

Propuesta de herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para asentamientos rurales andinos, considerando criterios técnicos, sociales y económicos.

Diana Lucía Prieto Jiménez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD. En Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural.

Codirectora

Sully Gómez Isidro

PhD en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

“Es tan lindo saber que usted existe, uno se siente vivo...”

M. Benedetti

...A mis papás, Erasmo y María Helena, por supuesto.

Agradecimientos

A mis papás, Erasmo y María Helena, a mis hermanos, Fernando y Natalia, y a mis sobrinos, Emma, Juan Lucas y Sara. Con su apoyo y amor incondicional han forjado a la persona que soy hoy, y son fuente constante de inspiración en mi vida.

Al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) y al proyecto 2534 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS): “Estudio integral del agua en la Mesa de Los Santos” por su apoyo durante el desarrollo del proyecto. A las profesoras Isabel Domínguez y Sully Gómez por su guía, paciencia y disposición durante todo este proceso. A todos los profesores que contribuyeron en la realización del proyecto. A los estudiantes de pregrado y posgrado vinculados a esta investigación por su acompañamiento durante diferentes fases. A los habitantes de Garbanzal por su colaboración y buena voluntad durante las visitas a la vereda.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Justificación	18
2. Marco de referencia	21
2.1. Marco teórico	21
2.1.1. Abastecimiento de agua rural en la zona andina colombiana	21
2.1.2. Aprovechamiento de aguas lluvias.....	22
2.1.3. Análisis multicriterio.....	23
2.2. Estado del arte	25
2.2.1. Aceptación social de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias	25
2.2.2. Factores técnicos de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias	28
2.2.3. Costos relacionados a los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias	31
2.2.4. Análisis multicriterio.....	34
2.2.5. Vacío en el conocimiento.....	35
3. Objetivos	37
3.1. Objetivo general	37
3.2. Objetivos específicos.....	37
4. Metodología.....	38
4.1. Identificación y selección de subcriterios de evaluación.....	38

4.2. Integración de dimensiones en una herramienta multicriterio.....	39
4.3. Validación de la herramienta en un caso de estudio.....	42
4.3.1. Selección de la zona de estudio	42
4.3.2. Recopilación de información socioeconómica, infraestructura y prácticas relacionadas con el agua.....	46
4.3.3. Recopilación de información hidroclimatológica.....	48
4.3.4. Recolección de información sobre la calidad del agua.....	49
4.3.5. Formulación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias	52
4.3.6. Evaluación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias utilizando la herramienta multicriterio.....	57
4.4. Análisis de sensibilidad	58
5. Resultados y discusión.....	59
5.1. Identificación y selección de criterios de evaluación	59
5.1.1. Subcriterios Económicos.	61
5.1.2. Subcriterios Sociales.....	61
5.1.3. Subcriterios Técnicos.	63
5.2. Integración de dimensiones en una herramienta multicriterio.....	65
5.3. Validación de la herramienta en un caso de estudio.....	68
5.3.1. Información socioeconómica, infraestructura y prácticas relacionadas con el agua	68
5.3.2. Recopilación de información hidroclimatológica.....	78

5.3.3. Recolección de información sobre la calidad del agua.....	83
5.3.4. Formulación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias	86
5.3.5. Evaluación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias utilizando la herramienta multicriterio.....	100
5.3.6. Análisis de Sensibilidad.....	103
5.3.7. Discusión sobre la aplicabilidad de la herramienta.	106
6. Conclusiones.....	111
7. Recomendaciones	113
Referencias.....	114
Anexos	131

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Escala de Saaty utilizada para comparar los criterios y subcriterios de evaluación por pares.	40
Tabla 2. Información de estaciones de monitoreo cercanas a la zona de estudio.	48
Tabla 3. Métodos y técnicas utilizados para medir parámetros de calidad.	51
Tabla 4. Detalles de los subcriterios seleccionados para evaluar sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.	60
Tabla 5. Calificación de los ítems del subcriterio mantenimiento.	64
Tabla 6. Ponderación de los criterios y subcriterios de evaluación.	67
Tabla 7. Información demográfica de los habitantes y características de propiedad de las viviendas de la zona.	69
Tabla 8. Información sobre usos y demanda de agua en las viviendas encuestadas.	71
Tabla 9. Percepciones sobre el agua lluvia de las viviendas encuestadas.	72
Tabla 10. Información de infraestructura y prácticas de mantenimiento de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias de las viviendas encuestadas.	74
Tabla 11. Porcentaje de datos faltantes de las estaciones cercanas a la zona de estudio.	78
Tabla 12. Medias y desviaciones estándar de la precipitación mensual de la estación “La Mesa”, para cada década.	81
Tabla 13. Resultados de los análisis de calidad de las muestras de agua lluvia tomadas.	83
Tabla 14. Tipologías de viviendas de la zona de estudio, clasificadas según la combinación de usos dados al agua lluvia.	86

Tabla 15. Características generales de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos.....	89
Tabla 16. Características recomendadas para las capas del filtro lento de arena propuesto.....	99
Tabla 17. Matriz de decisión con las calificaciones de cada alternativa en cada uno de los subcriterios de evaluación.....	103

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Mapa de la zona de estudio y ubicación de las estaciones hidroclimatológicas.	44
Figura 2. Cartografía social realizada durante la exploración inicial de la zona de estudio.	45
Figura 3. Tanque de almacenamiento de agua lluvia en la zona de estudio.	46
Figura 4. Ubicación de las viviendas muestreadas.	50
Figura 5. Detalle del proceso de filtrado de subcriterios.	59
Figura 6. Distribución de expertos según el área de experticia.	66
Figura 7. Evidencia fotográfica de algunas de las fuentes de agua disponibles en la zona de estudio.	72
Figura 8. Evidencia fotográfica de componentes de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias existentes.	75
Figura 9. Serie de lluvias anuales acumuladas y medias de cada década de la estación La Mesa (1974 – 2021).	80
Figura 10. Serie de lluvias mensuales de la estación La Mesa (1974 – 2021).	81
Figura 11. Ciclo anual de precipitación estación La Mesa (1974 – 2021).	82
Figura 12. Usos y demanda de agua considerados para cada alternativa de sistema de aprovechamiento de aguas lluvias propuesto.	88
Figura 13. Componentes del tratamiento primario propuesto para las tres alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos.	93
Figura 14. Gráfica de eficiencia vs. volumen del componente de almacenamiento de las tres alternativas de sistema de abastecimiento de aguas lluvias propuestas.	95

Figura 15. Plano isométrico de los aparatos sanitarios de la vivienda y del trazado propuesto de la red hidráulica de la vivienda tipo.....	97
Figura 16. Puntajes de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos ante la variación de la ponderación del criterio social.....	104
Figura 17. Puntajes de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos ante la variación de la ponderación del criterio técnico.....	105
Figura 18. Puntajes de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos ante la variación de la ponderación del criterio económico.....	106
Figura 19. Diagrama del proceso para la utilización de la herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuesta.....	109

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Encuesta realizada a expertos para la comparación por pares de criterios y subcriterios.	131
Anexo B. Mapa social realizado por habitantes de la zona.	139
Anexo C. Formato de las encuestas realizadas a los habitantes de la vereda.	140
Anexo D. Formato de las encuestas de subcriterios sociales y diagramas de las alternativas....	154
Anexo E. Requerimientos del cultivo calculados por el software CROPWAT.....	158
Anexo F. Detalle del cálculo de las pérdidas dentro de la red de instalaciones hidrosanitarias de la vivienda tipo.....	159
Anexo G. Detalle del cálculo de las pérdidas y requerimientos de bombeo.....	163
Anexo H. Flujo de caja con la estimación de costos y beneficios descontados de cada alternativa.	165

Resumen

Título: Propuesta de herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para asentamientos rurales andinos, considerando criterios técnicos, sociales y económicos *

Autor: Diana Lucia Prieto Jiménez **

Palabras Clave: Captación de agua de lluvia, sostenibilidad, análisis multicriterio, provisión de agua, zonas rurales

Descripción: Los desafíos globales del suministro de agua han promovido alternativas descentralizadas como los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia (SAALL). Las exigencias de sostenibilidad de SAALL implican criterios sociales, técnicos y económicos en la planificación. Generalmente, en las zonas rurales, el suministro de agua es más complejo debido a los múltiples usos del agua, la dispersión de los hogares y las economías de baja escala. Esta investigación propone una herramienta multicriterio para la selección de SAALL en zonas rurales, considerando criterios sociales, técnicos y económicos. La herramienta se desarrolló identificando sistemáticamente subcriterios, su jerarquización a través del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), y una validación de un caso de estudio utilizando la Técnica de Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS). Se identificaron siete subcriterios: dos sociales, tres técnicos y dos económicos. La jerarquía de criterios fue social (49.7%), técnica (26.4%) y económica (23.9%). La validación de herramienta en una zona rural incluyó la evaluación tres alternativas propuestas: 1) usos domésticos potables (P) y no potable (NP); 2) P, NP, riego de cultivos y cría de pollos para autoconsumo; y 3) P, NP y cría de pollos para la venta. Los resultados muestran la importancia de integrar subcriterios de las tres dimensiones en la selección de SAALL. El análisis de sensibilidad mostró la consistencia y robustez de la herramienta. El estudio proporciona una metodología para evaluar y priorizar los SAALL, atrayendo a los formuladores de políticas, ingenieros y profesionales que facilitan la gestión del agua y los procesos de suministro en áreas rurales. Está alineado con el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la eliminación de la pobreza (ODS1), la buena salud y el bienestar (ODS3), el suministro de agua (ODS6), las comunidades sostenibles (ODS11) y la adaptación al cambio climático (ODS13). (SDG13).

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Maestría en Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera. PhD. En Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural. Codirectora: Sully Gómez Isidro. PhD en Ingeniería.

Abstract

Title: Proposal for a selection tool for rainwater use systems for Andean rural settlements, considering technical, social and economic criteria.*

Author: Diana Lucia Prieto Jiménez**

Key Words: Rainwater harvesting, sustainability, multicriteria analysis, water provision, rural areas.

Description: Global water provision challenges have promoted decentralized water supply alternatives such as Rainwater Harvesting Systems (RWHS). RWHS sustainability demands involve social, technical, and economic criteria in planning. Generally, in rural areas, water provision is more complex due to multiple uses of water, scattering of households, and low economies of scale. This research proposes a multicriteria tool for selecting RWHS in rural areas, considering social, technical, and economic criteria. The tool was developed by systematically identifying subcriteria, their hierarchization through Analytical Hierarchy Process (AHP), and a case study validation through Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Seven subcriteria were identified: two social, three technical, and two economic. The hierarchy of criteria was social (49.7%), technical (26.4%), and economic (23.9%). Tool validation in a rural area included the evaluation of three alternatives proposed: 1) Potable domestic uses (PD) and non-potable (NPD); 2) PD, NPD, irrigation of crops and chicken farming for self-consumption; and 3) PD, NPD and chicken farming for sell. The results show the importance of integrating subcriteria from the three dimensions in selecting RWHS. The sensitivity analysis showed the tool's consistency and robustness. The study provides a methodology to assess and prioritize RWHS, appealing to policymakers, engineers, and practitioners facilitating water management and supply processes in rural areas. It is aligned with the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs) related to no poverty (SDG1), good health and well-being (SDG3), water provision (SDG6), sustainable communities (SDG11), and climate change adaptation (SDG13).

* Degree work

** Industrial University of Santander. Master's degree in civil engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Ph.D. In Agriculture, Food and Rural Development. Co-director: Sully Gómez Isidro. PhD in Engineering.

Introducción

El agua es un recurso indispensable para la sociedad, ya que ocupa un papel primordial en la rutina diaria de las personas (Lani et al., 2018). Actualmente, muchos de los sistemas de suministro de agua en el mundo presentan inconvenientes para abastecer a todos los usuarios (Imteaz et al., 2012). Se estima que, en el 2017, 2.2 mil millones de personas carecían de servicios básicos de agua potable, esto puede ser debido al aumento de la demanda de agua (Bocanegra et al., 2014 y UNESCO, 2020). Por ejemplo, en los últimos cien años el uso de agua se multiplicó por un factor de seis y sigue creciendo a razón del 1% anual (UNESCO, 2020), ocasionando la disminución de la disponibilidad de agua en el mundo, presentándose escasez, que, en algunas regiones, como Oriente Medio y África del Norte, podría costar entre el 6% y el 14% de su Producto Interno Bruto para el 2050 (FAO y World Bank Group, 2018). Además, en 2014, 1.6 mil millones de personas experimentaban escasez económica de agua, es decir no contaban con infraestructura de abastecimiento suficiente. En contraste, en 2020, un número aproximado de cuatro mil millones de personas vivían con severa escasez física de agua, es decir, no contaban con recursos hídricos suficientes, durante por lo menos un mes del año (UNESCO, 2020). Por lo tanto, el estrés hídrico es uno de los mayores desafíos que afronta el mundo actualmente y se espera que a futuro se agudice en contextos en que ya se padece o que empiece a experimentarse en lugares donde actualmente hay abundancia de agua. Se proyecta que para 2050, aproximadamente 685 millones de personas experimentarán una disminución de agua de como mínimo un 10% (UNESCO, 2020).

Las causas principales de esta problemática son: i) aumento de la población (Khastagir y Jayasuriya, 2010; Imteaz et al., 2012; Bocanegra et al., 2014; Nnaji et al., 2017 y Lani et al., 2018); ii) patrón de urbanización que aumenta la densidad poblacional y la presión sobre los recursos hídricos en ciertas zonas (Nairn, 2003; Bocanegra et al., 2014 y Sample

y Liu, 2014); y iii) el cambio climático. En relación con el cambio climático, el aumento de la temperatura aumenta la demanda de agua de las personas, y disminuye la disponibilidad del recurso; altera el ciclo hidrológico y los patrones de lluvia, presentándose precipitaciones más fuertes que desencadenan en inundaciones o, en el otro extremo, periodos largos sin lluvias que ocasionan sequías cada vez más graves y largas (Imteaz et al., 2012; Bocanegra et al., 2014; Lani et al., 2018 y UNESCO, 2020). Se prevé que las consecuencias del cambio climático ocurran especialmente en zonas tropicales, donde se encuentra una gran parte de los países en desarrollo. Por ejemplo, en América Latina y el Caribe los cambios en los patrones de lluvias y los eventos extremos ya reducen la disponibilidad de agua y se estima que continuarán. Esta problemática afecta principalmente regiones vulnerables, especialmente, zonas rurales donde la limitación de agua también puede representar una limitación económica.

Ante estos desafíos, resulta esencial planificar infraestructuras hidráulicas flexibles y adaptables a las diferentes situaciones, lo que implica el desarrollo de infraestructura capaz de afrontar los cambios futuros (UNESCO, 2020). Esta problemática ha enfocado la atención hacia las prácticas de gestión sostenible de agua (Seo et al., 2012; Gurung y Sharma, 2014 y Semaan et al., 2020) que aseguren la protección y uso eficiente del recurso hídrico (Okoye et al. 2015), entre ellas el Aprovechamiento de Aguas Lluvias (AALL) (Campisano y Modica, 2012; Imteaz et al., 2012; Okoye et al., 2015 y Silva et al., 2015).

El AALL se practicaba en civilizaciones antiguas, especialmente para la agricultura, remontándose al 10,000 a.C. A pesar de que en muchos casos estos sistemas pueden implementarse empíricamente, como se hacía en la antigüedad (Abdulla y Al-Shareef, 2009; Ammar et al., 2016 y Toosi et al., 2020), el diseño y desarrollo de infraestructura para recolectar agua lluvias requiere

de un proceso en el que se tomen en cuenta múltiples dimensiones como lo son: i) social, ya que la percepción de las personas acerca del agua lluvia puede representar un impedimento o una fuerza impulsora de la implementación del sistema pues los usuarios cumplen el papel de administradores y propietarios; ii) técnica, ya que se debe evaluar si la zona en que se quiere implementar el sistema tiene potencial para la recolección de agua lluvia, considerando características específicas del contexto y; iii) económica, pues el sistema y en especial el tanque de almacenamiento pueden tener costos elevados que deberán ser asumidos por el usuario (Domènech y Saurí, 201; Mankad y Tapsuwan, 2011; Gurung et al., 2012; Domènech et al., 2013; Khan et al., 2017 y Semaan et al., 2020).

En esta investigación se desarrolla una herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias basada en el análisis multicriterio considerando criterios sociales, técnicos y económicos, que fue validada teniendo como caso de estudio la vereda Garbanzal, localizada en el municipio de Los Santos, Santander.

El documento se organiza en 8 secciones. La presente sección introductoria. La sección de justificación enmarca la importancia de considerar cada criterio y la relevancia de esta investigación. Luego, se presenta un marco de referencia que se divide en dos secciones, el marco teórico donde se describen aspectos relacionados con el abastecimiento de agua rural, el aprovechamiento de aguas lluvias y el análisis multicriterio; y el estado del arte, que presenta una revisión de literatura sobre los tres criterios considerados en este estudio y sobre el análisis multicriterio aplicado al tema de las aguas lluvias, para finalizar con el vacío del conocimiento que aborda esta investigación. La sección cuatro presenta los objetivos general y específicos del estudio. En la sección de metodología se describen los procedimientos llevados a cabo en este estudio, y está dividida en 3 subsecciones, una por cada objetivo específico, que incluyen la

identificación de subcriterios de evaluación en la literatura, la integración de dimensiones, validación y evaluación en un caso de estudio utilizando herramientas multicriterio. En la sección de resultados y discusión se presentan y comentan los principales hallazgos del estudio para cada una de las tres subsecciones mencionadas. La sección de conclusiones resume los resultados clave del estudio y las recomendaciones brindan sugerencias para futuros estudios.

1. Justificación

Los grandes desafíos a los que se enfrenta el mundo actualmente en torno al suministro de agua han impulsado la popularidad del AALL como alternativa para la gestión sostenible del agua (Gurung y Sharma, 2014 y Muklada et al., 2016). En países en desarrollo, el AALL representa una fuente de agua confiable, versátil, económica en comparación con sistemas tradicionales y que no consume energía en transporte, ya que es recogida in situ (Cowden et al., 2008 y Chiu et al., 2009). En contextos donde hay escasez de agua, el AALL puede representar la fuente principal de abastecimiento o una fuente complementaria para aumentar la disponibilidad del recurso (Muklada et al., 2016); mientras que en contextos donde el agua es abundante, el AALL se usa para el control de escorrentía, prevención de inundaciones y ahorro de energía asociada al transporte (Chiu et al., 2009 y Muklada et al., 2016). A pesar de sus múltiples beneficios, los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias tienen dos desventajas asociadas a su carácter de sistemas descentralizados: la primera, es que el mantenimiento es responsabilidad del usuario; la segunda, es que todos los costos asociados al sistema deben ser asumidos por el usuario. Diferentes estudios han encontrado que estos dos factores desestimulan a las personas de implementar estos sistemas (Ward et al., 2013; Gurung y Sharma, 2014 y Lawrence y Lopes, 2016).

El estudio de aceptación social puede ofrecer información acerca de barreras e incentivos de las personas respecto a la implementación de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAALL). Uno de los problemas identificados en torno a este tema es la percepción de riesgo de las personas, que consideran al agua lluvia más peligrosa a medida que su uso se vuelve más personal; adicional a este problema, en la literatura se reportan brechas de conocimiento del público en general en el tema del agua lluvia, por lo que su consideración en el diseño de SAALL es vital (Domènech y Saurí, 2011). Asimismo, cuando se plantea implementar un SAALL, otra componente que debe considerarse es la componente técnica, ya que debe verificarse si las

condiciones climatológicas, de demanda de agua y físicas de la zona permiten al SAALL almacenar suficiente agua para abastecer a los usuarios. Además, las zonas rurales dispersas, en especial en países menos desarrollados como Colombia, se caracterizan por ingresos bajos e inestabilidad económica. En este contexto, la estimación de los costos asociados a los SAALL se convierte en otro factor relevante en el diseño.

Por otro lado, cuando se planea implementar un SAALL, los entes encargados de planeación se enfrentan a la necesidad de tomar decisiones acerca de la gestión del agua y de los criterios de selección que se deben priorizar para decidir sobre cuál es la mejor opción; además, en contextos rurales se tienen desafíos adicionales entre los que se encuentran actividades socioeconómicas de alta demanda hídrica, baja cobertura de infraestructura para servicios básicos, bajos recursos económicos, entre otros, que condicionan la toma de decisiones. En estos casos donde se tiene una alta dificultad al momento de tomar una decisión debido a la complejidad del contexto, el análisis multicriterio representa una herramienta que apoya estas decisiones, especialmente cuando hay que tomar en cuenta varias dimensiones de una problemática, como es el caso de la implementación de SAALL (Domènech et al., 2013 y Melville et al., 2016).

El análisis multicriterio ha sido ampliamente utilizado en múltiples campos incluyendo la gestión del recurso hídrico, gestión forestal, producción de energía, protección ambiental, entre otros. En el campo de la gestión del agua, la sostenibilidad se ha convertido en un objetivo primordial a nivel mundial, lo que requiere enfoques multidimensionales para utilizar eficientemente los escasos recursos hídricos disponibles. Además, el análisis multicriterio se ha aplicado en la solución de problemas de escasez de agua, manejo del uso del agua, calidad, ecosistemas hídricos, riesgo de inundaciones y también para resolver problemas combinados de agua, evidenciando su gran contribución en la gestión sostenible del agua. Por lo que el análisis multicriterio es una

herramienta técnica relevante para abordar los desafíos de gestión de los recursos hídricos (Gebre et al., 2021).

Por ello, esta investigación desarrolló una herramienta de selección de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias que se basa en el análisis multicriterio considerando criterios sociales, técnicos y económicos y que fue evaluada en un caso de estudio localizado en un asentamiento rural del municipio de Los Santos, Santander. La herramienta propuesta permite decidir la mejor configuración de los sistemas, teniendo en cuenta criterios sociales, técnicos y económicos. La herramienta tiene potencial para apoyar la toma de decisiones acerca de la gestión descentralizada del agua, específicamente del AALL, en contextos rurales; y además aporta a la base del conocimiento acerca de la formulación y selección de alternativas de SAALL, así como de subcriterios de evaluación de estos. Este proyecto de investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Estudio Integral del Agua en la Mesa de los Santos”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) con código 2534.

2. Marco de referencia

En este capítulo se presenta la información relevante para el desarrollo de esta investigación. El capítulo se divide en dos secciones, en la primera se exponen conceptos que fundamentan el trabajo, y en la segunda sección se muestra el estado de actual de las investigaciones en torno al tema. Se finaliza con un breve resumen de los principales hallazgos de la revisión de literatura y el vacío de conocimiento encontrado.

2.1. Marco teórico

En esta sección inicialmente se abordan aspectos relativos al acceso al agua en contextos rurales, centrándose en la zona andina de Colombia; posteriormente se discute sobre el AALL, sus beneficios, usos y componentes básicos. Por último, se define el análisis multicriterio y se explican los métodos encontrados en la literatura para realizarlo.

2.1.1. Abastecimiento de agua rural en la zona andina colombiana

Es común que en contextos rurales o comunidades remotas las principales actividades económicas sean la agricultura y la ganadería, caracterizadas por una alta demanda de agua, denotando gran dependencia hacia los recursos hídricos. A pesar de la relevancia del recurso hídrico, es típico que la infraestructura hídrica y la cobertura a los servicios de agua y saneamiento sean precarios en estas zonas, debido a que la gestión del recurso hídrico en zonas dispersas y con baja densidad poblacional representa un gran desafío para los gobiernos locales y un bajo atractivo económico para empresas privadas prestadoras de servicios (Dickson et al., 2016). En Colombia, esto es causado en cierta medida porque los gobiernos locales priorizan proyectos en zonas urbanas, destinando pocos recursos para las zonas rurales dispersas, y también a deficiencias en la recolección de información, planificación y toma de decisiones en torno al recurso hídrico, por ejemplo, en 2019, solo un 4% de los recursos destinados para agua y saneamiento básico se está

invirtiendo en zonas rurales (Domínguez et al., 2016; Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2019).

La gestión comunitaria del agua es la forma dominante de acceso al agua en zonas rurales en muchos países en desarrollo. En estos sistemas, los habitantes voluntariamente crean organizaciones encargadas del suministro, operación, mantenimiento y reparaciones de los sistemas, cobros de tarifas, entre otros. No obstante, este tipo de gestión se enfrenta a diversos desafíos como: el monitoreo de calidad del agua, el envejecimiento de la infraestructura hídrica, la ausencia de apoyo político, la capacitación del personal encargado, el suministro intermitente, el establecimiento de tarifas adecuadas que permitan cubrir gastos de operación, mantenimiento, reparaciones, repuestos, entre otros (Domínguez et al., 2016). Otro problema en el abastecimiento que enfrentan las zonas rurales es la baja cobertura de los sistemas comunitarios (Dickson et al., 2016). Por esto, muchas personas invierten en sistemas individuales que utilizan diferentes fuentes de suministro (Domínguez et al., 2016). Entre estas alternativas individuales es común el uso del agua subterránea que, a pesar de su amplia aceptación, puede generar desigualdad debido a que el esfuerzo que debe hacerse para conseguirla limita la disponibilidad del recurso a personas vulnerables (Dickson et al., 2016).

2.1.2. Aprovechamiento de aguas lluvias

El agua lluvia es una fuente de agua renovable que puede reemplazar al agua tratada para consumo humano en varios usos que exijan menor calidad. Sin embargo, a pesar de ser un recurso valioso que al ser usado da mayor seguridad hídrica y reduce impactos del cambio climático, suele percibirse como un riesgo para las personas, por lo que es subutilizado (Khastagir y Jayasuriya, 2010 y Domènech y Saurí, 2011). La recolección de aguas lluvias normalmente se realiza captando la escorrentía de los techos; no obstante, también puede recolectarse de otras superficies como

carreteras o suelos de cultivo. El uso AALL no es una práctica reciente, ya que se utilizaba incluso antes de la implementación de sistemas de acueducto convencionales. De hecho, estos sistemas convencionales desalentaron en muchos lugares el uso de aguas lluvias. Sin embargo, la reducción actual de disponibilidad de agua en muchos lugares del mundo ha renovado el interés en los sistemas de AALL, razón por la cual, ésta se practica formal e informalmente y ha ganado gran popularidad (Cowden et al., 2008; Abdulla y Al-Shareef, 2009; Chiu et al., 2009; Khastagir y Jayasuriya, 2010; Domènech y Saurí, 2011; Campisano y Modica, 2012 y Imteaz et al., 2012).

Los sistemas de AALL más sencillos constan de tres componentes, el área de captación, que comúnmente es el techo, un sistema de transporte conformado por canaletas, bajantes y tuberías, y un tanque de almacenamiento (Abdulla y Al-Shareef, 2009). Estos sistemas ofrecen múltiples beneficios como el control de escorrentía que puede prevenir inundaciones, aumentan la flexibilidad y robustez de sistemas de acueducto postergando futuras actualizaciones de infraestructura hídrica, bajo costo y facilidad de mantenimiento a nivel doméstico, además de aumentar la disponibilidad de agua en épocas de sequías (Abdulla y Al-Shareef, 2009 y Lopes et al., 2017). Aunque se recomienda para usos al aire libre que no requieran la mejor calidad de agua, en regiones áridas o semiáridas o en entornos rurales, donde representa la única fuente de agua disponible, el agua lluvia es utilizada para beber y otros usos domésticos (Abdulla y Al-Shareef, 2009; Barthwal et al., 2014; Christian et al., 2016; Fonseca et al., 2017 y Lopes et al., 2017).

2.1.3. Análisis multicriterio

Cuando existe una gama de alternativas que dan solución a un problema, se tiene el reto de seleccionar la más adecuada. Esto implica una gran incertidumbre si se realiza de forma aleatoria sin seguir un proceso de selección bien definido. En estas situaciones, la técnica del análisis multicriterio se convierte en una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones, ya que

considera diferentes dimensiones que influyen en la solución del problema (Domènech et al. 2013). El análisis multicriterio es utilizado en la gestión integrada del agua para la evaluación de alternativas. La técnica consiste en seleccionar una serie de criterios o indicadores a evaluar para cada alternativa y darle un peso a cada uno de tal forma que al final del análisis se obtendrá una alternativa priorizada (Ammar et al., 2016).

Hay varios métodos para realizar un análisis multicriterio, entre ellos:

- Recuento Borda, en el que se asignan puntos a cada criterio para cada alternativa, se suman los puntos de cada alternativa y la que tenga mayor puntaje será la preferida (Loc et al., 2017).
- Votación o comparación por parejas, también llamada método Condorcet, en la que se escoge una pareja de alternativas y se determina cuántos criterios se prefieren en una sobre la otra, se seleccionará la alternativa con mayor cantidad de criterios preferidos (Loc et al., 2017).
- Rango de valor, en la que se debe definir la importancia de cada criterio y utilizando una función de utilidad se calcula la utilidad de cada alternativa y se selecciona la de mayor utilidad (Loc et al., 2017).
- Proceso de jerarquía analítica, en el que los elementos de un problema se organizan por niveles de objetivos, criterios, subcriterios y alternativas de forma jerárquica, y se utilizan comparaciones por pares para definir los pesos de cada criterio y el desempeño de las alternativas en cada criterio. Por último, se realizan matrices de comparación de las alternativas y la importancia de cada alternativa se calcula normalizando las matrices y representándolas como vectores propios (Loc et al., 2017).

- Técnica de orden de preferencia por similitud con la solución ideal, en la que se utilizan valores de ponderación de criterios y subcriterios preestablecidos que posteriormente serán normalizados para encontrar la distancia de cada alternativa con la alternativa ideal y la no ideal o ideal negativa, y así obtener un ranking de alternativas (Huang et al., 2011).

2.2. Estado del arte

En esta sección se expone la revisión de literatura de la presente investigación. Inicialmente, se sintetizan aspectos de aceptación social y receptividad asociados a las AALL; a continuación, se explican brevemente los componentes de un SAALL y los factores técnicos a considerar en el diseño; seguidamente se hace un recuento de los costos asociados y ahorros que puede representar la implementación de un SAALL. Por último, se aborda la integración de estos factores mediante la técnica del análisis multicriterio.

2.2.1. Aceptación social de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias

La percepción de las personas acerca del agua lluvia es un factor importante al considerar la implementación de un SAALL, ya que esta puede representar un impedimento o una fuerza impulsora del sistema, pues el uso, mantenimiento y funcionamiento del sistema está altamente influenciado por las actitudes de los usuarios, que también son propietarios y administradores del SAALL (Domènech y Saurí, 2011; Mankad y Tapsuwan, 2011 y Domènech et al., 2013).

El modelo de receptividad de Jeffrey y Seaton (2004) explica que la aceptación pública de tecnologías alternativas puede mejorarse si se siguen cuatro pasos: i) conciencia, o capacidad de los individuos para adquirir conocimientos sobre la nueva tecnología; ii) asociación, o conciencia de las personas acerca de los beneficios que puede ofrecer la nueva tecnología; iii) adquisición, o capacidad para implementar o usar la nueva tecnología y; iv) aplicación, o capacidad de utilizar el

conocimiento adquirido para obtener beneficios. Este modelo ha sido utilizado por Ward et al. (2013) en sectores urbanos del Reino Unido, concluyendo que los hogares tenían una buena conciencia y aceptación pero los pasos de adquisición y aplicación estaban estancados debido a los costos y la accesibilidad (Ward et al., 2013). Brown y Davies (2007) también utilizaron este modelo en una zona residencial en los suburbios de Ku-ring-gai, Australia, encontrando que la receptividad era alta para usos externos y que disminuía a medida que aumentaba el nivel de contacto (Brown y Davies, 2007).

El problema de la mayor percepción de riesgo y preocupación por la calidad del agua asociado a usos más personales ha sido un factor común en diferentes estudios en entornos urbanos (Song et al., 2009; Domènech y Saurí, 2011; Mankad y Tapsuwan, 2011; Ward et al., 2013 y Takagi et al., 2019). Takagi et al. (2019) realizaron un estudio con 101 hogares urbanos de Galle, al sur de Sri Lanka (Asia) donde se realizó una primera encuesta sobre aceptación pública de agua lluvia para usos específicos; posterior a esto, se administró a los participantes información acerca de calidad y cantidad del agua lluvia, así como costos de los sistemas; y por último se realizó una segunda encuesta, encontrando que en la primera encuesta el uso al aire libre fue el más aceptado, seguido por el uso para inodoro y para lavandería, mientras que en la segunda encuesta, aunque los usos aceptados por los encuestados eran los mismos, estos presentaban un aumento significativo en la aceptación pública (Takagi et al., 2019).

El estudio social acerca del agua lluvia permite conocer las barreras y los incentivos percibidos para la implementación de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia. Sheikh (2020) investigó las percepciones acerca del agua lluvia del público en general y de expertos en el tema, identificando barreras e impulsores que percibía cada grupo. En cuanto a las barreras, los expertos consideraron que las más importantes son la falta de organizaciones administrativas en

torno al agua lluvia, la falta de conocimiento técnico por parte de las personas y los altos costos de los SAALL. El público general coincide en que la falta de conocimiento e información es la principal barrera para la implementación. Sin embargo, también resaltan el sentimiento de no necesitar SAALL y los altos costos de éstos como otras barreras importantes. En cuanto a los incentivos, se considera que proporcionar pautas técnicas e implementar proyectos piloto que aumenten la visibilidad de los SAALL podrían ser los mecanismos más eficaces para fomentar la adopción de los sistemas. Por el contrario, para el público general, el incentivo más importante es proporcionar apoyo financiero (Sheikh, 2020).

Ward et al. (2013) realizaron encuestas a usuarios y no usuarios de SAALL, encontraron un consenso en ambos grupos en que un mayor conocimiento sobre SAALL aumentaría su recepción hacia estos sistemas. Además, los no usuarios manifestaron que los apoyos económicos, como subvenciones, y el ahorro en las facturas del agua los alentaría a implementar SAALL. La realización de mantenimiento o el tener que pagar por este fue el principal factor que disminuía la receptividad, tanto en usuarios como en no usuarios, seguido de las interrupciones del servicio de agua asociadas a la instalación del sistema. Adicionalmente, en este estudio los autores listaron 14 factores que pueden influir en la aceptación: costo y economía; ambiente; sofisticación; independencia; comunidad; visibilidad; gobernanza y regulación; ventaja relativa; compatibilidad; voluntariedad; imagen; facilidad de uso; experiencia; e innovación tecnológica. Al pedir a las personas que seleccionaran los factores más influyentes, se obtuvo que para los usuarios la independencia y la ventaja relativa eran los más importantes, mientras que para los no usuarios el costo y la economía fue el más importante (Ward et al., 2013).

