

Evaluación económica de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en zonas rurales andinas. Caso de estudio: vereda Garbanzal (Los Santos – Santander)

Cristian Andrés Albarracín Ortiz

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Con mucho cariño para mi familia, en especial, a mis padres, que con su ejemplo y amor me han orientado siempre a tomar las mejores decisiones para mi crecimiento personal. A mis abuelos por siempre ser tan cariñosos y brindarme todo su apoyo.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por brindarme todas las capacidades físicas e intelectuales, que me han permitido un crecimiento personal y profesional a lo largo de mis años.

A mis padres por todo el amor y apoyo incondicional que me han brindado.

Agradezco a mis profesores de carrera por su dedicación y compromiso, gracias a su pasión por enseñar y su profundo conocimiento en sus respectivas áreas, pude adquirir una base sólida de conocimientos y desarrollar habilidades fundamentales para mi desarrollo profesional.

A mi directora Isabel Domínguez por acompañarme, siempre con la mejor disposición en esta etapa final de mi proceso académico, valoro mucho todas las herramientas investigativas que aprendí a su lado.

Finalmente, quiero agradecer a cada experiencia y desafío que he enfrentado a lo largo de mi vida, ya que me han permitido aprender, crecer y convertirme en la persona que soy hoy.

Tabla de contenido

Introducción	14
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Objetivos	20
2.1 Objetivo general.....	20
2.2 Objetivos específicos	20
3. Marco de referencia	21
3.1 Marco teórico.....	21
3.1.1 Cambio climático en América Latina	21
3.1.2 Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) como alternativa para el suministro de agua en condiciones de cambio climático	23
3.1.3 Análisis económico.....	24
3.1.4 Metodología de análisis costo-beneficio.....	24
3.2 Marco de antecedentes.....	25
4. Metodología	28
4.1 Revisión de literatura científica sobre experiencias de aplicación del análisis costo- beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias.	28
4.1.1 Planificación de la revisión.....	29
4.1.2 Ejecución de la revisión.....	30
4.2 Descripción de la vereda caso de estudio	32
4.2.1 Caracterización de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) existentes en Garbanzal.....	33
4.3 Análisis de los costos del ciclo de vida de los sistemas.....	34
4.3.1 Alternativas de diseño.....	34
4.3.2 Análisis de los costos	37

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

4.4	Análisis de los beneficios de los sistemas.....	38
4.5	Determinación de la relación costo-beneficio de los sistemas.....	40
4.5.1	Tasa de descuento, inflación y período de vida del proyecto	40
4.5.2	Fuentes de financiación de la inversión	40
4.5.3	Relación costo-beneficio.....	41
5.	Resultados y discusión.....	42
5.1	Análisis Bibliométrico de los estudios sobre experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias.	42
5.1.1	Artículos publicados por año.	43
5.1.2	Citaciones.....	44
5.1.3	Producción científica por país.....	45
5.1.4	Publicaciones por revista	46
5.1.5	Publicaciones por autor.....	47
5.1.6	Publicaciones por área	48
5.2	Experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)	49
5.2.1	Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia como medida de adaptación al cambio climático.....	49
5.2.2	Motivación para implementar un Sistema de Abastecimiento de Aguas Lluvias (SAAL)50	
5.2.3	Evaluación económica de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)51	
5.2.4	Desafíos para la evaluación económica de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)	52
5.2.5	Alternativas para superar las limitaciones del análisis económico de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL).....	53
5.2.6	Relación Costo Beneficio de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)55	
5.3	Caracterización de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) en la vereda Garbanzal	61

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

5.3.1 Cambio climático en Garbanzal	61
5.3.2 Condiciones socioeconómicas de los habitantes de Garbanzal	64
5.3.3 Actividades que demandan agua.....	66
5.3.4 Fuentes de abastecimiento de agua.....	68
5.3.5 Calidad del agua.....	70
5.3.6 Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) existentes en Garbanzal....	70
5.4 Análisis de los costos para las alternativas de diseño de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) en Garbanzal	76
5.4.1 Costos inversión inicial.....	76
5.4.2 Costos de operación	77
5.4.3 Costos de mantenimiento.....	77
5.4.4 Costos de las actividades productivas.....	78
5.5 Beneficios de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias en Garbanzal	79
5.5.1 Costos evitados por el uso del sistema de abastecimiento de aguas lluvias para fines domésticos.....	79
5.5.2 Costos evitados por el uso del Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias(SAAL)para las actividades productivas.	81
5.5.3 Beneficios asociados a las actividades productivas.....	82
5.6 Relación costo beneficio de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) propuestos en Garbanzal	84
5.6.1 Relación costo- beneficio para el escenario 1	86
5.6.2 Relación costo- beneficio para el escenario 2.....	88
5.6.3 Análisis de la relación costo beneficio bajo diferentes fuentes de financiación de la inversión inicial.....	89
5.6.4 Costo de oportunidad.....	91
5.6.5 Análisis de sensibilidad.....	92
6. Conclusiones.....	93
7. Recomendaciones	96
Referencias Bibliográficas	97

Lista de Tablas

Tabla 1 Cumplimiento de los objetivos del proyecto	16
Tabla 2 Palabras claves y ecuaciones de búsqueda seleccionadas	30
Tabla 3 Datos de diseño	36
Tabla 4 Resumen costos de inversión inicial para cada alternativa.....	76
Tabla 5 Resumen actividades de mantenimiento.....	78
Tabla 6 Costos de producción gallinas para el segundo ciclo productivo de 6 meses.....	79
Tabla 7 Costos evitados para las actividades domesticas en cada alternativa y los dos escenarios	80
Tabla 8 Costo evitados para las actividades productivas en el escenario 2	81
Tabla 9 Beneficio anual estimado en términos de producción de huevo y carne para el escenario 1	82
Tabla 10 Beneficio cultivo de maíz	83
Tabla 11 Beneficios totales para un año en ambos escenarios	84
Tabla 12 Relación costo-beneficio y otros indicadores economicos para el escenario 1	86
Tabla 13 Relación costo beneficio para el escenario 2	88
Tabla 14 Resultados económicos de las diferentes fuentes de financiamiento para el escenario 1	89
Tabla 15 Relación costo-beneficio para tasa CDT 360 días para el escenario 1	91

Lista de Figuras

Figura 1. Composición marco de referencia.....	21
Figura 2 Metodología de la investigación.....	29
Figura 3 Resumen metodología de revisión de literatura	31
Figura 4 Localización geográfica vereda Garbanzal	32
Figura 5 Demanda de actividades domésticas y productivas en el día.	35
Figura 6 Componentes principales en cada alternativa.....	36
Figura 7 Artículos publicados por año, para la ecuación de búsqueda (rainwater harvesting” AND cost-benefit AND análisis) 141 artículos.....	43
Figura 8 Artículos publicados por año para los 26 artículos seleccionados	44
Figura 9 Número de citas en los 26 artículos seleccionados.....	45
Figura 10 Producción científica por país en los 26 artículos seleccionados.....	46
Figura 11 Publicaciones por revista para los 26 artículos seleccionados	47
Figura 12 Dispersión de los artículos (Ley de Bradford)	47
Figura 13 Publicaciones por autor, para la ecuación de búsqueda (rainwater harvesting” AND cost-benefit AND análisis) 141 artículos.....	48
Figura 14 Áreas donde se encuentran los artículos para los 26 artículos seleccionados	48
Figura 15. Serie de lluvias anuales en Garbanzal con datos de la Estación La Mesa 1974-2021	62
Figura 16 Ciclo anual de precipitación- Estación La Mesa 2010-2021	63
Figura 17 Comportamiento de precipitaciones entre el año 2018 y 2021	64
Figura 18. A. Permanencia en la vereda B. Propiedad del predio	65
Figura 19. Percepción meses de sequía y lluvia en la vereda	66
Figura 20. Distribución de animales de cría en las viviendas de Garbanzal.....	67
Figura 21. Distribución de cultivos en Garbanzal	68
Figura 22. Porcentaje de adopción de las fuentes de abastecimiento de agua en la vereda Garbanzal	69
Figura 23. Combinación de fuentes de agua en las viviendas de Garbanzal	70
Figura 24. Dimensiones comunes en techos de la vereda y tipo de material.....	71
Figura 25 Materiales usados en A. canaletas y B. bajantes	72

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

Figura 26 Materiales y estado de los tanques de almacenamiento	73
Figura 27 Capacidad de los tanques presentes en la vereda	74
Figura 28. Costo de implementación de los SAAL en techos	75
Figura 29. Tiempo de implementación de los sistemas	75
Figura 30 Comportamiento de la relación costo beneficio en función de la tasa de descuento y la inflación para la alternativa 1	93

Lista de Apéndices

Apéndice A. Artículo de carácter publicable

Glosario

ACB: análisis costo beneficio

SAAL: sistema de aprovechamiento de agua lluvia

TIR: tasa interna de retorno

VAN: valor actual neto

Resumen

Título: Evaluación económica de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en zonas rurales andinas. Caso de estudio: vereda Garbanzal (Los Santos – Santander) *

Autor: Cristian Andrés Albarracín Ortiz**

Palabras Clave: Cambio climático, Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, Análisis económico, Relación costo-beneficio

Descripción:

La seguridad hídrica y alimentaria están en juego en muchas regiones del mundo debido al cambio climático. Los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia (SAAL) han llevado a mejoras en la disponibilidad de agua en zonas urbanas y rurales, generando beneficios en el bienestar y la economía de numerosas comunidades. No obstante, la eficiencia económica de estos sistemas sigue siendo discutible. Diferentes investigaciones sobre la viabilidad financiera de los SAAL han arrojado resultados contradictorios, especialmente en áreas urbanas. En muchas zonas rurales, frecuentemente los SAAL son la única fuente de agua disponible. Además, la posibilidad de usar el agua para actividades de sustento puede mejorar los resultados de la evaluación financiera en las zonas rurales. En este estudio se usa el análisis costo-beneficio (ACB) como indicador económico para determinar la viabilidad de SAAL en zonas rurales. Para ello, se realizó una revisión de literatura sobre el tema en diferentes regiones del mundo, y luego se aplicó esta metodología para analizar la viabilidad de tres alternativas de diseño desarrolladas en la vereda Garbanzal de los Santos (Santander – Colombia). Los resultados muestran que, en zonas con escasez de agua como Garbanzal, al analizar económicamente los SAAL incorporando los beneficios de las actividades productivas facilitadas por la mayor disponibilidad de agua, los resultados son alentadores. Así, la relación ACB fue mejor para las alternativas que consideraban usos productivos (alternativas 2 y 3) en comparación con la alternativa que solo otorgaba agua para fines domésticos (alternativa 1). La alternativa que entregaba agua para actividades domésticas y crianza de gallinas (alternativa 3) tuvo la mejor relación (1.45), ya que, en el contexto de estudio, esta actividad tiene mayor margen de ganancia y menor consumo de agua en comparación con el cultivo de maíz (alternativa 2). También se encontró que cuando la inversión inicial es subsidiada por el gobierno se dan las mejores relaciones ACB. Estos resultados muestran a los SAAL como una opción viable para poblaciones campesinas con pequeñas actividades productivas que viven en zonas áridas. El uso de esta herramienta permite optimizar los recursos, evaluar los riesgos y beneficios y considerar diferentes escenarios y supuestos antes de su implementación. Los gobiernos comprometidos con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible podrían apoyar estas inversiones con gran impacto potencial para mejorar la calidad de vida de muchas comunidades.

*Trabajo de grado

**Facultad de Físicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Programa Ingeniería industrial. Directora: Isabel Domínguez.

Abstract

Title: Economic evaluation of rainwater harvesting systems in rural Andean areas. Case study: Garbanzal village (Los Santos - Santander)*.

Author: Cristian Andrés Albarracin Ortiz**

Keywords: Climate change, Rainwater harvesting systems, Economic analysis, Cost-benefit relation.

Description:

Water and food security are at stake in many world regions due to climate change. Rainwater harvesting systems (RWHS) have led to improved water availability in urban and rural areas, generating benefits for the well-being and economy of many communities. However, the economic feasibility of these systems remains arguable. Different investigations on the financial feasibility of RWHS have yielded conflicting results, especially in urban areas. In many rural areas, RWHS are often the only available water source. In addition, using water for livelihood activities can improve financial evaluation results in rural areas. This study uses cost-benefit analysis (CBA) to assess the feasibility of RWHS in rural areas. For this, a literature review on the subject in different regions of the world was carried out. Then, this methodology was applied to analyze the feasibility of three design alternatives developed for Garbanzal village from los Santos (Santander - Colombia). The results show that, in areas with water scarcity, such as Garbanzal, the results are promising when the economic analysis of RWHS incorporates the benefits of productive activities facilitated by greater water availability. Thus, the CBA ratio was better for the alternatives that considered productive uses (alternatives 2 and 3) than the alternative that only provided water for domestic purposes (alternative 1). The alternative that provided water for domestic activities and raising chickens (alternative 3) had the best ACB ratio (1.45) since, in the studied context, this activity has a higher profit margin and lower water consumption compared to growing corn (alternative 2). It was also found that the best CBA ratios were obtained when the government subsidized the initial investment. These results show RWHS as a viable option for peasant populations with small productive activities that live in arid zones. This tool allows for optimizing resources, assessing risks and benefits, and considering different scenarios and assumptions before implementation. Governments committed to meeting Sustainable Development Goals could support these investments with great potential to improve the quality of life of many communities.

*Undergraduate research work

**Faculty of Physics and Mechanics. School of Industrial and Business Studies. Industrial Engineering Program. Supervisor: Isabel Domínguez.

Introducción

El agua es el elemento más importante para el sostenimiento de la vida. En el siglo XXI, la creciente demanda de agua se presenta como uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad (FAO, 2013).

Históricamente las civilizaciones se han desarrollado en torno a las aguas superficiales disponibles en la zona, lo que les permitió crecer como sociedad, logrando una autonomía alimentaria, además de posibilitar el desarrollo de actividades productivas, generación de energías, y como fuente de transporte. A medida que la población mundial aumenta, también crece la demanda de agua potable, encontrando hoy en día poblaciones que no cuentan con seguridad hídrica, y en donde el problema se agrava cada día más (Id & Johnston, 2019).

La escasez de agua afecta negativa y profundamente las posibilidades de desarrollo de una región. La falta de agua compromete las posibilidades de progreso económico y bienestar social. En el contexto del calentamiento global, el problema de escasez de agua podría agudizarse en las regiones secas, incluso podría alcanzar zonas húmedas en donde nunca hubo desabastecimiento (Sturm et al., 2009a). La reducción de los niveles de precipitación y aumento en los niveles de evaporación y transpiración, comprometen el bienestar de muchas comunidades alrededor del mundo, encontrando hoy en día los llamados “migrantes climáticos” que son cada vez mayores en regiones como África (Id & Johnston, 2019).

En gran parte del mundo, los habitantes de localidades rurales se ven enfrentados a serios problemas para abastecerse de agua de buena calidad; la lejanía y dispersión de estos hacia los centros poblados complica el suministro por redes de acueducto, aun cuando esto se logra, la

administración es deficiente y la falta de mantenimiento de la infraestructura impide que los usuarios cuenten con el servicio de manera permanente (Mwenge Kahinda et al., 2007). La topografía irregular es otro problema que dificulta la instalación de infraestructura para abastecer a todas las viviendas, ya que esto se traduce en barreras naturales y elevados costos para su implementación (Dallman et al., 2017). Por ello, se hace necesario buscar otras alternativas de suministro no convencionales como los Sistemas de Aprovechamiento de Agua de Lluvia (SAAL). Los SAAL pueden brindar a las comunidades acceso a agua de calidad aceptable para uso doméstico y agrícola, y mediante tratamientos adicionales, ser apta para el consumo humano (Dallman et al., 2021).

A la hora de implementar estos sistemas, el parámetro más sensible en su adopción es el de los costos, ya que se requiere una inversión considerable para su montaje, y en muchas ocasiones las comunidades carecen de los recursos necesarios o no tienen acceso a créditos para financiarlos (Hatibu et al., 2006). Resulta esencial desarrollar sistemas de apoyo a la toma de decisiones que ayuden a las personas a mitigar riesgos e invertir en tecnologías prometedoras para la gestión de los recursos hídricos. En este sentido, la aplicación de herramientas económicas como el análisis costo-beneficio desempeña un papel fundamental al permitir la comparación de diferentes alternativas y seleccionar aquella que mejor se adapte a una determinada situación (Kim et al., 2016).

El presente trabajo investigativo aplicará la metodología de análisis Costo Beneficio para determinar la viabilidad de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en la vereda Garbanzal, localizada en la zona rural del municipio de Los Santos - Santander. Esta vereda se utilizará como caso de estudio, considerando la utilización generalizada de SAAL para satisfacer las necesidades de la población. Este trabajo contribuirá a un trabajo de grado de maestría en

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

investigación de la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en donde se está desarrollando una herramienta multicriterio para apoyar la selección de SAAL en zonas rurales. Esta herramienta considerará criterio técnicos, sociales y económicos. Por lo tanto, este trabajo suministrará elementos para el abordaje del componente económico, esencial para determinar la viabilidad de implementación de estos sistemas. El brindar herramientas y acompañamiento a las comunidades en riesgo, permite fortalecer su capacidad de adaptación ante los desafíos que trae el cambio climático.

Tabla cumplimiento de objetivos

Tabla 1

Cumplimiento de los objetivos del proyecto

<i>Objetivo</i>	<i>Cumplimiento</i>
<i>Revisar literatura científica sobre experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias.</i>	Numeral 5.1 y 5.2
<i>Caracterizar los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias existentes en la vereda Garbanzal (Los Santos-Santander)</i>	Numeral 5.3
<i>Analizar los costos del ciclo de vida de los sistemas</i>	Numeral 5.4
<i>Analizar los beneficios de los sistemas</i>	Numeral 5.5 y 5.6
<i>Entregar un artículo de carácter publicable</i>	Apéndice

1. Planteamiento del problema

En el mundo, aproximadamente tres de cada diez personas carecen de acceso permanente al agua. Desde la perspectiva de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), es crucial seguir impulsando estrategias que mejoren la calidad de vida de las personas a nivel global. Esto incluye la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos (OMS, 2021).

En Colombia, la Constitución Política establece como uno de los principales objetivos del Estado la solución de las necesidades básicas insatisfechas, entre las cuales se encuentra el acceso al servicio de agua potable. Es fundamental que la población tenga acceso a una cantidad mínima de agua potable al día, entre 1,5 y 2,0 litros para su consumo, y una cantidad adicional que garantice condiciones de higiene adecuadas (Procuraduría, 2021).

