la imagen frente a la sociedad.

4. Conclusiones

Se evidencia que el consumo se ajusta a las características de la empresa y no al tamaño de la infraestructura, lo que hace que resulte necesario el análisis de cada espacio en el que se pretenda captar agua de lluvia, sería un error estandarizar los resultados en cuanto al tamaño de almacenaje y el sistema a instalar.

En lo referente al tamaño, se identificó que a partir de cierto tamaño la diferencia entre eficiencia y satisfacción de demanda no es significativa, lo que se adjudica a las nulas precipitaciones de ciertos días y al incremento o disminución de consumo.

Se evidenció que mientras mayor sea el consumo de agua, más ahorro de consumo de agua de lluvia y posibilidad de sustento de la inversión en el sistema de recolección. Por tanto en los tres casos de estudio, que suplirán solo el 1% del total de consumo de agua potable con agua de lluvia, es extenso el tiempo requerido para recuperar la inversión únicamente con el consumo, pero las empresas deberán considerar que el beneficio no solo es el ahorro en el consumo de agua potable, sino también implica una acción de responsabilidad social que mejoraría su imagen ante la sociedad. Por tanto, se podría considerar como una inversión a largo plazo, donde el retorno no solo sería monetario, sino también social y ambiental, en consideración de que la disminución del consumo de agua potable representaría una acción de responsabilidad social de la empresa.

Como recomendación de los autores para las empresas Lácteos San Antonio y La Europea, se sugiere incrementar el porcentaje de uso de agua de lluvia. El 1 % referido en la investigación no permite cubrir la inversión, con ello se debería realizar un análisis para implementar agua lluvia en el proceso productivo a través de la eliminación de sustancias contaminantes. Lo anterior permitirá incrementar la demanda diaria de agua lluvia y el ahorro del consumo de agua potable para sustentar la inversión.

Referencias bibliográficas

- Abdulla, F., & Al-Shareff, A. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3), 195-207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.013>
- ANA. (2018). *Cuentas ambientales y económicas del agua en el Perú*. Chorrillos: Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4705/ANA0003201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Avelar, J., Sánchez, J., Domínguez, A., De la Cruz, C., & Mancilla, O. (2019). Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. *Idesia (Arica)*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000302>
- Avello, R., & Seisdedo, A. (2017). El procesamiento estadístico con R en la investigación científica. *MediSur*, 15(5), 583-586. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2017000500001
- Castillo, M., Homero, F., Vigorena, C., Díaz, R., & Espindola, C. (2014). Optimización de la distribución de agua potable rural mediante el uso de la programación lineal. *Ingeniería Industrial y Nuevas Tendencias*, 5(13), 7-17. <https://www.redalyc.org/pdf/2150/215045726002.pdf>
- Comisión Nacional de Agua. (2020). *Estadísticas del Agua en México 2019*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- ETAPA EP. (2017). *Estudio ambiental (ExPost) del sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento*. <https://maeazuay.files.wordpress.com/2017/03/estudio-ambiental-expost-del-sistema-de-abastecimiento-de-agua-potable-para-la-ciudad-de-cuenca-en-su-etapa-de-operacion-y-mantenimiento.pdf>
- ETAPA EP. (2019). *Informe de gestión. Administración 2014-2019*. <https://www.etapa.net.ec/Portals/0/TRANSPARENCIA/Literal-m/Informe%20de%20Labores%20para%20Municipio%20.pdf?ver=2019-10-14-174539-367×tamp=1571093305660>

- ETAPA EP. (2022). <https://www.etapa.net.ec/servicios-en-linea/valores-a-pagar>
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile : Organización de las Naciones Unidas.
- Guerrero, H., García, D., & Seguí, L. (2020). Productividad industrial del agua en México: análisis de eficiencia para ocho sectores. *Tecnología y ciencias del agua*.
- Hernández, D., & Chaparro, T. (2020). Tratamiento de agua lluvia con fines de consumo humano. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 30(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rcin.4409>
- Kucukkaya, E., Kelesoglu, A., Gunaydin, H., Gulenay , A., & Umit, U. (2020). Desing of a passive rainwater harvesting systems with green building approach. *International Journal of sustainable energy*. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1801681>
- León, A., Córdoba, J., & Carreño, U. (2016). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Tecnura*, 20(50), 141-153. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a10>
- López, G., & Castro , N. (2017). Optimización del plan de producción. Estudio de caso carpintería de aluminio. *Universidad y Sociedad*, 9(1), 178-186. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v9n1/rus26117.pdf>
- Martínez, A. (2019). La regulación del abastecimiento de agua en Ecuador. Evolución histórica y realidad actual. *Sostenibilidad económica, social y ambiental*, 1, 31-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.14198/Sostenibilidad2019.1.03>
- Molina, E., Quesada, F., Calle, A., Ortiz, J., & Orellan, D. (2018). Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*(20). <https://www.redalyc.org/journal/5055/505555586003/html/>
- Morote, Á., & Hernández, M. (2017). El uso de aguas pluviales en la ciudad de Alicante. De viejas ideas a nuevos enfoques. *Papeles de geografía*, 7-25. <https://www.redalyc.org/pdf/407/40754638001.pdf>
- OCDE. (2021). *Gobernanza del agua en Perú*. París: OECD publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/f826f55f-es>.
- Ortiz, D., Gomez, W., Anaya, A., & Yurany, A. (2020). Análisis del aprovechamiento del agua lluvia para uso residencial en Colombia. *Geoscience*. https://www.researchgate.net/publication/347514816_ANALISIS_DEL_APROVECHAMIENTO_DEL_AGUA_LUVIA_PARA_USO
- Peña, D. (2019). Evaluación de la factibilidad de cosechar agua lluvia en la ciudad de Cuenca, como método de gestión ambiental para ahorrar agua potable. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Pérez, A., Palacios, O., Anaya, M., & Tovar, J. (2017). Agua de lluvia para consumo humano y uso doméstico en San Miguel Tulancingo, Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017000601427
- Pérez, C. (2019). Diseño de sistemas de recolección de agua lluvia, una apuesta por la conservación. *Espirales revista multidisciplinaria de investigación científica*, 3(28).

<https://www.redalyc.org/journal/5732/573263327002/html/#:~:text=Este%20sistema%20de%20recolecti%C3%B3n%20permite,proceso%20en%20el%20proyecto%20de>

Ramírez, C., & Buriticá, C. (2021). Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá. *Tecnura*, 25(69), 171-195.

Rosete, A. (2018). Reformulación eficiente del problema de programación lineal de agregación de rankings. *Ingeniería Industrial*, 39(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362018000300250

Salazar, L. (2019). Implementación de un sistema de captación y filtración de agua lluvia en la vereda Verdín del Socorro, Santander. Manizales: Universidad de Manizales.

Salinas, J., Carvazos, R., & Vera, J. (2016). Evaluación de un sistema de captación de agua lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como medio alternativo. *Ingeniería*, 20(1), 1-13. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927001.pdf>

Solano, C., Gonzaga, F., Espinoza, F., & Espinoza, J. (2017). Sistema de captación de agua lluvia para uso doméstico, Isla Jambelí, cantón Santa Rosa. *Revista CUMBRES*, 151-159.

UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: El valor del agua*. París: Organización de las Naciones Unidas.

UNICEF. (2019). *Nota estratégica y teoría del cambio. Programa WASH Ecuador 2019-2022*. Naciones Unidas. https://www.unicef.org/ecuador/media/3736/file/Ecuador_2019-2022_WASH_Strategy_Note.pdf



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0 Internacional