En cuanto a aceptación social en contextos rurales, Fuentes et al. (2018) realizaron un estudio en el que buscaban identificar los factores que afectan el uso y adopción de SAALL en

comunidades rurales en México que ya contaban con un sistema de este tipo. Se encontró que el agua lluvia era la fuente principal en varias comunidades y que, en comunidades donde el suministro tradicional es deficiente, el AALL ha ganado gran popularidad; también se encontró que los factores clave para la instalación del sistema fueron el apoyo económico y la capacitación (Fuentes et al., 2018).

Varios estudios encontraron grandes brechas de conocimientos sobre AALL. La mayoría de las personas no eran conscientes de los beneficios del aprovechamiento, o tenían conocimientos erróneos acerca de este y otros tantos no tenían conciencia de que en su lugar de residencia se contaba con este tipo de sistemas. Esto concuerda con los hallazgos descritos anteriormente sobre las barreras percibidas para la implementación, y denota la importancia de promover campañas educativas y de sensibilización antes de implementar este tipo de sistemas para garantizar su éxito (Song et al., 2009; Domènech y Saurí, 2011; Mankad y Tapsuwan, 2011 y Ward et al., 2012).

2.2.2. Factores técnicos de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias

Los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias están compuestos de varios elementos, que listándolos según la dirección en que fluye el agua son (González y González, 2009 y Estupiñan y Zapata, 2010): i) área de captación, que normalmente es el techo de la edificación; ii) canaletas, que se disponen dependiendo de la configuración del techo; iii) bajantes, que son tuberías hacia donde las canaletas dirigen el agua, comúnmente dotadas con una malla en la entrada para impedir el paso de sólidos de gran tamaño; iv) desviador de primer flujo, que suele ser una tubería que recibe y desecha los primeros milímetros de precipitación, los cuales pueden arrastrar sólidos pequeños depositados en la superficie de captación, que al ser eliminados mejoran la calidad del agua almacenada; v) tanque de almacenamiento para el agua recolectada; vi) vertedero de excesos, que es una tubería conectada a la parte superior del tanque de almacenamiento para

evitar que el agua supere cierto nivel; vii) sistemas de tratamiento, generalmente filtración y, en menor medida, desinfección, seleccionados dependiendo el uso que se le dará al agua; y viii) sistema de distribución, que es la red de tuberías que lleva el agua lluvia a los puntos en que será utilizada.

En los SAALL el componente más costoso y crítico es el tanque de almacenamiento, por lo tanto, debe seleccionarse apropiadamente (Khastagir y Jayasuriya, 2011; Gurung et al., 2012; Pelak y Porporato, 2016; Khan et al., 2017 y Semaan et al., 2020). Según Semaan et al. (2020), un tanque sobredimensionado puede aumentar considerablemente los costos y representar una amenaza para la calidad del agua debido a que aumenta el tiempo en que esta permanece almacenada. Por el contrario, un tanque muy pequeño no lograría suministrar agua suficiente (Semaan et al., 2020). Diferentes autores coinciden en que el tamaño del tanque es función de cuatro parámetros principales que son específicos del contexto: área del techo, demanda de agua, precipitación y patrones de lluvia. En algunos casos se considera también como parámetro, la confiabilidad para el sistema, que hace referencia a la relación entre el volumen de agua lluvia suministrada y la demanda (Chiu et al., 2009, 2015; Campisano y Modica, 2012; Bocanegra et al., 2014; Allen y Haarhoff, 2015; Fonseca et al., 2017; Khan et al., 2017 y Lopes et al., 2017). En cuanto la precipitación, diferentes autores resaltan que escalas de precipitación pequeñas, como diaria, e incluso horaria, logran un modelo más realista que con escalas temporales más grandes como mensuales o anuales (Cowden et al., 2008; Santos y Taveira, 2013 y Bocanegra et al., 2014).

El método de dimensionamiento de tanques más comúnmente empleado es el balance de masa (Cowden et al., 2008; Khastagir y Jayasuriya, 2010, 2011; Imteaz et al., 2012; Bocanegra et al., 2014; Tsihrintzis y Baltas, 2014; Gurung y Sharma, 2014; Okoye et al., 2015; Pelak y Porporato 2016; Lawrence y Lopes, 2016; Ndiritu et al., 2017; Nnaji et al., 2017; Fonseca et al., 2017; Lopes

et al., 2017 y Lani et al., 2018), en el que se representan la entrada, la salida y las pérdidas de agua al sistema para determinar los niveles del agua dentro del tanque y calcular un tamaño que evite el desperdicio y la escasez de agua (Semaan et al., 2020). Jenkins y Pearson (1978), consideraron dos enfoques diferentes para desarrollar ecuaciones de balance de masa: i) el rendimiento después del derrame (YAS), en el que la demanda de agua se extrae después del evento de precipitación; y ii) el rendimiento antes del derrame (YBS), en el que la demanda de agua se extrae antes del evento de precipitación (Jenkins y Pearson, 1978; Gires y de Gouvello, 2009 y Seo et al., 2012). Islam et al. (2010) y Khan et al. (2017) concluyen que el modelo YBS tiende a sobreestimar el volumen de agua que puede proveer un tanque, mientras que el modelo YAS es más conservador, por lo que Muklada et al. (2016) recomiendan utilizar el modelo YAS (Islam et al., 2010; Muklada et al., 2016 y Khan et al., 2017).

La elección adecuada del tamaño del tanque es un aspecto crucial pues tiene que ver no solo con la oferta de agua que suplirá el sistema, sino con sus costos. El tanque es el componente más costoso y crítico del sistema, representando hasta un 30% del costo total durante toda su vida útil (Gurung et al., 2012; Khan et al., 2017 y Semaan et al., 2020), siendo éste un factor considerable al momento de tomar la decisión de invertir en un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, si esta decisión se basa en el atractivo económico que representa (Khastagir y Jayasuriya, 2011 y Pelak y Porporato, 2016).

La calidad del agua lluvia comúnmente no cumple con los estándares para agua para consumo humano, especialmente por la presencia de contaminantes microbianos que representan un riesgo para la salud de las personas (Gómez y Silva, 2019). Los tratamientos que se han utilizado y registrado en la literatura para el agua lluvia incluyen desviación de primer flujo, cloración, aditivos químicos/metálicos, ozono, filtración, desinfección solar, tratamiento UV,

pasteurización solar, entre otros. Sin embargo, algunos microorganismos, como *Klebsiella* spp., *Legionella* spp., *Pseudomonas* spp., *Cryptosporidium* spp. y *Campylobacter* spp., que pueden estar presentes en el agua lluvia, sobreviven a este tipo de tratamientos convencionales por lo que se han buscado estrategias alternativas para tratar el agua, como el mejoramiento de algún tratamiento o la combinación de dos o más tratamientos de los anteriormente mencionados. También ha llamado la atención el tratamiento biológico que incluye métodos que utilizan bacterias, bacteriófagos y sistemas con biofiltros para mejorar la calidad del agua lluvia (García, 2012 y Reyneke et al., 2020).

2.2.3. Costos relacionados a los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias

El costo es otro criterio relevante al momento de tomar decisiones sobre un sistema de SAALL (Nguyen et al., 2018 y Semaan et al., 2020). Semaan et al. (2020) identificaron cinco tipos de costos utilizados comúnmente en la literatura: i) Costos de capital, que se refieren al costo del tanque, bombas y tuberías; ii) Costos de mantenimiento, en los que se incurre durante la vida útil del sistema y pueden incluir jabón, cloro, pintura, resina, entre otros; iii) Costos de operación, asociados al funcionamiento del sistema (ej. energía, cuando hay bombeo o métodos de tratamiento complejos); iv) Costos de agua, referidos al agua potable que se deja de comprar al sistema público de suministro; y v) Costos ambientales, relacionados a la disminución de la escorrentía en los alcantarillados y otros beneficios ambientales más difíciles de cuantificar (Semaan et al., 2020). En los estudios sobre aprovechamiento de aguas lluvias, generalmente se cuantifican los costos de capital y de agua, en menor medida el costo de operación, y muy pocas veces los costos ambientales, probablemente debido a la dificultad de calcularlos (Mankad y Tapsuwan, 2011).

En cuanto a las métricas utilizadas para estimar los costos de los SAALL, el periodo de retorno o de amortización, definido como el periodo de tiempo necesario para recuperar una

inversión, es el indicador más utilizado en la literatura (p. ej. (Jenkins, 2007; Khastagir y Jayasuriya, 2011; Campisano y Modica, 2012; Ghisi y Schondermark, 2013; Santos y Taveira, 2013; Silva et al., 2015; Lawrence y Lopes, 2016; Lani et al., 2018 y Nguyen et al., 2018)); otro indicador usado frecuentemente es la relación Beneficio-Costo que vincula los costos de un proyecto y los beneficios que este produce (p.ej. (Chiu et al., 2009, 2015; Khastagir y Jayasuriya, 2011; Lani et al., 2018 y Nguyen et al., 2018)). Por último, el Valor Presente Neto, definido como el costo del ciclo de vida de una inversión o proyecto expresado en valor de dinero actual (p.ej. (Khastagir y Jayasuriya, 2011; Gurung y Sharma, 2014; Okoye et al., 2015; Fuentes et al., 2018; Lani et al., 2018; Nguyen et al., 2018 y Semaan et al., 2020)). Algunos estudios utilizan los tres indicadores para realizar la evaluación de costos (p. ej. (Khastagir y Jayasuriya, 2011; Lani et al., 2018 y Nguyen et al., 2018)).

Diferentes autores han concluido que instalar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias no era económicamente viable si solo se evaluaban costos de capital y de agua (Ghisi y de Oliveira, 2007; Chiu et al., 2009; Islam et al., 2010; Domènech y Saurí, 2011; Roebuck et al., 2011 y Christian et al., 2016) . En varios estudios se indica que estos sistemas solo son viables si se cuenta con algún apoyo económico para su implementación como subsidios, créditos, reembolsos gubernamentales, etc., (Ghisi y de Oliveira, 2007; Islam et al., 2010; Mankad y Tapsuwan, 2011 y Santos y Taveira, 2013). Sin embargo, autores que tomaron en cuenta otros factores para su análisis llegaron a conclusiones diferentes. Por ejemplo; Chiu et al. (2009, 2015) quienes realizaron estudios en comunidades montañosas del área metropolitana de Taipéi, Taiwán, midieron además del ahorro de agua, el ahorro de energía en transporte y bombeo de agua potable, asociada a utilizar SAALL en vez de sistemas centralizados, y concluyeron que cuando se aborda conjuntamente el

ahorro de energía con el ahorro de agua se vuelve factible implementar SAALL considerando como indicador la relación Beneficio-Costo (Chiu et al., 2009, 2015).

En algunos estudios se encontró que, dependiendo de la escala utilizada, estos sistemas podrían llegar a ser viables. Por ejemplo, Santos y Taveira (2013) en zonas urbanas de Portugal, utilizando como indicador la relación entre ahorro económico y costo de instalación, concluyeron que en una vivienda no es una inversión factible implementar un SAALL mientras que en un edificio público si lo es, debido a que presentaba menor tiempo de recuperación de la inversión si comparaban costos de capital con costos de agua ahorrada (Santos y Taveira, 2013); Domènech y Saurí (2011) en la zona urbana del área metropolitana de Barcelona, llegaron a resultados parecidos, ya que al evaluar los periodos de amortización de un edificio multifamiliar y de una vivienda unifamiliar encontraron que eran mucho menores para el edificio multifamiliar cuando se consideran costos de capital (sin incluir bajantes y canaletas), mantenimiento, operación y ahorro de agua (Domènech and Saurí 2011). Resultados similares fueron encontrados por Ghisi y de Oliveira (2007) y Ghisi y Ferreira (2007) en la zona urbana del sur de Brasil. Todos estos resultados coinciden con los encontrados por Lani et al. (2018) quienes, al considerar costos de capital, mantenimiento, operación y ahorros de agua en dos edificios comerciales de diferentes tamaños en zonas urbanas de Malasia, encontraron que a mayor tamaño del sistema mayores beneficios económicos. Dicho estudio usó como indicadores el porcentaje de confiabilidad, valor presente neto, retorno de la inversión, relación costo-beneficio y período de recuperación (Lani et al., 2018). No se encontraron estudios que compararan sistemas a diferentes escalas para verificar la viabilidad en zonas rurales.

2.2.4. *Análisis multicriterio*

El análisis multicriterio es una técnica ampliamente utilizada en el sector de la gestión integrada del agua, ya que facilita la toma de decisiones cuando se tienen varias alternativas para solucionar un mismo problema (Melville et al., 2016). La aplicación de esta técnica implica identificar criterios para evaluar cada alternativa y darle un peso relativo a cada criterio, de tal forma que se tenga como resultado una alternativa preferida (Ammar et al., 2016; Singhai et al. 2017). Los pasos que comúnmente se siguen para realizar este análisis son definir el problema, identificar las alternativas de solución, definir los criterios y objetivos a cumplir, realizar una matriz de desempeño y evaluar el desempeño de cada alternativa para los criterios seleccionados (Melville et al., 2016).

El análisis multicriterio se ha utilizado en el campo de la gestión del agua lluvia enfocado a dos líneas de investigación: i) identificación de sitios adecuados para la recolección de aguas lluvias, en su mayoría basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG); y ii) comparación de estructuras hidráulicas.

En relación con la línea de investigación en que se ha utilizado el análisis multicriterio para la comparación de estructuras hidráulicas, Loc et al. (2017) utilizaron como caso de estudio siete distritos de la Ciudad Ho Chi Minh en Vietnam donde compararon la eficacia y la aceptabilidad de cuatro alternativas para mitigar las inundaciones: recolección de agua de lluvia, techo verde, espacio verde urbano y pavimento permeable; en este estudio se utilizaron cuatro métodos de análisis multicriterio (recuento borda, comparación por parejas o método condorcet, rango de valor y proceso de jerarquía analítica), y llegaron a la conclusión de que en cualquiera de los cuatro métodos la opción menos preferible es la recolección de aguas lluvias (Loc et al., 2017). Melville et al., (2016) utilizaron el análisis multicriterio para comparar varias configuraciones de sistemas

de aprovechamiento de aguas lluvias para una vivienda típica de zonas urbanas del Reino Unido, en este caso tomaron en cuenta criterios de costos, ahorro de agua, consumo de energía y minimización de descargas de aguas pluviales, concluyeron que la tecnología a seleccionar dependía en gran medida de las preferencias del usuario o del tomador de decisiones (Melville et al., 2016).

2.2.5. Vacío en el conocimiento

Se encontró que la percepción del riesgo y las brechas de conocimiento en el público desestimulan el uso del agua lluvia, lo que denota la necesidad de estudiar la aceptación social de las personas antes de implementar un SAALL. En el ámbito económico, se encontró que una proporción considerable de estudios solo reportan costos asociados a la inversión inicial y de ahorro de agua y, en menor medida costos de operación y mantenimiento, dejando de lado los múltiples beneficios ambientales, así como mejoras a la calidad de vida que puede acarrear el AALL. Aunque los estudios revisados consideran la componente técnica, verificando que para el contexto específico, las condiciones climatológicas, de demanda de agua y físicas sean las adecuadas, ninguno de estos integró estas tres dimensiones para diseñar SAALL.

El análisis multicriterio relacionado a AALL ha sido utilizado en el mundo principalmente enfocándose en dos temáticas, la identificación de zonas potenciales para la instalación de sistemas de AALL, que se desarrolla a grandes escalas como la de cuenca, y la comparación de varias fuentes alternativas de agua (p.ej. agua lluvia y reutilización de aguas grises) que fue realizada a escala de distritos dentro de la ciudad, solamente un estudio se enfocó exclusivamente en las aguas lluvias y en la comparación y selección de diferentes configuraciones de SAALL para una vivienda tipo del Reino Unido; no obstante, este estudio fue realizado para viviendas en contextos urbanos. Por lo tanto, el análisis multicriterio aún no se ha utilizado en estudios donde se desarrolle una

herramienta para seleccionar sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en entornos rurales integrando criterios sociales, técnicos y económicos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Proponer una herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para asentamientos rurales andinos en Colombia, considerando criterios técnicos, sociales y económicos.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar variables de las dimensiones técnica, social y económica relevantes para la selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en asentamientos rurales andinos en Colombia.
- Integrar las variables identificadas en una herramienta multicriterio para selección de alternativas de aprovechamiento de aguas lluvias en asentamientos rurales andinos en Colombia.
- Validar la herramienta multicriterio propuesta en un asentamiento rural andino en Santander – Colombia.

4. Metodología

En este capítulo se explica la forma en que se identificaron y seleccionaron los criterios de decisión utilizados, así como el método para integrarlos en la herramienta multicriterio. Seguidamente, se explica el proceso de validación de la herramienta en el caso de estudio del municipio Los Santos, Santander.

4.1. Identificación y selección de subcriterios de evaluación

En este estudio se consideraron criterios sociales, técnicos y económicos que están conformados por subcriterios. Los subcriterios de evaluación y las unidades de medida que se utilizaron en la herramienta se identificaron mediante una revisión de literatura realizada en las bases de datos Scopus® y Science Direct®. Se realizaron dos procesos de búsqueda, la primera búsqueda se realizó con los términos “rainwater harvesting” y “rainwater harvesting system” combinados con “economic analysis” y otras variaciones de estos términos (p. ej. “investment feasibility analysis”, “economic feasibility”). En esta búsqueda se identificaron simultáneamente subcriterios de evaluación en las dimensiones económica y técnica, pues el análisis económico de un SAALL debe ser antecedido por un diseño técnico. La segunda búsqueda usó los términos “rainwater harvesting” y “rainwater harvesting system” combinados con el término “receptivity” y algunas variaciones (p. ej. “perception”, “acceptance”) para identificar criterios de evaluación en la dimensión social. La búsqueda se limitó a artículos científicos que incluyeran los términos de búsqueda en el título, el resumen o las palabras clave; asimismo, el período de observación estuvo comprendido entre los años 2000 y 2021. Los artículos resultantes de estas búsquedas fueron filtrados inicialmente inspeccionando el título, seguidamente leyendo el resumen y por último leyendo el contenido. Finalmente, se preparó una base de datos con los subcriterios encontrados en la literatura, el criterio al que pertenecen y una corta descripción, para posteriormente seleccionar los que se iban a utilizar.

4.2. Integración de dimensiones en una herramienta multicriterio

La integración de las dimensiones consistió en desarrollar una herramienta para seleccionar la mejor alternativa o configuración de SAALL tomando en cuenta criterios y subcriterios sociales, técnicos y económicos, identificados y seleccionados en la revisión de literatura, los cuales fueron discutidos con expertos nacionales e internacionales, usando el método proceso de jerarquía analítica (AHP), para establecer la relevancia de cada uno de ellos.

El método AHP que se utilizó para comparar criterios y subcriterios, se seleccionó porque permite comprobar la consistencia de las preferencias de expertos, minimizando así la subjetividad al momento de tomar decisiones (Saaty, 1980). Además, AHP es ampliamente utilizado en toma de decisiones en diferentes áreas relacionadas con la gestión del recurso hídrico (Ammar et al. 2016). Se consideraron tres niveles jerárquicos, el primer nivel comprende los criterios principales, el segundo nivel comprende los subcriterios y el tercer nivel comprende las alternativas a evaluar.

Para la comparación de criterios y subcriterios se utilizó la opinión de expertos. Sobre el número de expertos que deben comparar criterios y subcriterios, Tsyganok et al. (2012) mencionan que las competencias individuales pierden relevancia cuando el grupo es de 50 o más expertos, mientras que, si el número de expertos es pequeño deben tenerse en cuenta sus competencias. No obstante, en el estudio los autores no especifican un número mínimo de expertos. Considerando la complejidad de conseguir 50 o más expertos, se decidió buscar expertos con experiencia y conocimientos en SAALL para así requerir una cantidad menor. Con esta consideración, se seleccionaron expertos cuyo trabajo de maestría o doctorado haya sido desarrollado en el área de los SAALL y/o sean autores principales de artículos sobre el tema, para comparar por pares los criterios y subcriterios (dos primeros niveles jerárquicos), se dio prioridad a expertos hispanohablantes para facilitar el entendimiento de los criterios y subcriterios a comparar. Los

expertos fueron contactados mediante mensaje de correo electrónico y se les preguntó sobre su disposición para responder una encuesta en la que se comparaban por pares los criterios y subcriterios de evaluación utilizando la escala de importancia de 9 niveles propuesta por Saaty (1980) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Escala de Saaty utilizada para comparar los criterios y subcriterios de evaluación por pares.

Escala de importancia	Puntaje
Extremadamente menos importante.	1/9
Mucho menos importante.	1/7
Menos importante.	1/5
Ligeramente menos importante.	1/3
Igual de importante.	1
Ligeramente más importante.	3
Más importante.	5
Mucho más importante.	7
Extremadamente más importante.	9

Fuente: Saaty (1980).

La comparación de criterios y subcriterios se acordó para efectuar, según la preferencia de los expertos, mediante videoconferencia o diligenciando de manera autónoma un formulario de Google. La encuesta se encuentra en el Anexo A. Se construyeron matrices de comparación por pares para las respuestas de cada experto, a las que se les verificó el coeficiente de consistencia (CC), como se muestra en las Ecuaciones 1 y 2. Las respuestas de los expertos se utilizaron cuando el CC fue menor o igual a 5%, valor que depende del orden de la matriz.

$$CC = \frac{IC}{IA} \quad (1)$$

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

Donde IC es el índice de consistencia; IA es el índice aleatorio, que depende del orden de la matriz; n es el orden de la matriz; y λ es el valor propio principal.

Luego de este proceso, se utilizaron las respuestas declaradas de 15 expertos, provenientes de México, Colombia, Argentina, Costa Rica y España. Finalmente, se realizó la matriz de comparación por pares P con la media de las respuestas que fueron consistentes (Ver Ecuación 3). Esta matriz se soluciona normalizando los vectores de cada columna de la matriz y calculando el promedio de las filas de la matriz resultante. Este proceso permite obtener el vector de ponderación para todos los criterios y subcriterios (ver Ecuación 4) (Saaty, 1980).

$$P = \begin{bmatrix} 1 & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & 1 & \dots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{w_1}{w_1}\right) & \left(\frac{w_1}{w_2}\right) & \dots & \left(\frac{w_1}{w_n}\right) \\ \left(\frac{w_2}{w_1}\right) & \left(\frac{w_2}{w_2}\right) & \dots & \left(\frac{w_2}{w_n}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{w_n}{w_1}\right) & \left(\frac{w_n}{w_2}\right) & \dots & \left(\frac{w_n}{w_n}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (4)$$

Donde P es la matriz de comparación por pares y W es el vector de ponderación de criterios y subcriterios.

Para el tercer nivel jerárquico, donde comparan las alternativas de SAALL, se articuló el método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) para disminuir la cantidad de preferencias declaradas que debían hacer los expertos, ya que utilizar AHP en este nivel hubiese requerido que los expertos compararan por pares cada una de las alternativas de SAALL en cada uno de los subcriterios aumentando así el número de preguntas que debían responder en la encuesta. El método TOPSIS fue seleccionado por su simplicidad ya que es

relativamente fácil de entender y de aplicar, comparado con otros métodos multicriterio (ELECTRE, VIKOR o PROMETHEE), sin comprometer su robustez y su solidez matemática (Yeh, 2003 y Muñoz y Bueno, 2022). Además, utilizar conjuntamente AHP y TOPSIS permite obtener la ponderación de criterios y subcriterios sin necesidad de que las alternativas a evaluar estén completamente diseñadas. En la sección 5.3.6. se explica a detalle cómo se compararon las alternativas utilizando TOPSIS.

4.3. Validación de la herramienta en un caso de estudio

En esta sección se explica cómo se seleccionó el área de estudio y cómo se entablaron las relaciones con los habitantes de la zona de estudio, la forma en que se recopiló la información general de la zona y sus habitantes, datos hidroclimáticos y de calidad de agua lluvia necesarios para el desarrollo de esta investigación. Por último, se explica cómo se formularon y se evaluaron las alternativas de SAALL.

4.3.1. Selección de la zona de estudio

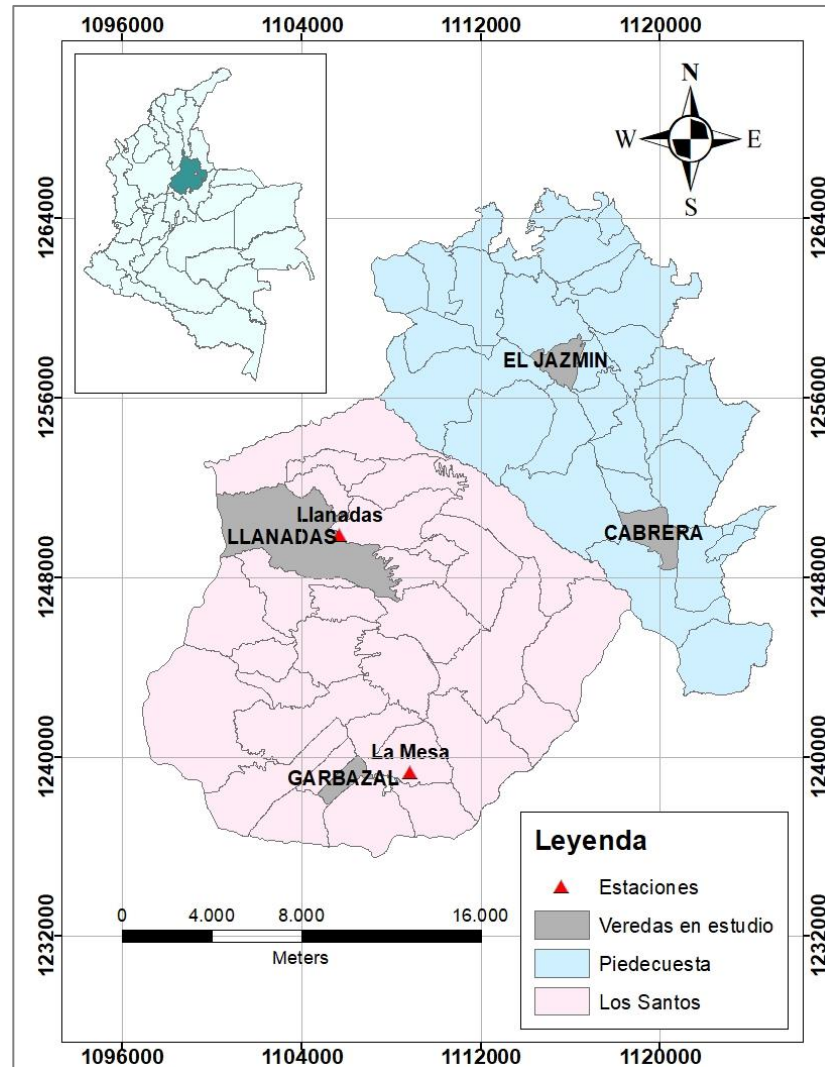
Este proyecto de investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Estudio Integral del Agua en la Mesa de los Santos”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) con código 2534, desarrollado en “la Mesa de los Santos”, que incluye áreas de los municipios de Zapatoca, Piedecuesta, Los Santos, Girón y Aratoca. Para seleccionar la zona de estudio se buscó una vereda con características típicas de asentamientos rurales, facilidad de acceso, y disposición de los habitantes para participar en el proyecto. Las veredas que se consideraron fueron Llanadas, La Cabrera, El Jazmín y Garbanzal, en las cuales ya se tenía conexión con algunos líderes comunitarios y personas influyentes. Las veredas La Cabrera y El Jazmín se descartaron porque pertenecen a otro municipio (Piedecuesta),

entre Garbanzal y Llanadas se seleccionó Garbanzal por la facilidad de acceso y el tamaño de la población. En la Figura 1 se muestra un mapa con la ubicación de estas veredas.

La vereda Garbanzal presenta características típicas de las zonas rurales andinas, como el uso de múltiples fuentes de agua que deben ser gestionadas por la comunidad, precaria cobertura de servicios de agua y saneamiento públicos suministrada por los gobiernos locales, intermitencia del servicio de suministro y la mala calidad del agua (Chino et al., 2016; Dickson et al., 2016; Domínguez et al., 2016 y Domínguez et al., 2016), además, las características hidrológicas combinadas con los efectos del cambio climático han hecho del suministro de agua en este sector un problema relevante (INGEOMINAS, 2009). La vereda se encuentra aproximadamente a 2 km de la cabecera municipal del municipio Los Santos y tiene un área de 1.97 km², donde viven 145 personas en 38 viviendas (DANE, 2014).

Figura 1

Mapa de la zona de estudio y ubicación de las estaciones hidroclimatológicas.



4.3.1.1. Exploración inicial de la zona de estudio. Utilizando la técnica de bola de nieve se establecieron conexiones con los habitantes de la zona. Esta técnica consiste en pedirle a una persona o un grupo pequeño de personas que refieran a otras que también puedan ser incluidas en el estudio (Alloatti, 2014). Se realizó una cartografía social (Figura 2), que además del número de viviendas y su ubicación aproximada, permitió reconocer información importante entre la que se

encuentran carreteras, quebradas que pasan por la zona y la ubicación de un pozo construido por la comunidad y su red de distribución a diferentes viviendas. A continuación, se realizó un recorrido por la vereda, donde se visitaron varios sitios identificados previamente en la cartografía social.

Figura 2.

Cartografía social realizada durante la exploración inicial de la zona de estudio.



Esta información permitió tener un panorama general de las características físicas, hidrográficas y demográficas de la vereda, se identificó el papel del agua lluvia en la zona, reconociendo su amplio uso en la vereda (Figura 3). El mapa resultante de la cartografía social realizada se presenta en el Anexo B.

Figura 3.

Tanque de almacenamiento de agua lluvia en la zona de estudio.



4.3.2. Recopilación de información socioeconómica, infraestructura y prácticas relacionadas con el agua

La recopilación de información del área de estudio se hizo mediante encuestas semiestructuradas, que fueron piloteadas durante la visita de exploración inicial de la zona de estudio para cerciorarse que todas las preguntas fueran comprensibles y adecuadas al contexto. Las encuestas se aplicaron personalmente, visitando la vivienda de los encuestados, por un grupo de estudiantes de pregrado asociados al proyecto, quienes recibieron el apoyo de un habitante de la vereda para tener acceso a las viviendas. Las encuestas se llevaron a cabo en Julio de 2021 y se encuestó a un total de 29 viviendas de las 38 que se encontraban registradas en el censo nacional agropecuario del 2014. Las encuestas estaban dirigidas específicamente a los jefes de hogar, ya que se esperaba que fueran los más informados y capaces de proporcionar respuestas precisas a las preguntas y se llevaron a cabo con previo consentimiento.

La encuesta se dividió en 6 secciones que recopilaban datos fundamentales para el presente estudio (ver Anexo C): i) información demográfica; ii) características de la vivienda; iii) fuentes de agua disponibles, usos y demanda; iv) percepción sobre el agua lluvia; v) información sobre los SAALL existentes (solo para viviendas con SAALL), abordando temas como los beneficios percibidos del uso de agua de lluvia, usos finales, características técnicas del sistema, aspectos financieros, prácticas de mantenimiento y operación; y vi) información sobre SAALL (viviendas sin sistema), para indagar sobre la disposición a implementar un sistema y barreras y beneficios percibidos. Cabe resaltar que para calificar los subcriterios sociales en cada una de las alternativas diseñadas para validar la herramienta fue necesario hacer una segunda encuesta donde a las personas se les mostraba las alternativas y se les explicaba su funcionamiento. En el Anexo D se encuentra el formato de esta segunda encuesta y los diagramas explicados.

Como resultado del procesamiento de datos de las secciones uno y dos de la encuesta, se obtuvo información estadística acerca de los habitantes de la zona, y dimensiones y materiales de componentes de las viviendas relevantes para el aprovechamiento de aguas lluvias, también se obtuvo información cualitativa categorizada acerca de prácticas de mantenimiento de estos componentes. El procesamiento de la sección tres aportó información sobre las tendencias de uso y demanda de las fuentes de agua disponibles, información estadística acerca de los costos asociados a utilizar estas fuentes e información sobre los ciclos de producción y las preferencias de los habitantes acerca de las actividades productivas. De la sección cuatro se obtuvo información cualitativa acerca de la percepción sobre el agua lluvia, de la cual una parte fue categorizada y otra cuantificada mediante escala Likert de cinco puntos. La sección cinco aportó información cualitativa acerca de los usos que se le da al agua lluvia en la zona, así como información cuantitativa acerca de dimensiones y costos de los componentes de los sistemas existentes, con la

que se realizó estadística descriptiva. La sección seis aportó información cualitativa acerca de la disposición de implementar sistemas de aprovechamiento de agua lluvia la cual fue categorizada. El análisis de la información se realizó utilizando Excel®.

4.3.3. *Recopilación de información hidroclimatológica*

Para validar la herramienta multi-criterio y dimensionar alternativas de suministro de agua lluvia se utilizaron datos hidroclimatológicos históricos de tres estaciones cercanas (ver Tabla 2), activas al momento de la presente investigación.

Tabla 2.

Información de estaciones de monitoreo cercanas a la zona de estudio.

Estación	Tipo de registro	Resolución temporal	Intervalo de tiempo	Distancia a la zona de estudio	Entidad operadora
La Mesa	Pluviométrica	Diaria	1974 – 2021	2 km	IDEAM
Llanadas	Meteorológica	30 minutos	2020 -2022	10 km	GPH
El Cucharó	Pluviométrica	Diaria	1965 - 2009	27 km	IDEAM

Nota: IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, GPH: grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental de la Universidad Industrial de Santander.

Los datos hidroclimatológicos fueron inspeccionados para verificar que la cantidad de datos faltantes no superaran un porcentaje máximo aceptable del 10% (Becerra y Parra, 2016), para la estación “La Mesa” también se verificó la consistencia de los datos examinando las curvas de doble masa que fueron realizadas por Becerra y Parra (2016).

Los datos hidroclimatológicos fueron procesados utilizando Excel® y utilizados para el diseño de las alternativas. De la estación pluviométrica “La Mesa” se extrajeron datos para analizar las tendencias de precipitación de la zona, necesaria para calcular el componente de

almacenamiento. De la estación meteorológica “Llanadas” se extrajeron datos de temperatura, humedad, velocidad del viento e insolación, que aportaron información estadística de cada una de estas variables, necesaria para el cálculo de los requerimientos de riego. Por último, se utilizaron las curvas de Intensidad – Frecuencia – Duración de la estación pluviométrica “El Cucharó”, proporcionadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2017), para extraer información para el diseño de canales y bajantes.