Existe una gran brecha entre la cobertura de acceso al agua en zonas urbanas y rurales. Según datos del año 2022, por cada 100 personas que viven en áreas rurales, únicamente 46,6 tienen acceso a agua potable (Washdata, 2022). Este resultado ubica a Colombia como el país con peor desempeño dentro del grupo de naciones pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), con las cuales se realizó la comparación (Procuraduría, 2021).

El limitado acceso al agua en algunas áreas rurales se traduce en zonas con poca productividad y un nivel socioeconómico bajo. Diversas entidades, como el Banco Mundial, universidades y organizaciones gubernamentales y no gubernamentales (ONG), se dedican a brindar asistencia a estas regiones con el objetivo de lograr un crecimiento económico y reducir la pobreza. En este contexto, los SAAL están adquiriendo importancia, pues representan un método

eficaz para complementar el suministro de agua destinado a la agricultura, ganadería y actividades domésticas. Además, los SAAL contribuyen a aliviar la gran demanda que actualmente se da a las aguas superficiales y subterráneas que cada día son más escasas (Liang & van Dijk, 2011).

En muchas ocasiones los SAAL son nuevos para las comunidades o en el pasado no han tenido experiencias positivas, por lo que puede haber algo de rechazo e incertidumbre a la hora de invertir en estos sistemas (Islam et al., 2011). Por lo tanto, se hace necesario que las personas puedan entender en términos económicos lo que pueden ganar y en que costos incurrirían a la hora de adoptarlos (Malik et al., 2014a). Son muchas las variables a examinar antes de afirmar que los SAAL son la panacea para el suministro de agua y que son la opción más viable para toda comunidad. No obstante, en muchos estudios a nivel mundial se ha comprobado que estos han sido eficaces como método de suministro de agua y que tanto su fiabilidad como viabilidad dependen de las condiciones socioeconómicas y geográficas, pero que en términos generales se han traducido en mejores condiciones de vida y crecimiento económico a la región (Hatibu et al., 2006).

En este contexto ¿Cómo saber si un SAAL es económicamente viable para una determinada comunidad? Y ¿merece la pena invertir en un SAAL? Se afirma que existe viabilidad económica cuando la inversión que se lleva a cabo en su implementación, junto con los costos de funcionamiento es inferior a los beneficios que, a lo largo del tiempo, esperamos obtener por haberla realizado (Lara & Franco, 2017). Uno de los métodos de evaluación más ampliamente usado en proyectos ambientales y sociales es el análisis costo-beneficio (ANLA, 2018). Esta herramienta permite determinar si el SAAL que se desea implementar es viable para la comunidad, ya que desglosa cada uno de los costos requeridos para ponerlo en marcha y los relaciona con los posibles beneficios. Cuando esta relación es mayor a 1, se dice que la implementación de este

sistema dará valor agregado a la comunidad y merece la pena invertir en estos sistemas (Mwenge Kahinda et al., 2007).

El trabajo de investigación propuesto aborda el análisis económico de los SAAL, primero desde una perspectiva global, identificando a través de revisión bibliográfica las experiencias de implementación del análisis costo beneficio en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas a nivel mundial; luego se analizan económicamente tres alternativas de diseño, que surgieron del análisis de los sistemas presentes en la vereda y la necesidad de una mejora. Estas alternativas fueron diseñadas en el trabajo investigación de maestría en Ingeniería Civil liderada por Diana Prieto (Prieto, 2023).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar económicamente los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvia en vereda Garbanzal (Los Santos-Santander)

2.2 Objetivos específicos

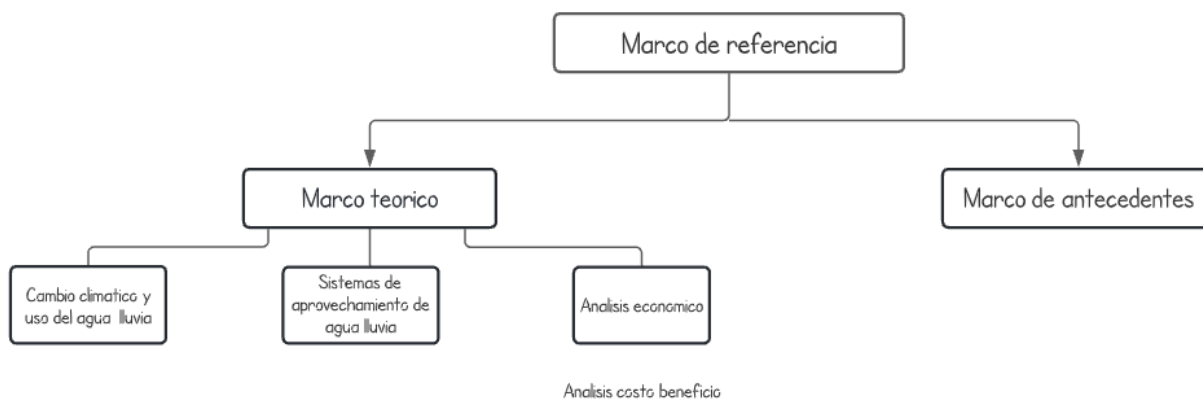
- A. Revisar literatura científica sobre experiencias de aplicación del análisis Costo Beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias.
- B. Caracterizar los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias existentes en la vereda Garbanzal (Los Santos-Santander)
- C. Analizar los costos del ciclo de vida de los sistemas
- D. Analizar los beneficios de los sistemas
- E. Entregar un artículo de carácter publicable

3. Marco de referencia

El siguiente marco de referencia pretende dar soporte teórico al planteamiento del problema a través del análisis de literatura y trabajos de investigación realizados en el pasado (Figura 1).

Figura 1

Estructura marco de referencia



3.1 Marco teórico.

El marco teórico aborda la problemática del cambio climático. Se analizan los SAAL como alternativa para garantizar agua en zonas de escasez en el contexto de los desafíos impuestos por el cambio climático. Por último, se explica la metodología con la cual se realizó el análisis económico a las alternativas de diseño en la vereda caso de estudio.

3.1.1 Cambio climático en América Latina

El cambio climático es un fenómeno global con un impacto cada vez más evidente en América Latina y el Caribe, donde se observan cambios en los patrones de precipitación, aumento acelerado de las temperaturas y modificaciones en la frecuencia y severidad de los fenómenos

meteorológicos (ONU, 2022). La sequía generalizada ha tenido un impacto significativo en la seguridad hídrica, tanto en las ciudades como en las regiones rurales. La escasez de fuentes hídricas cercanas ha llevado a la necesidad de buscar otras fuentes de agua más alejadas, lo cual además de mayores costos económicos, genera preocupaciones en términos de sostenibilidad ambiental. La seguridad alimentaria también se ha visto amenazada, esta región se caracteriza por depender en gran medida de la extracción de materias primas y la agricultura, sectores que contribuyen con el 5% del Producto Interno Bruto (PIB), el 23% de las exportaciones y emplean al 16% de la población ocupada. Estas sequías provocan una disminución en la vitalidad de las plantas, lo que las vuelve más susceptibles a enfermedades. Por otro lado, las inundaciones y las intensas lluvias favorecen el crecimiento de hongos patógenos en las hojas, la pérdida de fertilidad del suelo y la proliferación de organismos causantes de enfermedades (FIDA & UNICEF, 2018).

Los eventos climáticos extremos han tenido consecuencias devastadoras en América Latina y el Caribe, cobrando la vida de más de 312,000 personas en la región y afectando a más de 277 millones de personas entre 1998 y 2020. Estas cifras son alarmantes y reflejan la magnitud de los desafíos que enfrenta la región (ONU,2021).

3.1.1.1 Cambio climático en Colombia. Colombia se encuentra en una situación de vulnerabilidad frente al cambio climático, y los efectos visibles demuestran cómo el calentamiento global está causando estragos en el país. Uno de los impactos más evidentes es el derretimiento de los glaciares, con una pérdida del 68% de su área glaciar desde los años 50's (IDEAM, 2021). Además, se han observado otros efectos negativos como el blanqueamiento de corales, la pérdida de playas, la erosión costera y cambios severos en los patrones de lluvia, como lo ocurrido durante el fenómeno de El Niño 2015 - 2016. Estos eventos han provocado periodos de sequía y lluvias más prolongadas en diferentes regiones del país (IDEAM, 2021), lo que se traduce en desafíos

significativos para el país en términos de agricultura, recursos hídricos y sostenibilidad ambiental (Amos et al., 2018).

3.1.2 Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) como alternativa para el suministro de agua en condiciones de cambio climático

Los SAAL son una estrategia efectiva para aprovechar el recurso hídrico de la lluvia y reducir la dependencia de fuentes convencionales de agua. Estos sistemas proporcionan una cantidad de agua adicional para uso doméstico, agrícola o industrial, lo que se traduce en una mayor disponibilidad en tiempos de escasez (Ngigi, 2005).

En términos generales, un SAAL consta de tres componentes principales. En primer lugar, está el área de recogida, que implica el uso de superficies como techos, cubiertas de plástico en invernaderos o zanjas colectivas para captar el agua de lluvia. Luego, se encuentra la parte de almacenamiento, que implica el uso de tanques de plástico, cemento o espacios al aire libre, como jagüeyes, para almacenar el agua recolectada. Por último, está la parte de utilización, que se compone de tuberías de distribución, bombas e instalaciones de riego para permitir el uso del agua almacenada (Sturm et al., 2009a). En el diseño del SAAL se busca determinar la capacidad de almacenamiento óptima, que permita garantizar la mayor cantidad de agua para los fines previstos (Abdulla, 2020a; Malik et al., 2014b).

Las oportunidades y limitaciones relacionadas con la adopción de los SAAL se pueden analizar mediante la evaluación de los riesgos hidrológicos, la evaluación técnica-social y la evaluación económica (Ngigi, 2005b). Esta última es clave para determinar la contribución que estos sistemas ofrecen al usuario y al desarrollo en general de la sociedad; el usuario debe ver un beneficio claro en la adquisición y uso del sistema. Estas consideraciones suelen estar relacionadas con la comodidad, el coste, y con las ventajas estacionales percibidas (Sturm et al., 2009b); si los

nuevos sistemas no fueran más atractivos desde el punto de vista económico que los sistemas tradicionales, los agricultores los rechazarían y seguirían utilizando las fuentes de agua convencionales (Liang & van Dijk, 2011). Analizar la viabilidad de las diferentes alternativas permite que los responsables de la toma de decisiones, con diferentes puntos de vista, puedan orientarse hacia la mejor elección (Dallman et al., 2021).

3.1.3 Análisis económico

El análisis económico de una inversión social es un enfoque que busca evaluar los beneficios y costos de proyectos o programas que tienen un impacto social positivo. A diferencia de las inversiones puramente comerciales que buscan maximizar el beneficio financiero, las inversiones sociales tienen como objetivo principal generar un impacto positivo en la comunidad, mejorar la calidad de vida de las personas o abordar problemas sociales específicos. Se aplican diferentes técnicas de valoración para determinar si los beneficios económicos generados por la inversión superan los costos en un horizonte de tiempo específico (Morales-Pinzón et al., 2015).

3.1.4 Metodología de análisis costo-beneficio

El análisis costo-beneficio (ACB) es una herramienta ampliamente usada para evaluar proyectos de inversión, analizando de forma exhaustiva los costos y beneficios de un proyecto (programa, intervención o medida de política), para determinar si el proyecto es deseable desde el punto de vista del bienestar social y, si lo es, en qué medida (Lara & Franco, 2017).

El ACB consiste en valorar si, en un momento específico en el tiempo, el beneficio de una alternativa es mayor que los costos de la misma. Esto permite pronosticar cual decisión es la más apropiada en términos económicos en un proyecto. Será rentable siempre y cuando la relación sea

mayor a 1. Se considera que, si el proyecto genera riqueza con seguridad traerá consigo un beneficio social (Gines de Rus, 2020).

El ACB tiene aplicación práctica cuando los costos y beneficios de un proyecto son cuantificables, y se pueden expresar en unidades de medición estándar (usualmente monetarias). Esta técnica tiene dificultades debido a que muchas veces es difícil cuantificar monetariamente de forma efectiva los beneficios de un proyecto (Lara & Franco, 2017).

3.2 Marco de antecedentes.

En Colombia, muchos de los estudios académicos relacionados con los SAAL están orientados a la creación de propuestas de implementación de estos sistemas en diferentes contextos, principalmente en entornos urbanos (ej. universidades, zonas residenciales, empresas entre otras). La mayoría de estos estudios tratan de abordar la problemática desde los tres aspectos fundamentales: lo social-ambiental, económico y técnico, pero se evidencia un especial énfasis en este último.

Los trabajos analizados demuestran preocupación por los efectos del cambio climático, destacan los avances logrados en Colombia en el uso de los SAAL y reportan los costos y beneficios más considerados. Destacan la importancia de llevar a cabo un análisis exhaustivo e integral de las características específicas de cada región antes de implementar estos sistemas. Reconocen el valor que tiene la herramienta costo-beneficio y otros indicadores económicos en la evaluación económica de los sistemas.

En el caso de Gómez & Molina (2016) realizaron un análisis de la factibilidad financiera y beneficios ambientales de implementar un SAAL. El estudio buscaba determinar si esta implementación generaría ahorros en el consumo de agua potable y cuánto tiempo tardaría en

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

recuperarse la inversión inicial. Se evaluaron económicamente seis configuraciones diferentes, donde se utilizaron indicadores financieros como el VAN, TIR y ACB. Para determinar los costos se realizó un análisis de precios unitarios de los materiales, herramientas, recurso humano, operación y mantenimiento de los sistemas. Los beneficios correspondieron al ahorro de agua y alcantarillo que se deja de pagar a la empresa prestadora. Se realizaron cálculos considerando la tasa de inflación de 7.93% y la tasa de descuento de 8,53 Efectivo Anual (EA). Los resultados del ACB a 50 años mostraron que algunas alternativas eran económicamente viables.

El trabajo de Estupiñan y Zapata, (2010) desarrollado en la universidad Javeriana, sede Bogotá, comienza con una revisión de las tendencias en el uso de aguas lluvias y luego se centra en el análisis de la hidrología local y la relación entre oferta y demanda de agua. Gran parte del documento se dedica al análisis de parámetros hidráulicos para el diseño de las redes y requerimientos técnicos para la implementación de estos sistemas. Por último, se concentran en el análisis financiero en donde se explica cómo calcular el VAN, la TIR, Periodo de Recuperación de la inversión y el ACB. Finalmente se concluye que el agua lluvia puede suplir aproximadamente una demanda del 14 % del consumo total en el campus, generando un ahorro promedio anual estimado en \$ 24.174.754 pesos colombianos (12723 USD), beneficiando alrededor de 30 mil personas que diariamente visitan esta universidad, Sin embargo, se destaca que se requiere una inversión significativa y un cambio en el modelo cultural del uso del agua para lograr estos beneficios.

Estudios como el de Rivera y Zaraza (2016) evaluaron la viabilidad financiera de implementar sistemas de aprovechamiento de agua lluvia y aguas grises en zonas residenciales para usos no potables. Se consideraron aspectos sociales y técnicos relacionados con la aceptabilidad del sistema. El estudio se centró en un hogar típico de alto consumo de agua en

Bucaramanga y se evaluaron indicadores como el VAN y el período de retorno para analizar diferentes alternativas. Los resultados financieros se estimaron considerando ingresos, gastos e inversión inicial. Los ingresos incluyeron el ahorro en los servicios de agua potable y alcantarillado, mientras que en los gastos se tuvieron en cuenta el mantenimiento, la depreciación y los costos energéticos. Los precios unitarios se obtuvieron de ConstruData y los costos de mantenimiento relacionados con la mano de obra se estimaron a partir del salario de un técnico cualificado. El flujo de efectivo se proyectó para 50 años siguiendo recomendaciones para la evaluación del ciclo de vida de proyectos ambientales. Se consideró una inflación media del 4,05% y una tasa de descuento anual efectiva del 6,05% para los primeros 23 años, incluyendo la inflación y una sobretasa del 2% para financiar el embalse actual. Los resultados mostraron que la ejecución del proyecto generaba un flujo de efectivo neto positivo a partir del año 23. Para los 50 años de funcionamiento del proyecto, se determinó una TIR del 6,5% y un VAN de 4,053 USD. En conclusión, la implementación de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia y aguas grises, bajo los parámetros de análisis del estudio fue económicamente viable.

Rincón y Mendoza (2016) identificaron las condiciones socioeconómicas y naturales que condicionan el diseño y la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias y grises en viviendas de interés social. En este estudio se realizó el diseño y se determinaron los costos de construcción, mantenimiento y operación, así como los beneficios económicos y ambientales en viviendas de interés social. En el análisis de la viabilidad económica se utilizaron indicadores como la TIR, el tiempo de retorno, el VAN y ACB. Se determinó el ahorro en el aprovechamiento del agua de lluvia y ahorro por reúso del agua, igualmente se hallaron los costos de implementación y gastos en mantenimiento. En el análisis de la viabilidad económica se proyectó el flujo de caja a 50 años y se utilizó una tasa de inflación de 4,16%, la tasa de descuento

elegida fue del 3,51% valor propuesto para proyectos ambientales en Colombia evaluados a mediano plazo. Se concluyó que en el análisis financiero para los sistemas de agua lluvia la TIR encontrada fue menor que la tasa de descuento, el VAN fue negativo y la relación costo beneficio menor a 1, se concluye que el sistema no es viable financieramente, lo que no implica que no sea viable económicamente, ya que habría que considerar otros beneficios secundarios.

La viabilidad de muchas de las propuestas analizadas en entornos urbanas se ven afectadas principalmente por las bajas tarifas de acueductos que aún se pagan y por los altos costos de implementación.

4. Metodología

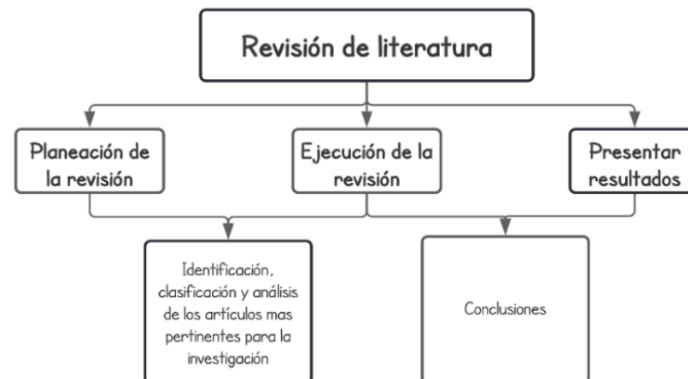
En esta sección se presentan los pasos necesarios para dar cumplimiento a los objetivos específicos de la investigación.

4.1 Revisión de literatura científica sobre experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias.

Para la revisión de literatura científica sobre experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias se siguió la metodología que se muestra en la Figura 2, adaptada a partir de los planteamientos de Arnau & Sala, (2020); Kitchenham, (2004).

Figura 2

Metodología de la revisión de literatura sobre Análisis Costo Beneficio de Sistemas de Aprovechamiento de Agua en la Vereda Garbanzal



Nota. Se muestra la metodología usada en la investigación. Adaptado de Arnau & Sala, (2020); Kitchenham, (2004).

A continuación, se describen las etapas desarrolladas en la investigación

4.1.1 Planificación de la revisión

Se realizaron lecturas preliminares para entender la problemática de estudio y la necesidad de realizar la investigación. Se acordaron reuniones periódicas con la directora de proyecto para mostrar avances y resolver dudas. Se realizó una capacitación acerca del uso de los diferentes recursos de investigación ofrecidos por la universidad, y otras herramientas para clasificar, ordenar y referenciar información. Se acordó el uso de artículos científicos, como la principal fuente de obtención de información válida.

4.1.2 Ejecución de la revisión

En esta fase se identificaron las palabras clave, se realizaron búsquedas en las bases de datos académicas, se filtraron los artículos relevantes, se realizó un análisis bibliométrico y se extrajo la información de interés de acuerdo con los objetivos de la investigación.

Las palabras claves se obtuvieron a través de la lectura preliminar de artículos científicos relacionados con la temática de investigación, y posteriormente la estructuración del marco de referencia. Las búsquedas se realizaron en la base de datos Scopus, donde se introdujeron diferentes ecuaciones creadas a partir de las palabras claves obtenidas y operadores booleanos (ver Tabla 2).

Tabla 2

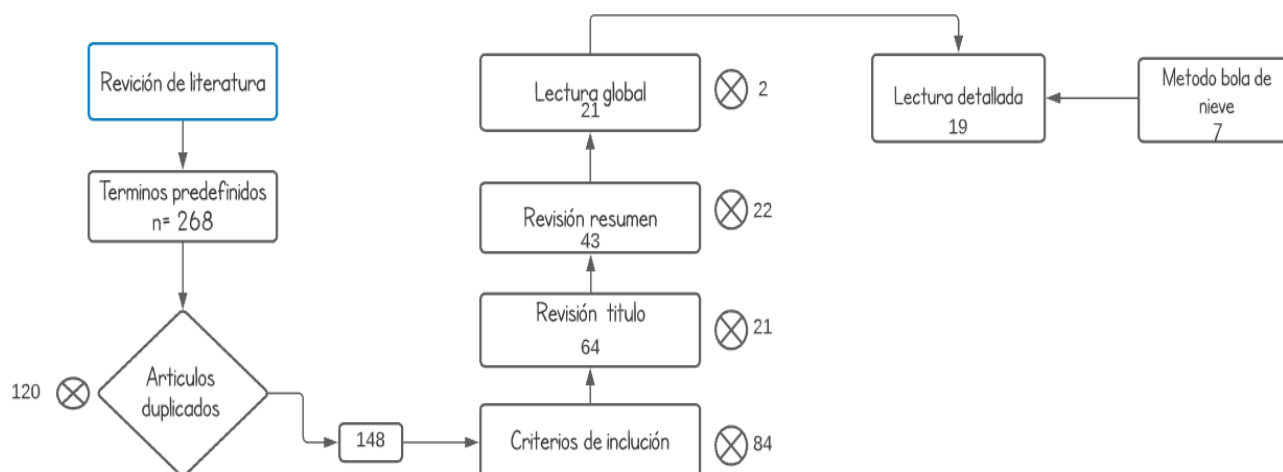
Palabras claves y ecuaciones de búsqueda seleccionadas

<i>Aprovechamiento de agua lluvia</i>	<i>Costo-beneficio</i>	<i>Análisis, evaluación, factibilidad, viabilidad, evaluación</i>	<i>Área rural</i>
<i>Rainwater harvesting</i>	Cost-benefit	Analysis, assessment, feasibility, viability, evaluation	Rural área
<i>“rainwater harvesting” AND cost-benefit AND analysis</i>	Ecuaciones de búsqueda “rainwater harvesting” AND cost-benefit AND analysis AND rural area	“rainwater harvesting” AND cost-benefit AND feasibility	“rainwater harvesting” AND cost-benefit AND viability OR assessment OR evaluation

Nota. Ecuaciones de búsqueda para la localización de los artículos relevantes en la investigación

El filtrado se realizó en diferentes etapas: i) eliminación de artículos duplicados a través de la herramienta de Mendeley; ii) selección de artículos relevantes a través de la inclusión de criterios de búsqueda y filtros; iii) lectura global de encabezados, eliminando en cada etapa los que menos aportaran a la investigación y iv) inclusión de algunos artículos por el método bola de nieve (ver

Figura 3).

Figura 3*Resumen selección de artículos en la revisión de literatura*

Nota. Metodología usada en la selección de artículos relevantes para la investigación

El análisis bibliométrico permitió, mediante análisis estadísticos, reconocer la actividad científica del campo de investigación, es decir, autores, revistas, citaciones, entre otros. El proceso se realizó para los artículos seleccionados y para los artículos arrojados por la ecuación de búsqueda (rainwater harvesting” AND cost-benefit AND analysis) con el fin de contrastar los dos procesos.

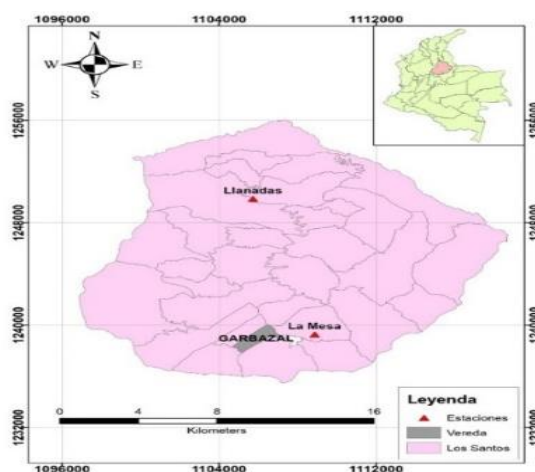
La extracción de información se logró mediante lectura detallada de cada uno de los artículos seleccionados. En un documento de Excel se clasificó la información, incluyendo la tabulación de datos relevantes para el estudio.

4.2 Descripción de la vereda caso de estudio

La vereda Garbanzal está ubicada en el municipio de Los Santos, en el departamento de Santander) (ver Figura 4). La vereda Garbanzal se caracteriza porque sus tierras son en su mayoría agrestes y rocosas, de erosión crítica, y con presencia de bosque seco subandino. La aridez de la zona genera limitaciones en el acceso al agua debido a la falta de precipitaciones continuas y de fuentes hídricas en abundancia (Florez, 2019). Por esta razón, en época seca la mayoría de las quebradas permanecen sin agua. Estas condiciones generan estrés hídrico en gran parte del año, a lo que se añade un déficit en la cobertura del servicio de acueducto, ya que este no llega a todos los hogares, o llega de manera intermitente (Florez, 2019; Planeacion, 2005). Para hacer frente a esta dificultad, los habitantes usan otras fuentes de suministro como aguas subterráneas y de lluvias. El agua de lluvia ha sido fundamental en el desarrollo de esta región ya que ha permitido diversificar actividades agropecuarias, y tener agua para sus actividades cotidianas (Briceño & Chaparro, 2022).

Figura 4

Localización geográfica vereda Garbanzal



Nota. Tomado de Briceño & Chaparro (2022)

La pertinencia de esta vereda para el presente estudio se debe a sus características geográficas, ya que es una región árida, con escasez de agua, donde las personas han recurrido a SAAL, lo que permite aprender sobre los sistemas instalados. Además, se contó con la voluntad de la comunidad para acompañar el proyecto y suministrar información.

4.2.1 Caracterización de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)

existentes en Garbanzal

Para caracterizar los SAAL de la vereda Garbanzal se recopiló información: sociodemográfica, condiciones de las viviendas, uso, demanda y medios de obtención del agua, componentes de los SAAL presentes, actividades productivas en las viviendas y la percepción de las personas sobre los SAAL. Esta información se obtuvo a partir de los resultados de una encuesta realizada en un trabajo de grado de pregrado de Ingeniería Civil (Briceño & Chaparro, 2022). La información meteorológica requerida se obtuvo del trabajo de maestría de Prieto (2023). Estos trabajos de grado fueron realizados en el marco del proyecto de investigación “Estudio Integral del Agua”, a cargo del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la UIS, y financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS.

Se realizaron visitas al área de estudio para conocer las características ambientales y sociales de la región, así como los SAAL presentes en la vereda y recopilar información necesaria para el ACB que no se hubiera obtenido en estudios previos. Para esto, se aplicaron otras dos encuestas donde se preguntó acerca de la disponibilidad y los costos que asume la comunidad a la hora de acceder a otras fuentes de abastecimiento de agua diferentes a los SAAL. Además, se indagó sobre algunas tareas productivas que se realizaban en la vereda, como la cría de gallinas y cultivo de maíz, para entender las prácticas, costos y beneficios asociados.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

Las encuestas se aplicaron a 29 de las 38 viviendas existentes, ya que en algunas ocasiones las viviendas se encontraban solas. La aplicación de las encuestas estuvo a cargo de estudiantes de Ingenierías civil e industrial que tenían diferentes objetivos investigativos pero que compartían la misma área de estudio. Las encuestas se aplicaron personalmente y la persona a cargo de la unidad familiar contestaba la encuesta. Las respuestas fueron tabuladas y organizadas para su posterior análisis estadístico. Se calcularon frecuencia y porcentajes de respuesta. Las preguntas abiertas fueron codificadas en categorías para reducir la variedad de respuestas. Los resultados se presentaron a través de gráficos y un análisis de las ideas más relevantes que sugieren las mismas.

La caracterización detallada de los SAAL en la vereda permitió indagar sobre el conocimiento local de las personas asociado a aspectos técnicos de los sistemas, los costos y los beneficios recibidos a través de su implementación, e identificar oportunidades para mejorar los sistemas existentes y brindar soluciones técnicas sostenibles y eficientes que contribuyan al bienestar de las familias.

4.3 Análisis de los costos del ciclo de vida de los sistemas

Según UPC (2017), el costo del ciclo de vida se calcula como la suma del coste de adquisición y del coste de propiedad de un producto a lo largo de su ciclo. El análisis del coste de la vida útil de los SAAL en el caso de estudio se realizó para tres alternativas de diseño, desarrolladas por el proyecto de maestría de Prieto (2023).

4.3.1 Alternativas de diseño

Estas opciones se construyeron a partir del análisis de la información recopilada en las encuestas y visitas al área de estudio donde se identificaron fortalezas y deficiencias en los sistemas existentes y se propusieron mejoras. En el diseño de las alternativas se incluyeron actividades

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

productivas de pequeña escala típicas en la zona, como la cría de gallinas y cultivo de maíz, considerando varios escenarios de uso del agua y sus beneficios.

La elección de los materiales para techos, tanques y componentes adicionales se basó en las observaciones realizadas en los sistemas existentes en la vereda, así como en las recomendaciones propuestas en la literatura para áreas rurales con escasez de agua. En el diseño del tanque, se tuvieron en cuenta variables como la precipitación promedio de la región, el tamaño del techo seleccionado y el coeficiente de escurrimiento. Para la distribución del agua dentro del hogar, se optó por el método por gravedad, ya que resulta más eficiente en términos energéticos. En cuanto a la técnica de purificación del agua, se seleccionó un filtro natural desarrollado siguiendo recomendaciones de la literatura.

La alternativa 1 fue diseñada para cubrir únicamente las necesidades domésticas de un hogar. Además de las necesidades domésticas, las alternativas 2 y 3 fueron planteadas para satisfacer necesidades de agua de actividades productivas de pequeña escala (Figura 5).

Figura 5

Demanda de agua en actividades domésticas y productivas en el día de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal



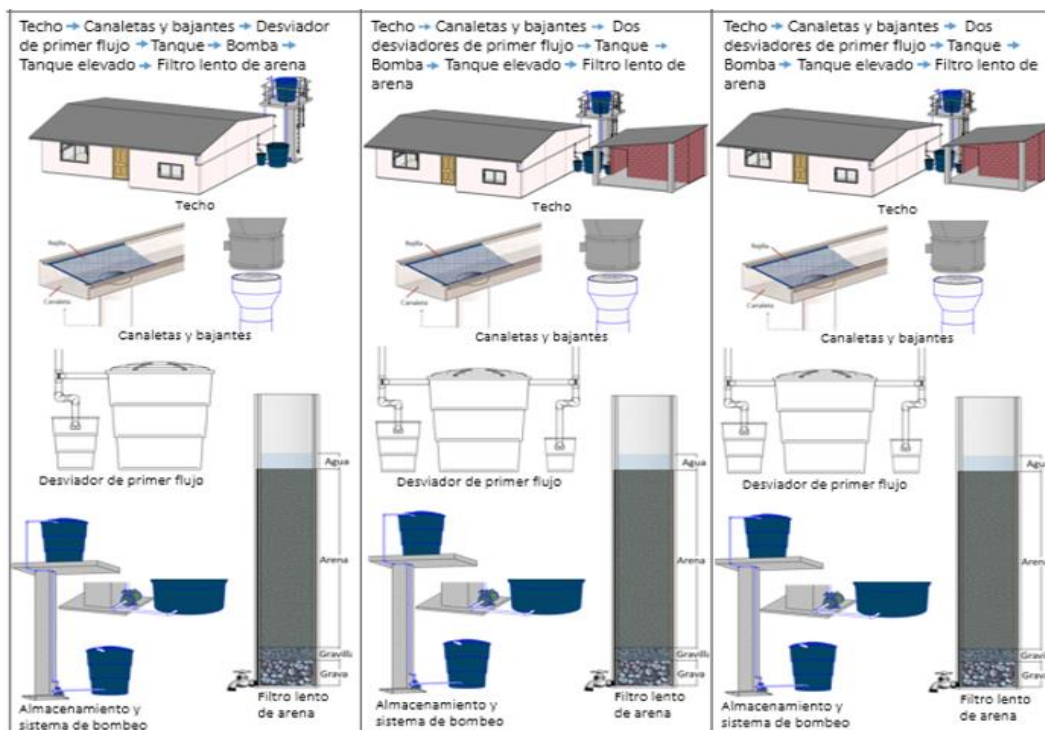
Nota. Actividad/hab-día se refiere al consumo de agua en litros de una persona en 1 día.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

La Figura 6 detalla los componentes utilizados en cada una de las tres alternativas

Figura 6

Componentes principales de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal.



Nota. Tomado de Prieto (2023)

La Tabla 3 presenta los datos de diseño más representativos para las tres alternativas

Tabla 3

Datos de diseño de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Coefficiente de pérdida	0.9	0.9	0.9
Área de captación (m ²)	100	125	125
Volumen de tanque (l)	2,000	2,000	2,000
Canaletas (m)	10	15	15
Tuberías y bajantes(m)	12.5	14.5	14.5
Bomba (unidad)	1	1	1
Filtro (unidad)	1	1	1

Nota. Datos de diseños en las tres alternativas. Tomado de Prieto (2023)

Más información sobre el diseño de las alternativas puede consultarse en Prieto (2023).

4.3.2 Análisis de los costos

A continuación, se describe el proceso para analizar cada uno de los costos considerados para las alternativas propuestas.

4.3.2.1 Costos de inversión inicial. Se analizaron los costos de inversión inicial como adecuación del lugar, materiales, construcción del sistema, métodos de purificación del agua, mecanismos de suministro, necesidades de mano de obra y maquinaria. Se cotizó cada uno de los componentes del sistema en almacenes de cadena de la región. Se excluyó el costo del tejado ya que se consideró el existente en las viviendas.

A partir de las medidas de diseño y el costo promedio por unidad, se calculó el costo total de los materiales. La mano de obra y maquinaria solo se tuvo en cuenta para las actividades que requerían de un experto como la construcción de la columna y base en el tanque elevado. Estos costos se calcularon según recomendaciones de (Gobernación de Boyacá, 2022). Se asumió que las actividades que no requerían mano de obra experta eran realizadas por los propietarios del sistema.

4.3.2.2. Costos de operación. Los costos de operación asociados al suministro y purificación del agua dentro de los hogares se calcularon acorde al requerimiento de energía para el funcionamiento de la bomba y el consumo de gas para la desinfección del agua. Para la bomba, el consumo de electricidad se calculó teniendo en cuenta las características técnicas y la tarifa por KWH proporcionada por la empresa prestadora del servicio, para un consumo promedio de 15 minutos al día. El consumo de gas fue el asociado a la desinfección de 20 litros de agua diarios y se calculó teniendo en cuenta el valor de la tarifa de la empresa prestadora de servicio de la región.

Se asumió que todas las actividades eran realizadas por los propietarios, por lo cual no se generaron costos de mano de obra por operación del sistema.

4.3.2.3. Costos de mantenimiento. Se estimó la compra de utensilios e insumos para la limpieza de cada uno de los componentes del SAAL. Además, se definió la periodicidad de reparación o cambio de los componentes, de acuerdo con su ciclo de vida.

4.3.2.4 Costo de las actividades productivas. A partir de la información obtenida de las encuestas en la zona, en relación con las prácticas locales, se identificó que la crianza de gallinas y el cultivo de maíz eran actividades comunes entre los pobladores. Por lo tanto, se analizaron los costos de alimentación, cuidado y vivienda para las gallinas. Se establecieron ciclos productivos de 6 meses para facilitar la comercialización de carne y huevos. Se tuvo en cuenta que, al comienzo del proceso, se adquieren pollitas de 2 meses con valor promedio de mercado de 15,000 pesos. El tipo de alimento y las cantidades suministradas se establecieron con base en las recomendaciones de la literatura. Se consideraron los costos de un gallinero, así como los costos de control de enfermedades (medicamentos) (Tellez,2011).

En cuanto al maíz, se decidió plantear un cultivo completamente orgánico, es decir, no se incluyeron costos asociados al control de plagas y enfermedades, ni gastos de adquisición de semillas, ya que es común que las familias dispongan de sus propias semillas o las obtengan de sus vecinos. Debido a la limitada extensión del terreno (105 m²), se asumió que los agricultores no requerirían mano de obra adicional ni maquinaria para llevar a cabo las labores agrícolas.

4.4 Análisis de los beneficios de los sistemas

El análisis de los beneficios consideró dos escenarios: i) sin un SAAL no sería posible llevar a cabo las actividades productivas seleccionadas en las alternativas debido a la escasa disponibilidad de agua en la zona suministrada por las otras fuentes existentes; y ii) sí sería posible

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

realizar las actividades utilizando otras fuentes de suministro de agua. Estos dos escenarios se analizaron para evaluar su influencia en el resultado del ACB. En el análisis de los beneficios se tuvieron en cuenta los costos evitados en la tarifa para consumo de agua doméstico de los sistemas centralizados existentes en la vereda (a partir de agua superficial y a partir de agua subterránea) y los beneficios procedentes de las actividades productivas, ya que estos son los más mencionados por la literatura, y los más fáciles de cuantificar (Amos et al., 2018).