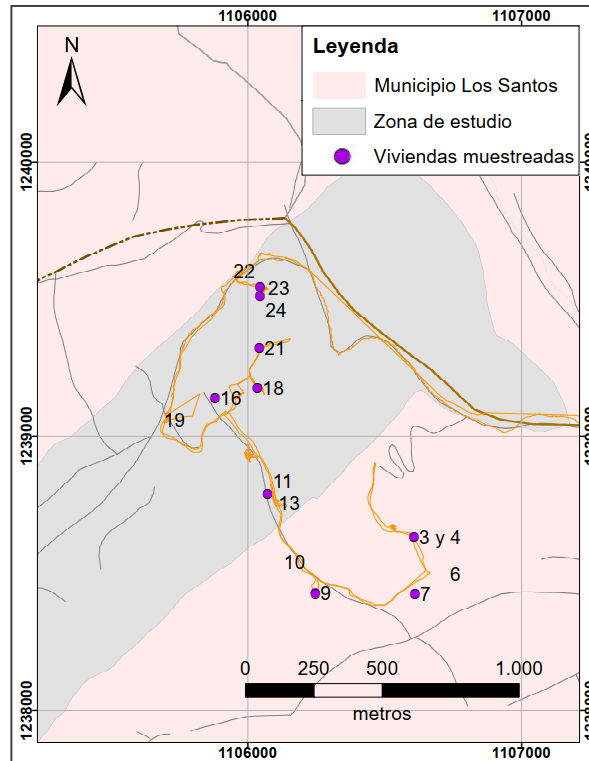
4.3.4. Recolección de información sobre la calidad del agua

Se realizaron campañas de muestreo para conocer la calidad del agua lluvia empleada por los habitantes en las condiciones actuales de los sistemas existentes en la zona, lo que ayudaría a proponer el sistema de tratamiento acorde con las condiciones de la zona y los usos del agua.

Para seleccionar las viviendas a muestrear, estas fueron divididas en tipologías de viviendas (7) que dependían del material de techo y de tanque. Se identificaron las tipologías más comunes y que abarcaban la mayor cantidad de viviendas de la zona. Se seleccionaron 14 viviendas para tomar muestras de agua y se preguntó a los habitantes acerca de su disponibilidad para permitir el muestreo. En la Figura 4 se encuentra el mapa con la ubicación de las viviendas muestreadas.

Figura 4.

Ubicación de las viviendas muestreadas.



El muestreo se realizó al comienzo de la temporada de lluvias, en noviembre de 2021, para capturar la situación más desfavorable en términos de calidad, pues está documentado que en esta época se encuentra la menor calidad de agua debido a la acumulación de contaminantes en el área de captación durante tiempos de sequía. Por recomendación de Gómez y Silva (2019) y World Health Organization (2012), los parámetros monitoreados en las viviendas seleccionadas fueron: i) entre los parámetros fisicoquímicos, pH, turbiedad, hierro total, conductividad eléctrica, nitratos, zinc total, cloro residual y color aparente; y ii) entre los parámetros microbiológicos, coliformes totales y coliformes fecales (*E. coli*).

El muestreo fue realizado por estudiantes de pregrado asociados al proyecto, quienes tomaron muestras puntuales del agua lluvia de los tanques de almacenamiento de las viviendas.

Estas muestras fueron preservadas mediante refrigeración utilizando contenedores de vidrio y gel refrigerante. Las muestras fueron transportadas a los laboratorios Siana Ltda. y laboratorio de hidráulica de la UIS, donde fueron analizadas. Los análisis de laboratorio se realizaron siguiendo los métodos y técnicas mencionados en la Tabla 3. Los parámetros pH, Turbiedad y Conductividad eléctrica que fueron medidos por el laboratorio de hidráulica de la UIS fueron medidos in situ durante la salida de campo; el pH y la conductividad se midieron con un medidor multiparámetro portátil de la serie Sevensgo Duo Pro de la marca Mettler Toledo; y la turbiedad se midió con un Turbidímetro portátil modelo 2100Q de la marca Hach.

Tabla 3.

Métodos y técnicas utilizados para medir parámetros de calidad.

Parámetro	Método y técnica	Laboratorio que realizó el análisis
pH	SM 4500 H+ B, Ed. 23rd	Siana Ltda. UIS
Turbiedad	SM 2130 B (Ed. 23rd), Nefelométrico	Siana Ltda. UIS
Hierro total	SM 3030 F, 3111 B (Ed. 23rd) - Digestión ácido Nitríco - Clorhídrico. Espectofotometría A.A. Llama directa Aire-Acetileno	Siana Ltda.
Conductividad eléctrica	SM 2510 B (Ed. 23rd) - Electrométrico	Siana Ltda. UIS
Nitratos	Methode par spectrometrie dabsortion moleculaire, 9e edition, J. Rodier 2009 L'Analyse de l'eau (Frances)	Siana Ltda.
Zinc total	SM 3030 F, 3111 B (Ed. 23rd) - Digestión ácido Nitríco - Clorhídrico. Espectofotometría A.A. Llama directa Aire-Acetileno	Siana Ltda.
Cloro residual	SM 4500 Cl G	Siana Ltda.
Color aparente	SM 2120 C	Siana Ltda.
Coliformes totales	SM 9222 J (Ed. 23rd) - FPM - Doble Cromogeno	Siana Ltda.
Coliformes fecales (E. coli)	SM 9222 J (Ed. 23rd) - FPM - Doble Cromogeno Método de filtración por membrana	Siana Ltda. UIS

Los resultados del análisis de las muestras aportaron información estadística acerca de cada uno de los parámetros de calidad evaluados, permitiendo así compararlos con estándares actuales de agua para consumo humano, establecidos en la Resolución 2115 de 2007, y reconocer los contaminantes que requerían atención para formular el tren de tratamiento de los sistemas propuestos.

4.3.5. Formulación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias

Las alternativas de SAALL que se propusieron tienen diferentes configuraciones que dependen de factores específicos del contexto donde se validó la herramienta. Inicialmente, se consideraron las características de las viviendas de la zona, donde se examinaron las dimensiones y materiales de techo, canaletas, bajantes y tanques disponibles y accesibles en el contexto seleccionado, así como las áreas disponibles para instalar los diferentes componentes del sistema. Adicionalmente, se consideraron usos típicos del agua, domésticos y productivos de pequeña escala. Con esta información se propuso una vivienda tipo, para el diseño de las tres alternativas, que englobaba características de las viviendas de la zona.

4.3.5.1. Usos y Demanda de Agua de las Alternativas. La demanda de agua es uno de los parámetros principales de diseño de los SAALL, para este estudio esta se derivó de la información aportada por los habitantes en la encuesta. Se encontró que muchas personas ya utilizaban el agua lluvia, entonces se identificaron los usos dados al agua clasificándolos en 6 categorías así:

- i) Usos domésticos que requieren calidad de agua potable, es decir para consumo humano, entre los que se encuentran beber, cocinar y lavar platos (denominada P por la palabra Potable).

- ii) Usos domésticos que no requieren agua potable y pueden suplirse con agua de menor calidad, donde se consideró la descarga de inodoros, ducha, lavamanos, lavado de ropa, lavadero y limpieza del hogar (denominada NP por las palabras No Potable).
- iii) Usos agrícolas donde los cultivos son para autoconsumo de la vivienda, aquí se consideró el riego de los cultivos (denominada CA por las palabras Cultivo Autoconsumo).
- iv) Usos agrícolas donde los cultivos son para venta, aquí se consideró el riego de los cultivos (denominada CV por las palabras Cultivo Venta).
- v) Usos de crianza de animales para autoconsumo, donde se consideró el uso del agua para la hidratación de los animales (denominada AA por las palabras Animales Autoconsumo).
- vi) Usos de crianza de animales para venta, donde se consideró el uso del agua para la hidratación de los animales (denominada AV por las palabras Animales Venta).

Con estas 6 categorías de usos del agua se realizaron tipologías de uso, donde se revisaron las diferentes combinaciones de usos que se le daba al agua en la zona. Con esto se seleccionaron las tres diferentes combinaciones de uso que se le daría a cada uno de los tres sistemas a diseñar.

La demanda para usos domésticos y ganaderos se estableció basándose en valores encontrados en la literatura, (p.ej. 71 L/hab*día para uso doméstico (FAO, 2013; Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2021) y 0.2 L/cabeza*día para cría de aves (FAO, 2013; Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2021), en la zona de estudio las actividades ganaderas suelen realizarse a pequeña escala, por ello, esta fue la escala seleccionada.

Los requerimientos para el riego de cultivos se calcularon usando el software CROPWAT 8.0 (<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>). El módulo Clima/ETo utilizó como entrada la información de la estación “Llanadas” que es la estación más cercana que mide los parámetros requeridos por el software; la información del módulo Precipitación fue tomada de la estación “La Mesa”; en el módulo Cultivo se utilizaron los datos disponibles en el estudio (FAO and World Bank Group 2018) para cultivos de maíz, por su uso extendido en la zona; y por último, para el módulo Suelo se utilizó la textura “Sandy Clay Loam” que corresponde con lo reportado en el mapa de texturas publicado por IGAC (2002), esta textura se usó como entrada en el software Soil Water Characteristics de la FAO para obtener los parámetros requeridos en el módulo Suelo de CROPWAT (IGAC, 2002). Finalmente, con la información completa se obtuvieron los requerimientos de riego del cultivo. Las fechas de siembra y de cultivo fueron asignadas teniendo en cuenta las prácticas de los agricultores, quienes procuran que el agua requerida por el cultivo provenga principalmente de la precipitación.

4.3.5.2. Componentes de las alternativas de sistemas de aguas lluvias propuestas.

4.3.5.3.1. Área de captación. El área de captación es uno de los componentes principales de los SAALL, ya que su tamaño influye en el volumen y el material en la calidad del agua a recolectar. En este estudio se consideró como área de captación la cubierta de la vivienda (Abdulla and Al-Shareef 2009). Su tamaño y material se seleccionaron tomando en cuenta las características de las viviendas de la zona y las recomendaciones de la literatura (Unatsabar, 2004 y Abdulla y Al-Shareef, 2009).

4.3.5.3.2. Canaletas y bajantes. Debido al limitado uso de estos componentes en la zona de estudio, no se contaba con tamaños o formas “tipo” por lo que se tomaron como referencia las disponibles comercialmente. El diseño de estos componentes utilizó la intensidad de la lluvia

calculada a partir de las curvas IDF de la estación “El Cucharo” y se escogieron áreas de drenaje de acuerdo con el tamaño y distribución de la vivienda tipo propuesta. A partir de esta intensidad y las áreas de drenaje se calculó el caudal de diseño de cada tramo de las canaletas y bajantes mediante el método racional descrito en la Norma NS 085. Finalmente, utilizando el caudal de diseño, se dimensionaron las canaletas y bajantes con base en la teoría de canales abiertos y siguiendo los requisitos del Código Colombiano de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2017). Su material fue seleccionado considerando recomendaciones de la literatura (Unatsabar, 2004).

4.3.5.3.3. Tanque de almacenamiento. Para el dimensionamiento del tanque se utilizó el método de balance de masa, donde se consideraron tres enfoques, YBS, YAS y THETA, el método YBS suele sobreestimar el volumen de agua recolectada mientras que el método YAS es más conservador (Islam et al., 2010 y Khan et al., 2017). Para el caso de este estudio se seleccionaron los resultados del método THETA ya que representa un valor intermedio entre YBS y YAS (Fewkes y Butler, 2000), para esto se utilizaron las ecuaciones 5 y 6.

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} + \theta Q_t \end{array} \right. \quad (5)$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} (V_{t-1} + Q_t - \theta Y_t) - (1 - \theta) Y_t \\ S - (1 - \theta) Y_t \end{array} \right. \quad (6)$$

Donde D_t es la demanda (m^3) durante el intervalo de tiempo t , V_t es el volumen almacenado (m^3) durante el intervalo de tiempo t , θ es un parámetro entre 0 y 1, Q_t es el agua lluvia escurrida (m^3) del área de captación durante el intervalo de tiempo t , Y_t el rendimiento del almacenamiento (m^3) durante el intervalo de tiempo t y S es la capacidad de almacenamiento (m^3).

4.3.5.3.4. Tren de tratamiento. El tren de tratamiento se dividió en tres etapas: i) tratamiento primario, denominado prefiltración, que se refiere a los procesos realizados para

eliminar sólidos grandes y partículas sedimentables por gravedad, sin la necesidad de adicionar ningún tipo de químico para este propósito, ii) tratamiento secundario, denominado filtración, que se refiere a los procesos de remoción de partículas sólidas pequeñas que no son sedimentables, puede incluir procesos físicos, biológicos y químicos, y iii) tratamiento terciario, que se refiere a la desinfección física o química del agua. Para el diseño de cada etapa se realizó una búsqueda en la literatura de posibles componentes considerando la calidad del agua cruda, la factibilidad de instalación en áreas rurales y la facilidad de operación y mantenimiento.

4.3.5.3.4. Red de instalaciones hidrosanitarias. La red de instalaciones hidrosanitarias se diseñó proponiendo un trazado de la red hidráulica de la vivienda tipo, se definieron todos los tramos según el trazado propuesto y se asumió una presión inicial (altura de agua dentro del tanque elevado). Se utilizó el método Hunter modificado, compatible con lo requerido por la NTC 1500 para suministro y distribución de agua (Rodríguez, 2005), para calcular el caudal máximo probable que considera la probabilidad de que todos los aparatos estén en funcionamiento al mismo tiempo. Se predimensionaron las tuberías de la red de instalaciones hidrosanitarias utilizando el caudal máximo probable y se hizo la verificación de velocidades, que deben estar entre 0.5 y 2.5 m/s (Carmona, 2010). Se calcularon las pérdidas por fricción y por accesorios, para finalmente obtener la presión final en cada uno de los aparatos sanitarios, luego se modificaron los diámetros propuestos y la presión inicial (nivel inicial del agua) para asegurarse que las presiones cumplieran con las recomendadas por Carmona (2010) para cada aparato. La presión inicial indicó la necesidad de un tanque elevado y del componente de bombeo. Los requerimientos de la bomba se calcularon utilizando las características de las bombas disponibles comercialmente, la presión inicial requerida y las pérdidas por fricción y por accesorios desde el tanque del suelo al tanque elevado.

4.3.6. Evaluación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias utilizando la herramienta multicriterio

Una vez diseñadas las tres alternativas de SAALL como se explicó en la sección 5.3.5. y con los vectores de ponderación obtenidos mediante AHP, siguiendo los métodos de la sección 5.2., se utilizó el método TOPSIS para determinar cuál de las alternativas es la más adecuada para el caso de estudio. Para ello, se evaluó el desempeño de cada una de las alternativas para cada uno de los subcriterios seleccionados, construyendo así una matriz de decisión que fue normalizada (Ver Ecuación 7) y multiplicada por la ponderación correspondiente como se muestra en la Ecuación 8.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$r_{ij}w_j; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

Donde r_{ij} es la matriz de decisión normalizada, w_j es el vector de ponderación y el producto $r_{ij}w_j$ es la matriz normalizada ponderada.

Se estableció la solución ideal positiva (V_n^+) y la solución ideal negativa (V_n^-), como se muestra en las Ecuaciones 9 y 10.

$$V_n^+ = \{V_1^+ V_2^+ \dots V_n^+\} \{\max v_{ij}\}; i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$V_n^- = \{V_1^- V_2^- \dots V_n^-\} \{\min v_{ij}\}; i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Se calculó la distancia euclidiana de las alternativas a estas dos soluciones mediante las Ecuaciones 11 y 12. Donde D_i^+ y D_i^- son la medida de distancia para cada alternativa a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa, respectivamente.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

Finalmente, se calculó la distancia de cada alternativa a la solución ideal (C_i) utilizando la Ecuación 13.

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}; i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

Partiendo de las distancias se obtuvo una clasificación de las alternativas, quedando en primer lugar la más favorable para el caso de estudio. Este proceso fue desarrollado y resuelto utilizando Excel[®].

4.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite determinar la estabilidad de los resultados de un modelo desarrollado al modificar sus parámetros de entrada (Barredo y Gómez, 2006). Los parámetros a modificar en este tipo de estudios son los pesos de los criterios de evaluación. Sobre el análisis de sensibilidad, en la literatura se encontró que Melvin et al. (2023) varían los pesos de 5 criterios entre 0% y 25%, Barredo y Gómez (2006) recomiendan variar un 5% más y menos del valor de referencia. Otros autores proponen y evalúan distintos escenarios limitados con diferentes pesos, entre los que se encuentran valores extremos con pesos desde 0% hasta 100% (Galeano y Hurtado, 2017 y Jaramillo, 2018). En este estudio, el análisis de sensibilidad se realizó variando los pesos del primer criterio desde 1% hasta 100% y para cada una de estas variaciones se le asignaron todas las combinaciones de pesos posibles a los otros dos criterios, todo esto con intervalos de 1%, luego se hizo lo mismo para el segundo y tercer criterio, con lo que se obtuvieron todas las posibles

combinaciones de ponderación que podrían obtener los criterios, con cada una de ellas se aplicó el método TOPSIS para verificar como se comportaba el ranking en todas ellas.

5. Resultados y discusión

5.1. Identificación y selección de criterios de evaluación

Como resultado de la revisión de literatura se seleccionaron y revisaron 51 artículos donde se encontraron 294 subcriterios de evaluación; con estos subcriterios se creó una base de datos que incluye la dimensión a la que pertenece cada subcriterio y una breve descripción. La selección de los subcriterios finales se realizó mediante 4 filtros (ver Figura 5): i) subcriterios repetidos; ii) subcriterios de difícil cuantificación, ya que para utilizar el método de análisis multicriterio se debe poder medir cada alternativa en cada subcriterio con una métrica especificada (Keeney and Raiffa 1993); iii) subcriterios dependientes entre sí o con una descripción o forma de calcular parecida, ya que para utilizar el análisis multicriterio es necesario que todos los subcriterios sean completamente independientes unos de otros (Keeney y Raiffa, 1993); sin embargo, no se descartaron los subcriterios que aunque eran distintos utilizaban las mismas variables para su cálculo; y iv) subcriterios que se calculaban con la mismas variables o duplicados.

Figura 5.

Detalle del proceso de filtrado de subcriterios.



Los 7 subcriterios resultantes del proceso de filtrado fueron expuestos y discutidos con expertos del grupo de investigación GPH para confirmar su relevancia en la evaluación de SAALL. En la Tabla 4 se muestran los subcriterios seleccionados, el identificador (ID) de cada uno de ellos, el criterio al que pertenecen, la métrica que se utiliza en cada uno y una pequeña descripción.

Tabla 4.

Detalles de los subcriterios seleccionados para evaluar sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

ID	Subcriterio	Criterio	Métrica	Descripción
E.1	Beneficio	Económico	COP	Costos del sistema durante toda su vida útil
E.2	Costo	Económico	COP	Beneficios del sistema durante toda su vida útil
S.1	Facilidad de uso percibida	Social	5 Categorías	Facilidad de uso percibida por las personas. Categorías: Muy difícil (1), Difícil (2), Normal (3), Fácil (4) y Muy fácil (5).
S.2	Percepción sobre disponibilidad de fuentes de agua diferentes al agua lluvia	Social	5 Categorías	Percepción sobre la cantidad de agua disponible de las fuentes diferentes al agua lluvia. Categorías: Muy baja (1), Baja (2), Media (3), Alta (4) y Muy alta (5).
T.1	Tamaño del suministro	Técnico	m ³	Volumen máximo de agua de lluvia que se puede recolectar en un área específica durante un período específico.
T.2	Comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento	Técnico	Calificación (0 – 5)	Análisis comparativo de la percepción sobre la calidad de agua ofrecida por fuentes de abastecimiento disponibles diferentes al agua lluvia y la calidad de agua entregada por el sistema. Calificación de 0 a 5, asignado según las reglas descritas en la sección 6.3.5.
T.3	Mantenimiento	Técnico	5 Niveles	Requisitos de mantenimiento de por vida. Niveles de dificultad: Muy baja (1), Baja (2), Media (3), Alta (4) y Muy alta (5).

5.1.1. Subcriterios Económicos.

En el criterio económico se planteó utilizar como subcriterio la relación costo/beneficio (C/B), ya que es un indicador comúnmente utilizado en la literatura para la evaluación económica de proyectos. Según Semaan et al. (2020), este es uno de los indicadores más utilizados en la evaluación de la viabilidad económica de SAALL. Sin embargo, en este caso se decidió separar en dos subcriterios, E.1 Beneficios y E.2 costos, para hacer explícita de manera independiente la cuantía de los costos y los beneficios. Además, dado que, el método TOPSIS encuentra valores máximos y mínimos de calificación en cada subcriterio para cada alternativa, con la relación costo/beneficio se busca el valor más cercano a 1, por lo que no era compatible utilizar esta relación como subcriterio dentro del método TOPSIS.

5.1.2. Subcriterios Sociales.

En el criterio social se identificaron dos subcriterios, facilidad de uso percibida y percepción sobre la disponibilidad de fuentes de agua, los cuales se cuantificaron utilizando la escala de Likert (Emenike et al., 2017 y Ignacio et al., 2019).

El subcriterio S1 es la percepción directa de las personas sobre facilidad de uso de las alternativas de SAALL propuestas, esta percepción se considera relevante ya que puede afectar positiva o negativamente la intención de comportamiento de uso de los usuarios del sistema, lo que impactaría su diseño e implementación debido a la estrecha interacción usuario-sistema (Ignacio et al., 2019).

Para el subcriterio S2, que mide la percepción sobre la disponibilidad de fuentes de agua, se propuso que se basara en la comparación entre las características de costo, cantidad y calidad percibidos de las fuentes de agua disponibles diferentes al agua lluvia y las características de costo,

cantidad y calidad del agua ofrecida por cada una de las alternativas propuestas. Se descartaron las siguientes comparaciones de características:

- La comparación de costos porque implica tener las percepciones de las personas sobre el costo de cada sistema, lo que podría crear algún tipo de dependencia entre este subcriterio con el subcriterio E.2 Costos.
- La comparación de percepción de calidad de las fuentes de agua disponibles diferentes al agua lluvia con la calidad del agua ofrecida por cada una de las alternativas de SAALL propuestas ya que, tendría dependencia con el subcriterio T.2 Comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento.

Se considera que el subcriterio S.2 podría afectar directamente el diseño e implementación de SAALL, pues una percepción sobre disponibilidad de fuentes diferentes al agua lluvia baja podría asegurar el uso generalizado del SAALL mientras que, una percepción sobre disponibilidad de fuentes diferentes al agua lluvia alta podría eliminar completamente la necesidad de las personas de usar el SAALL (Emenike et al., 2017).

Se consideró que a menor cantidad percibida mayor calificación deberá tener la alternativa que más agua pueda proveer al usuario, de forma análoga, a mayor cantidad percibida, menos relevancia tiene la alternativa que más agua pueda proveer al usuario. Se pueden asignar dos puntajes, el primero ordena las alternativas dependiendo cual ofrece más agua al usuario y la mayor calificación será para la alternativa que más agua ofrezca, el segundo ordena las alternativas dependiendo de cual ofrece menos agua al usuario y la mayor calificación será para la que menos agua ofrezca. Si la cantidad de agua percibida de fuentes diferentes al agua lluvia se considera muy baja (1), baja (2) o media (3), la calificación del criterio S.2. de las alternativas será el primer

puntaje, si la cantidad se considera de alta (5) o muy alta (4), la calificación de las alternativas será el segundo puntaje.

5.1.3. Subcriterios Técnicos.

Sobre el criterio técnico, el subcriterio T.1 Tamaño del suministro se mide mediante el volumen máximo de agua de lluvia que se puede recolectar de un área de techo en un período específico. Esta métrica es utilizada por Abu-Zreig et al. (2019), y se consideró útil por involucrar dos de los dos parámetros principales para el diseño del tamaño del tanque mencionados por múltiples autores (Chiu et al., 2009, 2015; Campisano y Modica, 2012; Bocanegra et al., 2014; Allen y Haarhoff, 2015; Fonseca et al., 2017; Khan et al., 2017 y Lopes et al., 2017): precipitación y área de captación.

El subcriterio T.2, Comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento, se planteó para evaluar la calidad del agua del sistema con algunos de los parámetros propuestos por Abdulla y Al-Shareef (2009). Sin embargo, para medir esta calidad sería necesario que los sistemas estuviesen implementados y funcionando, esto no es compatible con el hecho de que este estudio proporciona una herramienta para seleccionar la alternativa que mejor se acomode a ciertas condiciones, para así implementar la óptima. Debido a esto, se decidió modificar la métrica del subcriterio sin que este perdiera el propósito de cuantificar la calidad del agua que entregaría el sistema, por lo que su calificación se basó en la comparación de la percepción sobre la calidad de agua ofrecida por fuentes de abastecimiento disponibles diferentes al agua lluvia y la calidad de agua entregada por el sistema. Por ejemplo, con una percepción de mala calidad en las fuentes disponibles diferentes al agua lluvia se tendría mayor calificación en las alternativas de SAALL que pueden ofrecer agua para usos que requieren mejor calidad, mientras que una percepción de buena calidad en las fuentes disponibles diferentes al agua lluvia

se tendría menor calificación en las alternativas de SAALL que pueden ofrecer agua para usos que requieren mejor calidad.

El subcriterio T.3, Mantenimiento, es mencionado por Melville et al. (2016), aunque no especifica con qué métrica se debe evaluar. En este caso, se propuso medir este subcriterio con una escala de Likert de cinco puntos, descomponiendo la dificultad de mantenimiento en cuatro ítems calificados en una escala de 1 a 5: i) facilidad de consecución de las herramientas y equipos necesarios para el mantenimiento, ii) cualificación del personal requerido para realizar las actividades de mantenimiento, iii) frecuencia anual con que se debe hacer el mantenimiento y, iv) facilidad de consecución de los materiales necesarios para el mantenimiento. Para esto, se realizó una base de datos de posibles componentes de un SAALL y su nivel de dificultad de mantenimiento, que se tomó como el promedio del nivel de dificultad entre los cuatro ítems nombrados anteriormente. Finalmente, para la calificación del subcriterio para cada alternativa se busca en la base de datos los componentes de la alternativa y se asigna el puntaje del componente con mayor nivel de dificultad. En la Tabla 5 se detalla cómo se califica cada uno de los 4 ítems.

Tabla 5.

Calificación de los ítems del subcriterio mantenimiento.

Ítem	Dificultad	Descripción
M1. Herramientas	1	No se necesita
	2	Se encuentran comúnmente en la vivienda
	3	Se deben comprar
	4	Se debe comprar, pero es difícil conseguir
	5	Se debe alquilar maquinaria o equipo
M2. Personal	1	Cualquier persona (sin ningún tipo de conocimiento sobre el sistema)
	2	Cualquier persona que haya tenido algún contacto con el sistema
	3	El usuario del sistema puede hacerlo

	4	Cualificado (La persona que construyó el sistema)
	5	Cualificado (Se necesita contratar a un especialista)
M3. Frecuencia anual	1	Menor a 1 vez por año
	2	1 o 2 (semestral o anual)
	3	3 o 4 (trimestral o cada 4 meses)
	4	Entre 5 y 12 (entre bimestral y mensual)
	5	52 o más (semanal o más frecuente)
M4. Materiales (cloro, jabón, tubo, canal, etc.)	1	No se necesita
	2	Se encuentran comúnmente en la vivienda
	3	Se deben comprar
	4	Se debe comprar, pero es difícil conseguir
	5	No se consigue en la región

Cuando se realizó esta búsqueda de subcriterios había una cantidad limitada de artículos que compararan y evaluaran diferentes alternativas de SAALL por lo que, además de revisar en estos artículos encontrados, los subcriterios también fueron buscados en artículos que fueran específicos de cada criterio.

5.2. Integración de dimensiones en una herramienta multicriterio

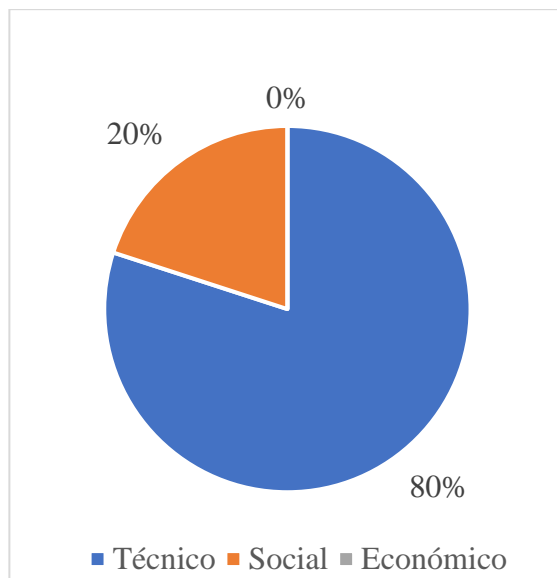
Para esta fase se contactaron 99 expertos en SAALL, de los cuales participaron 23; 5 de ellos realizaron la comparación mediante videoconferencia y 17 la diligenciaron de forma autónoma, y se obtuvieron 15 respuestas consistentes. Este número de respuestas consistentes se considera suficiente para realizar el análisis ya que todas las respuestas provienen de personas con competencias en SAALL. Otros estudios como Saeedi et al. (2022), Galarza et al. (2015) y Melville et al. (2014) utilizaron entre 9 y 15 expertos para la ponderación de criterios.

En la Figura 6 se muestra la distribución de expertos según el área en que se considera tienen experticia. Esta distribución de experticia en SAALL con énfasis en lo técnico se dio a pesar de que en la búsqueda hubo un esfuerzo por contar con participación de investigadores con experticia en las diferentes dimensiones. El mayor número de expertos en SAALL enfocados en

lo técnico refleja que la tendencia actual de la investigación en esta área frecuentemente deja de lado aspectos sociales y económicos, situación que es más acentuada en el trabajo de investigadores hispanohablantes.

Figura 6.

Distribución de expertos según el área de experticia.



La ponderación de los criterios se encuentra en la Tabla 6. Los valores obtenidos muestran que, aunque la mayoría de los expertos tenían conocimientos y experiencia principalmente en aspectos técnicos, hubo una tendencia a dar mayor importancia al criterio social. Este resultado se puede deber a que los expertos son conscientes de que al tratarse de un sistema descentralizado administrado por el usuario, el uso, mantenimiento y funcionamiento está influenciado por las actitudes de los propietarios (Domènech y Saurí, 2011; Mankad y Tapsuwan, 2011; Domènech et al., 2013). Es importante destacar que el criterio social no se considera dictador, ya que su ponderación no supera la suma de las ponderaciones de los criterios restantes, sin embargo, en vista de que se acerca bastante, resultaría valiosa una validación adicional por parte de otro panel

de expertos (Corrente et al., 2021). Los criterios técnico y económico obtuvieron ponderaciones similares, probablemente porque son criterios ampliamente utilizados en la formulación de proyectos y la mayoría de los expertos están familiarizados con estos y reconocen la importancia de ambos.

En los subcriterios sociales se puede notar que la facilidad de uso percibida tiene una ponderación alta en comparación con la percepción sobre disponibilidad de fuentes, lo mismo ocurre con los subcriterios económicos donde el beneficio tiene una ponderación mayor en comparación con el costo, mientras que los subcriterios técnicos tienen la ponderación distribuida de forma más equitativa, esto puede deberse a que los expertos tienen más experiencia y conocimiento en los aspectos técnicos de los SAALL que en aspectos sociales y económicos lo que les permitió realizar la comparación de subcriterios técnicos con más información. Una posible explicación de la marcada diferencia entre la ponderación de los subcriterios sociales puede ser que los expertos reconocen que, inclusive cuando el agua lluvia es necesaria para asegurar el suministro, si la alternativa de SAALL es considerada muy difícil de usar por los usuarios, esto impedirá que su uso sea generalizado (Ignacio et al., 2019). La diferencia entre la ponderación de los subcriterios económicos, probablemente se deba a que los expertos son conscientes de que los SAALL aportan múltiples beneficios que normalmente no son cuantificados debido a la dificultad para su cuantificación en términos monetarios (Chiu et al., 2009 y Christian et al., 2016), y por ello le asignaron mayor relevancia al subcriterio beneficio.

Tabla 6.

Ponderación de los criterios y subcriterios de evaluación.

Criterio	Ponderación	ID	Subcriterio	Ponderación
-----------------	--------------------	-----------	--------------------	--------------------

Económico	23.9%	E.1	Beneficio	77.8%
		E.2	Costo	22.2%
Social	49.7%	S.1	Facilidad de uso percibida	61.1%
		S.2	Percepción sobre disponibilidad de fuentes de agua diferentes al agua lluvia	38.9%
Técnico	26.4%	T.1	Tamaño del suministro	43.4%
		T.2	Usos finales	32.0%
		T.3	Mantenimiento	24.6%

5.3. Validación de la herramienta en un caso de estudio

En esta sección se resume la información recopilada en el área de estudio, los resultados de los análisis de los datos hidroclimáticos de las estaciones disponibles y de la calidad de agua lluvia de la zona. Además, se explican las alternativas formuladas y el resultado de la evaluación de estas utilizando la herramienta multicriterio.

5.3.1. Información socioeconómica, infraestructura y prácticas relacionadas con el agua

La vereda Garbanzal, en el municipio Los Santos, presenta características socioeconómicas típicas de las zonas rurales andinas y además las características hidrológicas del municipio, combinadas con los efectos del cambio climático, han hecho del suministro de agua un problema municipal relevante (INGEOMINAS, 2009).

5.3.1.1. Sección 1 Información Demográfica. En la Tabla 7 se muestran algunos resultados de la información demográfica de los habitantes de la zona. El número de habitantes por vivienda y su distribución por sexo corresponde a valores típicos encontrados en zonas rurales (Delgado, 2018 y Secretaría Distrital de Planeación, 2022). La mayoría de las personas tienen menos de 39 años, lo cual es inusual en zonas rurales, ya que las personas jóvenes suelen desplazarse a zonas urbanas, quedando principalmente personas mayores (Delgado, 2018). Sobre

la ocupación, la mayoría son estudiantes que se encuentran entre los 6 y 22 años, coincidiendo con la mayoría de las personas jóvenes en la zona. Agricultores y amas de casa son las siguientes ocupaciones más comunes en la zona, lo que concuerda con lo observado en otras zonas rurales del país (Domínguez, 2014 y Secretaría Distrital de Planeación, 2022). El nivel educativo máximo alcanzado es el nivel de las personas que no son estudiantes, por eso el N es diferente al número total de habitantes, la mayoría tienen primaria básica o primaria incompleta, siendo menor al promedio a nivel nacional de años de escolaridad para las personas de las zonas rurales, que es 8.6 (Delgado, 2018).