En el primer escenario se consideraron todos los beneficios derivados de las actividades productivas además del valor ahorrado en el pago de tarifas por el uso de agua en actividades domésticas. En el segundo escenario, el beneficio analizado fue únicamente el costo evitado en las tarifas tanto para consumo doméstico como en las actividades productivas.

La metodología utilizada para calcular el beneficio del agua ahorrada fue la de costos evitados o inducidos, que analiza los bienes ambientales relacionados con bienes privados o con presencia en el mercado (UPC, 2017). Para esto, se determinó la tarifa por metro cúbico (m^3), la cual se construyó tomando como referencia los valores que las personas encuestadas pagan por las diferentes fuentes de agua a las que tienen acceso, información que se recopiló en una de las encuestas mencionadas anteriormente. Los beneficios de las actividades productivas se calcularon tomando como referencia lo encontrado en cartillas, documentos de literatura especializada e información contenida en las encuestas.

La cantidad de agua que el sistema puede aprovechar durante su ciclo de vida, dada sus características de diseño, se calculó con la proyección de la precipitación diaria. Se utilizó el promedio de las precipitaciones de los últimos 11 años, suministrado por la estación meteorológica de la Mesa de los Santos.

4.5 Determinación de la relación costo-beneficio de los sistemas

A continuación, se describen la elección de parámetros importantes en la construcción de la relación costo-beneficio

4.5.1 Tasa de descuento, inflación y período de vida del proyecto

La tasa de inflación se usó para proyectar los flujos de caja de los beneficios y costos de operación, mantenimiento y de actividades productivas. Esta tasa se definió a partir de datos históricos mensuales de inflación (1993 – mayo 2023) y se usó el método de media móvil, el cual consistió en tomar el promedio de la inflación anual de los últimos 8 años, además de considerar el valor actual de la inflación y las expectativas proporcionadas por los bancos para el cierre del presente año y el próximo. La vida del proyecto se definió tomando como referencia la literatura en el área y recomendaciones de la normatividad. La tasa de descuento se seleccionó a partir de recomendaciones de literatura, expertos y la normatividad vigente en proyectos ambientales.

A los datos históricos de la inflación de los últimos 30 años se les realizó una prueba de ajuste de distribución de probabilidad utilizando el software MINITAB, para identificar cual describía mejor el comportamiento de los datos, y así definir el rango de sensibilidad de la tasa de inflación con un determinado intervalo de confianza.

Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables de inflación y la tasa de descuento donde se evidenció el comportamiento de la relación costo-beneficio ante la variación de estas tasas.

4.5.2 Fuentes de financiación de la inversión

Para enriquecer el análisis se evaluaron tres escenarios de financiación del sistema:

- A. Capital propio: El propietario invierte un capital ahorrado.

- B. Crédito: El propietario accede a un crédito a una tasa de 15.65% Efectivo Anual, a un plazo de 3 años.
- C. Subsidio por un ente de gobierno: El estado subsidia el costo total de inversión inicial.

4.5.3 Relación costo-beneficio

Con los costos y beneficios cuantificados se determinó la relación costo-beneficio. Para esto se comparó el Valor Presente de los beneficios proyectados con el Valor Presente de los costos, incluyendo la inversión (Morales-Pinzón et al., 2015). Los valores presentes se calcularon multiplicando los flujos de efectivo (FC) por la tasa de descuento, que es una función de la tasa de interés (i) y el año en que se produjo el flujo de caja (t), como se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$VP \text{ costos} = \sum_{t=0}^T \left(\frac{\text{Costos}}{(1+i)^t} \right)$$

Ecuación 1 Valor presente de los costos

Nota. Adaptado de Morales-Pinzón et al (2015)

$$VP \text{ beneficios} = \sum_{t=0}^T \left(\frac{\text{Beneficios}}{(1+i)^t} \right)$$

Ecuación 2 Valor presente de los beneficios

Nota. Adaptado de Morales-Pinzón et al (2015)

La relación costo beneficio es la sumatoria de todos los beneficios descontados a lo largo del periodo de tiempo propuesto sobre la sumatoria de todos los costos descontados (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

$$RCB = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

Ecuación 3 Relación costo beneficio

Nota. Adaptado de (Morales-Pinzón et al., 2015)

5. Resultados y discusión

A continuación, se describen los resultados obtenidos en el proceso de selección de la información y análisis estadístico, además se expone las experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias. Se muestran los resultados del análisis de los costos, beneficios de cada alternativa bajo los dos escenarios expuestos. Por último, se muestra la viabilidad de cada alternativa a través de la relación costo beneficio y otros indicadores económicos.

5.1 Análisis Bibliométrico de los estudios sobre experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en proyectos de aprovechamiento de aguas lluvias.

De los 26 artículos seleccionados, el 100% expone lo que es un sistema de captación de agua lluvia, sus características y funcionamiento. El 81% de estos artículos se centran en estudios realizados en áreas rurales, principalmente en regiones de África. En todos los lugares de estudio se observa una gran dificultad para acceder a fuentes de agua, especialmente debido a la ubicación predominante en zonas semiáridas y áridas. Esta falta de acceso a agua suele estar asociada a desafíos en el desarrollo socioeconómico de las comunidades. En el 96% de los artículos revisados, se lleva a cabo un análisis económico de los sistemas de captación de agua lluvia. Si bien algunos estudios profundizan más que otros, todos reconocen la importancia de cuantificar los costos del ciclo de vida de los sistemas, los beneficios, el período de recuperación de la inversión, el VAN y el coeficiente de la relación costo/beneficio. Estos indicadores económicos son considerados fundamentales para evaluar la viabilidad y eficacia de los sistemas de captación de agua lluvia en diferentes contextos.

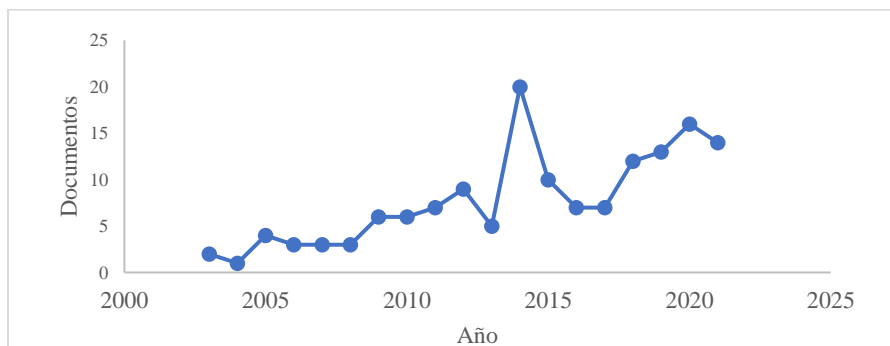
5.1.1 Artículos publicados por año.

Al analizar el número de publicaciones relacionadas con el análisis económico en los SAAL en el período de 2003 a 2021, se observa un creciente interés en la búsqueda de nuevas fuentes de suministro de agua. Este aumento en el interés se puede atribuir al incremento exponencial de la población, la contaminación de las fuentes de agua superficiales y los desafíos derivados del cambio climático, que amenazan la disponibilidad de agua (Durodola et al., 2020). Entre los años 2003 y 2008, se registraba una cantidad relativamente estable de publicaciones, oscilando entre 2 y 3 documentos por año. Sin embargo, a partir de ese periodo, se observa un cambio gradual en el comportamiento, con un aumento significativo en los siguientes cuatro años, triplicando el número de publicaciones. El punto álgido se alcanza en los años 2013 y 2014, con el mayor número de publicaciones en el período analizado. Aunque en los tres años siguientes se registra una disminución en el número de publicaciones, se observa nuevamente un incremento proporcional en los años posteriores.

La Figura 7 muestra los artículos publicados por año con la ecuación de búsqueda (*rainwater harvesting* AND *cost-benefit* AND *analysis*), 141 artículos.

Figura 7

Artículos publicados por año, para la ecuación de búsqueda (rainwater harvesting AND cost-benefit AND analysis) 141 artículos

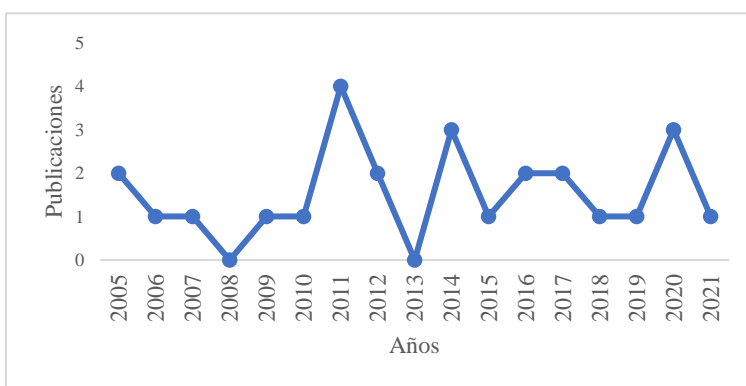


Nota. Tomado de herramienta Scopus

La Figura 8 muestra la evolución, en el período de tiempo (2005-2021), de la publicación de artículos que específicamente abordan el análisis costo beneficio de los sistemas de captación de agua lluvia en un contexto rural. Se encontraron en promedio de 1 a 2 artículos por año (2010-2021)

Figura 8

Artículos publicados por año, para los 26 artículos seleccionados, para los años 2005 a 2021



Nota. Año de publicación de cada uno de los artículos seleccionados.

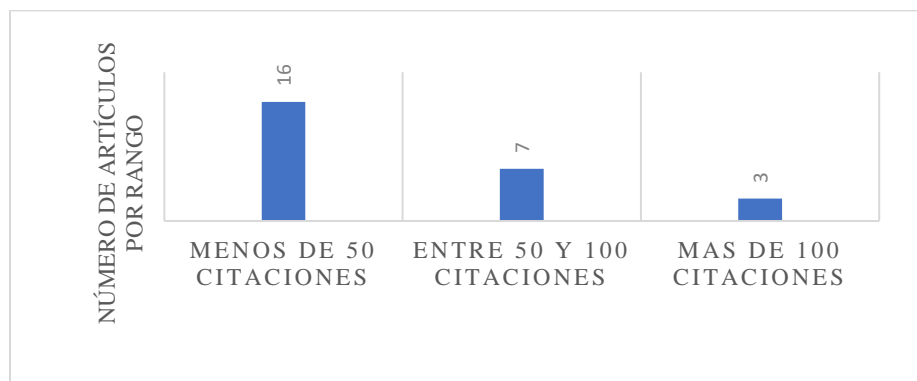
5.1.2 Citaciones

De los 26 artículos seleccionados para esta investigación, se encontró que 16 de ellos tienen menos de 50 citaciones. Cinco de estos artículos han sido publicados recientemente y cuentan con solo 10 citaciones, lo cual es comprensible debido a su corto tiempo desde la publicación. Por otro lado, los restantes artículos han superado las 100 citaciones, lo que demuestra su calidad y originalidad en el campo de estudio. Destaca el artículo titulado "Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa", realizado en Kenia, el cual es el más citado con un total de 154 citas. Otros documentos ampliamente citados han sido desarrollados en Australia, como "Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits" con 138 citas, y en Canadá, como "Assessing the potential for rainwater harvesting" con 135 citas.

Estas cifras reflejan el impacto y la relevancia de estos estudios en la comunidad científica. La Figura 9 muestra la distribución del número de citaciones de los artículos en los rangos propuestos.

Figura 9

Número de citaciones en los 26 artículos seleccionados, para los años 2005 a 2021



Nota. Se muestra la relevancia de las publicaciones seleccionadas a través del número de citaciones que tiene cada artículo

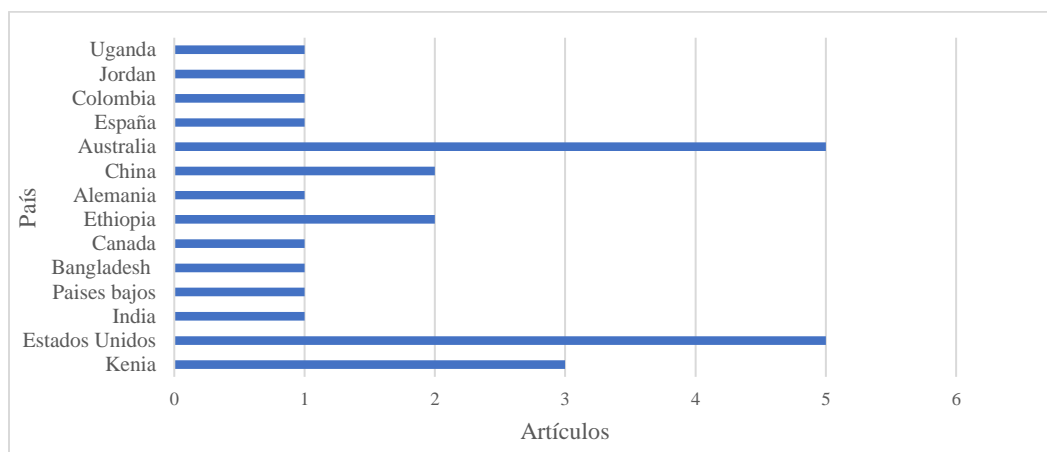
5.1.3 Producción científica por país

Estados Unidos y Australia se destacan como los países con mayor contribución de artículos dentro del grupo de los 26 seleccionados para esta investigación. Sin embargo, los artículos provenientes de países africanos brindaron una gran cantidad de información en el análisis económico de los SAAL en contextos rurales. Esto resulta especialmente relevante, ya que permite comprender los desafíos y problemas que se enfrentan en áreas rurales, así como la necesidad de fomentar el uso de métodos no convencionales de captación de agua para impulsar el desarrollo de estas regiones.

La Figura 10 presenta el número de artículos publicados por cada país dentro de los artículos seleccionados en esta investigación, lo cual proporciona una visión clara de la contribución de cada país en el tema de estudio.

Figura 10

Producción científica por país en los 26 artículos seleccionados, para los años 2005 a 2021



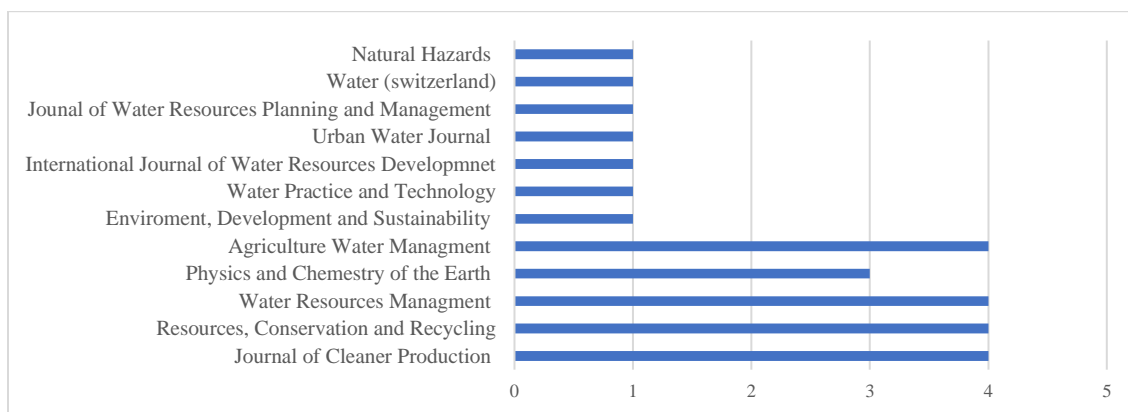
Nota. Indica los países que han realizado más aportes a esta área de investigación

5.1.4 Publicaciones por revista

La Figura 11 presenta las revistas en las que se publicaron los 26 artículos seleccionados en el área de investigación. Por otro lado, la Figura 12 muestra el cumplimiento de la Ley de Bradford o Ley de dispersión (Bradford, 1984), que revela una distribución desigual de los artículos en las revistas, donde la mayoría de ellos se concentran en un grupo reducido de revistas. De hecho, se observa que solo 4 revistas contienen el 61% de los 26 artículos seleccionados para la investigación. Además, una revista aporta tres artículos en la zona intermedia, mientras que siete revistas aportan siete artículos en la zona externa. Es importante destacar que las revistas que más contribuyen y se encuentran en el núcleo son *Agriculture Water Management*, *Water Resource Management*, *Resources Conservation and Recycling*.

Figura 11

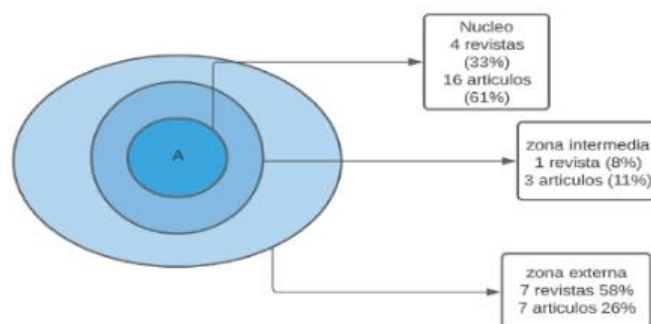
Publicaciones por revista para los 26 artículos seleccionados



Nota. Se presentan las revistas donde más se han publicado estos artículos

Figura 12

Dispersión de los artículos (Ley de Bradford)



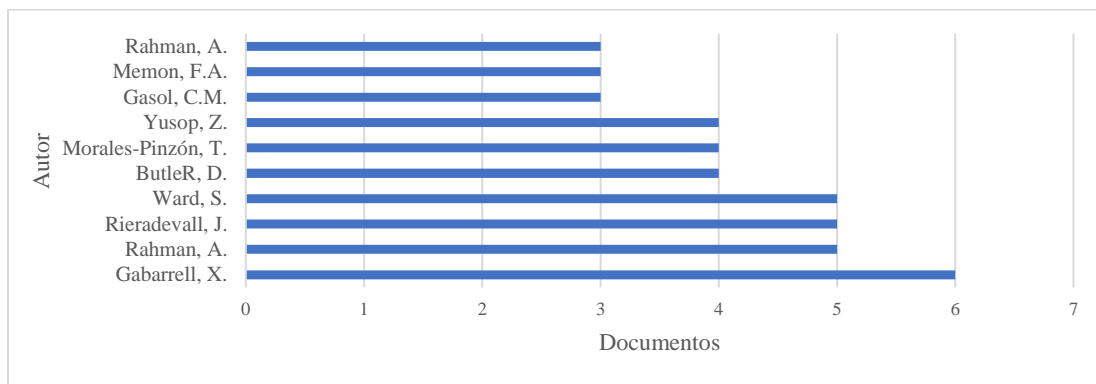
Nota. Se muestra la dispersión de los artículos seleccionados

5.1.5 Publicaciones por autor

La Figura 13 presenta los 10 autores que han realizado mayores contribuciones en el análisis económico aplicado a los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, donde se destacan Gabarrell X, Rahman A, Rieradevall J y Ward S. Para los artículos 26 seleccionados en la investigación, se identifica que ninguno de estos tiene autores en común, y esto posiblemente debido a la diferencia temporal entre publicaciones, y la dispersión geográfica de estos.