Tabla 7.

Información demográfica de los habitantes y características de propiedad de las viviendas de la zona.

Características de las viviendas		Porcentaje
Tipo de vivienda	Propia	59%
	Arrendada	24%
	Aparcería	10%
	Otras	7%
Características demográficas		Porcentaje
Sexo	Mujeres	49%
	Hombres	51%
Edad	Infantes (0 – 12 ¹)	29%
	Adolescentes (13 – 19 ¹)	14%
	Adultos jóvenes (20 – 39 ¹)	23%
	Adultos de mediana edad (40 – 59 ¹)	19%
	Adultos mayores (más de 60 ¹)	16%
Ocupación	Estudiantes	39%
	Amas de casa	11%
	Agricultores	10%
	Obreros de construcción	7%
	Otros	33%

Nivel educativo máximo alcanzado (N=61)	Primaria incompleta (1 – 4 ²)	39%
	Primaria completa (5 ²)	23%
	Secundaria incompleta (6 – 10 ²)	10%
	Secundaria completa (11 ²)	25%
	Técnicos, tecnólogos o grado profesional (más de 11 ²)	3%

Nota: N (viviendas) = 29; N (personas) = 129; Promedio personas por vivienda = 4; ¹edad; ²años de estudio.

5.3.1.2. Sección 2 Información de las Viviendas. El estado de propiedad de las viviendas de la zona se encuentra en la Tabla 7. La mayoría de las viviendas son propias, al igual que en zonas rurales de otras regiones (Secretaría Distrital de Planeación, 2022). Esta característica puede representar una ventaja para la implementación de SAALL pues si los habitantes son propietarios tendrán más control y autonomía sobre las decisiones acerca de la infraestructura de sus viviendas, lo que les permitiría instalar SAALL de manera más fácil; a diferencia de las personas que viven en arriendo o no son propietarios, que podrían no estar dispuestos a invertir en SAALL debido a su condición de no ser dueños de la vivienda.

5.3.1.3. Sección 3 Información sobre Usos y Demanda de Agua. En la Tabla 8 se presenta el resumen de la información relevante acerca de los usos y la demanda de agua en la zona. En la zona de estudio no se tiene infraestructura de suministro de agua ni de saneamiento prestado por entidades públicas, por lo que todas las fuentes, a excepción del agua del carrotanque, son autogestionadas por la comunidad. En la Figura 7 se muestran algunas de las fuentes de abastecimiento de agua utilizadas. A pesar de usar múltiples fuentes en la zona, los habitantes manifestaron que ninguna de ellas está disponible durante todo el año y además no confían completamente en la calidad del agua de algunas de las fuentes. Sobre las actividades productivas, un 93% de viviendas las realizan tanto para autoconsumo como para venta.

Tabla 8.*Información sobre usos y demanda de agua en las viviendas encuestadas.*

Características	Porcentaje	
Fuentes de abastecimiento	Sistema individual – Agua Lluvia	97%
	Sistema colectivo – fuente superficial	55%
	Sistema colectivo – fuente subterránea	7%
	Carrotanque	83%
Tratamientos utilizados	Cloro	34%
	Ebullición	34%
	Sedimentación	24%
Actividades productivas	Crianza de animales	17%
	Cultivos	17%
	Crianza de animales y cultivos	59%
	Ninguno	7%
Cultivos comunes	Maíz	28%
	Yuca	31%
	Tabaco	28%
	Otros	21%
	Ninguno	24%
Animales de crianza comunes	Aves	52%
	Bovinos	28%
	Otros	16%
	Ninguno	24%

Nota: N=29 viviendas.

Figura 7.

Evidencia fotográfica de algunas de las fuentes de agua disponibles en la zona de estudio.



(a) Tanque de agua lluvia



(b) Agua subterránea

5.3.1.4. Sección 4 Percepción sobre el Agua Lluvia. La Tabla 9 muestra información sobre la percepción de los habitantes de Garbanzal sobre calidad del agua lluvia, riesgos de usarla, su utilidad, su facilidad de uso, entre otros. En relación con la calidad del agua lluvia, el 59% de las personas la consideraban entre limpia y muy limpia, esto coincide exactamente con el porcentaje de personas que consideraban que no hay ningún riesgo en utilizar el agua lluvia.

Tabla 9.

Percepciones sobre el agua lluvia de las viviendas encuestadas.

Característica	Métrica	Porcentaje de viviendas
Calidad del agua Lluvia	Muy sucia	0%
	Sucia	3%
	Medianamente limpia	38%
	Limpia	45%
	Muy limpia	14%
Utilidad del agua	Inútil	0%
	Poco útil	0%
	Moderadamente útil	0%
	Útil	17%
Facilidad de uso	Muy útil	83%
	Muy difícil	3%

	Difícil	24%
	Normal	7%
	Fácil	52%
	Muy fácil	14%
Riesgos de uso	Enfermedades estomacales	28%
	Enfermedades a la piel	7%
	Otros	7%
	Ninguno	59%

Nota: N=29 viviendas.

5.3.1.5. Sección 5 Información sobre los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias

Existentes. El resumen de la información de infraestructura y prácticas de mantenimiento de los componentes de los SAALL existentes se presenta en la Tabla 10. Sobre el material del techo se encontró que hay viviendas donde recolectan el agua lluvia de más de un tejado y, además, estos pueden ser de materiales distintos, por lo que el tamaño de la muestra es mayor a la cantidad de viviendas encuestadas.

Las canaletas y bajantes no son ampliamente usadas en la zona de estudio y muchas consisten en material sobrante de otras construcciones que fue acondicionado para dirigir el agua lluvia. En las Figuras 8a, 8c y 8d se muestran canaletas típicas usadas en la zona. Solo el 13% de las viviendas utilizan mallas y filtros principalmente en la entrada del tanque de almacenamiento, en las Figuras 8b y 8c se muestra las mallas que suelen usarse para retener sólidos. El mantenimiento de los techos, canaletas y bajantes consiste en retirar sólidos, hacer limpieza y hacer cambios y reparaciones en estos.

El 93% de las viviendas tenían tanque de almacenamiento en su SAALL, en las Figuras 8d, 8e y 8f se muestran varios tanques de almacenamiento encontrados en la zona. El mantenimiento se realiza en promedio 4 veces por año y este consiste en una limpieza interna del tanque. El tamaño de la muestra de números de tanque por vivienda corresponde al número de

viviendas encuestadas. El bombeo es otro componente con el que cuentan los SAALL existentes, aunque no es generalizado, el 18% de las viviendas utilizaban bombas.

Tabla 10.

Información de infraestructura y prácticas de mantenimiento de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias de las viviendas encuestadas.

		Porcentaje	Magnitud
Características de techo			
Área de techo promedio	-	-	68 m ²
Desviación	-	-	26.1 m ²
Viviendas que hacen limpieza y mantenimiento	-	24%	-
Materiales más usados (N=35)	Lámina metálica	29%	-
	Fibrocemento	29%	-
	Teja cerámica	26%	-
	Teja de cemento	14%	-
	Teja plástica	3%	-
Características de canaletas			
Porcentaje de uso		86%	-
Viviendas que hacen limpieza y mantenimiento		56%	-
Materiales más usados	Lámina metálica	76%	-
	Plástico	20%	-
	Fibrocemento	4%	-
Características de bajantes			
Porcentaje de uso		31%	-
Viviendas que hacen limpieza y mantenimiento		56%	-
Materiales más usados	Lámina metálica	11%	-
	Plástico	89%	-
Características de tanques de almacenamiento			
Porcentaje de uso		93%	-
Numero de tanques por vivienda (N=27)	1 – 4	93%	-
	5 – 8	7%	-
Viviendas que hacen limpieza y mantenimiento (N=27)		100%	-
Materiales usados (N=57)	Arcillosos/concreto	48%	-
	Plásticos	37%	-

	Varios	15%	-
Volumen de tanque (N=35)	150L – 500L	31%	-
	501L – 2000L	63%	-
	Más de 2000L	6%	-

Nota: Donde no se especifique, N=29

Figura 8.

Evidencia fotográfica de componentes de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias existentes.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

5.3.1.6. Sección 6 Información sobre la Disposición de Implementar un Sistema de Aprovechamiento de Aguas Lluvias. Esta sección fue diseñada para las personas que no contaban con un SAALL con almacenamiento en tanque; sin embargo, en la zona solo se encontró a una única familia que no tenía, quienes manifestaron que estarían dispuestos a utilizar el agua lluvia en su vivienda ya que perciben que les traería beneficios en cuanto al aumento de la cantidad de agua disponible. No obstante, las barreras que les impiden tener un sistema son principalmente económicas y falta de conocimiento técnico sobre el tema.

Las características de acceso al agua en la zona de estudio coinciden con características típicas de los contextos rurales andinos, como el uso de múltiples fuentes de agua que deben ser gestionadas por la comunidad, lo que probablemente surgió como respuesta a la precaria cobertura de servicios de agua y saneamiento públicos suministrada por los gobiernos locales; otras características como la intermitencia del servicio y la mala calidad del agua, reportados por los habitantes de la zona de estudio, también son comunes en el suministro de agua en contextos rurales (Chino et al., 2016; Dickson et al., 2016; Domínguez et al., 2016 y Domínguez et al., 2016).

Autores como Fuentes et al. (2018) y Hajani y Rahman (2014) reportan el uso extendido del agua lluvia en entornos rurales en México y Australia, de hecho, Fuentes et al. (2018)

encontraron que el agua lluvia era la fuente principal en comunidades rurales donde el suministro de agua es deficiente. Los hallazgos de la literatura coinciden con lo observado en la zona de estudio, donde se encontró una adopción generalizada del uso del agua lluvia y, en la mayoría de las viviendas encuestadas, esta era la fuente principal de agua.

La aceptación social de los sistemas SAALL en la zona es alta. Según el modelo de receptividad de Jeffrey y Seaton (2004) que incluye cuatro pasos para mejorar la aceptación social de una tecnología, conciencia, asociación, adquisición y aplicación, se observa que, según la encuesta aplicada, en la zona de estudio el 93% de las viviendas superaron los cuatro pasos del modelo de receptividad, lo que explica la alta calificación obtenida en la percepción de calidad y utilidad del agua lluvia.

En cuanto a los SAALL existentes, el área de captación promedio en la zona de estudio se encuentra dentro de los valores comunes encontrados en otras zonas rurales, que varían entre los 26 m² a los 120 m², predominando las áreas pequeñas (Chino et al., 2016 y Fuentes et al., 2018). Sobre los materiales utilizados, se observa que en otras zonas rurales predominan las láminas metálicas, hormigón y tejas de arcilla, coincidiendo con los materiales de techo utilizados en la zona de estudio (Chino et al., 2016 y Fuentes et al., 2018). Finalmente, respecto a los tanques de almacenamiento, la literatura reporta valores que varían entre 5 m³ y 12 m³ (Fuentes et al., 2018), mientras que en la zona de estudio estos varían entre 0.15 m³ y 2 m³, lo que indica que los SAALL descritos en la literatura son considerablemente más grandes que los presentes en la zona de estudio, en cuanto sus materiales, estos coinciden con los descritos por Fuentes et al. (2018).

Sobre las barreras e incentivos, aunque se tiene una única vivienda que respondió la sección 6, esta coincide con dos de las barreras reportadas en el estudio de Sheikh (2020) por parte del público en general, falta de conocimiento e información y los altos costos; en cuanto a los

incentivos, en el estudio de Sheikh (2020) reportan el apoyo financiero como el más importante. Sin embargo, en esta investigación el incentivo encontrado es el aumento en la disponibilidad de agua que aporta el SAALL, aunque probablemente el apoyo financiero facilitaría la implementación de un SAALL en esta vivienda ya que manifestaron como barrera la falta de recursos económicos.

5.3.2. *Recopilación de información hidroclimatológica*

El porcentaje de datos faltantes se verificó para las tres estaciones disponibles, comprobando que este estuviera dentro del umbral de aceptación utilizado por Becerra y Parra (2016) (Tabla 11). Para las estaciones “El Cucharo” del IDEAM y “Llanadas” del GPH, no se realizaron verificaciones adicionales, como la consistencia de los datos. Para el caso de “El Cucharo” es de esperarse que el IDEAM use datos confiables para construir las curvas IDF, mientras que para “Llanadas”, debido al corto tiempo de monitoreo y, además, al ser una estación meteorológica de carácter privado, que se encuentra bajo constante revisión, es de esperarse que los datos sean consistentes. Por último, para la estación “La Mesa”, se revisó el diagrama de doble masa presentado por Becerra y Parra (2016), que demuestra que la precipitación se ha medido de forma homogénea a lo largo de los años y que la estación no ha presentado fallas o problemas durante el tiempo de medición. Por lo tanto, se pudo afirmar que la información es consistente (Becerra y Parra, 2016).

Tabla 11.

Porcentaje de datos faltantes de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

Estación	Intervalo de medición	Porcentaje de datos faltantes
“El Cucharo”	1965 – 2009	7.11%
“Llanadas”	Septiembre 10 de 2020 – Septiembre 3 de 2022	2.62%

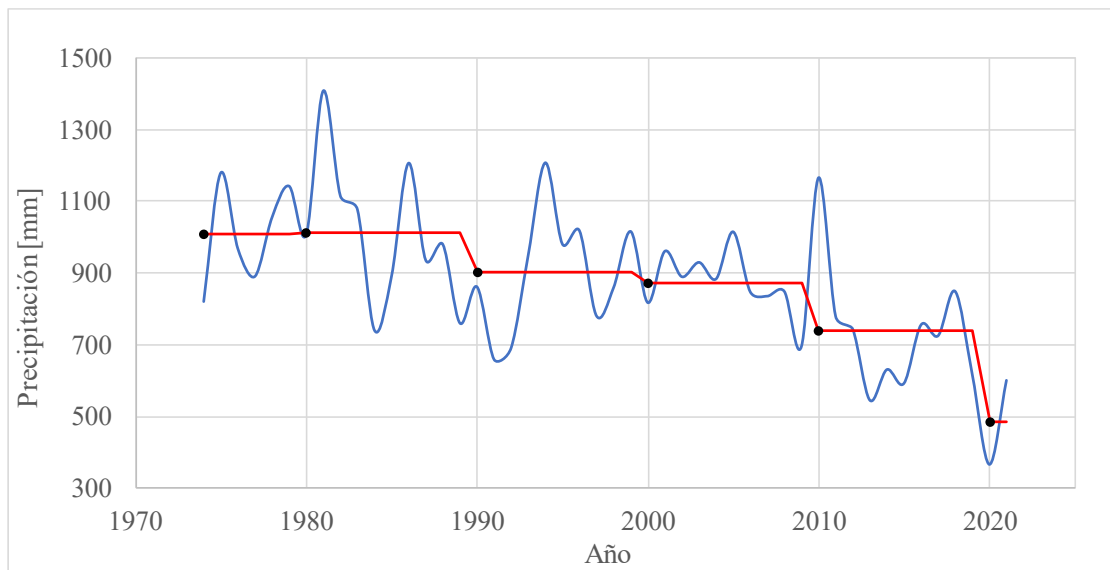
Conocer el comportamiento de la precipitación en la zona es de especial interés para el diseño de un SAALL, especialmente del tanque de almacenamiento. Para esto se realizaron dos análisis con los datos de la estación “La Mesa”, primero se buscó si la precipitación presentaba alguna tendencia a lo largo de los años y a continuación se analizó su distribución temporal utilizando el ciclo anual de precipitación.

5.3.2.1. Tendencia de Decrecimiento Anual. En la Figura 9 se muestra la precipitación anual (línea azul) y la precipitación media de cada década (línea roja). En la gráfica se destaca que la precipitación ha disminuido en los últimos 30 años. Se encontró que la precipitación media anual de la primera década (1974 – 1979) era 1008 mm, mientras que en la última década de la que se tiene registro (2010 – 2019) este valor fue 740 mm, es decir, una reducción de 270 mm en esos 45 años. Sin embargo, si se calcula la media de última década sin incluir el año 2010, que presentó una precipitación mayor y que causa que la media sea mayor, se tendría un promedio de 693 mm, es decir, una disminución de 315 mm. Además, también se puede apreciar que este decrecimiento se ha presentado paulatinamente y de forma constante a lo largo de los años, ya que cada década es inferior a la anterior. Según UNESCO (2020), el cambio climático puede causar precipitaciones fuertes e inundaciones o, en el otro extremo, periodos largos sin lluvias que ocasionan sequías intensas y prolongadas; además, estudios como García et al. (2016) e Ivanova y Marín (2012) encontraron al analizar las series de precipitación de múltiples estaciones repartidas en el altiplano cundiboyacense y en Antioquia, tendencias tanto crecientes como decrecientes que no parecen responder a una distribución espacial y que posiblemente sean causadas por el cambio climático.

Por lo tanto, es probable que la precipitación de la zona de estudio este siendo afectada por el cambio climático y el efecto que este produce es una disminución en su magnitud.

Figura 9.

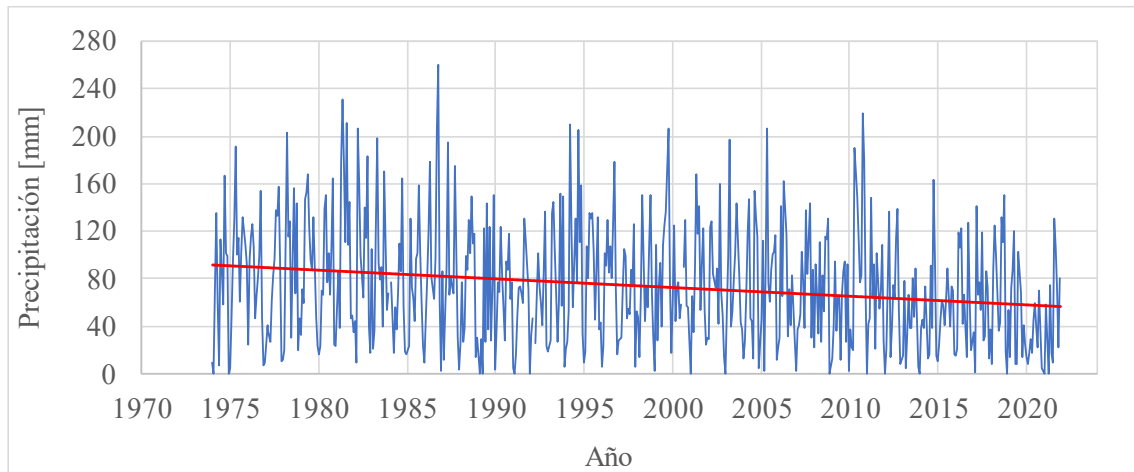
Serie de lluvias anuales acumuladas y medias de cada década de la estación La Mesa (1974 – 2021).



5.3.2.2. Tendencia de Decrecimiento Mensual. En la Figura 10 se muestra la precipitación mensual (línea azul) y la línea de tendencia de esta (línea roja). Aunque menos pronunciado que a escala anual (Figura 10), también se observa una disminución de la precipitación acumulada mensual.

Figura 10.

Serie de lluvias mensuales de la estación La Mesa (1974 – 2021).



En la Tabla 12 se muestra cómo el promedio de precipitación acumulada mensual ha disminuido a lo largo de los años, coincidiendo con lo observado en la serie de lluvias anuales. Esta disminución también se evidencia en la Figura 10, donde se observa que cada vez hay menos meses extremadamente lluviosos, mientras que los meses secos no presentan gran cambio. Los únicos datos que no coinciden con el decrecimiento mencionado son los del año 2010, caracterizado por precipitaciones notablemente más altas.

Tabla 12.

Medias y desviaciones estándar de la precipitación mensual de la estación “La Mesa”, para cada década.

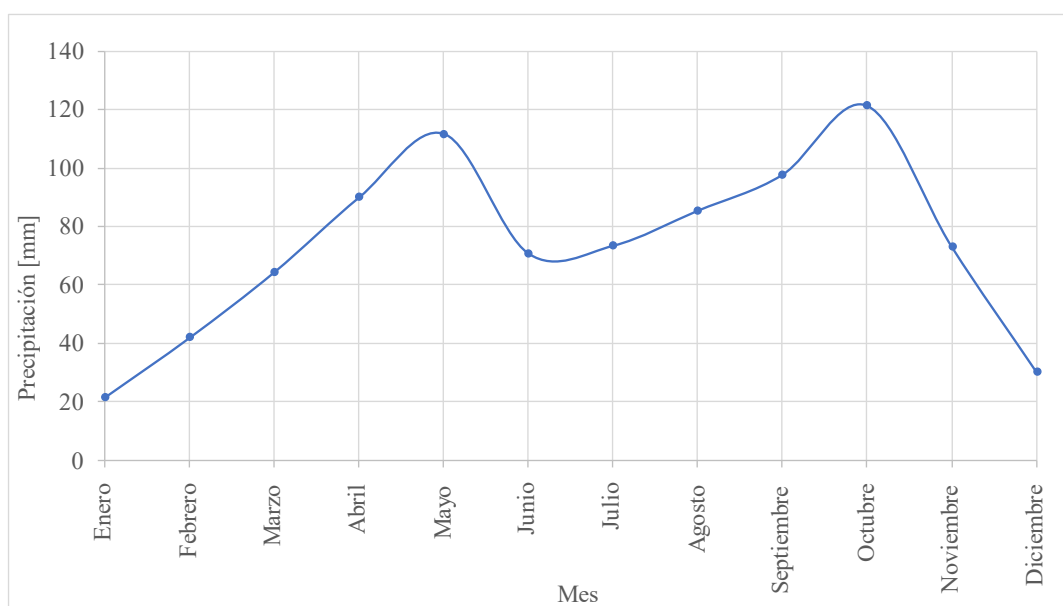
Década	Media [mm]	Desviación estándar [mm]	Rango [mm]
1974 – 1979	84.03	51.35	203.0
1980 – 1989	84.97	57.64	260.0
1990 – 1999	75.77	48.01	210.0
2000 – 2009	73.26	44.96	206.0
2010 – 2019	61.68	46.32	219.4

5.3.2.3. Ciclo anual de precipitación. En la Figura 11 se muestra el ciclo anual de la lluvia donde, debido al paso de la zona de convergencia intertropical, se evidencia un comportamiento bimodal en que se presentan dos épocas húmedas, caracterizadas por altas precipitaciones, y dos épocas de sequía, caracterizadas por precipitaciones muy bajas o por ausencia de precipitaciones.

También se observa que el periodo de sequía más crítico se encuentra entre diciembre, enero y febrero, donde la menor precipitación mensual promedio es cercana a los 20 mm. Sin embargo, se debe considerar que este valor es un acumulado mensual, ya que en la zona se presentan días, incluso consecutivos, donde la precipitación es 0 mm. Entre junio, julio y agosto también hay una disminución de la precipitación, pero no es tan significativa como en el primer periodo de sequía. Esta distribución temporal de la precipitación coincide con la distribución encontrada por Becerra y Parra (2016) para diferentes estaciones, lo que era de esperarse al tener zonas de estudio cercanas.

Figura 11.

Ciclo anual de precipitación estación La Mesa (1974 – 2021).



5.3.3. *Recolección de información sobre la calidad del agua*

Debido a la incidencia que puede tener el material de techo y de tanque en la calidad del agua lluvia, se realizó un análisis de estos componentes en la zona, donde se encontró que los materiales más comunes de techo son metálicos y arcillosos (principalmente teja cerámica), estos materiales coinciden con los recomendados por Unatsabar (2004) para la captación de aguas lluvias donde mencionan que los materiales metálicos son fáciles de instalar y requieren poco mantenimiento. Además, se indica que las tejas cerámicas pueden resultar más económicas; el material metálico es el más usado para las canaletas en la zona. Según Unatsabar (2004), este material es el más adecuado por su duración y requerimientos mínimos de mantenimiento, sin embargo, explican también que usar canaletas de PVC puede ser más económico con ventajas similares a las de las canaletas metálicas. El uso de material arcilloso/concreto (ladrillo, cemento, concreto o una combinación de estos) es predominante para los tanques de almacenamiento de la zona. Basán Nickisch et al. (2018) argumenta que, independientemente del material de tanque, este debe mantenerse cerrado para evitar que entren contaminantes, mientras que Chino et al. (2016) indican que los tanques construidos de concreto pueden recolectar agua segura para uso doméstico.

Los parámetros que se midieron en las 14 viviendas muestreadas fueron: conductividad, pH, turbiedad, *E. coli*, hierro total, nitratos, zinc total, cloro residual, color aparente y coliformes totales. En la Tabla 13 se presentan los resultados de los análisis de calidad en la zona de estudio.

Tabla 13.

Resultados de los análisis de calidad de las muestras de agua lluvia tomadas.

Parámetro	N	Valor medido	Valor mínimo	Valor máximo
Fisicoquímicos				
Turbiedad [NTU]	12	1.94 ± 1.31	-	2

pH [unid. pH]	12	7.51 ± 0.89	6.5	9.0
Conductividad [µs/cm]	12	70.40 ± 36.84	-	1000
Hierro total [mg/L]	5	0.054 ± 0.01	-	0.3
Nitratos [mg/L]	5	0.932 ± 0.98	-	10
Zinc total [mg/L]	5	0.052 ± 0.06	-	3
Cloro residual [mg/L]	5	No detectable	0.3	2.0
Color aparente [UPC]	5	46 ± 26.57	-	15
Microbiológicos				
Coliformes totales [UFC/100 mL]	5	1046 ± 1933	-	0
E. coli [UFC/100 mL]	14	33 ± 45	-	0

Nota: los valores mínimo y máximo corresponden a los permitidos por la reglamentación nacional, Resolución 2115 de 2007.

5.3.3.1. Parámetros fisicoquímicos. Todas las viviendas cumplieron con los valores permitidos de conductividad, un valor alto de este parámetro podría indicar que hay descomposición y mineralización de materia orgánica en el agua lluvia (Gómez y Silva, 2019). Sobre el pH, el 28% de las viviendas no cumplió con los valores permitidos, un pH alcalino o ácido en la zona puede deberse a los materiales de los componentes de los sistemas y el estado en que se encuentran, ya que para las muestras que tienen pH más alejado de los valores permitidos, el agua se recolecta de un techo de fibrocemento desgastado, lo que puede alterar el pH. El 57% de las viviendas no cumplió con el valor de turbiedad, un valor mayor al permitido indica presencia de partículas en suspensión y mayor probabilidad de contaminación, puede ser causada por partículas en suspensión en el aire que fueron depositadas en el área de captación (Gómez y Silva, 2019 y Villanueva y Avila, 2019).

Todas las viviendas cumplen con los valores permitidos de hierro, nitratos y zinc. Un valor alto de hierro total podría deberse a la lixiviación de materiales de techo metálicos (Gómez y Silva, 2019), los nitratos se ven afectados por factores como la combustión de biomasa o de combustibles fósiles, o la deposición húmeda o seca en las cubiertas (Gómez y Silva, 2019) y zinc total puede

augmentar por el uso de materiales metálicos en algún componente del sistema o a la combustión de carbón u otros combustibles fósiles en la zona (Gómez y Silva, 2019). Sobre el cloro residual, este parámetro no se encontró en las viviendas muestreadas, encontrarlo indicaría que el agua fue desinfectada por los habitantes de las viviendas, lo que podría afectar los resultados de *E. coli* (Organización Mundial de la Salud, 2012). El agua lluvia de ninguna de las viviendas monitoreadas cumplió con los valores de color aparente permitidos, este resultado puede deberse a la presencia de metales en el agua, que pueden ser resultado de la corrosión de materiales metálicos, es muy probable que esta sea la razón de los resultados obtenidos, ya que las cubiertas y canaletas metálicas de las viviendas de la zona estaban visiblemente desgastadas (Gómez y Silva, 2019).

5.3.3.2. Parámetros microbiológicos. En cuanto a los parámetros microbiológicos, la *E.coli* y los coliformes superaron el estándar de calidad de agua (0 UFC/100 mL). La presencia de estos contaminantes en el agua es causada por materia fecal o restos orgánicos descompuestos depositados en el área de captación. El consumo de agua con estos contaminantes puede provocar problemas gastrointestinales afectando principalmente a personas vulnerables, como niños, ancianos y mujeres embarazadas (Rock y Rivera, 2014). Los resultados de estos parámetros microbiológicos y del cloro residual evidencian una ausencia en prácticas de desinfección en los tanques de almacenamiento.

Cabe destacar que los resultados de los parámetros de calidad están siendo comparados con normativa para agua para consumo humano y que, a pesar de ser muestras de agua sin tratamiento previo, cumplen con varios de los parámetros evaluados. Sin embargo, los valores encontrados demuestran la necesidad de tener tratamientos complementarios para el consumo humano.

5.3.4. *Formulación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias*

En esta sección se presentan los usos que se le da al agua lluvia en la zona, los usos y demandas que se seleccionaron para cada una de las tres alternativas de SAALL propuestas, y finalmente, se presentan las características de las alternativas, explicando a detalle el diseño y selección de cada uno de sus componentes: área de captación, canaletas y bajantes, tratamiento primario, tanque de almacenamiento, red de instalaciones hidrosanitarias, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

5.3.4.1. Usos y demanda de agua. Utilizando las seis categorías de uso en que se dividieron los posibles usos que se le podía dar al agua lluvia recolectada de un SAALL se encontraron 17 combinaciones diferentes en las 28 viviendas consideradas. En la Tabla 14 se muestran estas combinaciones y la cantidad y porcentaje de viviendas pertenecientes a cada una de ellas (N=28). Para seleccionar qué combinaciones de usos iba a tener cada una de las alternativas se identificaron las tipologías a las que pertenecía el mayor porcentaje de viviendas. Se encontró que las tipologías 5, 6, 8 y 9 contenían el 44% de todas las viviendas de la zona. Los usos de estas tipologías fueron los considerados para la formulación de las alternativas de SAALL.

Tabla 14.

Tipologías de viviendas de la zona de estudio, clasificadas según la combinación de usos dados al agua lluvia.

Tipología	Usos que se le da al agua	Cantidad	Porcentaje
1	P	1	4%
2	P, NP, CV, AA	2	7%
3	P, NP, CV, CA, AA	1	4%
4	P, NP, AA	2	7%
5	P, NP, CA, AA	3	11%
6	P, NP, AV, AA	3	11%
7	P, NP, CA, AV	1	4%

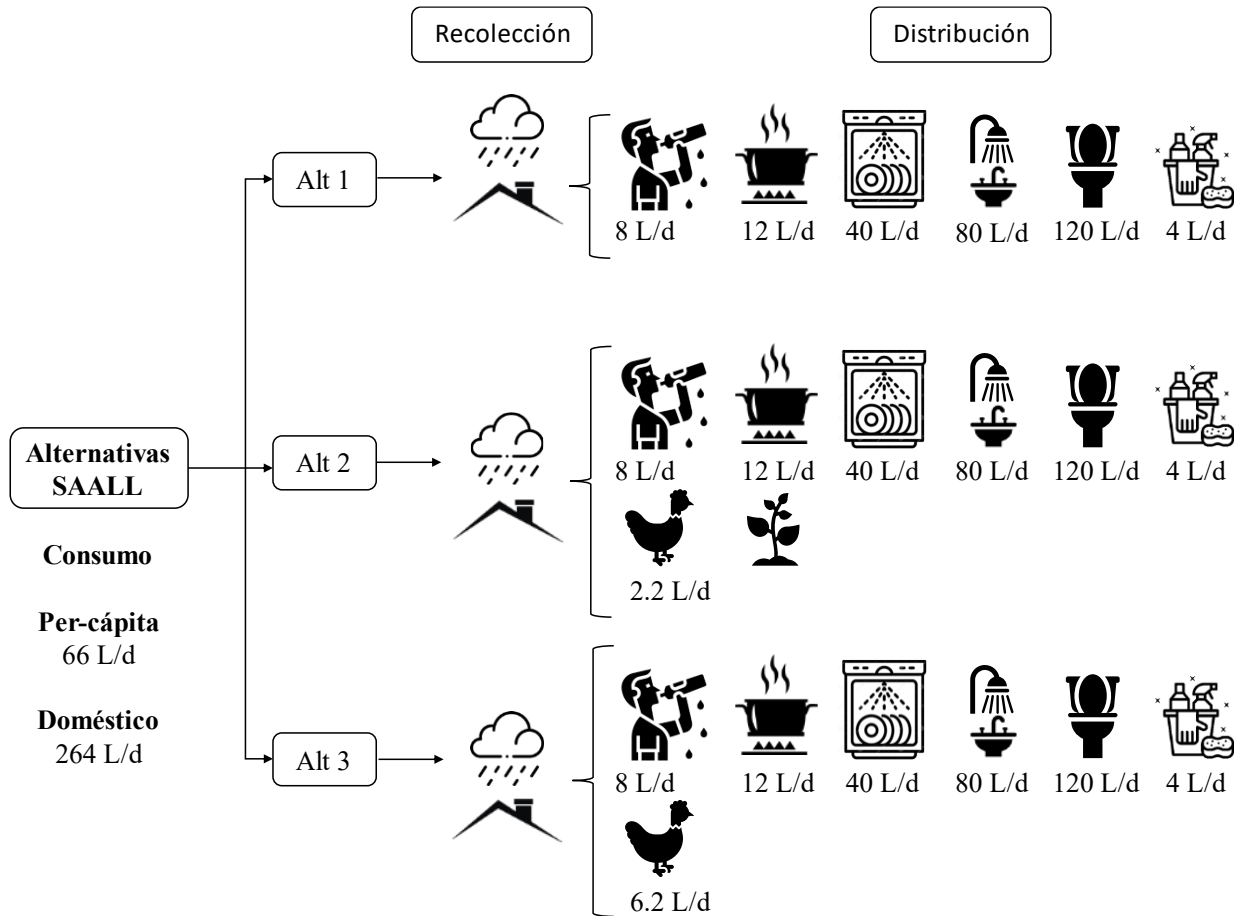
8	P, NP	3	11%
9	P, NP, CV, CA	3	11%
10	P, NP, CV, CA, AV	1	4%
11	P, NP, CA, AV, AA	1	4%
12	P, NP, CA	1	4%
13	P, NP, CV, AV	1	4%
14	P, NP, CV	2	7%
15	P, NP, CV, AV, AA	1	4%
16	NP, CA, AA	1	4%
17	NP, AA	1	4%

N=28. P: usos domésticos que requieren agua potable, NP: usos domésticos que no requieren agua potable, CA: usos agrícolas para autoconsumo, CV: usos agrícolas para venta, AA: crianza de animales para autoconsumo y AV: crianza de animales para venta.