Figura 13

Publicaciones por autor, para la ecuación de búsqueda (rainwater harvesting” AND cost-benefit AND análisis) 141 artículos.



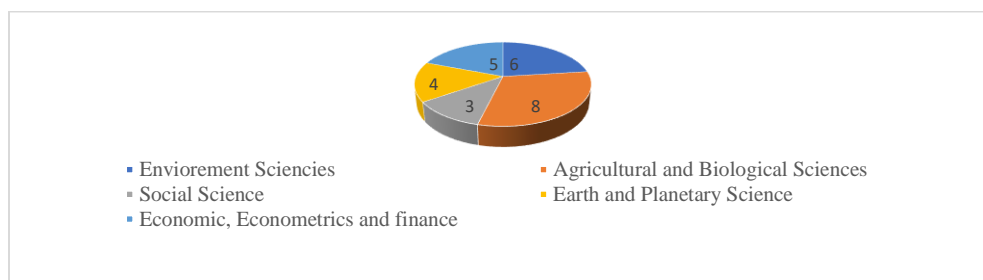
Nota. Tomado de Herramienta de Scopus

5.1.6 Publicaciones por área

Las áreas más representativas en la investigación para los 26 artículos seleccionados fueron Agricultura y Ciencias Biológicas (30% de los artículos seleccionados); Ciencia del medio ambiente (23%), área de Economía, Econometría y Finanzas (19%); Ciencias de la tierra con un 15% y por último Ciencias Sociales con un 11%. La Figura 14 muestra las áreas donde más se encontraron los artículos.

Figura 14

Áreas donde se encuentran los artículos para los 26 artículos seleccionados



Nota. Se muestran las áreas donde se encontró más artículos representativos

5.2 Experiencias de aplicación del análisis costo-beneficio en Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)

Esta sección está estructurada en cuatro partes: i) se examina la relevancia de la adopción de SAAL bajo el panorama del calentamiento global; ii) se destaca la importancia del análisis económico en el diseño e implementación de estos sistemas, especialmente en áreas rurales; y iii) se describen los conceptos claves del análisis costo-beneficio aplicados a los SAAL y se presentan algunas conclusiones relevantes obtenidas a partir de la investigación

5.2.1 Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia como medida de adaptación al cambio climático

Los recursos hídricos son vitales para el funcionamiento de cualquier economía, estos continúan agotándose y degradándose a un ritmo que es insostenible (Khastagir & Jayasuriya, 2011). La preocupación de la seguridad hídrica y alimentaria, así como la seguridad energética en relación con el crecimiento económico, ha aumentado a nivel mundial. La conexión agua-energía-alimentos, en una sociedad en continuo crecimiento, apunta a la búsqueda de nuevas prácticas de gestión de recursos que permitan dar continuidad a las actividades a la vez siendo más responsables con el medio ambiente (Sturm et al., 2009a).

El agua ha sido uno de los recursos más afectados como resultado del crecimiento demográfico, la rápida urbanización, la contaminación continua y el cambio climático (S. N. Ngigi et al., 2005). El valor del agua a menudo se ha pasado por alto en las decisiones de desarrollo. Por lo tanto, es necesario implementar políticas sociales y económicas eficientes que eviten la degradación y el agotamiento excesivo. Reconocer el valor y el aporte del agua al desarrollo de la sociedad será importante en los procesos de toma de decisiones de entidades públicas y privadas (Amos et al., 2018).

Ante la alarmante escasez de agua en algunos países, la mirada está ahora en la búsqueda de nuevas fuentes de aprovisionamiento de agua. Así, los sistemas descentralizados de gestión de agua de lluvia podrían implementarse para cubrir el déficit, siendo el uso de agua de lluvia una de las tecnologías más prometedoras (Alim et al., 2020). La atención pública se dirige cada vez más hacia el valor potencial del agua lluvia como estrategia para el suministro de agua tanto en áreas urbanas como rurales y, dado que estos sistemas se han adoptado en varias regiones del mundo, las experiencias de implementación existentes enriquecen el desarrollo de futuros sistemas (Rahman et al., 2012).

5.2.2 Motivación para implementar un Sistema de Abastecimiento de Aguas Lluvias (SAAL)

Los SAAL se han adoptado tanto en regiones urbanas como en periurbanas y rurales; su aceptación en ciudades va en auge, ya que permiten reducir el consumo de agua potable en actividades diarias que no requieren de agua en óptimas condiciones como lo son el uso en baños, lavado, riego de jardines, entre otras. Por ejemplo, Australia, un país desarrollado que ha sufrido los estragos de sequías fuertes en algunas regiones, ha implementado los SAAL en áreas urbanas y periurbanas logrando buenos resultados como lo muestran varias investigaciones (Alim et al., 2020; Amos et al., 2016, 2018; Hajani & Rahman, 2014). En Estados Unidos, Kim et al (2016) en su estudio económico en la ciudad de Austin (Texas) concluyeron que el uso de agua de lluvia genera ahorros significativos en la factura del agua, además de reducir la demanda en los días pico para la planta de tratamiento. Otros beneficios de los sistemas identificados por estos autores fueron la reducción del riesgo de inundación y el ahorro de costos al mejorar el sistema de drenaje.

En las zonas periurbanas y rurales, la adopción de SAAL se presenta porque a menudo la lluvia representa la única agua disponible (Moges et al., 2011). Muchas comunidades dependen de un SAAL para satisfacer todas las necesidades de agua de su hogar. Aquí, la confiabilidad de un

SAAL es muy importante ya que el acceso a otras fuentes para complementar el suministro es limitado (Sturm et al., 2009a). Más aún, en zonas rurales de regiones semiáridas, los campesinos enfrentan el desafío de aumentar la productividad agrícola y pecuaria para mejorar sus condiciones de vida. Durodola et al (2020), en Nigeria, recomendaron la recolección de agua de lluvia como medida de adaptación al cambio climático y método para obtener agua suficiente para la agricultura. Zingiro et al (2014), en zonas rurales de Ruanda, afirman que los principales factores que impulsan la adopción de tanques de recolección de agua de lluvia son el tamaño del hogar, la membresía a una organización de agricultores, los ingresos agrícolas, la dotación de materiales o subsidios por parte del gobierno y el acceso a créditos con tasas diferenciadas.

5.2.3 Evaluación económica de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)

La adopción de los SAAL requiere de varios análisis previos que contribuyan a una implementación exitosa. En las zonas rurales, entender los objetivos, necesidades y disponibilidad de recursos de los campesinos facilita la construcción del diseño más adecuado. Por ejemplo, un SAAL innecesariamente grande es un mal uso de los recursos y espacio, por otro lado, uno que es demasiado pequeño no puede cumplir con los propósitos previstos y es probable que haya escasez de agua de manera regular (Hajani & Rahman, 2014). Los estudios técnicos son fundamentales para la construcción de sistemas robustos que permitan tener una mayor confiabilidad de este recurso en los momentos que más se necesita. Conocer las características topográficas de la región y el comportamiento de las precipitaciones, suele ser el primer paso para luego empezar a diseñar alternativas que se ajusten a las necesidades del adoptante (Alim et al., 2020; Rahman et al., 2012; Zingiro et al., 2014).

Si bien, a nivel mundial, se han estudiado los SAAL en áreas urbanas y rurales, desarrollando especialmente herramientas para el análisis técnico, dando lugar a un importante

cuerpo de investigación en el pasado reciente, el análisis económico ha tenido presencia limitada en la literatura científica a pesar de que las decisiones de índole técnica están estrechamente ligadas a los aspectos económicos.

Los estudios que han abordado el análisis económico de los SAAL tanto en áreas rurales como urbanas han utilizado indicadores como (VAN), retorno de la inversión (ROI), (ACB) y período de recuperación (PR) (Morales-Pinzón et al (2012), (TIR) (Mwenge Kahinda et al (2007)). En particular, el (ACB), es una herramienta para la toma de decisiones ampliamente aceptada y de uso frecuente (Hajani & Rahman, 2014), que mide, en términos monetarios, los costos y beneficios privados y sociales de un proyecto para la comunidad o la economía, y en consecuencia determina si se está generando valor (Gines de Rus, 2020). No obstante, la aplicación del ACB al estudio de los SAAL no es generalizada y, por tanto, las implicaciones financieras y económicas del uso de estos sistemas se discuten menos (Jing et al., 2017a) o ignoran todos los beneficios que puede ofrecer un SAAL (Amos et al (2018)). Por otro lado, la cantidad limitada de estudios que se centran en los aspectos económicos a menudo ha arrojado resultados contradictorios (Zingiro et al., 2014). Dallman et al (2017) afirma que el ACB debe considerar una amplia gama de temas que en muchas investigaciones no se abordan, como beneficios ambientales, el costo de los suministros de agua alternativos, opciones de ahorro de agua, el costo de capacitar a las personas, productividad de su uso y tareas de mantenimiento, entre otros.

5.2.4 Desafíos para la evaluación económica de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)

Varios estudios (Dallman et al., 2016a; Jing et al., 2017b; Rahman et al., 2012) han concluido que los SAAL no son económicamente viables. Estas conclusiones son resultado de las suposiciones financieras y parámetros con los que se modelan los estudios. Por ejemplo, los

resultados pueden variar en función del tipo y tamaño del tanque de almacenamiento seleccionado, de la existencia de otras fuentes de agua y del precio que se paga por el acceso a ellas (Amos et al., 2016). Hajani & Rahman (2014) en su análisis del costo del ciclo de vida de los SAAL en Australia, encontró que en tres de las diez ubicaciones analizadas los valores de la relación costo-beneficio variaron según el tamaño del tanque, la ubicación y el uso del agua. Amos et al (2018) afirman que, si las aguas subterráneas no se cobran, y los precios del agua no se incrementan cada año, los SAAL no son viables desde el punto de vista financiero. Morales-Pinzón et al., (2012) concluyeron que, los SAAL no son rentables en la mayoría de los casos en zonas urbanas en España debido a las bajas tarifas del agua. Otras variables que pueden afectar la viabilidad son la no inclusión de algunos beneficios indirectos, las suposiciones sobre las tasas de descuento y las expectativas de vida del sistema ya que, estas pueden depender de suposiciones arbitrarias que pueden influir significativamente en los estudios (Mwenge Kahinda et al., 2007). Además, las comparaciones de los sistemas entre diferentes épocas y diferentes países son difíciles de examinar debido a la influencia combinada de la inflación, los tipos de cambio, los materiales locales y las variaciones del poder adquisitivo (Malik et al., 2014a).

5.2.5 Alternativas para superar las limitaciones del análisis económico de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)

Usualmente los investigadores realizan análisis de sensibilidad a cada una de las variables de diseño de los SAAL, por ejemplo, varían el tamaño de los tanques, el área de captación, la tubería de suministro, el tipo de bombeo, entre otras, todo esto para identificar diferentes opciones que, al ser comparadas a través del análisis económico, ofrecen diferentes relaciones costo-beneficio que ayudan a responder a la pregunta de cuál SAAL es económicamente más viable dadas las condiciones geográficas y sociales en las que se encuentren. Por ejemplo, Amos et al

(2016) examinaron el potencial de ahorro de agua, la confiabilidad del suministro de agua, los beneficios financieros y la idoneidad de los subsidios gubernamentales existentes para un SAAL en una vivienda unifamiliar en diez ubicaciones diferentes en Greater Sydney, Australia. Durodola et al (2020) en su estudio en Mbale, Uganda investigaron las capacidades de rendimiento, los costos y la seguridad del agua de los sistemas individuales utilizando un modelo de rendimiento anual medio de los sistemas de captación de tejados modificados, basado en procedimientos de balance hídrico diario.

Algunos investigadores han desarrollado modelos y programas informáticos especializados para analizar alternativas de abastecimiento de agua lluvia para usos urbanos y rurales. Estos modelos cuentan con diferentes niveles de detalle y están enfocados al dimensionamiento de tanques, abastecimiento y captación de agua de lluvia (utilizando registros históricos) y demanda de agua. La decisión de implementar un SAAL generalmente se basa en los resultados de análisis financieros y económicos, esto ocurre por la falta de herramientas que puedan evaluar estos sistemas según criterios ambientales y sociales de manera integrada. Por esto Morales-Pinzón et al (2015) en su investigación desarrollaron un programa de software denominado Plugrisost (acrónimo de pluviales, grises y grises). Este programa contribuye a una evaluación más completa de los SAAL, brindando información sobre aspectos técnicos, económicos y ambientales. Además, ofrece herramientas adicionales para la toma de decisiones y la planificación urbana en sistemas que incorporan el agua de lluvia como recurso.

Amos et al, (2018) desarrollaron un modelo detallado llamado ERain, que combina el análisis financiero con el análisis de rendimiento utilizando datos de precipitaciones diarias e insumos económicos. El análisis financiero en ERain se construyó incorporando los costos y beneficios detallados que se encuentran en la literatura, siguiendo las pautas de la norma

australiana sobre el costo del ciclo de vida. El análisis de desempeño de ERain se basa en un análisis de rendimiento después del derrame de los datos de lluvia diarios y tiene como resultados la "eficiencia" (porcentaje de agua disponible utilizada) y la "confiabilidad" (porcentaje de días en que se cumplió la demanda) del SAAL. Esto permite la evaluación de los resultados en el análisis de ciclo de vida en vista del rendimiento de los sistemas y destaca las áreas de mejora.

5.2.6 Relación Costo Beneficio de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL)

En el ACB es necesario definir la vida útil del sistema, tasa de inflación y la tasa de descuento con los cuales se cuantificarán todos los costos y beneficios a valores presentes (Gines de Rus, 2020). Existe un amplio desacuerdo sobre la tasa de descuento adecuada para los proyectos a largo plazo principalmente debido a los largos horizontes temporales implicados y a la preocupación por la equidad intergeneracional. Hajani & Rahman, (2014) concluyen que las hipótesis sobre la tasa de descuento más adecuada varían mucho, en su estudio se supuso que la vida útil del SAAL era de 40 años y la tasa de descuento del 3 %. La selección de estos valores obedeció a que, generalmente SAAL tiene una vida útil de 40 años en las condiciones australianas, y que la tasa de descuento del 3 % era lo suficientemente cercana al valor del índice de precios al consumidor de Australia (2,7 % para el año 2013). Dallman et al (2016) utilizaron en su estudio una tasa de descuento del 3% que coincide con la usada en el análisis de impacto normativo del plan de energía limpio de la Environmental Protection Agency (EPA), una importante normativa de gases de efecto invernadero; la vida útil de este proyecto se consideró en 30 años. Morales-Pinzón et al (2012) consideraron una tasa de descuento del 5%, similar a los valores utilizados por otros autores al analizar el desempeño financiero de los SAAL en otros países, y consideraron una vida útil de 50 años. Además, encontraron que las principales variables que afectan el análisis ACB son el precio del agua corriente, la tasa de descuento y la tasa de inflación. Moges et al (2011) en

su análisis económico suponen una vida útil de 10 años de los tanques, pero considerando que los tanques de plástico deben reemplazarse cada cinco años, fijaron una tasa de descuento de 10%. En general, las tasas de descuento de todos los artículos seleccionados varían entre el 3% y 10%, así mismo la vida útil esta entre los 10 y 60 años, dependiendo de muchos factores como la calidad de los materiales, el tamaño seleccionado, la situación financiera del país, entre otras razones.

5.2.6.1 Análisis de costos de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL). Usualmente los estudios realizan un análisis de costo de ciclo de vida (ACV). Este método evalúa el coste de un producto a lo largo de su ciclo de vida (Alim et al., 2020). Aladenola & Adeboye (2010) determinaron los costos locales de material, mano de obra y mantenimiento y realizaron un análisis dinámico de costos para comparar las opciones tecnológicas en términos de tiempos de amortización.

Muchas variables afectan el costo total en los SAAL, por ejemplo, la cantidad de agua que se requiere, disponibilidad de materiales y mano de obra, las tareas de mantenimiento, el acceso a subsidios o créditos entre otras (Aladenola & Adeboye, 2010). Generalmente, los sistemas de bajo costo son instalados por los propietarios, mientras que las instalaciones profesionales son más costosas, pero en muchas ocasiones han dado mejores resultados en cuanto a fiabilidad (Liang & Van Dijk, 2011).

Generalmente los SAAL están constituidos por: superficie de captación, canaletas, desviador de primer flujo, tanque de almacenamiento, distribución y en algunos casos, sistema de tratamiento para uso potable (Morales-Pinzón et al., 2015). El costo de los materiales frecuentemente se obtiene de los proveedores locales, de ejemplos de proyectos implementados anteriormente y del uso de manuales técnicos. La mano de obra en algunas ocasiones va por parte de los beneficiarios en zonas rurales, pero normalmente en ciudades este coste se asume de los

valores locales (Mwenge Kahinda et al., 2007). En su estudio, Hajani & Rahman (2014) obtuvieron los datos sobre costos de capital y operación a partir de proveedores de tanques de agua de lluvia en Sydney. Los costos de la inversión inicial incluyeron el costo del tanque de agua de lluvia, la base de concreto, la bomba, el desviador de primer flujo, el kit de conexión de la bomba al tanque, los suministros eléctricos y de plomería y todos los costos de mano de obra.

5.2.6.2 Análisis beneficios de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL). En la mayoría de los estudios revisados el valor del agua ahorrada representa el beneficio principal, calculado a través de la metodología de costos evitados (Durodola et al., 2020), en donde el beneficio se cuantifica en términos de cantidades de agua ahorrada multiplicada por el precio del agua que exista en la región de estudio. Además, hay que considerar el valor del agua adicional que el hogar usa como resultado de tenerlo y que podría utilizarse en actividades productivas (Malik et al., 2014a).

Jing et al, (2017) en un estudio realizado en varias zonas climáticas de China argumentan que, además del agua ahorrada, se pueden tener en cuenta otros tipos de beneficios como la disminución de la pérdida social resultante de una menor contaminación, la disminución de la operación del sistema de descarga de agua municipal, aumento de la productividad de la región y muchos otros beneficios. Kim et al (2016) en su estudio en la ciudad de Texas, señalan que las viviendas podrían obtener mayor valor de venta si han adoptado estos sistemas, y proponen la metodología de precios hedónicos para determinar en qué proporción lo hacen.

Dallman et al (2016) indican en su estudio en zonas urbanas que se pueden analizar beneficios como la reducción del riesgo de inundación y daños debido a la reducción del pico y volumen de esorrentía. Morales-Pinzón et al (2012) calcularon los beneficios de los sistemas SAAL en términos de ahorro de detergente y energía (Asociación de Calidad del Agua, 2010).

Algunos autores indican que los SAAL definitivamente serían más factibles económicamente si se incluyeran todos los beneficios mencionados anteriormente (Aladenola & Adeboye, 2010). No obstante, los beneficios secundarios son difíciles de cuantificar en términos monetarios, y por eso muchas investigaciones económicas no las tienen en cuenta (Rahman et al., 2012)

En zonas rurales, la fuerza que impulsa la adopción y las inversiones en tecnologías de gestión de riesgos es la mejora de la producción agrícola, que conduce a la seguridad alimentaria, la generación de ingresos, la reducción de la pobreza y mejores medios de vida (Zingiro et al., 2014). En estos contextos, los SAAL pueden aumentar la producción agrícola, pero su rendimiento depende de las condiciones biofísicas, institucionales y socioeconómicas locales y específicas del hogar. Dallman et al (2017) calcularon los beneficios financieros de la compra doméstica al año, y los beneficios de la compra de agua para riego y encontraron buenos resultados económicos.

Los SAAL pueden significar mejoras en la disponibilidad de agua de riego, reactivación de la economía agrícola de una región y aumentos sustanciales en los ingresos y medios de vida de los agricultores. Malik et al (2014) en un estudio realizado en la India, que cuenta con 86 millones de hectáreas en agricultura, reportan la adopción para el riego complementario y protección frente a la variabilidad climática. En este contexto, los SAAL permitieron el control individual sobre el agua disponible, facilitando una mejor planificación de las operaciones agrícolas, uso más eficiente y productivo de los recursos. Los resultados se mostraron a través de un número seleccionado de indicadores antes y después de la inversión, identificando cambios en la intensidad y rendimientos de cultivo. Estos sistemas permitirían superar limitaciones presentes en muchas regiones donde los cultivos se restringen a la modalidad de secano, dejando gran parte de la tierra sin cultivar durante la estación seca, lo que conlleva a caídas abruptas en los ingresos y limitaciones en su capacidad para diversificar sus actividades (Durodola et al., 2020).

Otros posibles beneficios de los SAAL en la zona rural incluyen la diversificación de las actividades agropecuarias como crianza de animales, piscicultura y la recarga de aguas subterráneas, una mejor disponibilidad de agua potable en los pozos adyacentes y una mayor presencia de fauna y flora en la región. Al tener agua para el riego, los agricultores pueden tener cultivos forrajeros que les permitan criar ganado y diversificar sus actividades. Para evaluar el impacto de las estructuras de captación de agua de lluvia en el ganado, (Malik et al., 2014a) examinaron los cambios tanto en el número de cabezas de ganado como en la producción de leche.

5.2.6.3 Relación costo beneficio de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL). En casi todos los estudios revisados en áreas urbanas, con diferentes escenarios de demanda y capacidades de almacenamiento en regiones áridas y semiáridas, las relaciones costo-beneficio son menores a 1.0, aparentemente se concluye que no es económicamente factible instalar SAAL en las ciudades, y esto debido a las bajas tarifas del agua que se pagan en el acueducto, que no permite que se recupere la inversión en el periodo de vida propuesto en el proyecto. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el agua de lluvia es una de las fuentes alternativas más prometedoras en áreas áridas y semiáridas y existe una larga historia de recolección de agua de lluvia en estas zonas.

El parámetro más influyente en la adopción de estos sistemas son los costos en donde el tanque de almacenamiento y las bombas de suministro representan gran parte de la inversión; es por esto por lo que, varios países subvencionan la implementación de SAAL a nivel individual. Por ejemplo, en Brisbane, Sydney y Queensland en Australia, se subsidian los costos asociados con la instalación y la plomería de los SAAL entre USD 800 a USD 1000. En los EE. UU, la ciudad de Tucson subsidia hasta un máximo de 2000 USD para tanques, materiales y mano de obra y, el estado de Texas exime a los equipos de eficiencia de agua del impuesto sobre las ventas

(TWDB,2005)(Kim et al., 2016). Brindar incentivos y reembolsos podría ser un enfoque prometedor para aumentar la implementación de los SAAL. El desafío de considerar este enfoque es encontrar una forma equitativa y asequible de subsidiar los costos. Los resultados también muestran que un reembolso que coincida con el tamaño del tanque puede ser una buena iniciativa para alentar la instalación de tanques más grandes y aumentar la seguridad del agua (Moges et al., 2011).

En áreas rurales, la mayoría de los estudios arrojan relaciones costo beneficio por encima de 1 (Durodola et al., 2020; Malik et al., 2014a; Zingiro et al., 2014). La eficacia de la gestión del agua de lluvia depende de una serie de factores como las inversiones de los agricultores, el acceso a créditos con tasas especiales, la obtención de subsidio por parte del gobierno, la fiabilidad y la distribución de las precipitaciones, la gestión del agua, las características del suelo y los tipos de cultivos. Los resultados destacan la necesidad de innovación y reducción de capital y costos continuos asociados con los sistemas, en lugar de depender de aumentar el precio del agua para aumentar su viabilidad económica (Durodola et al., 2020). En Kenia, el principal escenario beneficioso fue para un sistema instalado sin bombas ni plomería e incluyendo ahorros por no tener que comprar agua en bidones de 20 L dio como resultado un ACB superior a 1 para casi todos los tamaños de tanques y habitantes de en una vivienda (Ngigi, 2005b)

Amos et al (2018) en su estudio comparativo en Australia y Kenia afirma que ambos países enfrentan problemas similares relacionados predominantemente con el costo de instalación, el reemplazo de piezas y el precio actual del agua. Además, determinaron los factores que tienen un alto nivel de influencia en la adopción de los SAAL, entre estos está el costo de capital (tanque, plomería y bombas), costo de reemplazo (especialmente si se instala una bomba), precios del agua e iniciativas de subsidio por parte del gobierno; también se dieron a conocer las variables de

influencia media como relación entre el tamaño del tanque y el perfil de demanda de agua que incluye: el número de ocupantes de la vivienda, los tipos de usos de agua permitidos, tipo de tanque (tanques redondos, delgados y subterráneos especialmente), área del techo, lluvia (en algunos casos extremos, esto podría ser una influencia principal), mantenimiento (que no sea reemplazo).

Un enfoque multisectorial e integrado es un requisito previo para lograr soluciones sostenibles a los numerosos problemas que afectan la vida en zonas rurales con escasez de agua. La adopción de tecnologías de conservación de agua, como rociadores y goteo, podría ayudar a hacer un uso más eficiente del agua, la disponibilidad de agua de riego combinada con mejores prácticas agrícolas, un uso más intensivo de insumos y mejores variedades de cultivos han resultado en conjunto en un aumento de los rendimientos de los cultivos, por lo tanto, la producción de cultivos en la estación seca es en realidad una adición neta a la producción anual, facilitada por la disponibilidad de agua de estas estructuras de captación de agua (Malik et al., 2014a).

5.3 Caracterización de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) en la vereda Garbanzal

A continuación, se expone las características ambientales, sociales y económicas de la vereda de estudio y de los SAAL existentes.

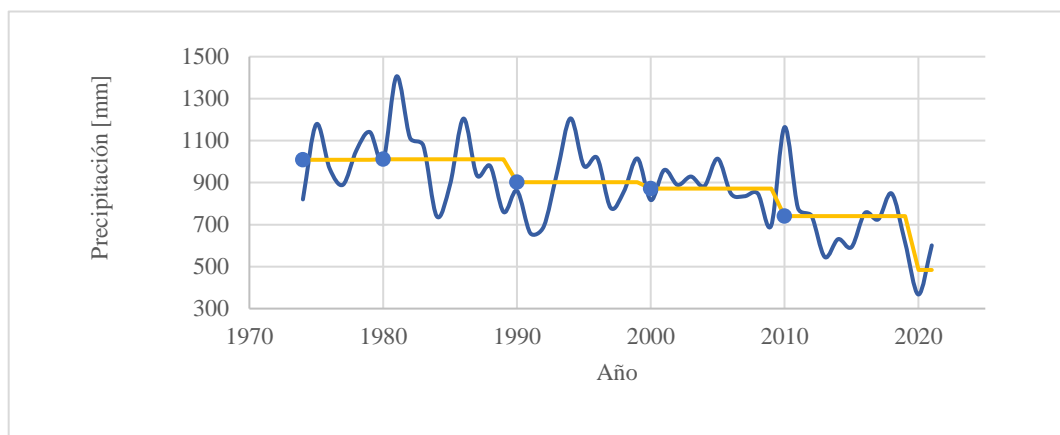
5.3.1 Cambio climático en Garbanzal

En Garbanzal, la escasez de agua se ha convertido en un problema cada vez más grave debido al cambio climático. A lo largo del tiempo, se ha observado una disminución gradual en el volumen de precipitaciones anuales en la zona, como se muestra en la Figura 15. El análisis de los datos de precipitación entre 1974 y 2021 revela una tendencia descendente, especialmente a partir

de la década de los 90, con una marcada disminución en los últimos años. Esta escasez de agua dificulta la diversificación y mejora de la productividad de las actividades realizadas en la vereda.

Figura 15

Serie de lluvias anuales en Garbanzal con datos de la Estación La Mesa 1974-2021



Nota. Adaptado de Prieto (2023)

5.3.1.1 Comportamiento de la precipitación en Garbanzal. Conocer la disponibilidad de lluvias durante el año permite saber la cantidad de agua disponible que se puede aprovechar a lo largo de este, fundamental en el análisis técnico y económico de los SAAL, ya que permite dimensionar adecuadamente el tamaño del tanque y el área de captación. De esta forma, se busca optimizar el aprovechamiento de las precipitaciones y garantizar la satisfacción de la demanda durante un mayor número de días.

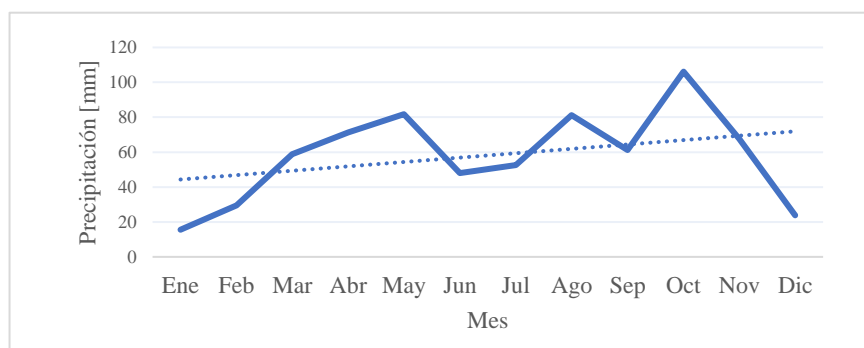
La Figura 16 ilustra los patrones de precipitación en la región, revelando la presencia de tres períodos distintos. El primer período abarca los meses de marzo a mayo, siendo más prolongado, pero con una intensidad de lluvias menor, con un promedio de hasta 75 mm. Más adelante, se presenta un pico corto en el mes de agosto, caracterizado por precipitaciones más intensas que superan los 80 mm. Por último, en octubre se registra el período de mayor precipitación, con valores que pueden superar los 95 mm. A medida que avanza noviembre, las precipitaciones comienzan a disminuir, llegando a los meses más secos del año: diciembre y enero,

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

donde los niveles pueden descender por debajo de los 20 mm. Durante el resto de los meses, las precipitaciones se sitúan entre los 30 y 50 mm.

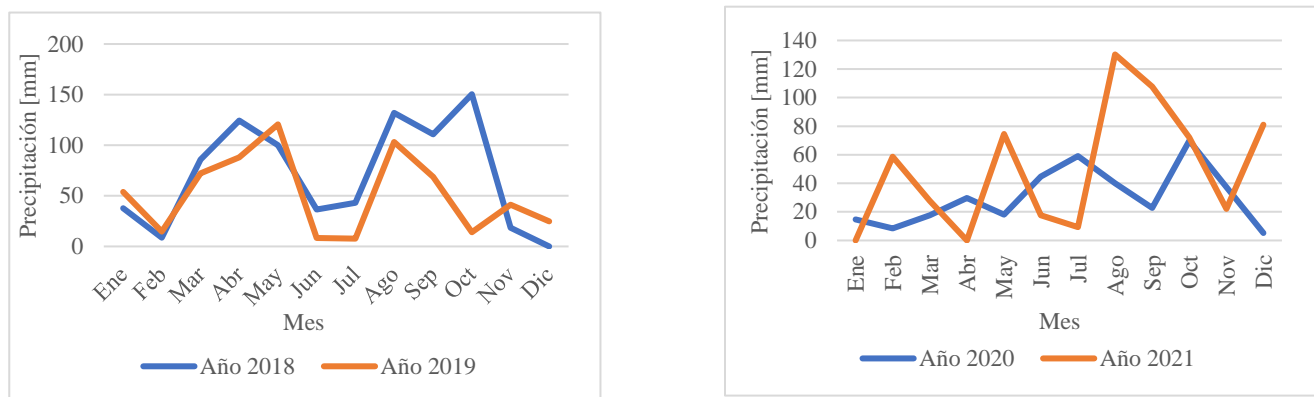
Figura 16

Ciclo anual de precipitación en Garbanzal- Estación La Mesa 2010-2021



Nota. Adaptado de Prieto (2023)

La Figura 17 ilustra la variabilidad de las precipitaciones en el período comprendido entre 2018 y 2021. Se puede apreciar que, si bien se mantiene la distribución estacional de las lluvias a lo largo del año, la cantidad de agua que cae varía considerablemente, con años más secos que otros. Esta variabilidad genera un ambiente de incertidumbre en cuanto a las condiciones climáticas futuras, lo cual dificulta la toma de decisiones por parte de los habitantes de la zona, especialmente en lo que respecta a inversiones en el campo.

Figura 17*Comportamiento de precipitaciones en Garbanzal (2018- 2021)*

Nota. Adaptado de Prieto (2023)

5.3.2 Condiciones socioeconómicas de los habitantes de Garbanzal

La vereda Garbanzal está conformada por 38 viviendas y 145 personas. Sus habitantes se dedican principalmente a tareas del campo, el 38% de los jefes de hogar se ocupan en labores de agricultura como la siembra de cultivos a pequeña escala, los cuales son usados para autoconsumo y en algunas ocasiones para venta, dependiendo del tipo de cultivo y la disponibilidad de recursos de la familia. Otras actividades comunes son la cría de animales de corral y de pastoreo, oportunidades de trabajo en el sector construcción y transporte, empleados públicos, entre otras. En promedio, las familias están conformadas entre 4 y 5 habitantes, donde la mayoría de los integrantes se clasifica como población joven-adulta, el 80% de sus habitantes tienen edades inferiores a 50 años y el 40% de sus habitantes se encuentra en edad laboral.

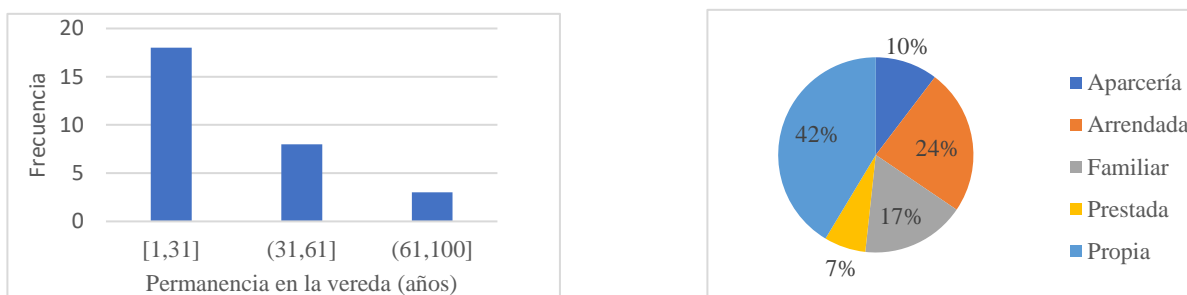
El 50% de las personas encuestadas ha vivido menos de 10 años en la vereda, solo un 28% de sus habitantes ha vivido desde su nacimiento (Figura 18 A). Este fenómeno podría asociarse a un flujo migratorio de sus habitantes en la búsqueda de mejores condiciones de vida en otras regiones. El 41% de las familias afirman que el predio donde viven es propio, mientras que el 24% aseveran que viven en forma arrendada (Figura 18 B). Las personas que recuerdan el tamaño de

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

sus predios informan que el 70% de los terrenos superan los 10,000 m², siendo el promedio de 32,232 m². Aún con el limitado acceso al agua, estos terrenos aportan a la economía de sus habitantes a través del desarrollo actividades agropecuarias.

Figura 18

A. Permanencia en Garbanzal, B. Propiedad del predio



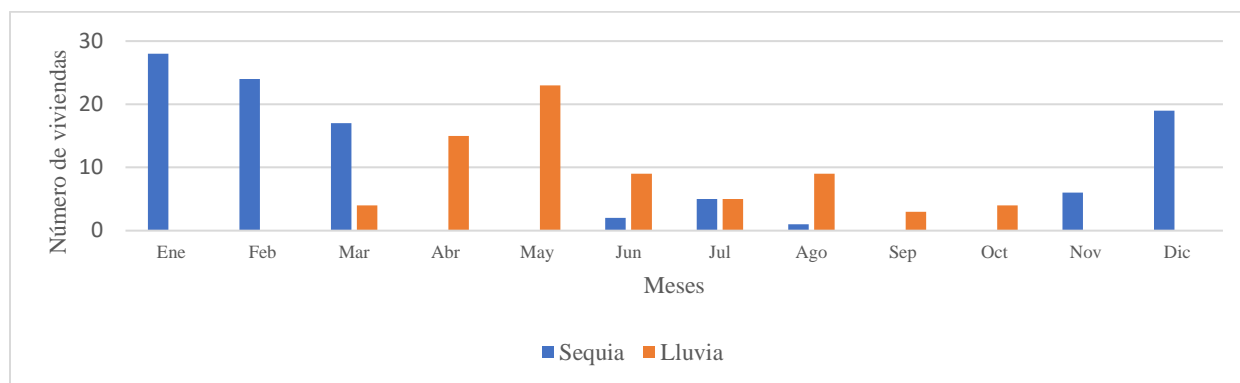
Nota. Se identifica características como la posesión de la tierra y la cantidad de años que han estado las familias en la vereda

El 100% de las casas cuentan con servicio de energía, el 62% con gas a través de pimplinas. El 55% de los hogares cuentan con servicio de agua prestado por un acueducto veredal.