Finalmente, se verificó la demanda que podría tener cada una de las tipologías y se descartó la tipología 9 debido a que este proyecto no considera usos comerciales sino usos de pequeña escala. En síntesis, las tipologías de usos de agua seleccionadas para diseñar las diferentes alternativas fueron las 5, 6 y 8. La alternativa 1 se diseñó para la tipología 8 (usos P y NP), la alternativa 2 se diseñó para la tipología 5 (usos P, NP, CA y AA) y la alternativa 3 se diseñó para la tipología 6 (usos P, NP, AV y AA). En la Figura 12 se encuentra un esquema con los usos considerados en cada alternativa. En cuanto al uso de agua para crianza de animales para la venta (AV), se encontró que esta actividad productiva se hace tanto a pequeña como a gran escala. Para fines de diseño se consideró solo uso a pequeña escala, teniendo en cuenta que es la escala de producción para el 75% de las viviendas que crían animales.

Figura 12.

Usos y demanda de agua considerados para cada alternativa de sistema de aprovechamiento de aguas lluvias propuesto.



Nota: La demanda de cultivos no es un único valor si no un calendario de requerimiento de riego, por lo tanto, no se especifica en la figura. En el Anexo E se encuentran los requerimientos de riego del cultivo.

Para la producción agrícola se estableció un calendario de cultivos con dos ciclos al año, ajustados para que la etapa del cultivo con mayor requerimiento hídrico coincida con las épocas de mayor precipitación del año. Esto coincide con las prácticas tradicionales de los agricultores en

la zona de estudio. Para la crianza de animales se asumió que las personas tenían gallinas de forma permanente durante el año, por ciclos semestrales, donde se adquieren animales jóvenes al inicio, los cuales producen huevos durante todo el ciclo y son vendidos al final de este.

5.3.4.2. Características de las alternativas. En la Tabla 15 se muestra un cuadro comparativo con los usos planteados en cada alternativa, la demanda de agua doméstica potable y no potable, la demanda agrícola, la demanda para la cría de animales y las características generales de cada una de las alternativas: área de captación, canaletas, bajantes, volumen del tanque de almacenamiento y sistema de tratamiento propuesto.

Tabla 15.

Características generales de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Usos	P, NP	P, NP, CA, AA	P, NP, AV, AA
Demanda P	15 L/hab*día	15 L/hab*día	15 L/hab*día
Demanda NP	56 L/hab*día	56 L/hab*día	56 L/hab*día
Demanda CA	-	Según CROPWAT. Para un cultivo de maíz de 100 m ² .	-
Demanda AA	-	11 aves – 0.2 L/cabeza*día	11 aves – 0.2 L/cabeza*día
Demanda AV	-	-	20 aves – 0.2 L/cabeza*día
Área de captación	100 m ²	125 m ²	125 m ²
Dimensiones canaletas	Alto: 12 cm. Base: 6 cm	Alto: 12 cm. Base: 6 cm	Alto: 12 cm. Base: 6 cm
Dimensión bajantes	Tejado vivienda: 3” Tejado depósito: -	Tejado vivienda: 3” Tejado depósito: 2”	Tejado vivienda: 3” Tejado depósito: 2”
Volumen de almacenamiento	1 tanque elevado: 1000 L 1 tanque nivel de suelo: 1000 L	1 tanque elevado: 1000 L 1 tanque nivel de suelo: 1000 L	1 tanque elevado: 1000 L 1 tanque nivel de suelo: 1000 L

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tratamiento primario	Malla en canaletas	Malla en canaletas	Malla en canaletas
	Rejilla en bajantes	Rejilla en bajantes	Rejilla en bajantes
	Desviador de primer flujo	Desviador de primer flujo	Desviador de primer flujo
Tratamiento secundario	Filtro lento de arena	Filtro lento de arena	Filtro lento de arena
Tratamiento terciario	Ebullición	Ebullición	Ebullición

P: usos domésticos que requieren agua potable, NP: usos domésticos que no requieren agua potable, CA: usos agrícolas para autoconsumo, CV: usos agrícolas para venta, AA: crianza de animales para autoconsumo y AV: crianza de animales para venta.

5.3.4.3. Área de Captación. El valor promedio o “típico” de área de techo de las viviendas de la zona es de 68 m². Sin embargo, Chiu et al. (2009) mencionan que el aprovechamiento de aguas lluvias tiene mejor desempeño cuando se usan áreas de captación mayores, por lo que se decidió utilizar un área de 100 m², que aunque es mayor al promedio, no se aleja de los tamaños de cubierta encontrados en la zona. Adicionalmente, en las alternativas que consideran actividades productivas, se supone un área de captación adicional de 25 m², asumida como un depósito pequeño, donde se almacena el producto de la actividad productiva o los elementos necesarios para realizarla.

Los materiales considerados fueron lámina metálica, fibrocemento y teja cerámica ya que son los más usados para las cubiertas en la zona. El fibrocemento fue descartado por que Zabala y Largo (2018) argumentan que el contacto del agua lluvia con este material se relaciona con un incremento en los contaminantes presentes en esta. Sobre la lámina metálica y la teja cerámica, Abdulla y Al-Shareef (2009) explican que cualquiera de estos dos materiales son recomendables para recolectar agua lluvia de buena calidad. Por otro lado, Unatsabar (2004) resalta la facilidad de instalación y mantenimiento de la lámina metálica, aunque también señala que la teja cerámica

es una buena opción para la recolección de agua lluvia, con la ventaja de ser más económica que la lámina metálica. Finalmente, entre estos dos se escogió para las tres alternativas el material que tenía menor coeficiente de pérdidas, es decir, la lámina metálica.

5.3.4.4. Canaletas y Bajantes. En la zona no hay un uso extendido de canaletas y bajantes, además en las viviendas donde si las hay, estas no fueron diseñadas inicialmente para conducir el agua, sino que probablemente fueron materiales sobrantes de la instalación del techo de las viviendas, adaptados como canaletas o bajantes. Los materiales más comunes encontrados fueron lámina metálica, plástico y fibrocemento. En este estudio, por recomendación de Unatsabar (2004), se seleccionó la lámina metálica como material para este componente de transporte para las tres alternativas.

La intensidad de la lluvia calculada a partir de las curvas IDF de la estación “El Cucharo” dio como resultado 137.3 mm/h, utilizando como periodo de retorno de 3 años, recomendado por EAAB (2009), y duración, equivalente al tiempo de concentración, esto es, el tiempo que tarda el agua lluvia en llegar desde el punto más alejado del techo a la canaleta, asumida como 2 minutos (Naranjo y Salazar, 2021). La alternativa 1 tiene dos áreas de drenaje de 50 m², mientras que para las alternativas 2 y 3 se tienen tres áreas de drenaje, dos de 50 m² y una de 25 m². Con esto la canaleta comercial que mejor cumple con la pendiente, velocidad y esfuerzo cortante requeridos por la norma NTC 1500, fue una canaleta rectangular de base 12 cm y altura 6 cm. Este tamaño de canaleta tiene propiedades hidráulicas similares a las de las canaletas mencionadas por Abdulla y Al-Shareef (2009).

5.3.4.5. Tratamiento Primario – Prefiltración. Las opciones que se revisaron para el tratamiento primario fueron:

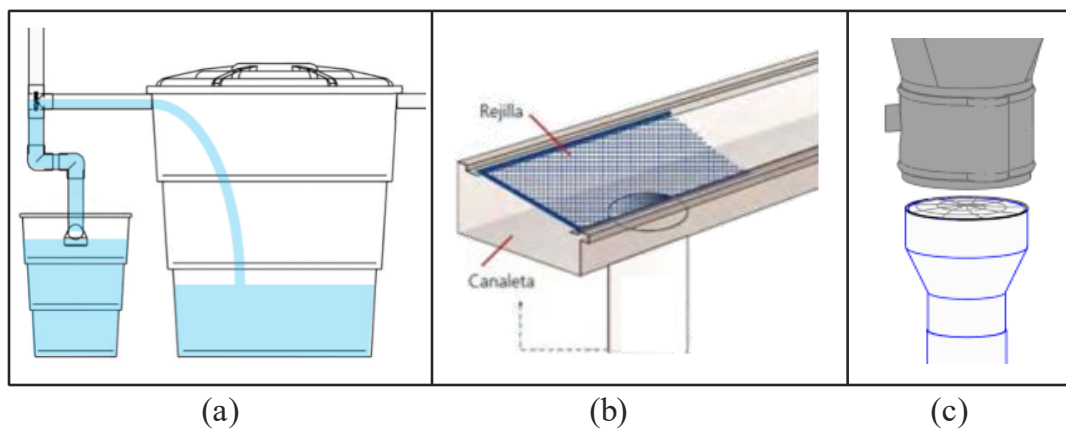
- i) Desviador de primer flujo. Se consideraron 4 diseños distintos de desviadores encontrados en la literatura, uno de ellos desviaba el agua en una tubería y los restantes la desviaban a un tanque. Se descartó el desviador en tubería porque se requería una tubería muy larga y con gran diámetro para poder desviar el volumen de agua requerido, entre los desviadores de tanque se seleccionó el que tenía el funcionamiento más simple de los tres, esto considerando que el funcionamiento del sistema debe ser comprendido completamente por los usuarios ya que ellos son los encargados de las labores de operación y mantenimiento. En la Figura 13a se muestra el diseño seleccionado. Además, se asume que el agua del desviador se utiliza para usos que no requieren agua de alta calidad, por lo que se considera más sencillo extraer el agua de un tanque que de una tubería (García, 2012; Ávila, 2013 y Mendoza y Rincón, 2016).
- ii) Filtros en canaletas y bajantes. Se encontraron 8 diseños diferentes de filtros para bajantes y canaletas, 6 fueron descartados porque: i) requerían la instalación de rejillas dentro de las bajantes con un minucioso ángulo de instalación de la rejilla interior, ii) presentaban porcentajes de pérdida de agua importantes, o iii) tenían una configuración complicada para su funcionamiento. Por lo tanto, se seleccionaron dos diseños, que fueron una malla instalada en las canaletas y un filtro tipo cesta instalado en las bajantes (ver Figura 13b y 13c) (Isla Urbana, s.f.; García, 2012; Ávila, 2013 y Ávila y Ávila, 2018).
- iii) Cámaras de inspección, se descartaron porque requerían comprar el dispositivo para instalarlo lo que aumentaría los costos finales del sistema, o construirlo, pero en este quedaría fijo en un lugar sin la posibilidad de cambios en el futuro y dificultaría

su limpieza. Además, las dimensiones propuestas en el diseño encontrado no son viables a nivel doméstico por el gran volumen de agua que manejaría la cámara de inspección (Borda, 2014).

iv) Vórtices hidrodinámicos, el diseño considerado aumenta el recorrido del agua por lo que facilita la sedimentación de sólidos, este tratamiento se descartó porque requería la compra del dispositivo, aumentando los costos del sistema, su funcionamiento podría no ser claro para los usuarios, y en caso de algún tipo de daño los usuarios no podrían realizar el arreglo si no que tendrían que contratar a una persona capacitada (Borda, 2014).

Figura 13.

Componentes del tratamiento primario propuesto para las tres alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos.



Fuente: (a) elaboración propia basada en García (2012), (b) A. Ávila (2013), (c) elaboración propia basada en Isla Urbana (s.f.).

Los dos componentes de tratamiento seleccionados son mencionados por Mazurkiewicz et al. (2022) como los dos primeros procesos, de cuatro, para producir agua para consumo humano a

partir del agua lluvia. Gómez y Silva (2019) explican que la desviación del primer flujo es un método efectivo para disminuir la concentración de contaminantes en el agua lluvia, mejorando parámetros como sólidos suspendidos totales, turbiedad, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, zinc, color y coliformes totales. Teniendo en cuenta que el agua lluvia de la zona no cumple en varios de estos parámetros con los valores establecidos por la Resolución 2115 de 2007 para agua para consumo humano, el tratamiento primario se seleccionó para las tres alternativas propuestas.

5.3.4.6. Tanque de Almacenamiento. En la zona la mayoría de las viviendas tienen entre uno y tres tanques, por lo tanto, este estudio consideró factible utilizar dos tanques, uno a nivel de suelo que bombea agua, durante un tiempo mínimo de 15 minutos diarios, a un tanque elevado que se conecta a los grifos de la vivienda y suministra agua por gravedad. En cuanto al material, los tanques más utilizados en la zona son plástico y arcilloso/concreto. El arcilloso/concreto se descartó porque autores como Mechell et al. (2009) no recomiendan utilizar materiales porosos para las superficies que están en contacto con el agua. Además, Fernández y León (2022) resaltan facilidad de transporte y manipulación de los tanques plásticos en comparación con los arcillosos/concreto. Por esto, el diseño de las tres alternativas seleccionó el tanque de material plástico.

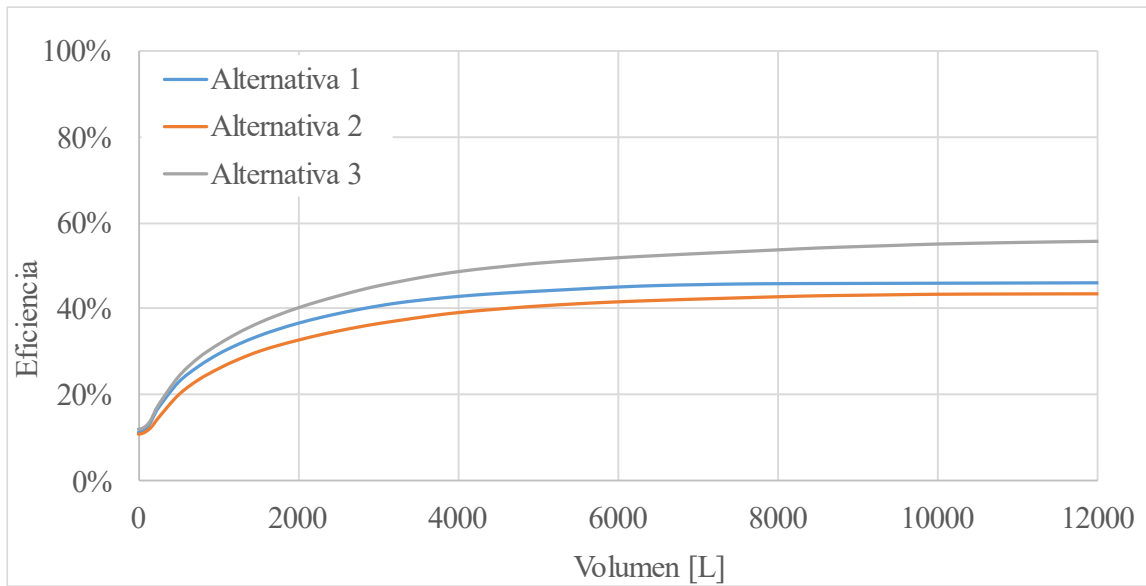
Para la alternativa 1 (usos P y NP) se obtuvo un volumen de 1750 L, donde se propuso usar dos tanques, uno de 1000 L a nivel del suelo y otro elevado de 750 L. Sin embargo, el tanque de 750 L es un 377% más costoso que el tanque de 1000 L, por lo que para esta alternativa se escogieron dos tanques de 1000 L. Este volumen tiene una eficiencia del 37%, entendiéndose la eficiencia como el volumen de agua total entregado por el sistema sobre el volumen de agua total demandado. Para la alternativa 2 (usos P, NP, CA y AA) se obtuvo un volumen de 1500 L, donde

se propuso usar dos tanques, uno de 1000 L a nivel del suelo y otro elevado de 500 L. Sin embargo, la diferencia de costos entre usar un tanque de 1000 L en vez de uno de 500 L es mínima y puede aumentar en un 3% la eficiencia, por lo que para esta alternativa se escogieron dos tanques de 1000 L. Este volumen tiene una eficiencia del 33%. Para la alternativa 3 (usos P, NP, AV y AA) se obtuvo un volumen de 2000 L, donde se propuso usar dos tanques, uno de 1000 L a nivel del suelo y otro elevado de 1000 L, con este volumen se tiene una eficiencia del 40%.

En la Figura 14 se muestra la eficiencia de cada una de las alternativas al variar el volumen de almacenamiento. Se puede apreciar que la alternativa 3 tiene mayor eficiencia, esto puede ser debido a que el área de captación es mayor que en la alternativa 1, sin embargo, la alternativa 2 es la menos eficiente, aunque tiene un área de captación igual a la de la alternativa 3, esto podría dar indicios de que los requerimientos hídricos del cultivo son muy altos. También se observa que ninguna de las 3 alternativas tiene eficiencias altas sin importar en cuanto se aumente el volumen de almacenamiento. Las alternativas 1 y 2 tienen asíntotas cercanas a la eficiencia del 50%, mientras la alternativa 3 tiene una asíntota cercana a la eficiencia 60%. Esto quiere decir que con el área de captación que se propuso no podrá suplirse la demanda completamente debido a la baja precipitación de la zona, lo que explicaría porque los habitantes deben utilizar múltiples fuentes de abastecimiento; por esto, es recomendable, si se quiere aumentar la eficiencia, aumentar también el área de captación. No obstante, las viviendas encontradas en la zona de estudio son pequeñas y, en consecuencia, sus techos también lo son.

Figura 14.

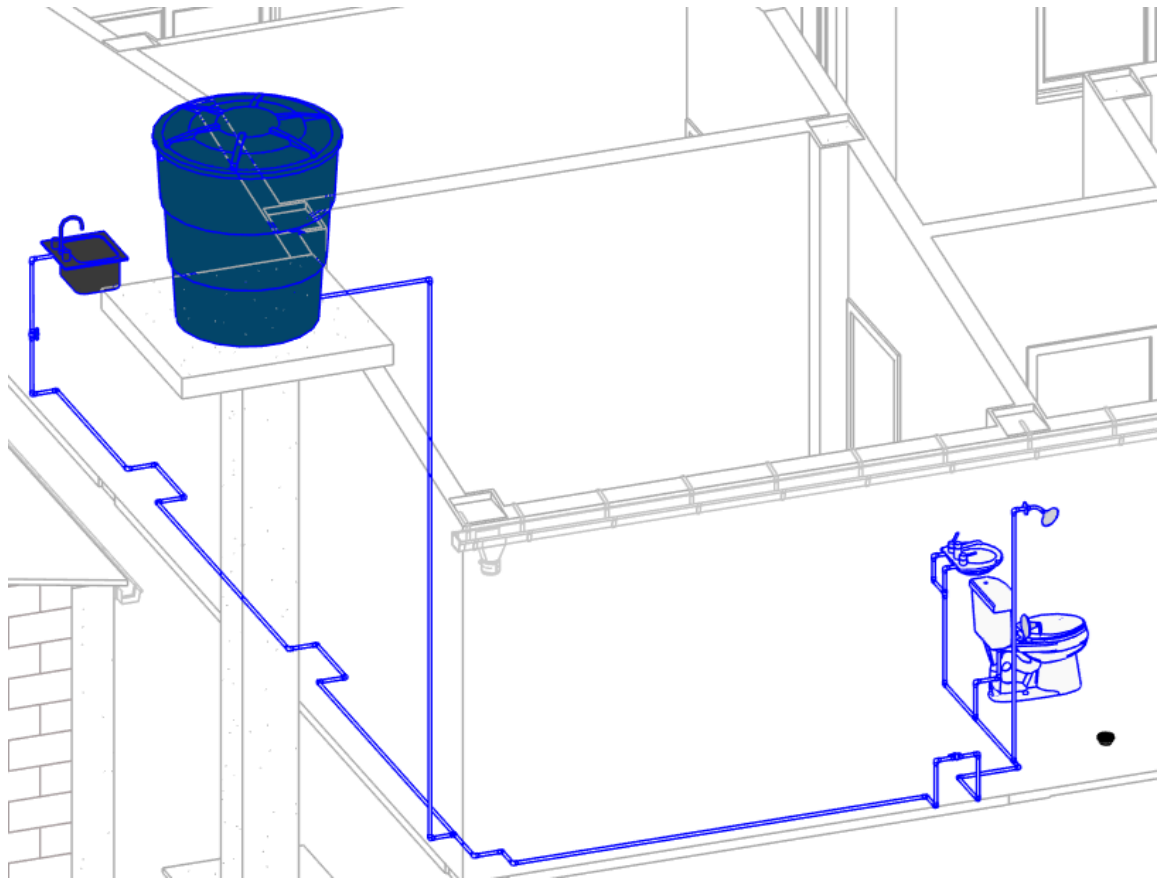
Gráfica de eficiencia vs. volumen del componente de almacenamiento de las tres alternativas de sistema de abastecimiento de aguas lluvias propuestas.



5.3.4.7. Red de instalaciones hidrosanitarias. Debido a que no se tenían planos de las viviendas de la zona, se propuso un plano de una vivienda tipo con 4 aparatos sanitarios, un lavamanos, un sanitario y una ducha en el baño y un lavaplatos en la cocina. De esta forma, se trazó la red hidráulica de la vivienda (ver Figura 15).

Figura 15.

Plano isométrico de los aparatos sanitarios de la vivienda y del trazado propuesto de la red hidráulica de la vivienda tipo.



La presión inicial mínima requerida para esta distribución de aparatos sanitarios fue de 4.3 m.c.a., es decir que el tanque elevado debe estar apoyado a una cota mínima de 4 m con una lámina de agua mínima de 30 cm; sin embargo, en caso de ser posible, es recomendable una presión de 5 m.c.a. En el Anexo F se encuentra el detalle del cálculo de pérdidas para encontrar la presión inicial mínima requerida. En las 3 alternativas se tiene la misma red de instalaciones hidrosanitarias por lo que se tiene la misma altura de tanque elevado también. Considerando las entre la bomba y los tanques y la presión inicial mínima requerida, se determinó que se requiere una bomba de $\frac{1}{2}$ hp, funcionando con una eficiencia del 80%, durante 15 minutos diarios para suministrar suficiente

agua para los usos domésticos dentro de la vivienda, en el anexo G se encuentra el detalle del cálculo de las pérdidas y requerimientos de bombeo.

5.3.4.8. Tratamiento Secundario – Filtración. Las opciones que se encontraron para el tratamiento secundario fueron membranas de ultrafiltración, desarenador, filtros de cartucho, filtros lentos y rápidos de arena y otros materiales y filtros con geotextiles (López y Vergara, 2011; García, 2012; Ávila, 2013; Correa, 2014 y Gómez y Silva, 2019). Las membranas de ultrafiltración y los filtros de cartucho fueron descartados por sus costos de inversión y mantenimiento. El desarenador fue descartado porque el tratamiento primario cumple una función parecida disminuyendo sólidos sedimentables. En cuanto a los filtros lentos y rápidos de arena, se prefirió el filtro lento debido a que, en comparación con el filtro rápido, no requiere que el agua tenga tratamientos previos (coagulación, floculación y sedimentación) (Ramírez y Pérez, 2002), no requiere bombeo porque el agua pasa por el filtro por gravedad y, además de ser un tratamiento físico, también es un tratamiento biológico. Así mismo, el filtro lento de arena es usado comúnmente en zonas rurales por su facilidad de uso y de construcción (López, 2020). Las únicas desventajas son que los filtros lentos de arena requieren un nivel de agua constante para para funcionar de forma óptima y requieren grandes áreas, esto es un inconveniente porque entonces son necesarios grandes volúmenes de agua para mantener estas condiciones óptimas (Prada, 1996), lo cual, debido a la escasez de agua de la zona es complejo. Para solucionar este inconveniente, se propuso usar este tratamiento solo en agua que será usada para beber, cocinar y lavar platos, disminuyendo así el volumen de agua a tratar y por lo tanto el tamaño del filtro.

Se propuso un filtro construido dentro de un tubo de PVC de 6", diámetro mínimo sugerido por CAWST (2009) para que este funcione correctamente. La velocidad de filtración seleccionada fue de 0.4 m/h (Ramírez y Pérez, 2002), pensando minimizar el tiempo que el usuario debe esperar

para recolectar agua del filtro; sin embargo, la velocidad siempre debe verificarse experimentalmente. En la Tabla 16 se muestran las características de las capas del filtro. Los espesores, diámetros efectivos y coeficiente de uniformidad fueron seleccionados con base en los tamaños para filtros lentos de arena a escala doméstica recomendados por diferentes autores (Prada, 1996; Solsona y Méndez, 2002; Posadas, 2015; Rivas y García, 2017 y López, 2020). Las tres alternativas tienen el mismo filtro lento de arena que se usa solo para el agua destinada a beber, cocinar y lavar platos

Tabla 16.

Características recomendadas para las capas del filtro lento de arena propuesto.

Capa	Espesor [cm]	Diámetro efectivo [mm]		Coeficiente de uniformidad	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Tirante hidráulico	5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Lecho filtrante (arena)	70	0.15	0.35	1.5	3
Capa de soporte 1 (gravilla)	5	2	5	N.A.	N.A.
Capa de soporte 2 (grava)	10	10	25	N.A.	N.A.
Borde libre	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

5.3.4.9. Tratamiento Terciario – Desinfección. En la literatura revisada se encontró que la desinfección puede hacerse mediante ósmosis inversa, ozono, desinfección UV, desinfección con cloro, desinfección solar SODIS, ebullición, CuSO_4 , carbón activado granular mezclado con KDF 85, iones de plata y plata coloidal (Conant, 2005; Adler et al., 2008; García, 2012; Chinchilla y Paredes, 2019 y Gómez y Silva, 2019). Para cada uno de estos tratamientos se tomaron en cuenta los costos y la facilidad de aplicación a nivel casero, preseleccionando dos de ellos, la desinfección por cloro y la desinfección por ebullición. El uso de cloro es un método asequible para el caso de estudio, esto se ve reflejado en la encuesta donde el 34% de los habitantes manifiestan que lo usan

para tratar el agua. Sin embargo, debido a que el cloro debe dosificarse correctamente, una dosificación inadecuada puede llevar a excesos, que tendrían efectos negativos en el sabor del agua. Por el contrario, un uso insuficiente puede no desinfectar correctamente el agua llevando a que las personas consuman agua contaminada, e igualmente tendría efectos negativos sobre la salud (Conant, 2005). Por lo tanto, el cloro fue descartado como tratamiento terciario. Así, se consideró que, aunque no tenga efecto residual, el método de tratamiento terciario más sencillo y al alcance de las personas de la zona era la ebullición, ya que es un método de desinfección física que es factible a escala doméstica y puede eliminar cualquier microorganismo patógeno en el agua (Nossa, 2017). El tratamiento terciario se plantea utilizar en las 3 alternativas, solamente para beber, cocinar y lavar platos.

5.3.5. Evaluación de alternativas del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias utilizando la herramienta multicriterio

En esta sección se presenta la calificación de subcriterios sociales, económicos y técnicos para cada alternativa, a continuación, se desarrolló la matriz de decisión con estas calificaciones y finalmente, se presenta el análisis de sensibilidad de los resultados.

5.3.5.1. Subcriterios Sociales. La calificación de la facilidad de uso percibida para las tres alternativas fue entre normal y fácil. Este comportamiento se debe a que los componentes tecnológicos de las tres alternativas son similares. Respecto de la cantidad de agua percibida de fuentes diferentes al agua lluvia, las personas la evaluaron como baja (2), por lo que, la alternativa que mayor cantidad de agua puede ofrecer obtuvo la mayor calificación. Como resultado, la alternativa 1 recibió la peor calificación debido a que ofrece la menor cantidad de agua respecto de las alternativas 2 y 3 (i.e., ofrecen la misma cantidad de agua). En la Tabla 17 se presenta la calificación de cada alternativa frente a los subcriterios y criterios evaluados.

5.3.5.2. Subcriterios Económicos. Los costos considerados fueron inversión inicial, operación, mantenimiento y costos de producción de las actividades productivas. Los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento incluyen materiales, equipos y mano de obra. La mano de obra solo fue considerada en las actividades que no podría realizar el usuario del sistema. La crianza de animales asumió que las personas tenían gallinas de forma permanente durante el año por ciclos, por lo que se consideraron costos de compra de animales de forma cíclica a medida que el ciclo anterior envejece, costos de alimentación, medicamentos y construcción del corral. Se asumió que los cultivos son orgánicos, sin productos adicionados, debido a que es la forma común de cultivar en la zona; los costos como jornales y arados no se tomaron en cuenta ya que se asumió que por ser de pequeña escala, los habitantes de la vivienda realizaban estas tareas. Los beneficios considerados fueron el costo de agua evitado, al no requerir agua de los sistemas centralizados para el suministro requerido por estas actividades y los ingresos debidos a la producción de cultivos y animales (ver Tabla 17). Para los costos de agua evitados se consideraron costos diferenciados por la calidad ofrecida por cada fuente disponible, es decir, para los usos que requieren menor calidad de agua, se utilizaron los costos del agua de fuentes de menor calidad, mientras que para usos que requieren agua para consumo humano se utilizaron los costos del agua potable de la zona. En el Anexo H se encuentran los flujos de caja con la estimación de costos y beneficios, en el estudio realizado por Albarracín (2023) se profundiza el análisis realizado.

5.3.5.3. Subcriterios Técnicos. El tamaño del suministro se evaluó para el área de captación de cada alternativa durante un periodo de tiempo de un año. Para la aplicación de este subcriterio, se utilizó el año con mayor cantidad de agua ofertada, ya que el subcriterio se refiere al volumen máximo de agua lluvia que se puede recolectar en un área específica durante un período específico. Cabe destacar que este valor se refiere al volumen obtenido si se pudiera recolectar

toda la precipitación sin ningún derrame, es decir asumiendo un almacenamiento “infinito” (Abu-Zreig et al. 2019).

La calificación de comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento se determinó mediante un análisis comparativo de la percepción sobre la calidad de agua ofrecida por fuentes de abastecimiento disponibles diferentes al agua lluvia (O) y la calidad de agua entregada por el sistema (ALL). Se asignaron puntuaciones para O y ALL que varían de 1 a 5, asignando valor de 1 para calidad muy baja hasta 5 para calidad muy alta. La calificación sigue las siguientes reglas: si la calidad de ALL es menor que O, la calificación recibida se establece en cero; si la calidad de ALL es igual a O, la calificación es asignada como uno; y finalmente, si la calidad de ALL es mayor que O, la calificación se obtiene mediante la realización de la operación matemática de $((ALL-O) + 1)$. Las personas calificaron la calidad percibida del agua ofrecida por fuentes de abastecimiento disponibles diferentes al agua lluvia en la zona de estudio como baja (2). Por lo tanto, la calidad ofrecida por las tres alternativas es muy alta (5), por lo que la calificación de las tres alternativas es la misma y fue 4.

El mantenimiento se evaluó calificando la dificultad de mantenimiento de todos los componentes y seleccionando el mayor valor, para la calificación de cada alternativa. En el caso de estudio el componente con mayor dificultad fue el bombeo, sin embargo, las tres alternativas requieren bombeo para llevar el agua al tanque elevado, y, por lo tanto, se tiene la misma calificación para las tres (ver Tabla 17).

Con estas calificaciones de las alternativas en cada subcriterio se obtiene la matriz de decisión que se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17.

Matriz de decisión con las calificaciones de cada alternativa en cada uno de los subcriterios de evaluación.

	E.1. Beneficio [USD]	E.2. Costo [USD]	S.1. Facilidad de uso percibida [escala Likert]	S.2. Percepción sobre disponibilidad de fuentes de agua diferentes al agua lluvia [escala Likert]	T.1. Tamaño del suministro [m ³]	T.2. Comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento Calificación [0-5]	T.3. Mantenimiento [escala Likert]
Alternativa 1	\$ 1,545	\$ 1,841	3.24	1	57.87	4	3
Alternativa 2	\$ 16,930	\$ 12,641	3.10	2	72.34	4	3
Alternativa 3	\$ 49,742	\$ 34,162	3.10	2	72.34	4	3

TMR: 1 USD = 4,180.99 COP

Con esta matriz de decisión y los pesos de los criterios y subcriterios se obtuvo como resultado que la mejor alternativa para la zona de estudio es la 3, seguida de la 2 y por último la 1.

5.3.6. Análisis de Sensibilidad

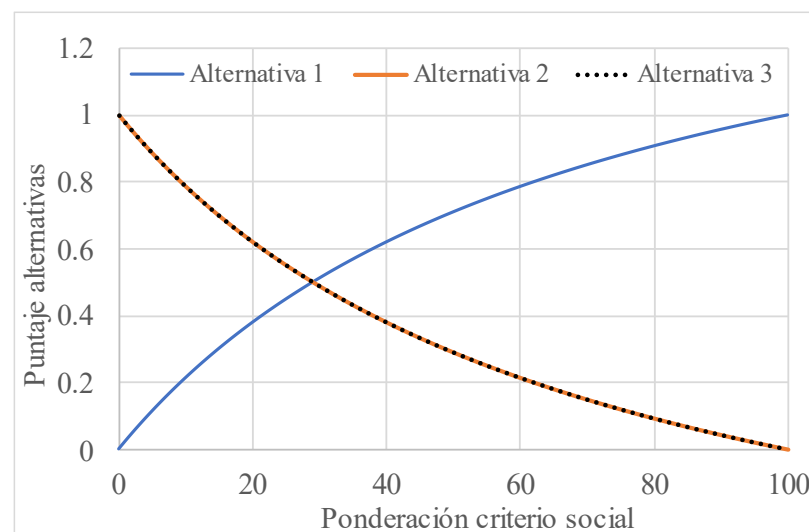
Es de interés verificar si, cambiando las ponderaciones de los criterios, la alternativa 3 sigue siendo la más idónea para las condiciones que se tienen en la zona de estudio y en qué casos deja de serlo. Para ello se realizaron 5151 iteraciones, donde se encontró que en el 85% de estas, la alternativa 3 obtuvo el mayor puntaje, mientras que en el 14% la alternativa 1 fue la que obtuvo el mayor puntaje y en 1% restante era indiferente si se escogía entre las alternativas 2 y 3. Los resultados del análisis de sensibilidad indican que la herramienta propuesta es estable al variar las ponderaciones de los criterios.