Se indagó por la percepción de los habitantes sobre la estacionalidad de la precipitación en la región. La mayoría de las personas concuerdan que la temporada seca empieza desde mediados de noviembre, tornándose más fuerte en los meses de diciembre, enero y febrero; en marzo se presentan pequeñas lluvias, y en abril, mayo, junio y agosto lluvias mayores. Las personas indicaron que, en promedio, llueve dos o tres veces a la semana en la temporada lluviosa. En los demás meses las personas reportan lluvias esporádicas y escasas (ver Figura 19).

Figura 19

Percepción de los habitantes sobre los meses de sequía y lluvia en Garbanzal



Al contrarrestar la percepción de los habitantes con los datos de precipitación diaria suministrados por la estación meteorológica de la Mesa de los Santos para los años 2010-2021, se evidencia que los habitantes son grandes conocedores del comportamiento de las estaciones en la vereda, ya que de ello dependen muchas de las actividades que realizan, como los tiempos de siembra y recolección en cultivos, y los ajustes que realizan pensando en la temporada seca. Las familias son conscientes del cambio climático y reportan que, en la última década, la regularidad de las precipitaciones ha cambiado.

5.3.3 Actividades que demandan agua

En las viviendas de Garbanzal, las principales actividades domésticas que demandan agua son la bebida y preparación de alimentos, descarga de inodoros, ducha, lavado de loza y ropa. Por otro lado, el 75% de las familias cuentan con jardín que riegan en promedio entre 2 y 3 veces en la semana, dependiendo de la temporada.

En cuanto a la demanda de agua para actividades pecuarias, en Garbanzal esto se requiere principalmente para la cría de gallinas. Cada familia posee un promedio de treinta gallinas que se

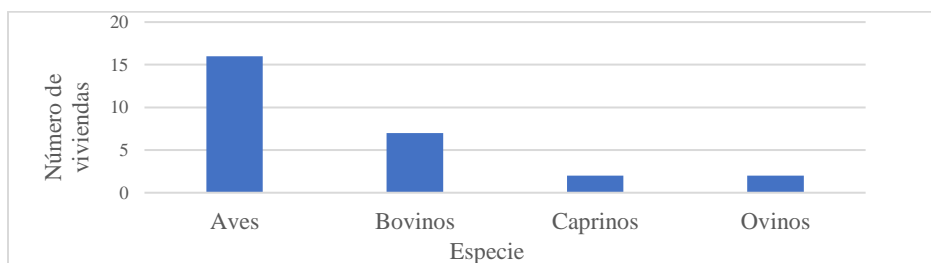
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

mueven libremente por el terreno o se mantienen en pequeños corrales de aproximadamente 5 m. Estas gallinas proporcionan huevos y carne para el consumo familiar, y ocasionalmente se venden. Las familias proveen agua a sus gallinas principalmente a través del agua de lluvia captada en los techos de sus viviendas, aproximadamente cada gallina toma en el día 0,2 L.

Otras actividades pecuarias encontradas, aunque en menor proporción (número de familias y de individuos por especie), fueron la cría de bovinos, caprinos, equinos y ovinos. Estos animales se crían para consumo propio o tareas de la finca. Los campesinos afirman que, en promedio, los bovinos y equinos requieren entre 10 y 20 litros al día, los caprinos y equinos entre 10 y 15 litros. El agua usada para la bebida de estos animales se suministra de jagueyes (reservorios en tierra) o agua lluvia de techo. La Figura 20 muestra el número de viviendas donde se encontró animales de cría.

Figura 20

Distribución de animales de cría en las viviendas de Garbanzal

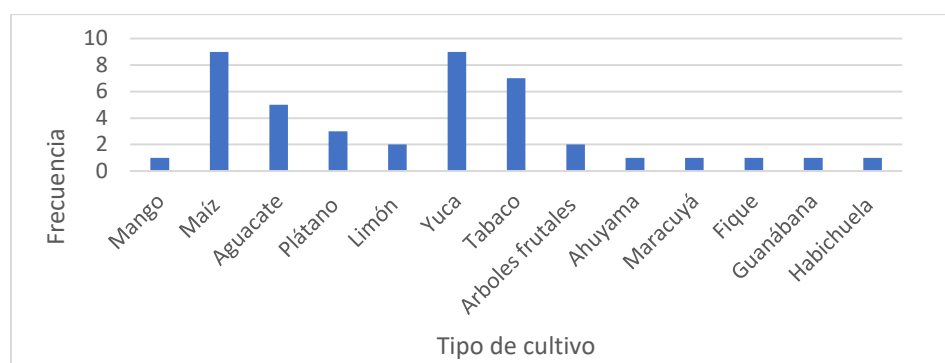


En la agricultura, se evidenció una diversificación de cultivos (ej. frutas, tubérculos, granos) en pequeñas parcelas y generalmente para autoconsumo. El agua es un limitante que imposibilita un crecimiento en el área cultivada. Además, las fuertes sequías que se presentan reducen la productividad. Los cultivos más encontrados fueron maíz, yuca y tabaco, que son resistentes a la sequía, y se adaptan mejor a las condiciones del área, ya que demandan menor cantidad de agua que otros cultivos (latinclima, 2022). En las etapas de sequía, entre diciembre y

febrero, los campesinos riegan los cultivos de 1 a 2 veces por semana, usualmente con agua lluvia almacenada. El método de riego empleado es el riego por superficie, técnica que demanda grandes cantidades de agua y es poco eficiente (Khastagir & Jayasuriya, 2011). La Figura 21 muestra las diferentes variedades de cultivos encontrados y el número de familias que los cultivan.

Figura 21

Distribución de cultivos en Garbanzal

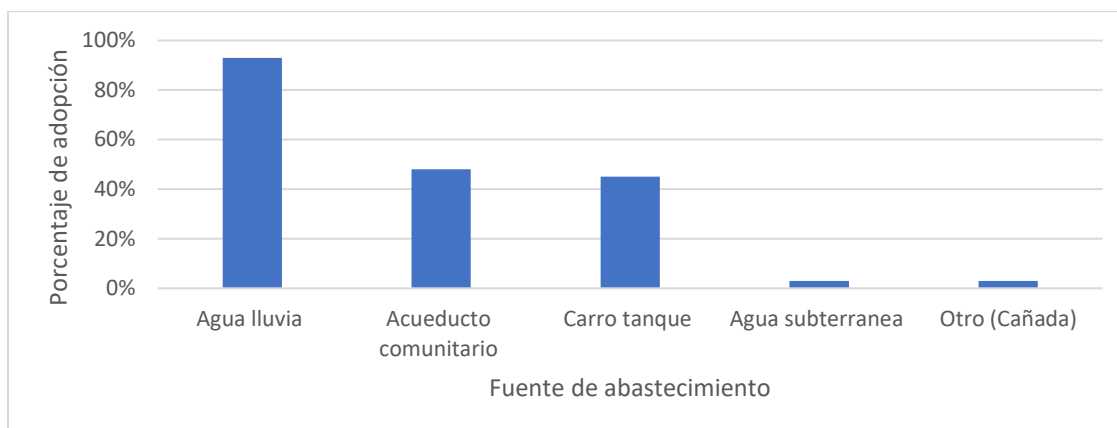


5.3.4 Fuentes de abastecimiento de agua

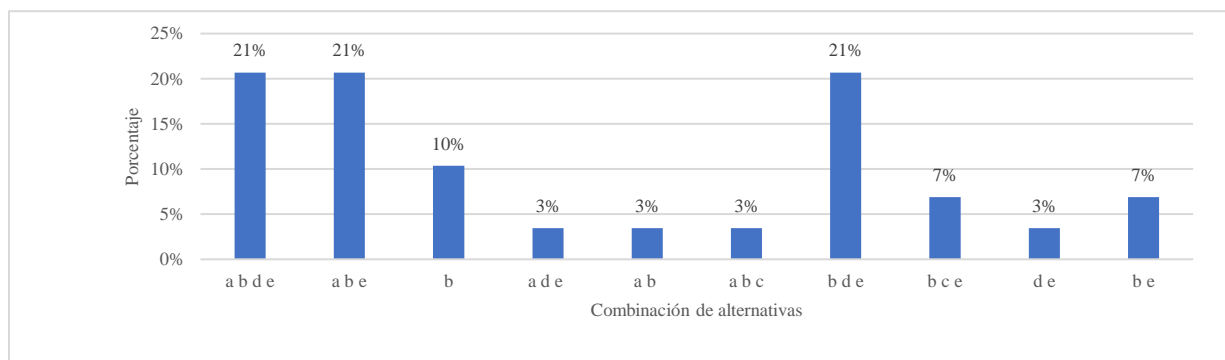
En Garbanzal, las necesidades diarias de agua, la poca disponibilidad del recurso, y la variabilidad estacional de la oferta, exigen casi siempre tener más de una fuente de abastecimiento. La Figura 22 muestra las diferentes fuentes a las que recurren los habitantes para abastecerse de agua y el porcentaje de adopción de los hogares.

Figura 22

Porcentaje de adopción de las fuentes de abastecimiento de agua en Garbanzal



La Figura 23 muestra la cantidad de fuentes que son adoptados por un mismo hogar, y la proporción de adopción de cada combinación en toda la vereda. Para esto, cada fuente se clasificó por una letra y se generaron las diferentes combinaciones. Se puede evidenciar que, aunque hay una variedad de combinaciones, el SAAL está presente en casi todas (8/10), excepto dos que abarcan el 6% de la población. Otras fuentes importantes son los jagueyes (reservorios en tierra) donde se almacena agua lluvia (45% de los hogares). El acueducto comunitario (51%), donde algunas viviendas tienen acceso hasta el interior del domicilio (40%), mientras el resto debe acarrearla desde la fuente. El acueducto es una fuente de gran valor para las actividades del campo, pero la calidad no es apta para consumo humano. Algunos hogares tienen acceso a agua subterránea, pero esto conlleva mayores costos de energía para la utilización de las bombas que facilitan el suministro. En temporadas fuertes de sequía, muchas de estas fuentes escasean y el municipio de Los Santos debe suministrar agua gratuitamente a través de carrotanques.

Figura 23*Combinación de fuentes de agua en las viviendas de Garbanzal*

Nota: a: Jaguey; b: SAAL; c: Agua subterránea; d: Acueducto comunitario; e: Carrotanque; f: Otro

5.3.5 Calidad del agua

Prieto (2023) investigó la presencia de agentes microbianos como la *Escherichia coli*, y otras características fisicoquímicas como la turbiedad y el pH del agua recolectada en los SAAL de la zona. Los resultados se compararon con los parámetros que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS), y se encontró que el agua empleada en muchos de los hogares no cumplía con los estándares potables del agua; debido a la alta presencia de colonias de bacterias, niveles altos de turbiedad y pH irregulares.

5.3.6 Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) existentes en Garbanzal

El 97% de las viviendas presentes en la vereda eran de 1 solo nivel, algunas fueron construidas en ladrillo con acabados, otras más sencillas en adobe. La ausencia de recursos económicos y programas de orientación en el diseño y construcción ha hecho que, en Garbanzal, los SAAL hayan sido construidos empíricamente. Esto ha permitido a las personas contar con el recurso, pero no con la fiabilidad, cantidad y calidad de agua necesaria. Los SAAL observados en los hogares generalmente son producto de la creatividad y recursividad de los habitantes, donde han adaptado materiales sobrantes de otras actividades. Aun así, el uso de SAAL en techos es generalizado (93% de las viviendas encuestadas).

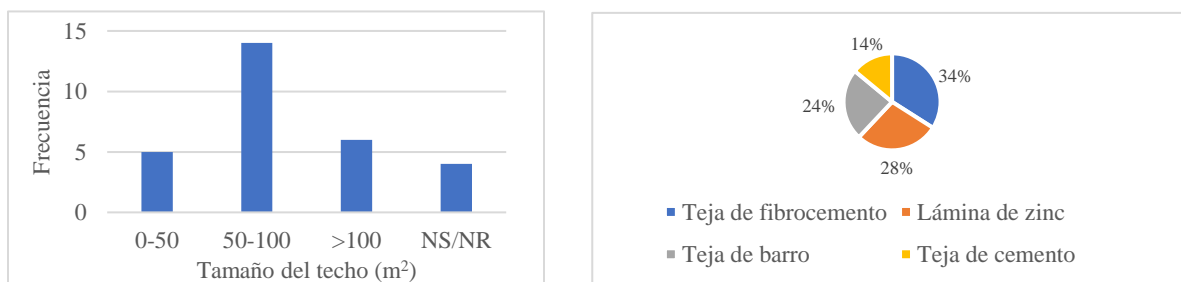
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

En Garbanzal, los SAAL están conformados por el techo de las viviendas, algunas canaletas instaladas a los costados de la casa, y un tanque donde se almacena el agua. Sin embargo, ninguno de estos sistemas cuenta con todos los componentes técnicamente recomendados para captar el agua, prevenir desperdicio, y reducir la cantidad de agentes contaminantes. A continuación, se describe lo encontrado en relación con los componentes de los SAAL en la vereda.

5.3.6.1 Techos. La mayoría de las viviendas en la zona cuentan con áreas de techo entre 50 y 100 m², con un promedio de 68 m², utilizados para la captación de agua de lluvia. Los materiales más comunes son el fibrocemento, la teja de barro y la lámina de zinc. Según el 76% de las familias encuestadas, no se realizan labores de mantenimiento en los techos. Sin embargo, algunas familias mencionaron acciones básicas de mantenimiento como barrer hojas y suciedad, limpiar con cepillo y jabón de 2 a 3 veces al año. Otras familias, motivadas por mantener condiciones de salubridad óptimas en la recolección del agua de lluvia, mencionaron cambiar las tejas una vez al año o recubrir el tejado con cal. La Figura 24 muestran el tamaño y material más usado en los techos.

Figura 24

Área y material de techo en viviendas de Garbanzal

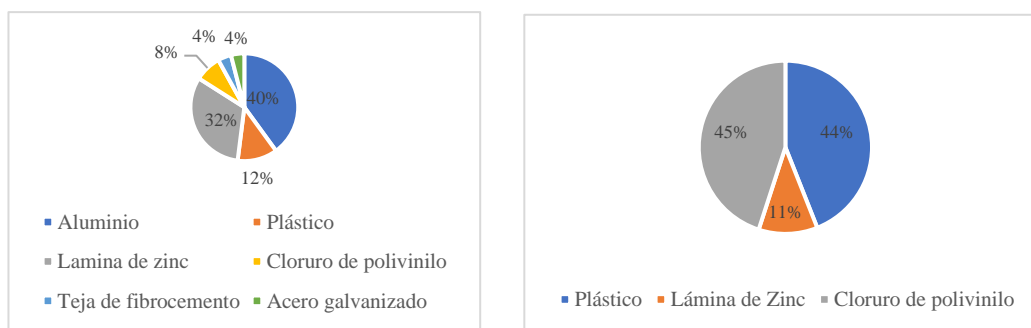


5.3.6.2 Canaletas y bajantes

El 86% de las viviendas encuestadas tenía instaladas canaletas, mientras que el 31% contaba con bajantes. Según la opinión de los encuestados, en general, el estado de estos componentes se consideraba bueno a regular. Sin embargo, al igual que en el caso del techo, la mayoría de las personas no realizaba tareas de mantenimiento periódico en estos componentes. En aquellas viviendas donde sí se realizaba mantenimiento, consistía principalmente en limpiar hojas y residuos que obstruyen el flujo del agua y reducen la eficiencia de captación. Algunas viviendas adoptaron rejillas en las entradas de las canaletas como medida preventiva para evitar obstrucciones. Otra actividad mencionada fue el lavado de los componentes con agentes desinfectantes como cloro y vinagre. En la Figura 25 se pueden observar los materiales más utilizados tanto en las bajantes como en las canaletas.

Figura 25

Materiales usados en Garbanzal A. canaletas y B. bajantes



Al igual que los demás componentes, las personas encuestadas no tenían claridad en las medidas. En general, las canaletas de las viviendas tienen en promedio entre 7 y 12 cm de alto, 20 cm de ancho y entre 8 y 15 cm de largo. Por otro lado, las bajantes tienen en promedio 8 cm de diámetro 2,5 cm de alto y 3 de largo.