La Figura 16 muestra la variación de los puntajes de las alternativas respecto al cambio de la ponderación del criterio social (con ponderación del criterio económico de 0%). Se observa que,

cuando la ponderación del criterio social es menor a 30%, la alternativa más favorable es la 3, probablemente porque en estos casos la ponderación del criterio técnico es mayor y la alternativa 3 tiene mejor calificación en este criterio. Además, a medida que aumenta la ponderación del criterio social se va volviendo más favorable la alternativa 1, esto es de esperarse debido a que la alternativa 1 tiene las mejores calificaciones en el criterio social. Esta gráfica evidencia que la mejor alternativa desde el punto de vista social, es decir, cuando se considera que el criterio social es el más importante, es la alternativa 1.

Figura 16.

Puntajes de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos ante la variación de la ponderación del criterio social.

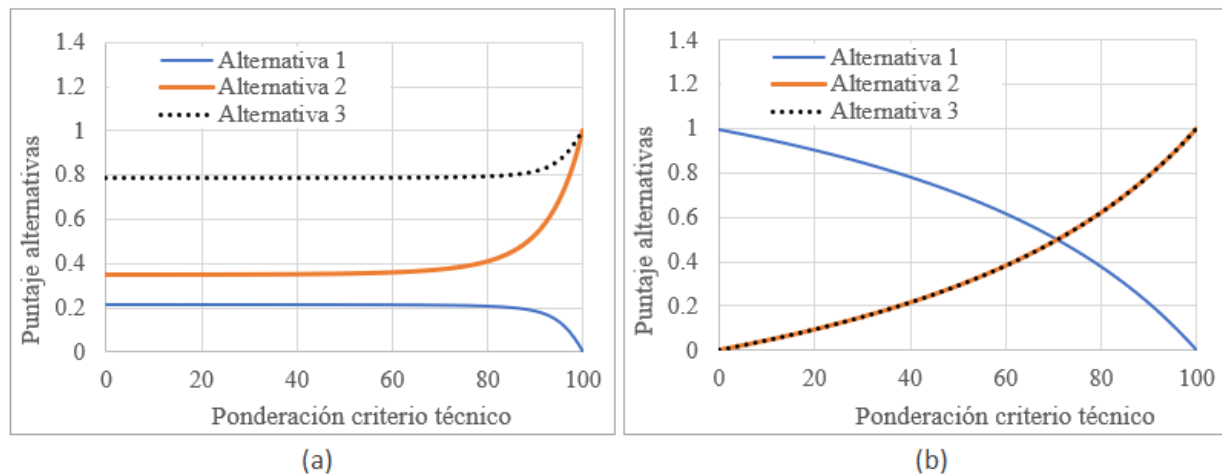


La Figura 17a muestra la variación de los puntajes de las alternativas respecto al cambio de la ponderación del criterio técnico (con ponderación del criterio social de 0%). Se observa que la alternativa 3 es la que mejor se desempeña para cualquier ponderación del criterio técnico, sin embargo, este comportamiento sucede porque cuando el criterio técnico tiene ponderaciones bajas, la ponderación restante se le asigna al criterio económico, donde la alternativa 3 tiene muy buen

desempeño. Este resultado hace necesario revisar cómo varían los puntajes de las alternativas al variar las ponderaciones del criterio técnico sin la influencia del criterio económico (Figura 17b). Se observa que la alternativa 3 solo es preferida cuando la ponderación del criterio técnico es mayor al 71%. Estas gráficas evidencian que la mejor alternativa desde el punto de vista técnico, es decir cuando se considera que el criterio técnico es el más importante, es la alternativa 3.

Figura 17.

Puntajes de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos ante la variación de la ponderación del criterio técnico.

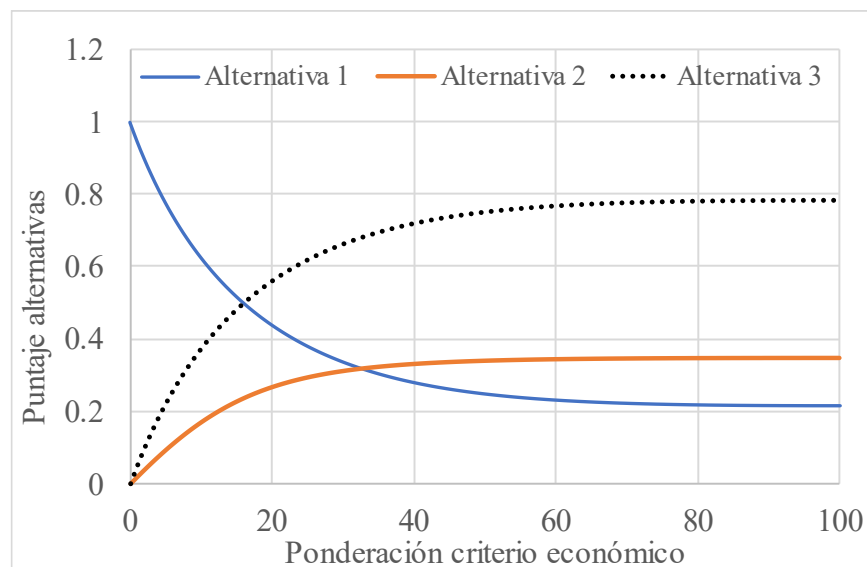


La Figura 18 muestra la variación de los puntajes de las alternativas respecto al cambio de la ponderación del criterio económico (con ponderación del criterio técnico de 0%). Cuando las ponderaciones del criterio económico son bajas, los resultados se ven altamente influenciados por las ponderaciones del criterio social, que también está variando en la gráfica, pero al aumentar la ponderación del criterio económico, a partir del 16%, la alternativa 3 es la mejor puntuada, seguida de la alternativa 2. Estos resultados están asociados a que estas dos alternativas consideran usos productivos de pequeña escala, lo que genera más ingresos en comparación con la alternativa 1

que solo considera agua para usos domésticos. Estas gráficas evidencian que la mejor alternativa desde el punto de vista económico, es decir cuando se considera que el criterio económico es el más importante, es la alternativa 3.

Figura 18.

Puntajes de las alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuestos ante la variación de la ponderación del criterio económico.



5.3.7. Discusión sobre la aplicabilidad de la herramienta.

La herramienta multicriterio de selección de SAALL desarrollada en este proyecto ofrece una solución para abordar los desafíos globales relacionados con el suministro de agua. Esto es especialmente importante en las zonas rurales, donde los usos del agua son diversos y los desafíos para atender las demandas de agua son mayores. Considerando la extensa aplicación de SAALL en estas zonas, es crucial contar con un proceso de selección de estos sistemas que considere criterios sociales, técnicos y económicos para garantizar su sostenibilidad. La herramienta propuesta en este estudio identificó criterios y subcriterios empleados en la literatura y planteó un

proceso objetivo de ponderación utilizando AHP y considerando la opinión de diversos expertos y usuarios. Se considera que este enfoque de selección permite a tomadores de decisiones evaluar múltiples factores y alternativas de manera estructurada y objetiva.

La herramienta propuesta tiene un marco amplio de aplicación. Puede ser utilizada por los planificadores, ingenieros y otros profesionales involucrados en el diseño e implementación de proyectos de gestión del recurso hídrico para evaluar y priorizar las opciones de SAALL en diferentes contextos rurales. La herramienta está concebida para facilitar la toma de decisiones considerando principios de eficiencia y sostenibilidad, adaptadas a las necesidades y limitaciones específicas de cada contexto, y proporciona una metodología sólida y estructurada para abordar el diseño de SAALL. También brinda a los responsables de la toma de decisiones en organismos gubernamentales y planificadores de políticas públicas, una base sólida para el desarrollo de estrategias y políticas relacionadas con el manejo del agua en zonas rurales.

La herramienta multicriterio cumple cinco de los principios orientadores asociados a la sostenibilidad de sistemas tecnológicos de agua y saneamiento establecidos en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia en su título J sobre alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2021): i) la implementación de soluciones tecnológicas apropiadas al evaluar criterios como facilidad de uso, beneficios y costos, asegurando que las soluciones sean simples, adecuadas y costo-eficientes para las necesidades de la comunidad; ii) la sostenibilidad operativa al evaluar la dificultad de mantenimiento, asegurando que la comunidad pueda hacerse cargo de la operación y mantenimiento del sistema a largo plazo; iii) la disponibilidad de agua también es considerada ya que se evalúa en los criterios de tamaño de suministro y comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento, para asegurar una oferta adecuada de agua

en términos de cantidad y calidad; iv) la sostenibilidad ambiental, al evaluar criterios relacionados con la preservación de los cuerpos de agua y el suelo, ventajas inherentes a los SAALL; v) la participación comunitaria, debido a que la herramienta considera la opinión de los usuarios en la evaluación de alternativas en los subcriterios sociales. Además, se incluye la realidad de las zonas rurales al considerar el uso del agua para diferentes actividades, incorporando los medios de sustento de pequeña escala, así como la diversidad de fuentes que, como estrategia adaptativa, usan las familias rurales.

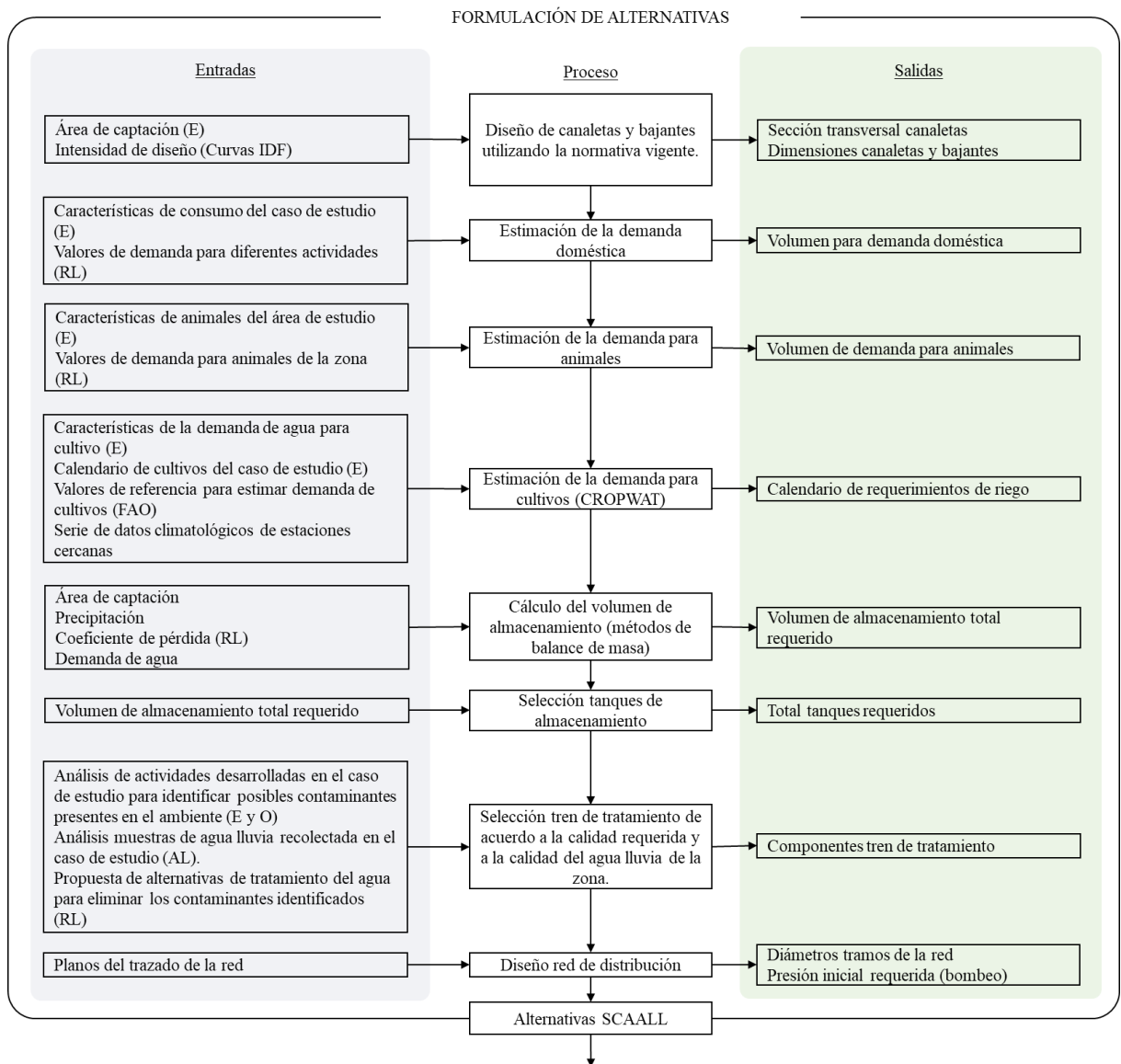
La herramienta también contribuye significativamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente al ODS 6 “Agua limpia y saneamiento” al proporcionar una metodología efectiva para seleccionar SAALL que mejoran el acceso al agua potable y saneamiento, tomando en cuenta que sus costos sean asequibles y considerando criterios sociales que aseguren la participación de las comunidades en la gestión del agua; al ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles” ya que promueve la adopción de SAALL que pueden mejorar la eficiencia del uso de recursos hídricos y, al considerar la facilidad de uso y la dificultad de mantenimiento, se asegura su sostenibilidad en el tiempo, y finalmente, se alinea con el ODS 13 “acción por el clima” al fomentar la implementación de soluciones de adaptación al cambio climático, ya que mitigan efectos como la disminución de inundaciones, y reducen la dependencia de los usuarios a fuentes de agua convencionales.

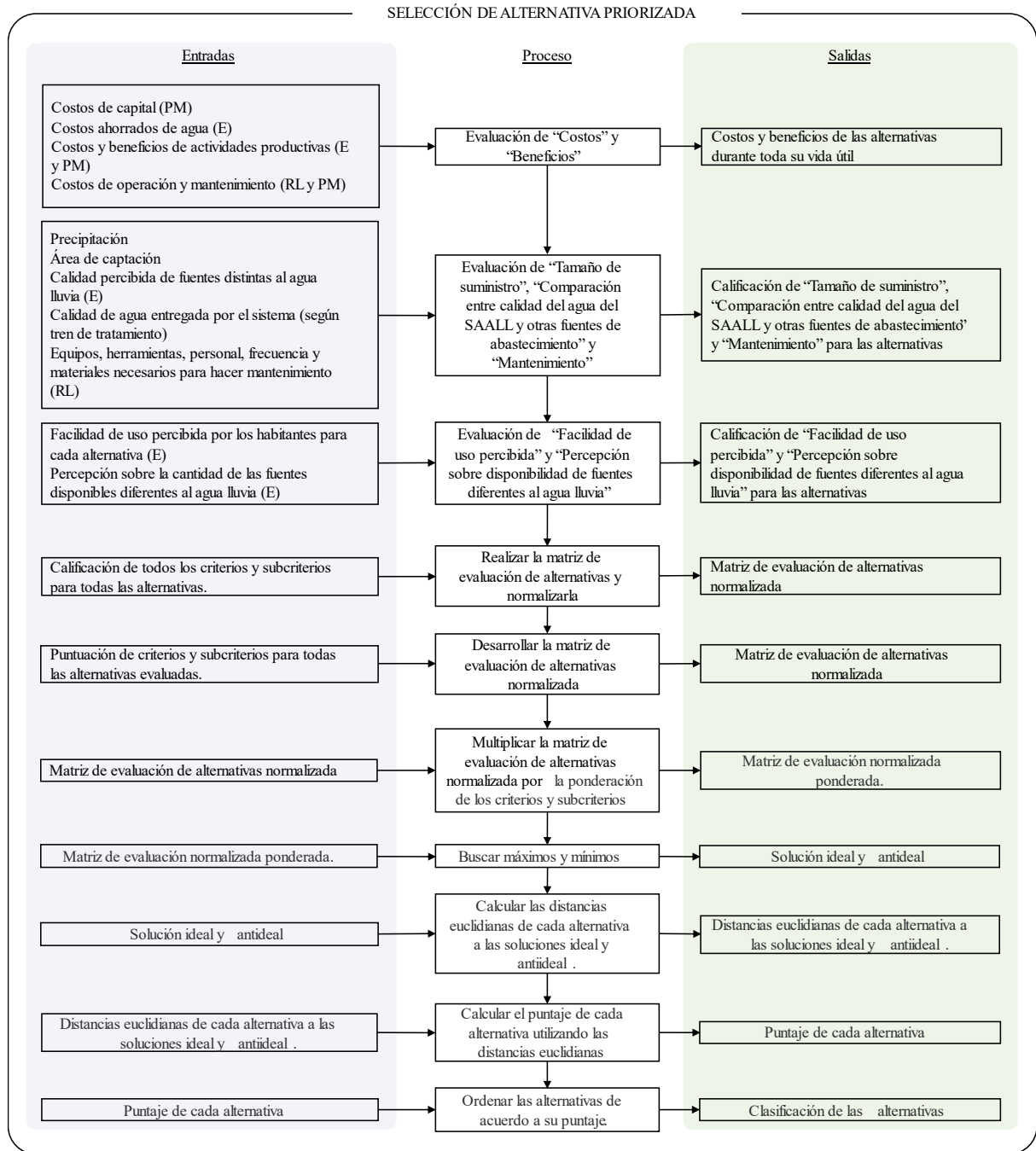
Entre los retos para robustecer la herramienta, se encuentra la incorporación de criterios y subcriterios ambientales, de manera que la selección del SAALL considere los impactos ambientales que se pueden presentar en el ciclo de implementación del sistema, y que podrían influenciar la selección final de las alternativas en un contexto específico.

En la Figura 19 se muestra un diagrama con el proceso que debe seguirse para utilizar la herramienta multicriterio propuesta en este estudio.

Figura 19.

Diagrama del proceso para la utilización de la herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias propuesta.





Nota: E: Encuesta de Hogares; RL: Revisión de la literatura; O: Observación; AL: Análisis de laboratorio; PM: Precios de mercado.

6. Conclusiones

Se encontraron 294 subcriterios de evaluación de los cuales se seleccionaron 7. En el criterio económico, “Beneficio” y “Costo”. En el criterio social, “Facilidad de uso percibida” y “Percepción sobre disponibilidad de fuentes de agua diferentes al agua lluvia”. En el criterio técnico, “Tamaño de suministro”, “Comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento” y “Mantenimiento”.

Las ponderaciones que se obtuvieron para los criterios fueron 49.7% para el criterio social, 26.4% para el criterio técnico y 23.9% para el criterio económico. Las ponderaciones obtenidas para los subcriterios económicos fueron 77.8% para “Beneficio” y 22.2% para “Costo”; para los subcriterios sociales fueron 61.1% para “Facilidad de uso percibida” y 38.9% para “Percepción sobre disponibilidad de fuentes de agua diferentes al agua lluvia”; y para los subcriterios técnicos fueron 43.4% para “Tamaño del suministro”, 32.0% para “Comparación entre calidad del agua del SAALL y otras fuentes de abastecimiento” y 24.6% para “Mantenimiento”.

Se diseñaron tres alternativas de SAALL basadas en las características de la zona de estudio. La alternativa 1 se diseñó para usos domésticos; la alternativa 2 se diseñó para usos domésticos, agrícolas y avícolas para autoconsumo; y la alternativa 3 se diseñó para usos domésticos y avícolas para autoconsumo y producción a pequeña escala. Se determinó que la mejor alternativa para las condiciones de la zona de estudio es la 3. Este resultado fue verificado con un análisis de sensibilidad.

La validación de la herramienta mostró un enfoque objetivo para la gestión sostenible de los recursos hídricos, pues considera las preferencias de expertos con diversas opiniones. La herramienta permite una selección efectiva, pues elige la alternativa de SAALL más adecuada para

un contexto determinado. Además, los resultados fueron estables ante variaciones de pesos en los criterios, lo que aumenta su confiabilidad.

La herramienta presentada en este estudio permite prediseñar, evaluar y priorizar alternativas de SAALL utilizando subcriterios sociales, técnicos y económicos, por lo que se puede adaptar a las necesidades de cada proyecto. Es una herramienta de apoyo al desarrollo de políticas y estrategias en torno a la gestión del agua en zonas rurales andinas, ya que está alineada a los principios de la normativa colombiana sobre agua y saneamiento para el sector rural y aporta al cumplimiento de las metas 6, 11 y 13 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Sin embargo, es necesario investigar e incluir otros enfoques, como el ambiental e institucional en la etapa de identificación y selección de criterios y subcriterios para tener resultados más completos en el futuro.

El contexto de validación de este estudio fue un limitante para la formulación de las alternativas, ya que estas se diseñaron apegándose al máximo a las características de la zona de estudio. Por lo tanto, realizar estudios adicionales donde se valide la herramienta en otros contextos y con otro panel de expertos puede aportar información adicional acerca de su solidez y la estabilidad de sus resultados.

7. Recomendaciones

En este estudio se seleccionaron los criterios considerados más básicos e importantes para la toma de decisiones; sin embargo, cada vez ha tomado más relevancia que la toma de decisiones responda también a criterios ambientales. Por esto, se recomienda explorar la inclusión de subcriterios ambientales en herramientas de selección de SAALL. Esta consideración puede proporcionar una perspectiva más amplia de la situación en los contextos donde se aplique la herramienta.

Una limitación identificada en este estudio es en la etapa integración de dimensiones, que involucra la participación de expertos para ponderar criterios y subcriterios. En este caso, los expertos incluidos fueron contactados por sus publicaciones sobre SAALL y no se incluyeron expertos familiarizados con el contexto donde se validaría la herramienta. Además, los expertos tenían conocimientos principalmente en aspectos técnicos. En aplicaciones posteriores se recomienda contar con un panel de expertos más diverso, esto podría contribuir a una herramienta más integral.

La aplicación exitosa de esta herramienta en un caso de estudio específico es un avance significativo en la toma de decisiones sobre la gestión sostenible del agua lluvia en contextos rurales andinos. No obstante, para garantizar la efectividad y la aplicabilidad generalizada de esta herramienta es recomendable desarrollar nuevos procesos de validación en otros contextos rurales, esto permitirá asegurar que sea una herramienta útil y robusta para diferentes condiciones.

Referencias

- Abdulla, F. y Al-Shareef, A. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3), 195–207.
- Abu-Zreig, M., Ababneh, F. y Abdullah, F. (2019). Assessment of rooftop rainwater harvesting in northern Jordan. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C*, 114.
- Adler, I., Carmona, G. y Bojalil, J. (2008). *Manual de captación de aguas de lluvia para centros urbanos*. PNUMA.
- Albarracín, C. (2023). *Evaluación económica de sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia. Caso de estudio vereda garbanzal en el municipio de los santos*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Alloatti M. (2014). *Una discusión sobre la técnica de bola de nieve a partir de la experiencia de investigación en migraciones internacionales*. IV Encuentro Latinoamericano de Metodología de las Ciencias Sociales, 27 al 29 de agosto de 2014, Heredia, Costa Rica. La investiga.
- Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M. y Ritsema, C. (2016) Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 108–120.
- Ávila, A. (2013). *Enotecnia para captación y reciclaje de aguas pluviales en casas de interés social en Pachua, Hidalgo*. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México).

- Ávila, V. y Ávila, P. (2018). *Implementación y evaluación técnica de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia*. (Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana).
- Barthwal, S., Chandola, S. y Goyal, H., Bhanu N. y Bhawana, A. (2014). Socio-economic acceptance of rooftop rainwater harvesting—A case study. *Urban Water Journal*, 11(3), 231–239.
- Basán, Mario., Sánchez, L., Tosolini, R., Tejerina, F. y Jordan, P. (2018). Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano, sinónimo de agua segura. *Aqua-LAC*, 10(1), 15–25.
- Becerra, N. y Parra, C. (2016). *Balance hídrico para estimar recarga potencial en La Mesa de Los Santos y dirección de flujo de agua subterránea*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Bocanegra, A., Ponce, J., Nápoles, F., Serna, M., Castro, A. y El-Halwagi, M. (2014). Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling*, 84, 44–56.
- Borda, S. (2014). Desempeño y mantenimiento de dispositivos de pretratamiento de agua lluvia, utilizados a nivel predial. (Tesis de Pregrado, Universidad de Los Andes).
- Brown, R. y Davies, P. (2007). Understanding community receptivity to water re-use: Ku-ring-gai Council case study. *Water Science & Technology*, 55(4), 283–290.
- Campisano, A. y Modica, C. (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling*, 63, 9–16.
- Carmona, R. (2010). *Instalaciones hidrosanitarias y de gas en edificaciones*. Ecoe Ediciones.

- Centre for Affordable Water and Sanitation Technology. (2009). *Manual para el filtro de bioarena diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento*. CAWST.
- Chinchilla, J. y Paredes, S. (2019). *Evaluación de las características fisicoquímicas 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*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Chino, M, Velarde, E, Espinoza, J. (2016) Captación de agua de lluvia en cobertura de viviendas rurales para consumo humano en la Comunidad de Vilca Maquera. *Revista Investigaciones Altoandina*, 8(3), 36 –373.
- Chiu Y., Tsai, Y. y Chiang, Y. (2015). Designing rainwater harvesting systems cost-effectively in a urban water-energy saving scheme by using a GIS-simulation based design system. *Water*, 7, 6285-6300.
- Chiu, Y., Liaw, C. y Chen, L. (2009). Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy*, 34, 492–498.
- Christian, C., Rahman, A. y Mwangi, J. (2016). Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A review of the global situation with a special focus on Australia and Kenya. *Water*, 8, 149.
- Conant, J. (2005). *Agua para vivir: cómo proteger el agua comunitaria*. Fundación Hesperian
- Correa, A. (2014). *Diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias como alternativa de ahorro de agua potable en la Universidad Libre de Colombia, sede bosque popular, bloque p y cafetería*. (Tesis de Pregrado, Universidad Libre de Colombia).

- Corrente, S., Greco, S., Leonardi, F. y Słowiński, R. (2021). The hierarchical SMAA-PROMETHEE method applied to assess the sustainability of European cities. *Applied Intelligence*, 51, 6430–6448.
- Cowden, J., Watkins, D. y Mihelcic, J. (2008). Stochastic rainfall modeling in West Africa: Parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment. *Journal of Hydrology*, 361, 64–77.
- Delgado, N. (2018). *Caracterización socioeconómica del corregimiento El Paujil del municipio de Matanza-Santander para el año 2018*. (Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga).
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2014). *Censo Nacional Agropecuario 2014*.
- Dickson, S., Schuster, C. y Newton, J. (2016) Water Security Assessment Indicators: The Rural Context. *Water Resour Manage*, 30, 1567–1604.
- Domènech, L. y Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19, 598-608.
- Domènech, L., March, H. y Saurí, D. (2013). Degrowth initiatives in the urban water sector? A social multi-criteria evaluation of non-conventional water alternatives in Metropolitan Barcelona. *Journal of Cleaner Production*, 38, 44-55.

- Domínguez, I. (2014). *Participatory modelling for holistic understanding of catchment health and human health in andean rural microcatchments, the case of Calabazas*. (Doctoral Thesis, Newcastle University).
- Domínguez, I., Oviedo, E. y Restrepo, I. (2016). Service provision in rural water supplies: Analysis of four community-based systems in Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(77), 117-140.
- Domínguez, I., Torres, W., Restrepo, I., Paterson, C. y Gowin, J. (2016). Self-supply as an alternative approach to water access in rural scattered regions: Evidence from a rural microcatchment in Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 20(1), 175–195.
- EAAB. (2009). *Norma Técnica de Servicio NS-085 Criterios de Diseño de Sistemas de Alcantarillado*.
- Emenike, C., Tenebe, I., Omole, D., Ngenea, B., Oniemayina, B., Maxwell, O. y Onokac, B. (2017). Accessing safe drinking water in sub-Saharan Africa: Issues and challenges in South–West Nigeria. *Sustainable Cities and Society*, 30, 263–272.
- Estupiñan, J. y Zapata, H. (2010). *Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá*. (Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana).
- FAO y World Bank Group. (2018). *Water Management in Fragile Systems: Building Resilience to Shocks and Protracted Crises in the Middle East and North Africa*.
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. FAO.

- Fernández, J. y León, L. (2022). *Análisis de la calidad del agua en sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias. Caso de estudio: vereda Garbanzal (Los Santos Santander)*. (Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Fewkes, A. y Butler, D. (2000). Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models. *Building Services Engineering Research & Technology*, 21(2), 99–106.
- Fonseca, C., Hidalgo, V. y Díaz, C. Vilchis, A. y Gallego, I. (2017) Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145, 323-335.
- Fuentes, M., Delgado, X., Charcas, H., Rodríguez, J., Flores, José. y Cardona, A. (2018). Roof rainwater harvesting in Central Mexico: uses, benefits, and factors of adoption. *Interciencia*, 40 (6), 403-408.
- Galarza, S., Torres, A., Moura, P. y Lara, J. (2015) Cride: A case study in multi-criteria analysis for decision-making support in rainwater harvesting. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 14(1), 43–67.
- Galeano, P. y Hurtado, S. (2017). *Propuesta de un modelo de localización para una planta de tratamiento de residuos peligrosos en el Valle del Cauca*. (Tesis de pregrado, Universidad del Valle).
- García, J. (2012). *Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la CD. de México*. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México).

- García, V., Arias, P. y Viera, S. (24-26 de agosto de 2016). *Análisis de tendencias en series de precipitación y temperatura de la Cuenca del Río Grande—Antioquía* [Discurso principal]. XXII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Bogotá D.C, Colombia.
- Gebre, S., Cattrysse, D. y Van, J. (2021). Multi-criteria decision-making methods to address water allocation problems: A systematic review. *Water*, 13 (2), 125.
- Ghisi E. y Schondermark, P. (2013). Investment feasibility analysis of rainwater use in residences. *Water Resour Manage*, 27, 2555–2576.
- Ghisi, E. y De Oliveira, S. (2007). Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. *Build Environ*, 42, 1731–1742.
- Gires A, y De Gouvello, B. (2009). Consequences to water suppliers of collecting rainwater on housing estates. *Water Science & Technology*, 60(3), 543-553.
- Gómez, M. y Barredo, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Grupo Editorial Alfaomega.
- Gómez, M. y Silva, C. (2019). *Propuesta de tecnologías para el tratamiento de aguas lluvias, como opción para su aprovechamiento en viviendas unifamiliares. Caso de estudio: Bucaramanga (Colombia)*. (Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- González, J. y González, D. (2009). *Uso de aguas lluvias de techos de edificaciones, como solución alternativa al problema de escasez de agua en el municipio de Barichara*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Gurung, T. y Sharma, A. (2014). Communal rainwater tank systems design and economies of scale. *Journal of Cleaner Production*, 67, 26–36.

- Gurung, T., Sharma, A. y Umapathi, S. (2012). *Economics of scale analysis of communal rainwater tanks*. Urban Water Security Research Alliance Technical Report No. 67.
- Hajani, E. y Rahman, A. (2014). Reliability and cost analysis of a rainwater harvesting system in peri-urban regions of Greater Sydney, Australia. *Water*, 6, 945–960.
- Huang, I., Keisler, J. y Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of The Total Environment*, 409(19), 3578-3594.
- IDEAM. (2017). *Curvas Intesidad Duración Frecuencia - IDF. Estación El Cucharo (Pinchote)*
- IGAC. (2002). *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Santander*
- Ignacio, J., Malenab, R., Pausta, C., Beltran, A., Belo, L., Tanhueco, R., Promentilla, M. y Orbecido, A. (2019) A perception study of an integrated water system project in a water scarce community in the Philippines. *Water*, 11, 1593.
- Imteaz, M., Adeboye, O., Rayburg, S. y Shanableh, A. (2012). Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 51–55.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2009). *Informe Hidrogeológico de la Mesa de Los Santos*. Bogotá D.C.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). *Norma técnica colombiana ntc 1500. Código colombiano de instalaciones hidráulicas y sanitarias*.
- Isla Urbana. (s.f.). *Manual de mantenimiento para su sistema residencial*.

- Islam, M., Chou, F. y Liaw, C. (2010). Evaluation of dual-mode rainwater harvesting system to mitigate typhoon-induced water shortage in Taiwan. *Water Science & Technology*, 62(1), 140–147.
- Ivanova, Y. y Marín, W. (2012). La evolución de la precipitación en la altiplanicie cundiboyacense: ¿tendencia o ciclos?, *Épsilon* 1(18), 9–30.
- Jaramillo, S. (2018). *Propuesta de mejora para el servicio de recolección de basuras del área urbana del municipio El Retiro*. (Tesis de Pregrado, Universidad EIA).
- Jeffrey, P. y Seaton, R. (2004) A conceptual model of ‘receptivity’ applied to the design and deployment of water policy mechanisms. *Environmental Sciences*, 1(3), 277-300.
- Jenkins, D. y Pearson, F. (1978). *Feasibility of rainwater collection systems in California*. University of California.
- Jenkins, G. (2007). Use of continuous simulation for the selection of an appropriate urban rainwater tank. *Australian Journal of Water Resources*, 11(2), 231-246
- Keeney, R. y Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press.
- Khan, S., Baksh, A., Papon, M. y Ali, M. (2017). Rainwater harvesting system: An approach for optimum tank size design and assessment of efficiency. *International Journal of Environmental Science and Development*, 8(1), 37-43.
- Khastagir A. y Jayasuriya, N. (2011). Investment evaluation of rainwater tanks. *Water Resour Manage*, 25, 3769–3784.

- Khastagir, A. y Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rainwater tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*, 381, 181–188.
- Lani, N., Syafiuddin, A., Yusop, Z., Adam, U. y Mat, M. (2018). Performance of small and large scales rainwater harvesting systems in commercial buildings under different reliability and future water tariff scenarios. *Science of the Total Environment*, 636, 1171–1179.
- Lawrence, D. y Lopes, V. (2016). Reliability analysis of urban rainwater harvesting for three Texas cities. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 10(1), 124-134.
- Illen, J. y Haarhoff, J. (2015). Una propuesta para el dimensionamiento probabilístico de tanques de agua de lluvia para demanda constante. *Revista de la Institución Sudafricana de Ingeniería Civil*, 57 (2), 22-27.
- Loc, H., Duyen, P., Ballatore, T., My Lan, N. y Gupta, A. (2017). Applicability of sustainable urban drainage systems: an evaluation by multi-criteria analysis. *Environ Syst Decis*; 37, 332–343.
- Lopes, V., Marques, G., Dornelles, F. y Medellin, J. (2017). Performance of rainwater harvesting systems under scenarios of non-potable water demand and roof area typologies using a stochastic approach. *Environ Syst Decis*, 37, 332–343.
- López, I. (2020). *Estudio de alternativas para el tratamiento de agua en sistemas rurales de la República Democrática del Congo*. Industriales
- López, J. y Vergara, N. (2011). *Elaboración de una guía ambiental para la reutilización de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias en edificaciones*. (Tesis de Especialización, Universidad Industrial de Santander).

- Mankad, A. y Tapsuwan, S. (2011). Review of socio-economic drivers of community acceptance and adoption of decentralized water systems. *Journal of Environmental Management*, 92, 380-391.
- Mazurkiewicz, K., Jeż-Walkowiak, J. y Michałkiewicz, M. (2022). Physicochemical and microbiological quality of rainwater harvested in underground retention tanks. *Science of the Total Environment*, 814, 1-12.
- Mechell, J., Kniffen, B., Lesikar, B., Kingman, D., Jaber, F., Alexander, R. y Clayton, B. (2009). *Rainwater harvesting: System planning*. Texas AgriLife Extension Service.
- Melville, P., Ward, S. y Butler, D. (2014). A preliminary sustainability assessment of innovative rainwater harvesting for residential properties in the UK. *Journal of Southeast University*, 30(2), 135-142.
- Melville, P., Ward, S. y Butler, D. (2016). Rainwater harvesting typologies for UK houses: a multi criteria analysis of system configurations. *Water*, 8(129), 1-12.
- Melvin, D., Ahammed, M. y Shaikh, I. (2023). Selection of Greywater Reuse Options Using Multi-criteria Decision-making Techniques. *Water Conservation Science and Engineering*, 8(1).
- Mendoza, J. y Rincón, C. (2016). *Evaluación de la viabilidad social, técnica y económica de la implementación de un sistema de recolección, tratamiento y aprovechamiento de aguas lluvias y aguas grises en un proyecto de vivienda de interés social*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (15 de agosto del 2019). *Gobierno Nacional lanzó programa Agua al Campo para mejorar la prestación de los servicios de agua potable y*

saneamiento básico en las zonas rurales del país. <https://minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/gobierno-nacional-lanzo-programa-agua-al-campo-para-mejorar-la-prestacion-de-los-servicios-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-en-las-zonas-rurales>.

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2021). *Reglamento Técnico del sector de Agua potable y saneamiento básico RAS – 2000.*

Muklada, H., Gilboa, Y. y Friedler, E. (2016) Stochastic modelling of the hydraulic performance of an onsite rainwater harvesting system in Mediterranean climate. *Water Science & Technology: Water Supply*, 16(6), 1614–1623

Muñoz, F. y Bueno, M. (2022). Metodología para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural. *Revista UIS Ingenierías*, 21(3), 85–100.

Nairn, A. (2003). Water management in the Arabian Gulf region and a partial solution to water shortages. *Elsevier Science*, 183–189.

Naranjo, J. y Salazar, I. (2021). Propuesta de variables técnicas para la selección de tecnología de sistema de aprovechamiento de aguas lluvias a nivel residencial en el contexto rural de países en desarrollo. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).

Ndiritu, J., Moodley, Y. y Guliwe, M. (2017). Generalized Storage–Yield–Reliability Relationships for Analysing Shopping Centre Rainwater Harvesting Systems. *Water* 9(771), 1-20.

Nguyen, V., Ichikawa, Y. y Ishidaira, H. (2018). Exploring optimal tank size for rainwater harvesting systems in Asian tropical climates. *Hydrological Research Letters*, 12(1), 1–6.

- Nnaji, C., Emenike, P. y Tenebe, I. (2017). An optimization approach for assessing the reliability of rainwater harvesting. *Water Resour Manage*, 31,2011–2024
- Nossa, S. (2017). *Alternativas de desinfección el agua para el siglo XXI sin cloro*. (Tesis de Pregrado, Universidad de Pamplona).
- Okoye, C., Solyal, O. y Akintuğ, B. (2015). Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 131–140.
- Organización Mundial de la Salud. (2012). *Estudio de la calidad de fuentes utilizadas para consumo humano y plan de mitigación por contaminación por uso doméstico y agroquímicos en Apurímac y Cusco*. Organización Panamericana de la Salud.
- Pelak, N. y Porporato, A. (2016). Sizing a rainwater harvesting cistern by minimizing costs. *Journal of Hydrology*, 541, 1340–1347.
- Posadas, A. (2015). *Sistema de cosecha de agua pluvial y reutilización de aguas grises de regadera en vivienda unifamiliar*. (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México).
- Prada, A. (1996). La filtración en arena, alcances y posibilidades de aplicación en la Orinoquia. *Revista Orinoquia*, 73–91.
- Ramírez, L. y Pérez, N. (2002). Uso de filtros lentos para el tratamiento de agua a nivel domiciliario. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 23(1) 44–50.
- Reyneke, B., y Waso, M., Khan, S. y Khan, W. (2020). Rainwater treatment technologies: Research needs, recent advances and effective monitoring strategies. *Curr Opin Environ Sci Health*, 16, 28–33.

- Rivas, M. y García, W. (2017). *Evaluación de la filtración lenta de arena para la potabilización del agua en el corregimiento de San José de Playón*. (Tesis de Pregrado, Universidad de Cartagena).
- Rock, C. y Rivera, B. (2014). *La Calidad del Agua, E. coli y su Salud*. College of Agriculture and Life Sciences.
- Rodríguez, H. (2005). *Diseños hidráulicos, sanitarios y de gas en edificaciones*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Roebuck, R. Oltean, C. y Tait, S. (2011). Whole life cost performance of domestic rainwater harvesting systems in the United Kingdom. *Water and Environment Journal*, 25, 355–365.
- Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176.
- Saeedi, I., Mikaeili, A., Bahremend, A. y Salmanmahiny, A. (2022). Multi-Criteria Prioritization Of Green Infrastructure Practices And Their Combinations To Control Runoff In Tehran Metropolitan. *Journal of Environmental Studies*, 48(1),.
- Sample, D. y Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal of Cleaner Production*, 75, 174–194.
- Santos, C. y Taveira, F. (2013). Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 1–6.
- Secretaría Distrital de Planeación. (2022). *Caracterización socioeconómica de la población rural bogotana a partir de la encuesta multipropósito*.

- Semaan, M., Day, S., Garvin, M., Ramakrishnand, N. y Pearce, A. (2020). Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: A systematic literature review. *Resources, Conservation & Recycling*.
- Seo, Y., Choi, N. y Park, D. (2012). Effect of connecting rain barrels on the storage size reduction. *Hydrological Processes*, 3538–3551.
- Sheikh, V. (2020). Perception of domestic rainwater harvesting by Iranian citizens. *Sustainable Cities and Society*, 60, 1-16.
- Silva, C., Sousa, V. y Carvalho, N. (2015). Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 21–34.
- Singhai, A., Das, S., Kadam, A., Shukla, J., Bundela, D. y Kalashetty, M. (2017). GIS-based multi-criteria approach for identification of rainwater harvesting zones in upper Betwa sub-basin of Madhya Pradesh, India. *Environment Development and Sustainability*, 21(10).
- Solsona, F. y Méndez, J. (2002). *Desinfección del agua*. OPS
- Song, J., Han, M., Kim, T. y Song, J. (2009). Rainwater harvesting as a sustainable water supply option in Banda Aceh. *Desalination*, 248, 233–240.
- Takagi, K., Otaki, M., Otaki, Y. y Chaminda, T. (2019). Availability and public acceptability of residential rainwater use in Sri Lanka. *Journal of Cleaner Production*, 234, 467-476.
- Toosi, A., Tousi, E., Ghassemi, S., Cheshomi, A. y Alaghmand, S. (2020). Un enfoque de análisis de decisiones multicriterio hacia la recolección eficiente de agua de lluvia. *Revista de Hidrología*, 582.



- Tsihrintzis, V. y Baltas, E. (2014). Determination of rainwater harvesting tank size. *Global NEST Journal*, 16(5), 822-831.
- Tsyganok, V., Kadenko, S. y Andriichuk, O. (2012). Significance of expert competence consideration in group decision making using AHP. *International Journal of Production Research*, 50(17), 1-8.
- Unatsabar. (2004). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Guía diseño para captación del agua lluvia*. CEPIS, OPS, OMS.
- UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. París
- Villanueva, M. y Ávila, J. (2019). *Análisis de Calidad Del Agua (Turbiedad y Color) de Un Sistema de Filtración de Flujo Ascendente Construido Con Materiales Granulares Para Bajantes de Agua Lluvia*. (Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia).
- Ward, S., Barr, S., Butler, D. y Memon, F. (2012). Rainwater harvesting in the UK: Socio-technical theory and practice. *Technol Forecast Soc Change* 79:1354–1361
- Ward, S., Barr, S., Butler, D. y Memon, F. (2013). Rainwater harvesting in the UK: exploring water-user perceptions. *Technological Forecasting & Social Change*, 79, 1354–1361.
- World Health Organization. (2012). *Rapid assessment of drinking-water quality: a handbook for implementation*. World Health Organization
- Yeh, C. (2003). The selection of multiattribute decision making methods for scholarship student selection. *International Journal of Selection and Assessment*, 11(4), 289-296.

Zabala, F. y Largo, G. (2018). *Estudio de la factibilidad de implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en un sector residencial de la cabecera municipal de Málaga, Santander*. (Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander).

Anexos

Anexo A. Encuesta realizada a expertos para la comparación por pares de criterios y subcriterios.

Comparación por pares de criterios y subcriterios considerados para el diseño de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias

 dianaluciapj@gmail.com (no se comparten) [Cambiar cuenta](#) 

***Obligatorio**


CONSENTIMIENTO INFORMADO


Usted ha sido invitado(a) a diligenciar una encuesta como parte del trabajo de grado de maestría titulado: "Propuesta de herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para asentamientos rurales andinos, considerando criterios técnicos, sociales y económicos". Este trabajo busca integrar criterios de evaluación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en una herramienta multicriterio de selección de alternativas, mediante la comparación de criterios por pares por parte de expertos en el tema.

Si usted decide responder esta encuesta, su participación será de carácter completamente voluntario y la información que usted suministre será utilizada únicamente para fines académicos.

Si está de acuerdo con lo expuesto anteriormente, por favor marque esta casilla de verificación

Si tiene alguna pregunta, inquietud o queja, puede ser enviada a:

 Isabel Cristina Domínguez. Directora del trabajo de maestría. Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: isabeldr@uis.edu.co

Diana Lucía Prieto Jiménez. Estudiante de maestría. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: diana2208420@correo.uis.edu.co 

Para preguntas o aclaraciones acerca de los aspectos éticos de esta investigación pueden comunicarse con el Comité de Ética para la Investigación Científica de la Facultad de Salud de la Universidad Industrial de Santander, al teléfono: 6344000 ext. 3145- 3107 o al email comitedetica@uis.edu.co

Dirección de correo electrónico *

Tu respuesta

COMPARACIÓN POR PARES DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

Esta encuesta consta de 8 preguntas acerca de sus preferencias sobre los criterios que se deben tener en cuenta para el diseño de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia (SAALL). Por ello en los enunciados siguientes escoja la opción que crea que debe ir en la línea punteada.

Evaluación de criterios

En este proyecto se consideran tres dimensiones (criterios) para tomar la decisión acerca de qué diseño de SAALL es más adecuado para determinado contexto. Estas dimensiones (criterios) son: económica, social y técnica.

Seleccione en los enunciados 1 a 3, la opción que usted considera que debe ir en la línea punteada.

1. El criterio social es _____ que el criterio económico *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

2. El criterio social es _____ que el criterio técnico *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

3. El criterio económico es _____ que el criterio técnico *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

EVALUACIÓN DE SUBCRITERIOS

Subcriterios económicos

En esta sección es de nuestro interés saber su opinión sobre la importancia que tienen los siguientes subcriterios económicos en la decisión acerca de qué diseño de sistema de aprovechamiento de agua lluvia (SAALL) es más adecuado para determinado contexto:

1. Beneficios: beneficios económicos del SAALL durante toda su vida útil (p. ej. Ahorros en la factura de agua potable, ahorros asociados a no comprar agua embotellada, etc.)
2. Costos: costos del SAALL durante toda su vida útil (p. ej. Costos de construcción, mano de obra, materiales, etc.)

Seleccione la opción que usted considera que debe ir en la línea punteada.

4. Los beneficios económicos son _____ que los costos *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

Subcriterios sociales

En esta sección es de nuestro interés saber su opinión sobre la importancia que tienen los siguientes subcriterios sociales en la decisión acerca de qué diseño de sistema de aprovechamiento de agua lluvia (SAALL) es más adecuado para determinado contexto:

1. Facilidad de uso percibida: opinión de las personas sobre qué tan fácil es la utilización de un SAALL.

2. Percepción sobre la disponibilidad de fuentes: opinión de las personas sobre atributos de fuentes alternativas al agua lluvia que tienen disponibles. Los atributos considerados son: i) disponibilidad de las fuentes durante el año; ii) porcentaje de demanda asegurada con estas fuentes; y iii) accesibilidad percibida en términos de calidad, costos y técnicos.

Seleccione la opción que usted considera que debe ir en la línea punteada.

5. La facilidad de uso percibida es _____ que la percepción sobre la disponibilidad de fuentes *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

Subcriterios técnicos

En esta sección es de nuestro interés saber su opinión sobre la importancia que tienen los siguientes subcriterios técnicos en la decisión acerca de qué diseño de sistema de aprovechamiento de agua lluvia (SAALL) es más adecuado para determinado contexto:

1. Tamaño del suministro: volumen máximo de agua de lluvia que se puede recolectar de un área de techo en un período específico
2. Usos finales: usos finales que se le dará al agua entregada por el sistema, clasificados en 5 categorías
3. Mantenimiento: requisitos de mantenimiento que tendrá el SAALL de por vida clasificados por niveles de dificultad (p. ej. Limpieza, reparaciones, cambios de piezas, etc.)

En los enunciados 6 a 8, seleccione la opción que usted considera que debe ir en la línea punteada.

6. El tamaño del suministro es _____ que los usos finales *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

7. El tamaño del suministro es _____ que el mantenimiento *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

8. Los usos finales son _____ que el mantenimiento *

- Extremadamente menos importante
- Mucho menos importante
- Menos importante
- Ligeramente menos importante
- Igual de importante
- Ligeramente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante

Agradecimiento

La información suministrada por usted es de gran importancia para estructurar la herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias que se está desarrollando en nuestra investigación. Muchas gracias por su valioso tiempo y por su disposición de responder esta encuesta.

Enviar

[Borrar formulario](#)

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.

Google no creó ni aprobó este contenido. [Denunciar abuso](#) - [Condiciones del Servicio](#) - [Política de Privacidad](#)

Google Formularios

Anexo C. Formato de las encuestas realizadas a los habitantes de la vereda.

Presentación del encuestador

Buenos días/tardes, somos estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, estamos realizando una encuesta sobre sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en la vereda Garbanzal del municipio Los Santos. El objetivo de esta encuesta es conocer la demanda de agua y los usos que se le da al agua en esta vereda y obtener información sobre los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias que tiene la gente en esta zona y si hay posibilidades de proponer mejoras a estos sistemas.

Esta encuesta hace parte del proyecto de investigación titulado "Propuesta de herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para asentamientos rurales andinos, considerando criterios técnicos, sociales y económicos", que hace parte del proyecto titulado "Estudio integral del agua en la Mesa de Los Santos" que se encuentra en desarrollo por parte de la Universidad Industrial de Santander. Su colaboración permitirá mejorar el conocimiento acerca de la recolección de agua lluvia, además, los resultados de la investigación serán divulgados a la comunidad a través de reuniones y material como folletos o cartillas explicativos. Si tiene alguna duda sobre el proyecto puede hacer preguntas en cualquier momento durante su participación.

La participación en la encuesta es voluntaria, si alguna de las preguntas durante la entrevista le parece incómoda, puede hacérselo saber al investigador y no responderla. La información suministrada por usted a los encargados de este estudio será utilizada únicamente para alcanzar los objetivos de la investigación y será exclusivamente consultada por profesores y estudiantes asociados al proyecto. Los resultados podrán ser publicados en revistas de carácter académico o ser presentados en reuniones, ponencias, congresos y demás escenarios de divulgación de conocimiento, estos resultados no serán presentados de con la información individual que responda cada persona, sino en conjunto con información de toda la vereda. En todos estos resultados, su identidad estará protegida de acuerdo con lo que usted exprese en el consentimiento informado. La encuesta tomará un tiempo estimado de 30 minutos. Desde ya le agradecemos su participación.

1. Perfil del encuestado

INFORMACIÓN SOCIODEMOGRÁFICA (jefe del hogar)

- 1.1. Nombre: _____
- 1.2. Sexo: F M
- 1.3. Edad: _____
- 1.4. Estado civil: a. Soltero b. Casado c. Unión libre d. Separado e. Divorciado f. Viudo
- 1.5. ¿Cuánto tiempo seguido lleva viviendo en esta casa?
- a. Desde que nació
- b. Un año o menos, enuncie número de meses: _____
- c. Más de un año, enuncie número de años: _____
- 1.6. Ocupación actual



a. Agricultor b. Jornalero c. Comerciante d. Empleado público e. Jubilado f. Otro, ¿Cuál? _____

1.7. Nivel de educación:

- a. Primaria incompleta, ¿cuántos años? _____
- b. Básica primaria
- c. Secundaria incompleta, ¿cuántos años? _____
- d. Básica secundaria (de 6° a 9°)
- e. Educación media (10° y 11°)
- f. Técnico
- g. Tecnólogo
- h. Profesional
- i. Otro, ¿Cuál? _____

1.8. ¿Usted hace parte de la junta de acción comunal? No Si

1.9. ¿Asiste a reuniones comunitarias? No Si

1.10. ¿Algún miembro de su familia hace parte de la junta de acción comunal No Si, ¿Quién? _____

1.11. ¿Algún miembro de su familia asiste a reuniones comunitarias? No Si, ¿Quién? _____

1.12. ¿Pertenece a algún tipo de organización comunal?

No Si, ¿Cuál? _____

1.13. ¿Algún miembro de su familia pertenece a algún tipo de organización comunal?

No Si, ¿Quién? _____

1.14. ¿A qué organización pertenece su familiar? _____

1.15. INFORMACIÓN SOCIO – ECONÓMICA (personas que habitan en la vivienda)

No.	Nombre y apellido (opcional)	Parentesco con el Jefe de Hogar	Edad	Estado civil	Ocupación	Nivel educativo
1						
2						
3						
4						



5						
6						
7						
8						

2. Información de vivienda

2.1. La finca que usted habita es:

- a. Propia b. Arrendada c. Aparcería d. Prestada e. Familiar f. Otro, ¿cuál? _____

2.2. ¿Cuál es el área total de este de la finca? _____ No sabe, no responde

2.3. Tipo de vivienda (Observación)

- a. Casa b. Habitación en casa c. Mediagua, mejora, rancho o choza d. Otro, ¿Cuál? _____

2.4. ¿Cuántos pisos o niveles tiene la vivienda? _____

2.5. ¿La vivienda actualmente cuenta con canaletas y bajantes (para el agua que escurre del techo)? Sí No

(si la respuesta es No continúe con la pregunta 2.11, de lo contrario continúe con la 2.6)

2.6. Llene la siguiente tabla sobre las canaletas y bajantes.

Poner diámetro donde aplique, si no aplica o es un canal abierto llenar las casillas de alto y ancho

	Diámetro	Alto	Ancho	Longitud	¿De qué material es el accesorio?	¿En qué estado considera que se encuentra? ²¹
Canaletas					__ a. Acero galvanizado __ b. Acero inoxidable __ c. Aluminio __ d. Plástico __ e. Otro, ¿Cuál? _____ __ f. No sabe, no responde	__ 1. Pésimo __ 2. Malo __ 3. Regular __ 4. Bueno __ 5. Nuevo __ 0. No sabe, no responde
Bajantes					__ a. Acero galvanizado __ b. Acero inoxidable __ c. Aluminio __ d. Plástico	__ 1. Pésimo __ 2. Malo __ 3. Regular __ 4. Bueno



					__e. Otro, ¿Cuál? _____ __f. No sabe, no responde	__5. Nuevo __0. No sabe, no responde
--	--	--	--	--	---	---

¹1. Pésimo, es necesario cambiarlo; 2. Malo, roto en algunas partes; 3. Regular, algo corroído; 4. Bueno, quizá necesite limpieza; 5. Nuevo

2.7. ¿Hay alguna malla para evitar que entren sólidos en el sistema? Si No

2.8. Si la respuesta fue si, ¿en qué componentes tiene la malla? (Puede marcar varias opciones)

- Canaletas
- Bajantes
- Tanques
- Otro, ¿Cuál? _____

2.9. ¿Cuántas veces al año realiza labores de mantenimiento a las canaletas y bajantes? _____

2.10. ¿En qué consisten las labores de mantenimiento que realiza a las canaletas? Describa brevemente

2.11. ¿En qué consisten las labores de mantenimiento que realiza a los bajantes? Describa brevemente

2.12. ¿Cuál es el material del techo de su vivienda?

- a. Teja de barro b. Paja c. Lámina de zinc d. Teja de cemento e. Otro: _____
- No sabe, no responde

2.13. ¿Cuál es el área del techo de la vivienda? _____ m² No sabe, no responde

2.14. (Observación) ¿Cuántas aguas (pendientes) tiene el techo? _____

2.15. ¿Cuántas veces al año realiza labores de mantenimiento/limpieza en el techo? _____

(si la respuesta es que no realiza mantenimiento seguir a la pregunta 2.16, de lo contrario continuar a la 2.15)

2.16. ¿En qué consiste las labores de mantenimiento que realiza? Describa brevemente

2.17. ¿Utiliza algún tipo de impermeabilizante en el techo de la vivienda? Sí No

2.18. ¿Con qué servicios de los siguientes cuenta su vivienda?



a. Energía eléctrica b. Acueducto c. Alcantarillado d. Gas e. Teléfono f. Internet g. Ninguno

2.19. Si cuenta con energía eléctrica, ¿el suministro es constante durante todo el año? Sí No

2.20. Si la respuesta es no, ¿cuántos días y horas a la semana tiene este servicio? _____ días y _____ horas

3. Información sobre usos y demanda de agua

3.1. Le haré unas preguntas sobre las fuentes de abastecimiento que tiene disponibles

Fuente	¿Cuáles fuentes utiliza en su vivienda? Marque con X	¿Cómo tiene acceso a estas fuentes? ¹	En las fuentes con conexión domiciliaria ¿Tiene medidor? Si o No	En las fuentes con acarreo, ¿Cuánto tiempo para tarda en traer el agua? minutos	En las fuentes con acarreo, ¿A qué distancia de la vivienda está la fuente? Metros	En las fuentes con acarreo, ¿Quién es el encargado de traer el agua?	¿La fuente está disponible todo el año? Si o NO	¿Durante qué meses del año no está disponible esta fuente de agua? ²	Si acarrea agua ¿Cuántos litros de agua acarrea en cada viaje?	¿Realiza algún tratamiento al agua antes de utilizarla?
Jagüey										
Recolección de aguas lluvias										
Agua subterránea (pozos o aljibes)										
Acueducto comunitario (el superficial antiguo)										
Carro tanque										
Otro, ¿cuál? _____										

¹ a) conexión de agua dentro de la casa; b) acarreo; c) otro y ¿cuál?; ² Poner los meses en formato de número; ³ a) Sedimentación, b) Filtración, c) Uso de cloro, d) Hervir, e) Otro ¿Cuál?, f) No sabe, g) Ninguno

3.2. ¿Compra agua en botella/bolsa? Sí No

(Si la respuesta es Sí continúe con la pregunta 3.3, si la respuesta es No pase a la pregunta 3.7)



3.3. Si la respuesta anterior fue sí, ¿Con que frecuencia compran agua en botella/bolsa para su hogar? (Llenar solo una de las opciones dependiendo la frecuencia)

_____ veces al día o _____ veces a la semana o _____ veces al mes o _____ veces al año

3.4. ¿Cuántos litros de agua compra cada vez que necesita? _____

3.5. ¿Cuánto cuesta el agua que compra? _____

3.6. ¿Qué uso le da al agua en botella/bolsa que compra? Beber Cocinar Otro, ¿Cuál? _____

3.7. Si cuenta con acueducto comunitario (pregunta 3.1) ¿Cuánto paga anualmente por este servicio? _____

3.8. Si cuenta con agua del pozo (pregunta 3.1) ¿Cuánto paga anualmente por este servicio? _____

3.9. ¿Ha habido algún momento en el último mes en el que en su hogar no hayan contado con agua suficiente cuando la necesitaban?

Sí No

(Si la respuesta es No pase a la pregunta 3.12, si la respuesta es Sí continúe con la 3.10)

3.10. ¿Cuántos días estuvo sin suministro de agua? _____

3.11. ¿Para qué actividades le ha faltado el suministro de agua en esos días?

3.12. ¿En su vivienda tiene jardín? No Sí

3.13. Si tiene jardín, ¿con qué frecuencia lo riega en épocas de sequía? _____ al día o _____ a la semana

3.14. ¿Tiene cultivos alrededor de su vivienda o en la finca en donde vive? No Sí

(Si la respuesta es sí llene la tabla de la pregunta 3.16, si la respuesta es no pase a la pregunta 3.17)

3.15. Responda las siguientes preguntas acerca de los cultivos que tiene.

¿Qué cultivos tiene?	¿Qué área dispone para cada cultivo? (m ²)	¿con qué fines tiene este cultivo? ¹	¿Qué fuente de agua utiliza para cada cultivo?	¿En qué meses riega cada cultivo? ²	¿Con qué frecuencia riega los cultivos en los meses en que riega?	¿Cuánto tiempo dura regando los cultivos?	¿Qué tipo de riego utiliza? ³
					____ veces al día ____ veces a la semana	____ mins ____ horas	
					____ veces al día ____ veces a la semana	____ mins ____ horas	
					____ veces al día ____ veces a la semana	____ mins ____ horas	
					____ veces al día ____ veces a la semana	____ mins ____ horas	



					___ veces al día	___ mins	
					___ veces a la semana	___ horas	
					___ veces al día	___ mins	
					___ veces a la semana	___ horas	

¹ Consumo propio o 2 venta; ² Escriba los meses en formato de numero; ³1 Superficie, 2 aspersion, 3 goteo, 4 subterráneo u 5 otro, anote cual

3.16. ¿Tiene animales de crianza en su vivienda? No Sí

(Si la respuesta es sí llene la tabla de la pregunta 3.18, si la respuesta es no pase a la pregunta 3.19)

3.17. Llene la siguiente tabla sobre los animales de crianza que tiene

Tipo	¿Cuáles animales tiene en su vivienda? Marque con X	Cantidad	¿Qué área dispone para cada grupo de animales? ^a (m2)	¿con qué fines tiene estos animales? ^b	¿Qué fuente de agua utiliza darle de beber los animales?	¿Cuántas veces les da de beber al día?	¿Qué cantidad de agua estima que utiliza cada vez que les da de beber? (litros)
Aves (gallinas, patos, etc.)							
Bovinos (vacas)							
Equinos (caballos)							
Porcinos (cerdos)							
Ovinos (ovejas)							
Caprinos (cabras)							
Camélidos (Alpacas)							
Otro:							

^a Solo si los tiene en un área cercada; ^b 1 Consumo propio o 2 venta;

3.18. ¿En qué meses considera usted que es la temporada de sequía del año? _____

3.19. ¿En qué meses considera usted que es la temporada de invierno del año? _____

3.20. ¿Con que frecuencia cree usted que llueve en la vereda en temporada de invierno?

a. Todos los días de la semana b. 2 o 3 veces a la semana c. Una vez a la semana

d. Cada 15 días e. Más de 15 días f. Otra, especifique: _____

3.21. ¿Cuenta su hogar con un tanque donde almacene agua que no sea proveniente de la lluvia? Si No

(si la respuesta es sí, continúe con la pregunta 3.23, de lo contrario pase a la sección 4)



3.22. Liste de cada depósito que tiene (Si alguno de los depósitos es llenado con agua lluvia no preguntar más, hay una sección específica para depósitos de agua lluvia)

No	¿Qué fuente de agua utiliza para llenar este depósito?	¿Qué uso le da a esta agua?	¿Cuántos litros puede almacenar este depósito? ¹	¿De qué material es este depósito?	¿Cuántas veces al año realiza mantenimiento/limpieza a este depósito? ²
1					
2					
3					
4					
5					

¹En litros; ²0: no realiza limpieza

3.23. ¿En qué consiste las labores de mantenimiento que realiza? Describa brevemente

4. Información sobre la percepción relacionada a aguas lluvias

4.1. ¿Considera que en la vereda los habitantes sufren de escasez de agua? Sí No

(si la respuesta es sí, continúe con la pregunta 4.2, si la respuesta es No, pase a la pregunta 4.7)

4.2. ¿Cómo le afecta esta problemática de escasez? _____

4.3. ¿La escasez de agua le impide realizar alguna actividad? Sí No

4.4. ¿Qué actividad no puede realizar? _____

4.5. ¿Cree que la recolección de agua lluvia es una buena alternativa de solución para el problema de escasez de agua? Sí No

4.6. ¿Por qué?

4.7. En una escala del 1 al 5, qué tan limpia considera que es el agua lluvia, donde 1 es un agua muy sucia y 5 es un agua muy limpia

1(Muy sucia) 2(Sucia) 3(Medianamente limpia) 4(Limpia) 5(Muy limpia)

4.8. ¿Qué posibles riesgos cree que conlleva la utilización de aguas lluvias?

- a. Enfermedades estomacales (asociadas a beberla)
- b. Enfermedades de la piel (irritación por contacto directo con la piel)



- c. Enfermedades de la piel (irritación por contacto con ropa lavada con agua lluvia)
- d. Daño de prendas de ropa por lavado usando agua lluvia
- e. Otro, ¿Cuál? _____

4.9. En una escala del 1 al 5 ¿Qué tan útil percibe el uso de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias?

- 1(Inútil) 2(Poco útil) 3(Moderadamente útil) 4(Útil) 5(Muy útil)

4.10. ¿En una escala del 1 al 5, qué tan fácil considera que es utilizar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias?

- 1(Muy difícil) 2(Difícil) 3(Normal) 4(Fácil) 5(Muy fácil)

4.11. ¿Sabe qué componentes tiene un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias? No Sí, explique:

4.12. ¿Sabe cómo funciona un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias? No Sí, explique:

4.13. ¿Sabe cómo se instala un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias? No Sí, explique:

4.14. ¿Sabe qué actividades de mantenimiento se debe realizar a los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias? No Sí, explique:

5. Información sobre sistemas de aguas lluvias existentes *(preguntar solo si recolectan agua lluvia)*

5.1. ¿En su vivienda recolecta agua lluvia en un reservorio o lago artificial o jagüey? Sí No

(Si la respuesta es No, pase a la pregunta 5.6 de lo contrario continúe con la pregunta 5.2)

5.2. ¿Cuántos jagüeyes tiene en su predio? _____



5.3. ¿Cuáles son las dimensiones que estima que tiene el jagüey?

Diámetro: _____ m

Profundidad: _____ m

5.4. ¿el jagüey cuenta con algún componente adicional? No Sí,

5.5. ¿Cuáles componentes adicionales tiene el jagüey?

- a. Bomba
- b. Polisombra negra encima
- c. Manguera o tubería
- d. Otro, ¿Cuál? _____

5.6. ¿Cuánto considera que le costó construir estos jagüeyes? _____

(incluidos en el costo los días de trabajo, bomba, manguera que lleva el agua, polisombra superior)

5.7. Respecto a la cantidad de agua lluvia que recoge en los jagüeyes, usted considera que:

- a. Está satisfecho con la cantidad
- b. Está satisfecho con la cantidad, pero no estaría mal si recogiera más
- c. No está satisfecho con la cantidad, realmente necesita recolectar más agua

5.8. ¿Qué uso le da al agua lluvia recolectada en el jagüey de almacenamiento? *(Marque con una X para qué usos utiliza agua del tanque y para qué usos usa agua del jagüey)*

Jagüey	Uso	Jagüey	Uso
	Beber		Hidratación de animales
	Cocinar		Limpieza del hogar
	Lavaplatos		Lavado de vehículo
	Ducha		Descarga de inodoros
	Lavamanos		Riego de cultivos
	Lavado de ropa		Limpieza sitios de estancia de animales
	Lavadero		Otro, ¿Cuál?:

5.9. ¿En su vivienda cuenta con tanques para la recolección de aguas lluvias? Sí No



¿Cuántos tanques para recoger aguas lluvias tiene?

5.10. Llene la siguiente tabla sobre el o los tanques para recolección de agua lluvia que tiene

No.	¿Cuántos litros almacena este tanque?	¿De qué material es este tanque?	¿Cuántas veces realiza limpieza / mantenimiento al año?	¿En qué estado considera que está el tanque? ¹	A parte del tanque, ¿cuenta con algún otro componente o accesorio? ²	¿Cuánto estima que le costó este sistema? ³	¿qué área tiene el techo donde recolecta agua para este tanque?	¿De qué material es el techo donde recolecta agua para este tanque? ⁴	¿Hace cuánto tiene este sistema?
1									____ Años o ____ Meses
2									____ Años o ____ Meses
3									____ Años o ____ Meses
4									____ Años o ____ Meses
5									____ Años o ____ Meses
6									____ Años o ____ Meses
7									____ Años o ____ Meses
8									____ Años o ____ Meses

¹1. Pésimo, es necesario cambiarlo; 2. Malo, roto en algunas partes; 3. Regular, algo corroído; 4. Bueno, quizá necesite limpieza; 5. Nuevo;

²tubería que transporte el agua dentro de la vivienda, llave para extraer agua, malla en la canaleta, una bomba, filtro, etc.; ³Incluyendo costo de días de trabajo, mangueras, bomba, canaletas, bajantes, malla, etc. ⁴Por ejemplo, teja de barro, paja, lámina de zinc, teja de cemento

5.11. ¿En qué consisten las labores de limpieza/mantenimiento que realiza? Describa brevemente

5.12. Respecto a la cantidad de agua lluvia que recoge en su sistema, usted considera que:

- a. Está satisfecho con la cantidad
- b. Está satisfecho con la cantidad, pero no estaría mal si recogiera más



- c. No está satisfecho con la cantidad, realmente necesita recolectar más agua

5.13. ¿Qué uso le da al agua lluvia recolectada en el tanque de almacenamiento? (Marque con una X para qué usos utiliza agua del tanque y para qué usos usa agua del jagüey)

Tanque	Uso	Tanque	Uso
	Beber		Hidratación de animales
	Cocinar		Limpieza del hogar
	Lavaplatos		Lavado de vehículo
	Ducha		Descarga de inodoros
	Lavamanos		Riego de cultivos
	Lavado de ropa		Limpieza sitios de estancia de animales
	Lavadero		Otro, ¿Cuál?:

- 5.14. ¿Tiene facilidad para comprar hipoclorito de sodio (Cloro) en su entorno? Sí No
- 5.15. ¿Qué beneficios le trajo a usted y a su familia la instalación del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias?



6. Información sobre sistemas de agua lluvia *(preguntar solo si NO recolectan agua lluvia)*

- 6.1. ¿Dispone de área suficiente en donde reside para poner un tanque y/o un sistema de tratamiento para agua lluvia? Sí No
- 6.2. ¿Tiene facilidad para comprar hipoclorito de sodio (Cloro) en su entorno? Sí No
- 6.3. ¿Estaría dispuesto a utilizar agua lluvia en su hogar? Sí No
- 6.4. ¿Estaría interesado en implementar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en su vivienda? Sí No

(Si la respuesta es Si siga con la pregunta 6.5, Si la respuesta es No, pase a la pregunta 6.8)

6.5. Si la respuesta es sí, ¿Por qué?

- a. Ahorro de dinero en compra de agua
- b. Es bueno para el medio ambiente
- c. Tengo mayor independencia
- d. Aumenta la cantidad de agua disponible
- e. No debo caminar para conseguirla
- Otros: _____

6.6. Si la respuesta es sí, ¿Qué uso le daría al agua lluvia recolectada? *(Marque con una X las opciones que apliquen)*

Marque x	USO	Marque x	USO
	Beber		Hidratación de animales
	Cocinar		Limpieza del hogar
	Lavaplatos		Lavado de vehículo
	Ducha		Descarga de inodoros
	Lavamanos		Riego de cultivos
	Lavado de ropa		Limpieza sitios de estancia de animales
	Lavadero		Otro, ¿Cuál?:

6.7. ¿Cuánto dinero invertiría en la construcción de un sistema de recolección de aguas lluvias?

- a. Entre 500.000 y 1.000.000



- b. Entre 1.000.000 y 2.000.000
- c. Entre 2.000.000 y 3.000.000
- d. Entre 3.000.000 y 5.000.000
- e. Más de 5.000.000

6.8. Si NO está dispuesto a invertir en la construcción de un sistema de recolección, ¿Por qué?

- a. Costo de inversión alto
- b. No está dispuesto a hacer actividades de mantenimiento y operación
- c. Falta de conocimiento acerca de la instalación, el funcionamiento o el mantenimiento del sistema
- d. Otros: _____

6.9. Si NO está dispuesto a invertir en la construcción de un sistema de recolección, ¿Qué lo motivaría a instalar un sistema de recolección de agua lluvia?

- a. Préstamos a bajo interés para la instalación
- b. Subsidios económicos del gobierno (valor total de la inversión)
- c. Subsidios económicos del gobierno (valor parcial de la inversión)
- d. Entrega de materiales necesarios para la construcción del sistema
- e. Capacitación acerca de la instalación, funcionamiento y operación del sistema
- f. Políticas o leyes que vuelva obligatoria la instalación de estos sistemas
- g. Otro, ¿Cuál? _____

6.10. ¿Qué beneficios cree que podría traerle a usted y a su familia la instalación de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias?

La información suministrada por usted es muy importante para nosotros, muchas gracias por su tiempo y disposición de responder esta encuesta!

Anexo D. Formato de las encuestas de subcriterios sociales y diagramas de las alternativas.



Formato de evaluación de subcriterios sociales por parte de expertos y encuesta con preguntas faltantes
Página 1 de 3



EVALUACIÓN DE SUBCRITERIOS SOCIALES

Esta sección indaga su opinión sobre de la escasez de agua en la vereda y las fuentes de agua que tiene disponibles, de tal manera que nos permita obtener su percepción sobre la oferta del agua en su vereda.

Nombre: _____

Teléfono*: _____

*no es obligatorio, solo si quiere que lo llamemos a avisarle cuando vamos a volver a dar más resultados

1. INFORMACIÓN SOBRE COSTOS DEL AGUA

Esta sección indaga acerca de los costos que usted debe asumir para tener agua en su vivienda.

1. Llenar la información de la siguiente tabla sobre los costos de las fuentes disponibles en la vereda, en caso de tener alguna fuente diferente a las mencionadas en la tabla, llenar la casilla "Otro, ¿Cuál?".

Fuente	1.1. ¿debe pagar por usar el agua de esta fuente? Sí o No	1.2. ¿Con qué frecuencia paga por utilizar el agua de esta fuente? ¹	1.3. ¿Cuántos litros compra o paga cada vez que utiliza agua de esta fuente?	1.4. ¿Cuánto cuesta la cantidad de agua que indicó en la pregunta 1.3.?
a. Agua embotellada				
b. Jagüey (reservorio)				
c. Pozo (agua subterránea)				
d. Acueducto comunitario				
e. Carro tanque				
f. Otro, ¿Cuál?:				

¹Frecuencia anual

2. INFORMACIÓN SOBRE CULTIVOS

Esta sección pregunta acerca de sus cultivos.

2.1. ¿tiene cultivos de maíz en la vivienda? Sí No

(Si la respuesta es sí responda la pregunta 2.2., si la respuesta es no continúe a la sección 3)

2.2. ¿Qué área tiene cultivada? O ¿cuántas matas tiene cultivadas?

a. área: _____

b. matas: _____

2.3. ¿Con qué fines tiene el cultivo? *(marcar con una X la respuesta, puede marcar varias opciones si lo requiere)*

___ a. Autoconsumo para la familia

___ b. Autoconsumo para alimentación de animales de crianza

___ c. Venta

___ d. Otro, ¿Cuál? _____

2.4. En la siguiente tabla anotar información sobre la siembra, el riego, la cosecha y los productos utilizados en el cultivo de maíz.

Marcar con una X el mes en que realiza las actividades de siembra, riego o cosecha, y los meses en que aplica productos como fertilizantes, herbicidas u otros productos para el control de plagas y enfermedades. Si no riega o utiliza productos en el cultivo dejar las casillas en blanco. Si en el mes aplica más de una vez los productos de los ítems b, d, e, f o g, anote en la casilla cuantas veces lo realiza en el mes.



Formato de evaluación de subcriterios sociales por parte de expertos y encuesta con preguntas faltantes
Página 2 de 3



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a. Siembra												
b. Riego												
c. Cosecha												
d. Fertilizantes												
e. Herbicidas												
f. Producto para el control de plagas y enfermedades												
g. Otro												

2.5. Si utiliza alguno de los productos de los ítems d, e, f o g de la pregunta 2.4. ¿Cuál producto utiliza en cada caso?

Anotar N.A. en los que no utiliza

- d. Fertilizante _____
- e. Herbicidas _____
- f. Producto para el control de plagas y enfermedades _____
- g. Otro, ¿Cuál? _____

2.6. Si utiliza alguno de los productos de los ítems d, e, f o g de la pregunta 2.4. ¿Qué cantidad de producto utiliza por cosecha? Anotar N.A. en los que no utiliza

- d. Fertilizante _____
- e. Herbicidas _____
- f. Producto para el control de plagas y enfermedades _____
- g. Otro _____

2.7. Si utiliza alguno de los productos de los ítems d, e, f o g de la pregunta 2.4. ¿Cuánto cuesta la cantidad de producto que indicó en la pregunta 2.6? Anotar N.A. en los que no utiliza

- d. Fertilizante _____
- e. Herbicidas _____
- f. Producto para el control de plagas y enfermedades _____
- g. Otro _____

2.8. ¿Riega su cultivo? Sí No

(Si la respuesta es sí responda la pregunta 2.9., si la respuesta es no continúe a la pregunta 2.10)

2.9. ¿Cuántos litros de agua considera que utiliza cada vez que riega su cultivo? (para toda el área indicada en la pregunta 2.2) _____

2.10. ¿Cuántos Kg de maíz produce su cultivo por cosecha? _____

2.11. ¿Es frecuente que en la zona se presenten plagas o enfermedades en los cultivos? Sí No

(Si la respuesta es sí responda la pregunta 2.12., si la respuesta es no continúe a la pregunta 2.13)

2.12. ¿Cuáles plagas y enfermedades se presentan? _____

2.13. Aparte de los costos de herbicidas, fertilizantes o productos para el control de plagas, ¿Qué otros costos de producción tiene su cultivo de maíz? Llenar la siguiente tabla²



EVALUACIÓN DE SUBCRITERIOS SOCIALES

Esta sección indaga su opinión sobre de la escasez de agua en la vereda y las fuentes de agua que tiene disponibles, de tal manera que nos permita obtener su percepción sobre la oferta del agua en su vereda.

Nombre: _____

Teléfono*: _____

*no es obligatorio, solo si quiere que lo llamemos a avisarle cuando vamos a volver a dar más resultados

1. INFORMACIÓN SOBRE COSTOS DEL AGUA

Esta sección indaga acerca de los costos que usted debe asumir para tener agua en su vivienda.

1. Llenar la información de la siguiente tabla sobre los costos de las fuentes disponibles en la vereda, en caso de tener alguna fuente diferente a las mencionadas en la tabla, llenar la casilla “Otro, ¿Cuál?”.

Fuente	1.1. ¿debe pagar por usar el agua de esta fuente? Sí o No	1.2. ¿Con qué frecuencia paga por utilizar el agua de esta fuente? ¹	1.3. ¿Cuántos litros compra o paga cada vez que utiliza agua de esta fuente?	1.4. ¿Cuánto cuesta la cantidad de agua que indicó en la pregunta 1.3.?
a. Agua embotellada				
b. Jagüey (reservorio)				
c. Pozo (agua subterránea)				
d. Acueducto comunitario				
e. Carro tanque				
f. Otro, ¿Cuál?:				

¹Frecuencia anual

2. INFORMACIÓN SOBRE CULTIVOS

Esta sección pregunta acerca de sus cultivos.

2.1. ¿tiene cultivos de maíz en la vivienda? Sí No

(Si la respuesta es sí responda la pregunta 2.2., si la respuesta es no continúe a la sección 3)

2.2. ¿Qué área tiene cultivada? O ¿cuántas matas tiene cultivadas?

a. área: _____

b. matas: _____

2.3. ¿Con qué fines tiene el cultivo? *(marcar con una X la respuesta, puede marcar varias opciones si lo requiere)*

___ a. Autoconsumo para la familia

___ b. Autoconsumo para alimentación de animales de crianza

___ c. Venta

___ d. Otro, ¿Cuál? _____

2.4. En la siguiente tabla anotar información sobre la siembra, el riego, la cosecha y los productos utilizados en el cultivo de maíz.

Marcar con una X el mes en que realiza las actividades de siembra, riego o cosecha, y los meses en que aplica productos como fertilizantes, herbicidas u otros productos para el control de plagas y enfermedades. Si no riega o utiliza productos en el cultivo dejar las casillas en blanco. Si en el mes aplica más de una vez los productos de los ítems b, d, e, f o g, anote en la casilla cuantas veces lo realiza en el mes.

FORMATO DE COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Usos			
Componentes	<p>Techo → Canaletas y bajantes → Desviador de primer flujo → Tanque → Bomba → Tanque elevado → Filtro lento de arena</p> <p>Techo</p> <p>Canaletas y bajantes</p> <p>Desviador de primer flujo</p> <p>Almacenamiento y sistema de bombeo</p> <p>Filtro lento de arena</p>	<p>Techo → Canaletas y bajantes → Dos desviadores de primer flujo → Tanque → Bomba → Tanque elevado → Filtro lento de arena</p> <p>Techo</p> <p>Canaletas y bajantes</p> <p>Desviador de primer flujo</p> <p>Almacenamiento y sistema de bombeo</p> <p>Filtro lento de arena</p>	<p>Techo → Canaletas y bajantes → Dos desviadores de primer flujo → Tanque → Bomba → Tanque elevado → Filtro lento de arena</p> <p>Techo</p> <p>Canaletas y bajantes</p> <p>Desviador de primer flujo</p> <p>Almacenamiento y sistema de bombeo</p> <p>Filtro lento de arena</p>
Tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Malla en canaletas y bajantes. • Desviar los primeros 100 litros de lluvia en otro tanque. • Filtrar el agua de consumo humano en un filtro casero de arena, gravilla y grava hecho en un tubo de PVC de diámetro 6" u 8". • Hervir el agua de consumo humano por 5 minutos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Malla en canaletas y bajantes. • Desviar los primeros 100 litros de lluvia en otro tanque. • Filtrar el agua de consumo humano en un filtro casero de arena, gravilla y grava hecho en un tubo de PVC de diámetro 6" u 8". • Hervir el agua de consumo humano por 5 minutos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Malla en canaletas y bajantes. • Desviar los primeros 100 litros de lluvia en otro tanque. • Filtrar el agua de consumo humano en un filtro casero de arena, gravilla y grava hecho en un tubo de PVC de diámetro 6" u 8". • Hervir el agua de consumo humano por 5 minutos.
Mantenimiento	<p>Durante los 25 años de vida útil:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de techo, canaletas, desviador de primer flujo y tanque cada 6 meses. • Revisión y reparación de techo, mallas de canaletas y bajantes y tuberías. • Reconstrucción desviador de primer flujo en el año 13. • Reemplazar el material del filtro lento de arena cada 2 años. 	<p>Durante los 25 años de vida útil:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de techo, canaletas, desviador de primer flujo y tanque cada 6 meses. • Revisión y reparación de techo, mallas de canaletas y bajantes y tuberías. • Reconstrucción desviador de primer flujo en el año 13. • Reemplazar el material del filtro lento de arena cada 2 años. 	<p>Durante los 25 años de vida útil:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de techo, canaletas, desviador de primer flujo y tanque cada 6 meses. • Revisión y reparación de techo, mallas de canaletas y bajantes y tuberías. • Reconstrucción desviador de primer flujo en el año 13. • Reemplazar el material del filtro lento de arena cada 2 años.

Autor: Diana Lucía Prieto Jiménez

Anexo E. Requerimientos del cultivo calculados por el software CROPWAT.

Ciclo 1 (Marzo 1 - Julio 19)			Ciclo 2 (Agosto 1 - Diciembre 19)		
Mes	Década (días)	Requerimiento de Riego mm/década	Mes	Década (días)	Requerimiento de riego mm/década
Marzo	1	0	Agosto	1	0
Marzo	2	0	Agosto	2	0
Marzo	3	0	Agosto	3	0
Abril	1	0	Septiembre	1	0
Abril	2	1.9	Septiembre	2	10.1
Abril	3	10.7	Septiembre	3	14.6
Mayo	1	17	Octubre	1	14.3
Mayo	2	17	Octubre	2	9.8
Mayo	3	23.5	Octubre	3	16.6
Junio	1	23.6	Noviembre	1	16.6
Junio	2	26.1	Noviembre	2	18.4
Junio	3	19.7	Noviembre	3	15
Julio	1	10.7	Diciembre	1	10.7
Julio	2	0	Diciembre	2	5.1

Anexo F. Detalle del cálculo de las pérdidas dentro de la red de instalaciones hidrosanitarias de la vivienda tipo.

Datos de diseño	
Temperatura T [°C]	25
Viscosidad cinemática μ [m ² /s]	8.94E-07
Viscosidad dinámica ν [Kg/m*s] [N*s/m]	0.000891
Gravedad g [m/s ²]	9.81
Peso específico γ [N/m ³]	9781.061
Densidad ρ [kg/m ³]	997.05
Presión inicial [m.c.a.]	4.3
Nivel base tanque	4.00

Tramo		Unid HM	No Salidas	K1	Q	Diámetro	V	Re	f	Pérdidas (longitud)		Pérdidas (accesorios)		Hf Total	Cota piezométrica		Cota aparato	Presión final	Presión mínima
										Hor	Hf	Km	Hf		Inicial	Final			
De	A	-	-	-	[l/s]	[in]	[m/s]	-	-	[m]	[m.c.a.]	-	[m.c.a.]	[m.c.a.]	[m.c.a.]	[m.c.a.]	[m]	[m]	
Tanque	1	8	4	0.58	0.280	1	0.55	15733	0.027898	5.03	0.086	1.8	0.028	0.114	4.30	4.19			
1	Lavaplat	2	1	1	0.187	3/4	0.66	14009	0.028588	9.18	0.303	11.65	0.256	0.560	4.19	3.63	0.95	2.68	2
1	2	6	3	0.71	0.282	1	0.56	15811	0.027869	5.43	0.094	10.15	0.160	0.254	4.19	3.93			
2	Ducha	2	1	1	0.187	3/4	0.66	14009	0.028588	1.88	0.062	2.4	0.053	0.115	3.93	3.82	1.8	2.02	2
2	3	4	2	1	0.302	3/4	1.06	22561	0.025861	0.69	0.053	0.45	0.026	0.079	3.93	3.85			
3	Sanit	3	1	1	0.248	3/4	0.87	18512	0.026959	0.57	0.031	3	0.115	0.146	3.85	3.71	0.43	3.28	2.8
3	Lavaman	1	1	1	0.116	1/2	0.92	13047	0.029019	1.59	0.156	4.95	0.213	0.369	3.85	3.48	0.81	2.67	2

Tramo	Accesorio 1			

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA LLUVIA

De	A	Tipo Accesorio	Cant.	Km	Km parcial
TE	1	Codo 90° 1"	2	0.9	1.8
1	Lavaplatos	T SL 1"	1	0.9	0.9
1	2	T SL 1"	1	0.9	0.9
2	Ducha	T SL 1"	1	0.9	0.9
2	3	T PD 1"	1	0.15	0.15
3	Sanitario	T SL 3/4"	1	0.9	0.9
3	Lavamanos	T PD 3/4"	1	0.15	0.15

Tramo		Accesorio 2			
De	A	Tipo Accesorio	Cant.	Km	Km parcial
TE	1				
1	Lavaplatos	Reducción 1" a 3/4"	1	0.3	0.3
1	2	Codo 90° 1"	10	0.9	9
2	Ducha	Reducción 1" a 3/4"	1	0.3	0.3
2	3	Reducción 1" a 3/4"	1	0.3	0.3
3	Sanitario	Codo 90° 3/4"	2	0.9	1.8
3	Lavamanos	Reducción 3/4" a 1/2"	1	0.3	0.3

Tramo		Accesorio 3			
De	A	Tipo Accesorio	Cant.	Km	Km parcial
TE	1				
1	Lavaplatos	Codo 90° 3/4"	11	0.9	9.9
1	2	Válvula de bola 1"	1	0.25	0.25
2	Ducha	Reducción 3/4" a 1/2"	1	0.3	0.3
2	3				

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA LLUVIA

3	Sanitario	Reducción 3/4" a 1/2"	1	0.3	0.3
3	Lavamanos	Codo 90° 1/2"	3	0.9	2.7

Tramo		Accesorio 4			
De	A	Tipo Accesorio	Cant.	Km	Km parcial
TE	1				
1	Lavaplatos	Válvula de bola 3/4"	1	0.25	0.25
1	2				
2	Ducha	Codo 90° 1/2"	1	0.9	0.9
2	3				
3	Sanitario				
3	Lavamanos	T SL 1/2"	1	0.9	0.9

Tramo		Accesorio 4			
De	A	Tipo Accesorio	Cant.	Km	Km parcial
TE	1				
1	Lavaplatos	Reducción 3/4" a 1/2"	1	0.3	0.3
1	2				
2	Ducha				
2	3				
3	Sanitario				
3	Lavamanos	T SL 1/2"	1	0.9	0.9

Tramo		Km Total
De	A	

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA LLUVIA

162

TE	1	1.8
1	Lavaplatos	11.65
1	2	10.15
2	Ducha	2.4
2	3	0.45
3	Sanitario	3
3	Lavamanos	4.95

2

3

4

5

Anexo G. Detalle del cálculo de las pérdidas y requerimientos de bombeo.

Datos de diseño	
Temperatura T [°C]	25
Viscosidad cinemática μ [m ² /s]	8.9364E-07
Viscosidad dinámica ν [Kg/m*s] [N*s/m]	0.000891
Gravedad g [m/s ²]	9.81
Peso específico γ [N/m ³]	9781.0605
Densidad ρ [kg/m ³]	997.05

Datos asumidos	
% Eficiencia	80%
Demanda [l/hab*día]	65
Demanda [l/día]	260
Tiempo de bombeo diario [h]	0.3
Qbomba [l/h]	1040.00
Qbomba [l/seg]	0.29
Qbomba máx [l/seg]	0.4
Velocidad [m/s]	0.5701
Qbomba [m ³ /s]	0.00029

Ficha técnica bomba	
Tipo	Periférica
Potencia [HP]	0.5
Voltaje [V]	110
Presión máxima [Psi]	26
Diámetro de succión [pulg]	1
Diámetro de descarga [pulg]	1
Caudal máximo [l/min]	28.0
Caudal máximo [l/seg]	0.47
trabajo continuo [min]	30

Cotas	
Base bomba	-0.456
Salida de agua bomba	0.0554
Entrada tanque elevado	5.2619

Tramo		Accesorio 1				Accesorio 2				Km Total
		Tipo Accesorio	Cant.	Km	Km parcial	Tipo Accesorio	Cant	Km	Km parcial	
De	A									
Tanque	Bomba	Codo 90° 1"	2	0.9	1.8	Salida tanque almacenamiento	1	1	1	2.8
Bomba	T. Elevado	Codo 90° 1"	7	0.9	6.3	Entrada tanque elevado	1	1	1	7.3

Tramo		Q	Diámetro			RDE	V	Re	f	Pérdidas (longitud)		Pérdidas (accesorios)		Hf Total
			Ec empírica	[in]	[m]					Long	Hf	Km	Hf	
De	A	[l/s]												
Tanque	Bomba	0.289	0.54	1	0.02540	21	0.57	16205	0.027725	2.04	0.037	2.8	0.046	0.083
Bomba	T. Elevado	0.289	0.54	1	0.02540	21	0.57	16205	0.027725	7.30	0.132	7.3	0.121	0.253

Requerimientos de la bomba

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA LLUVIA

164

Hb [m]	5.60
Pb requerida [vatios]	15.8
Pb entrada [vatios]	19.8
Pb entrada [Hp]	0.03

7

8

9

Anexo H. Flujo de caja con la estimación de costos y beneficios descontados de cada alternativa. 10
11

Alternativa 1				Flujo de efectivo neto
Fecha	Beneficio ahorro de agua	Mantenimiento	Operación	-\$ 4,962,384
dic-23	\$ 248,756	\$ 56,710	\$ 31,808	\$ 160,239
dic-24	\$ 259,002	\$ 46,443	\$ 33,118	\$ 179,440
dic-25	\$ 269,669	\$ 38,386	\$ 34,482	\$ 196,800
dic-26	\$ 280,776	\$ 50,348	\$ 35,903	\$ 194,526
dic-27	\$ 292,340	\$ 81,426	\$ 37,381	\$ 173,533
dic-28	\$ 304,381	\$ 54,580	\$ 38,921	\$ 210,879
dic-29	\$ 316,917	\$ 45,112	\$ 40,524	\$ 231,281
dic-30	\$ 329,970	\$ 59,169	\$ 42,193	\$ 228,608
dic-31	\$ 343,560	\$ 48,904	\$ 43,931	\$ 250,725
dic-32	\$ 357,710	\$ 254,525	\$ 45,740	\$ 57,445
dic-33	\$ 372,443	\$ 53,016	\$ 47,624	\$ 271,803
dic-34	\$ 387,782	\$ 70,741	\$ 49,585	\$ 267,456
dic-35	\$ 403,754	\$ 790,332	\$ 51,628	-\$ 438,206
dic-36	\$ 420,383	\$ 75,382	\$ 53,754	\$ 291,247
dic-37	\$ 437,697	\$ 121,912	\$ 55,968	\$ 259,817
dic-38	\$ 455,724	\$ 81,719	\$ 58,273	\$ 315,732
dic-39	\$ 474,494	\$ 67,543	\$ 60,673	\$ 346,279
dic-40	\$ 494,037	\$ 88,589	\$ 63,172	\$ 342,276
dic-41	\$ 514,385	\$ 73,221	\$ 65,774	\$ 375,390
dic-42	\$ 535,570	\$ 381,079	\$ 68,483	\$ 86,008
dic-43	\$ 557,629	\$ 79,376	\$ 71,303	\$ 406,949
dic-44	\$ 580,595	\$ 104,110	\$ 74,240	\$ 402,245
dic-45	\$ 604,508	\$ 86,050	\$ 77,298	\$ 441,161

Alternativa 1				Flujo de efectivo neto
Fecha	Beneficio ahorro de agua	Mantenimiento	Operación	-\$ 4,962,384
dic-46	\$ 629,406	\$ 112,863	\$ 80,482	\$ 436,061
dic-47	\$ 655,329	\$ 182,529	\$ 83,796	\$ 389,004
Valor presente	\$ 6,460,009	\$ 1,909,239	\$ 826,035	
Total Beneficios descontados	\$ 6,460,009			
Total costos descontados	\$ 7,697,658			

12

13

Alternativa 2								Flujo de efectivo neto
Fecha	Beneficio ahorro de agua	Beneficio Animales	Costo animales	Beneficio cultivos	Costo cultivos	Mantenimiento	Operación	-\$ 5,337,149
dic-23	\$ 134,582	\$ 1,793,600	\$ 1,485,485	\$ 171,859	\$ 221,400	\$ 57,279	\$ 31,808	\$ 304,068
dic-24	\$ 140,125	\$ 2,544,035	\$ 1,467,756	\$ 178,937	\$ 275,502	\$ 47,036	\$ 33,118	\$ 1,039,685
dic-25	\$ 145,896	\$ 2,648,815	\$ 1,528,207	\$ 186,307	\$ 286,848	\$ 39,004	\$ 34,482	\$ 1,092,476
dic-26	\$ 151,905	\$ 2,757,911	\$ 1,591,149	\$ 193,980	\$ 298,663	\$ 50,991	\$ 35,903	\$ 1,127,091
dic-27	\$ 158,161	\$ 2,871,500	\$ 1,901,405	\$ 201,970	\$ 310,964	\$ 82,335	\$ 37,381	\$ 899,546
dic-28	\$ 164,675	\$ 2,989,767	\$ 1,724,916	\$ 210,288	\$ 323,771	\$ 55,278	\$ 38,921	\$ 1,221,845
dic-29	\$ 171,458	\$ 3,112,905	\$ 1,795,959	\$ 218,949	\$ 337,106	\$ 45,838	\$ 40,524	\$ 1,283,885
dic-30	\$ 178,520	\$ 3,241,115	\$ 1,869,929	\$ 227,967	\$ 350,990	\$ 59,925	\$ 42,193	\$ 1,324,564
dic-31	\$ 185,872	\$ 3,374,605	\$ 1,946,944	\$ 237,356	\$ 365,447	\$ 49,691	\$ 43,931	\$ 1,391,820
dic-32	\$ 193,528	\$ 3,513,593	\$ 2,326,576	\$ 247,132	\$ 380,498	\$ 291,054	\$ 45,740	\$ 910,384
dic-33	\$ 201,498	\$ 3,658,306	\$ 2,110,623	\$ 257,311	\$ 396,169	\$ 53,869	\$ 47,624	\$ 1,508,830
dic-34	\$ 209,797	\$ 3,808,979	\$ 2,197,552	\$ 267,908	\$ 412,486	\$ 71,629	\$ 49,585	\$ 1,555,432
dic-35	\$ 218,438	\$ 3,965,857	\$ 2,288,062	\$ 278,943	\$ 429,475	\$ 956,980	\$ 51,628	\$ 737,093
dic-36	\$ 227,435	\$ 4,129,197	\$ 2,382,299	\$ 290,431	\$ 447,164	\$ 76,344	\$ 53,754	\$ 1,687,502
dic-37	\$ 236,802	\$ 4,299,265	\$ 2,846,820	\$ 302,393	\$ 465,581	\$ 123,274	\$ 55,968	\$ 1,346,818
dic-38	\$ 246,555	\$ 4,476,337	\$ 2,582,578	\$ 314,848	\$ 484,756	\$ 82,763	\$ 58,273	\$ 1,829,370
dic-39	\$ 256,710	\$ 4,660,701	\$ 2,688,945	\$ 327,815	\$ 504,722	\$ 68,629	\$ 60,673	\$ 1,922,257
dic-40	\$ 267,283	\$ 4,852,660	\$ 2,799,693	\$ 341,317	\$ 525,510	\$ 89,720	\$ 63,172	\$ 1,983,164

Alternativa 2								Flujo de efectivo neto
Fecha	Beneficio ahorro de agua	Beneficio Animales	Costo animales	Beneficio cultivos	Costo cultivos	Mantenimiento	Operación	-\$ 5,337,149
dic-41	\$ 278,291	\$ 5,052,524	\$ 2,915,003	\$ 355,374	\$ 547,154	\$ 74,399	\$ 65,774	\$ 2,083,860
dic-42	\$ 289,753	\$ 5,260,620	\$ 3,483,395	\$ 370,011	\$ 569,689	\$ 435,772	\$ 68,483	\$ 1,363,045
dic-43	\$ 301,687	\$ 5,477,287	\$ 3,160,066	\$ 385,250	\$ 593,152	\$ 80,653	\$ 71,303	\$ 2,259,049
dic-44	\$ 314,113	\$ 5,702,877	\$ 3,290,218	\$ 401,118	\$ 617,582	\$ 105,440	\$ 74,240	\$ 2,330,627
dic-45	\$ 327,050	\$ 5,937,759	\$ 3,425,730	\$ 417,638	\$ 643,018	\$ 87,434	\$ 77,298	\$ 2,448,966
dic-46	\$ 340,520	\$ 6,182,314	\$ 3,566,824	\$ 434,839	\$ 669,502	\$ 114,304	\$ 80,482	\$ 2,526,561
dic-47	\$ 354,545	\$ 6,436,943	\$ 4,262,314	\$ 452,749	\$ 697,077	\$ 184,568	\$ 83,796	\$ 2,016,481
Valor presente	\$ 3,494,982	\$ 62,825,373	\$ 37,776,397	\$ 4,463,044	\$ 6,829,803	\$ 2,082,827	\$ 826,035	
Total Beneficios descontados	\$ 70,783,399							
Total costos descontados	\$ 52,852,212							

Alternativa 3						Flujo de efectivo neto
Fecha	Beneficio ahorro de agua	Beneficio Animales	Costo animales	Mantenimiento	Operación	-\$ 5,337,149
dic-23	\$ 239,345	\$ 5,162,300	\$ 4,751,504	\$ 57,279	\$ 31,808	\$ 561,053
dic-24	\$ 249,203	\$ 8,193,930	\$ 5,340,295	\$ 47,036	\$ 33,118	\$ 3,022,683
dic-25	\$ 259,467	\$ 8,531,409	\$ 5,560,243	\$ 39,004	\$ 34,482	\$ 3,157,146
dic-26	\$ 270,153	\$ 8,882,789	\$ 5,789,250	\$ 50,991	\$ 35,903	\$ 3,276,798
dic-27	\$ 281,280	\$ 9,248,640	\$ 6,419,245	\$ 82,335	\$ 37,381	\$ 2,990,959
dic-28	\$ 292,865	\$ 9,629,559	\$ 6,275,949	\$ 55,278	\$ 38,921	\$ 3,552,276
dic-29	\$ 304,927	\$ 10,026,168	\$ 6,534,434	\$ 45,838	\$ 40,524	\$ 3,710,299
dic-30	\$ 317,486	\$ 10,439,111	\$ 6,803,565	\$ 59,925	\$ 42,193	\$ 3,850,914
dic-31	\$ 330,562	\$ 10,869,062	\$ 7,083,780	\$ 49,691	\$ 43,931	\$ 4,022,222
dic-32	\$ 344,177	\$ 11,316,721	\$ 7,854,647	\$ 291,054	\$ 45,740	\$ 3,469,457
dic-33	\$ 358,352	\$ 11,782,817	\$ 7,679,309	\$ 53,869	\$ 47,624	\$ 4,360,367
dic-34	\$ 373,111	\$ 12,268,111	\$ 7,995,593	\$ 71,629	\$ 49,585	\$ 4,524,414
dic-35	\$ 388,479	\$ 12,773,392	\$ 8,324,904	\$ 956,980	\$ 51,628	\$ 3,828,358
dic-36	\$ 404,479	\$ 13,299,483	\$ 8,667,778	\$ 76,344	\$ 53,754	\$ 4,906,086
dic-37	\$ 421,138	\$ 13,847,243	\$ 9,611,018	\$ 123,274	\$ 55,968	\$ 4,478,122
dic-38	\$ 438,483	\$ 14,417,563	\$ 9,396,473	\$ 82,763	\$ 58,273	\$ 5,318,537
dic-39	\$ 456,542	\$ 15,011,373	\$ 9,783,481	\$ 68,629	\$ 60,673	\$ 5,555,132
dic-40	\$ 475,346	\$ 15,629,639	\$ 10,186,429	\$ 89,720	\$ 63,172	\$ 5,765,664

Alternativa 3						Flujo de efectivo neto
Fecha	Beneficio ahorro de agua	Beneficio Animales	Costo animales	Mantenimiento	Operación	-\$ 5,337,149
dic-41	\$ 494,924	\$ 16,273,370	\$ 10,605,973	\$ 74,399	\$ 65,774	\$ 6,022,148
dic-42	\$ 515,308	\$ 16,943,614	\$ 11,760,129	\$ 435,772	\$ 68,483	\$ 5,194,538
dic-43	\$ 536,532	\$ 17,641,462	\$ 11,497,611	\$ 80,653	\$ 71,303	\$ 6,528,427
dic-44	\$ 558,630	\$ 18,368,053	\$ 11,971,157	\$ 105,440	\$ 74,240	\$ 6,775,845
dic-45	\$ 581,638	\$ 19,124,570	\$ 12,464,208	\$ 87,434	\$ 77,298	\$ 7,077,268
dic-46	\$ 605,593	\$ 19,912,245	\$ 12,977,566	\$ 114,304	\$ 80,482	\$ 7,345,486
dic-47	\$ 630,535	\$ 20,732,361	\$ 14,389,802	\$ 184,568	\$ 83,796	\$ 6,704,731
Valor presente	\$ 6,215,605	\$ 201,756,649	\$ 134,583,769	\$ 2,082,827	\$ 826,035	
Total Beneficios descontados	\$ 207,972,254					
Total costos descontados	\$ 142,829,781					