5.3.6.3 Tanques de almacenamiento

El tanque de almacenamiento es el componente principal de un SAAL y a su vez es el más costoso. La durabilidad del tanque dependerá de los materiales que se usen y de las medidas de protección que se adopten (Abdulla, 2020b). El 93% de los encuestados tenía tanques de almacenamiento de agua de lluvia, donde en promedio en cada hogar había uno o dos tanques, pero algunos predios que tenían actividades productivas contaban con hasta 8 depósitos. Se contabilizaron 59 tanques en total en las casas encuestadas, predominantemente de concreto y plástico. La mayoría de los tanques estaban en buenas condiciones, sin embargo, se encontraron algunos con deterioro, que no se habían cambiado por falta de recursos (Figura 26). Los tamaños más usados por los habitantes son de 1000 y 2000 litros, siendo este último el de mayor preferencia (Figura 27)

Figura 26

Materiales y estado de los tanques de almacenamiento en Garbanzal

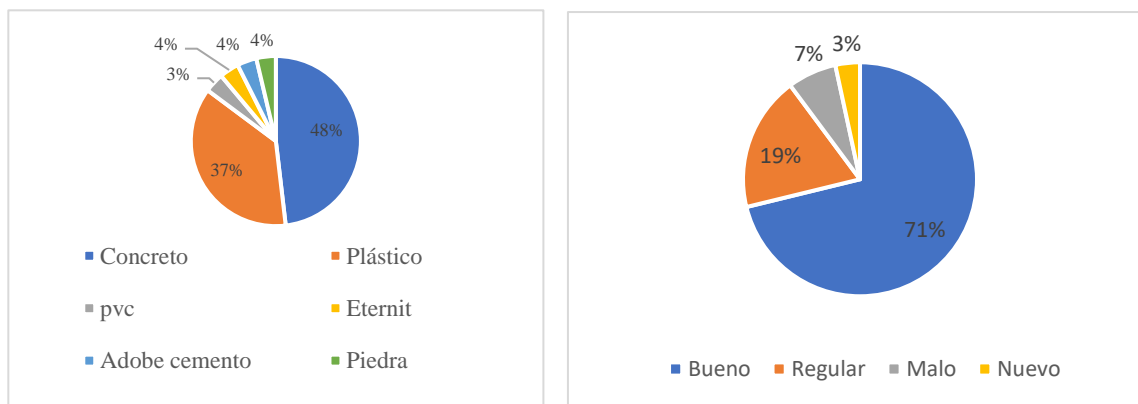
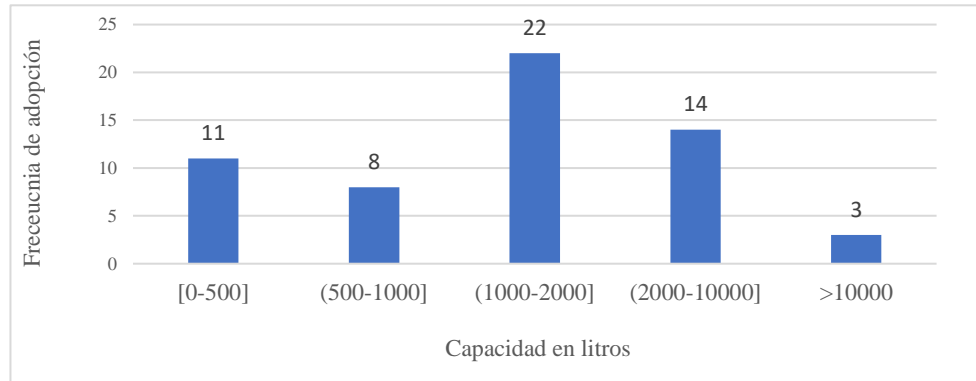


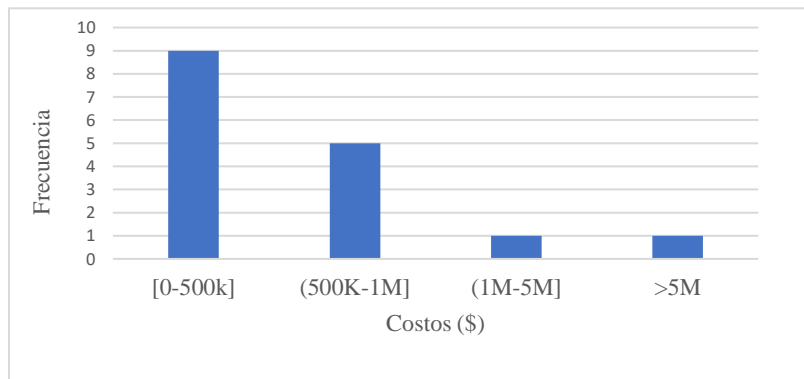
Figura 27*Capacidad de los tanques de almacenamiento de aguas lluvias en Garbanzal*

La mayoría de los hogares no contaban con conexión directa del agua del tanque a sus viviendas, solo el 28% ha adecuado los sistemas para recibir el agua dentro de la casa a través de tuberías o mangueras. Dos familias han adoptado tanques elevados, que les permite generar la presión suficiente para transportar el líquido dentro de los hogares. Las demás familias deben acarrear el agua desde el tanque hasta el punto de uso, que normalmente se encuentra cerca de la casa, en promedio a unos cinco o seis metros de distancia.

5.3.6.4 Costos de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL). Se conocieron los costos de 16 sistemas adoptados en la vereda. Estos costos incluyen el valor del tanque, canaletas, bajantes y accesorios adicionales. Esta es una aproximación que realizaron los encuestados ya que no llevaban registro de los gastos en que habían incurrido. Además, no se consideró el cambio de valor del dinero a lo largo del tiempo (ver Figura 28).

Figura 28

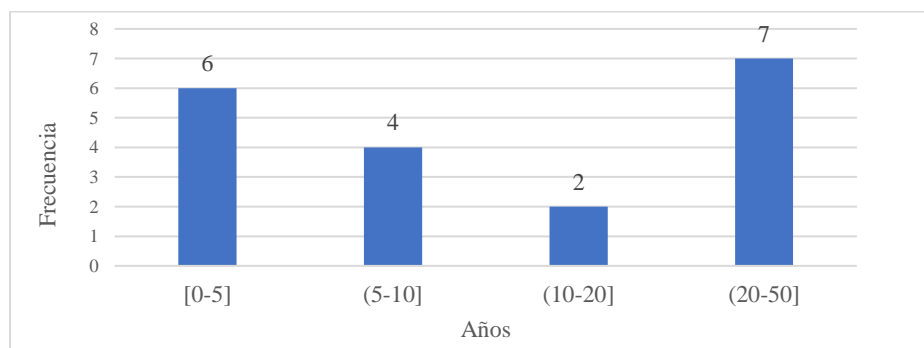
Costo de implementación de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias existentes en Garbanzal



Muchos de estos sistemas tienen menos de 10 años en funcionamiento (ver Figura 29). En los más antiguos, los propietarios aseguran que han realizado cambios en los componentes deteriorados.

Figura 29

Tiempo de implementación de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias existentes en Garbanzal



5.4 Análisis de los costos para las alternativas de diseño de los Sistemas de

Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) en Garbanzal

A continuación, se presentan los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de las tres alternativas de SAAL propuestas. Además, se incluyen los costos de las actividades productivas.

5.4.1 Costos inversión inicial

La Tabla 4 muestra el resumen de los costos de inversión inicial para cada una de las alternativas.

Tabla 4

Resumen costos de inversión inicial de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

<i>Tipo de costo</i>	<i>Alt 1</i>	<i>Alt 2</i>	<i>Alt 3</i>
<i>Costo de materiales</i>	\$ 3'983,723.76	\$ 4'358,489.58	\$ 4'358,489.58
<i>Costo de mano de obra</i>	\$ 709,040.36	\$ 709,040.36	\$ 709,040.36
<i>Costo maquinaria y equipo</i>	\$ 269,619.41	\$ 269,619.41	\$ 269,619.41
<i>Total</i>	\$ 4'962,383.52	\$ 5'337,149.34	\$ 5'337,149.34

Para cada una de las opciones, aproximadamente, el 80% de la inversión inicial se destina a la compra de materiales, mientras que el 14% se asigna a la mano de obra y el 6% a la maquinaria y equipo. Varios estudios concluyen que uno de los mayores desafíos a la hora de implementar estos sistemas es encontrar los recursos económicos para los materiales, ya que, en países en desarrollo, las necesidades de mano de obra están casi siempre a cargo del propietario (Hatibu et al., 2006; Islam et al., 2011; Malik et al., 2014).

La adecuación del tanque de almacenamiento elevado incurrió en el mayor costo de materiales, representando aproximadamente el 30% de la inversión. Estudios como Durodola et al. (2020) no recomiendan este sistema en zonas con bajo nivel económico, ya que se incrementan los costos de inversión, especialmente por la compra de la bomba y las estructuras en cemento.

Las canaletas, debido a la cantidad necesaria y su precio por unidad, representaron el 25%, convirtiéndose en el segundo elemento más costoso. La compra de dos tanques de almacenamiento y dos desviadores de primera descarga también tuvo gran impacto en los costos de las alternativas 2 y 3 totalizando un 20% de la inversión. En varios estudios se nota la preocupación por reducir los costos. En algunos diseños se ha optado por sacrificar la comodidad en función de reducir los costos, por ejemplo, prescindir de redes de suministro dentro del hogar, de bombas y utilizar materiales reciclados (Hatibu et al., 2006; Islam et al., 2011; Ngigi, 2005^a).

5.4.2 Costos de operación

Se estableció el costo promedio de funcionamiento de la bomba para las tres alternativas de 2000 pesos mensuales para el primer año. Esto corresponde al costo de bombear el agua diariamente al tanque elevado durante 15 minutos. Así mismo, para hervir la cantidad de agua potable establecida (20 litros diarios), se requieren 650 pesos mensuales en consumo de gas para el primer año en las tres alternativas.

5.4.3 Costos de mantenimiento

A continuación, en la Tabla 5 se presenta un resumen de todas las tareas de mantenimiento en las que se puede incurrir con un SAAL con su respectiva frecuencia, de acuerdo Gobernación de Boyacá (2023), y la estimación de los costos asociados a estas tareas en cada alternativa propuesta para el caso de estudio de Garbanzal.

Tabla 5

Resumen actividades de mantenimiento de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal.

<i>Tipo</i>	<i>Periodicidad</i>	<i>Valor Alt 1</i>	<i>Valor Alt 2</i>	<i>Valor Alt 3</i>
<i>Compra Equipo de limpieza</i>	1 vez en su ciclo de vida	21,300	21,300	21,300
<i>Mantenimiento – Limpieza</i>	2 veces al año	4,714.7	4,999.6	4,999.6
<i>Reconstrucción desviador</i>	1 vez a mitad de su ciclo de vida	127,590.4	162,234.1	162,234.1
<i>Reconstrucción filtro</i>	Cada 2 años	9,575.3	10,380.3	10,380.3
<i>Reparación canaletas</i>	1 vez a mitad de su ciclo de vida	524,320.5	655,400.6	655,400.6
<i>Reparación tejado</i>	Cada 10 años	141,666.9	177,083.6	177,083.6
<i>Revisión bomba</i>	Anual	25,980	25,980	25,980
<i>Revisión de tuberías y conexiones</i>	Cada 5 años	39,811.9	40,051.9	40,051.9
	<i>Total (25 años)</i>	2'155,742.8	2'417,405	2'417,405

Los costos de operación y mantenimiento suelen ser bajos en comparación con la inversión inicial. Jin et al (2023) consideraron los costos de operación/mantenimiento como el 2% de la inversión inicial. Amos et al (2018) afirman que el mantenimiento de la bomba y el tanque puede aumentar significativamente los costos de mantenimiento y propusieron las bombas manuales como alternativa de ahorro.

5.4.4 Costos de las actividades productivas

A continuación, se plantean los costos de las actividades productivas de pequeña escala para las alternativas de SAAL que permiten el desarrollo de este tipo de actividades.

La Tabla 6 presenta un resumen de los costos de la crianza de gallinas. Se consideró que al finalizar los ciclos productivos en las alternativas 2 y 3, algunas gallinas eran vendidas y otras se conservaban para asegurar la continuidad de la producción de huevos hasta el siguiente ciclo. Los costos de alimentación de las gallinas que siguen produciendo huevos se suman a los costos del próximo ciclo productivo. En promedio, el 20% de los costos está destinado a la adquisición de las pollitas, el 70% a la alimentación requerida y el resto se asigna a otras actividades.

Tabla 6

Costos de producción gallinas para el segundo ciclo productivo de 6 meses de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

<i>Costo promedio ciclo productivo (6 meses)</i>			
<i>Detalle</i>	Alt 1	Alt 2	Alt3
<i>Compra animales</i>	0	11 gallinas \$165,000	31 gallinas \$465,000
<i>Costo de alimentación</i>	0	\$ 647,142	\$ 2'049,502
<i>Otros costos</i>	0	\$25,000	\$50,000
Total	0	837,142	2'564,502

Para el cultivo de maíz, la mano de obra familiar, el fácil acceso a las semillas, junto con la elección de prácticas de cultivo orgánico implicó que no se consideraran costos asociados a este.

5. 5 Beneficios de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) en

Garbanzal

A continuación, se presentan los beneficios estimados para cada una de las alternativas propuestas. Estos beneficios, incluyen para el escenario 1 los costos evitados por uso del sistema de aguas lluvias para fines domésticos en todas las alternativas y beneficios asociados a los ingresos derivados de las actividades productivas de pequeña escala (Alt 2 y 3). En el escenario 2 se calculan los costos evitados por las actividades domésticas y actividades productivas.

5.5.1 Costos evitados por el uso del sistema de abastecimiento de aguas lluvias para fines domésticos

Para un núcleo familiar compuesto por 4 personas, se estimó un consumo promedio diario de 71 litros/persona de agua para actividades domésticas (Philco, 2021; Requejo, 2019), discriminado por requerimiento de calidad potable y no potable. De acuerdo con los resultados de la encuesta de hogares, se consideró que, las fuentes alternativas al agua lluvia disponibles en la comunidad que podían satisfacer esos usos eran el agua embotellada y el agua subterránea para

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

cubrir la necesidad de agua potable, y el acueducto comunitario para el uso no potable. Con la cantidad de agua prevista para los diferentes usos y el costo promedio que pagan los habitantes por acceder a las fuentes seleccionadas, se determinó la tarifa con la que se calculan los costos evitados domésticos.

La cantidad de agua suministrada por el sistema varía mes a mes debido a la cantidad de precipitaciones que caen durante el año en la región. Teniendo en cuenta la tarifa mensual y el número de m³ que el sistema pudo satisfacer para consumo doméstico al mes, se calcularon los beneficios de agua ahorrada para el primer año. La Tabla 7 muestra el cálculo de los costos evitados para las actividades domesticas en las tres alternativas, para ambos escenarios, ya que se obtuvieron los mismos costos evitados para el consumo de agua doméstico.

Tabla 7

Costos evitados para las actividades domesticas de las tres alternativas y escenarios de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal

Uso	Cantidad (l/hab*día)	Calidad requerida	Fuente	Demanda anual (m ³ /año)	Costo evitado (\$/año)		
					Alt 1	Alt 2	Alt 3
Beber	2	Potable	Agua embotellada y subterránea	2.9	7,007.2	3,659.3	6,726.8
Cocinar	3	Potable	Agua subterránea	4.3	10,510.8	5,489.1	10,090.2
Ducha y manos	20	Potable	Agua subterránea	29.2	35,036.1	18,296.8	33,634.1
Lavar loza	10	No potable	Acueducto comunitario	14.6	70,072.2	36,593.7	67,268.2
Descarga de inodoros	30	No potable	Acueducto comunitario	43.8	105,108.3	54,890.6	100,902.3
Aseo general	2	No potable	Acueducto comunitario	2.9	7,007.2	3,659.3	6,726.8
Lavado de ropa	4	No potable	Acueducto comunitario	5.8	14,014.4	7,318.7	13,453.6
				Total	248,756.3	129,907.9	238,802.1

En las alternativas 2 y 3 el agua se usa tanto para fines domésticos como productivos, por lo tanto, el agua disponible se distribuye entre estos usos y eso hace que el costo evitado varíe entre las alternativas.

5.5.2 Costos evitados por el uso del Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) para las actividades productivas.

Para el escenario 2, se analizaron los beneficios de las actividades productivas en función del costo evitado por el pago en la factura de la fuente seleccionada para estas actividades. Las gallinas requieren agua de buena calidad. Por lo tanto, se consideró como fuente de suministro el agua subterránea (10,000 \$/m³-mes). En cuanto al cultivo, en promedio, éste demanda un volumen de 29.9 m³ en las dos cosechas que se realizan en el año (abril y septiembre). Dado que esta cantidad, puede ser suplida por el acueducto comunitario, no se incurrió en costos, ya que actualmente los usuarios no pagan por el servicio. La Tabla 8 muestra el costo evitado en el consumo de gallinas y cultivo en las tres alternativas.

Tabla 8

Costos evitados para las actividades productivas de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal en el escenario 2

<i>Actividad</i>	<i>Cantidad (l/gallinas*día)</i>	<i>Fuente</i>	<i>Costo de la fuente (\$/m³)- mes</i>	<i>Demanda anual (m³/año)</i>			<i>Costo evitado (\$/año)</i>		
				<i>Alt 1</i>	<i>Alt2</i>	<i>Alt 3</i>	<i>Alt 1</i>	<i>Alt 2</i>	<i>Alt 3</i>
<i>Cría de gallinas</i>	0.2	Agua subterránea	10,000	0	0.83	2.23	0	8,030.1	22,629.9
<i>Cultivos</i>	Variable durante el ciclo del cultivo	Acueducto comunitario	0	0	29.9	0	0	0	0
			Total	0	30.73	2.23	0	8,030.1	22,629.9

Se observa que los costos evitados en las actividades productivas son bajos ya que son pocas las gallinas que se tienen en ambas alternativas y su requerimiento de agua diario es también bajo.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

Con respecto al cultivo, la comunidad mencionó que obtenían agua para sus cultivos del acueducto comunitario sin tener que pagar por ella, el inconveniente es que el servicio no es constante.

5.5.3 Beneficios asociados a las actividades productivas

En este apartado se consideraron los beneficios asociados a las actividades productivas y que son calculados para el escenario 1.

Para las gallinas se consideraron los beneficios por la producción de huevo y venta de carne. En promedio una gallina criolla pone 20 huevos al mes, y empieza su producción a partir de los seis meses. Se tomaron en cuenta imprevistos como enfermedades, pérdida de animales y otros contratiempos, aplicando un descuento del 5%. La Tabla 9 presenta el beneficio anual estimado para las tres alternativas en términos de producción de huevos y carne.

Tabla 9

Beneficio anual estimado en términos de producción de huevo y carne para el escenario 1 de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

Beneficios gallinas para un año productivo

<i>Venta</i>	<i>Alt 1</i>			<i>Alt 2</i>			<i>Alt 3</i>		
	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Total</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Total</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Total</i>
<i>Huevos</i>	0	0	0	920	\$ 800	\$ 1'398,000	3,240	\$ 800	\$ 4'924,800
<i>Carne</i>	0	0	0	27.5	\$ 20,000	\$ 1'045,000	77.5	\$ 20,000	\$ 2'945,000
				Total		\$ 2'443,000	Total		\$ 7'869,800

En cuanto al maíz, en la encuesta, los campesinos indicaron tener rendimientos de la siembra de maíz amarillo tradicional de 0.67 ton/hectárea. Este rendimiento es inferior al promedio nacional para los años 2010-2020, 1.83 ton/hectárea (Minagricultura, 2021). Este menor rendimiento se debe a que no se aplican fertilizantes ni riego. Los cálculos realizados por Prieto

(2023) indican que, con la implementación del SAAL se puede asegurar el cumplimiento de 88% de toda la demanda de agua necesaria durante el cultivo. Esta mayor disponibilidad de agua para el cultivo, según FENALCE, (2022), supondría un incremento de producción del 72%. Esto implicaría un rendimiento de 3.14 ton/hectárea. Así, en la alternativa 2 se obtiene un beneficio final de 33 kilogramos por cada cosecha para los 105 m² maíz sembrados. De acuerdo con los precios de venta de la mazorca para abril de 2023 (Corabastos, 2023), 2600 pesos por kilogramo, los beneficios derivados para el año 1 del cultivo del maíz se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10

Beneficio cultivo de maíz de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

<i>Actividad</i>	<i>Beneficio cultivo para un año productivo</i>		
	<i>Alt 1</i>	<i>Alt 2</i>	<i>Alt 3</i>
<i>Cultivo</i>	0	171,858.96	0

La Tabla 11 sintetiza todos los beneficios para los dos escenarios y las tres alternativas. Estos resultados muestran que, cuando se elige una actividad agropecuaria de alto valor en el mercado, con pocos requerimientos de agua, se pueden obtener los mejores beneficios, tal es el caso de la alternativa 2 y 3 para el escenario 1 que tienen producción de huevo y carne y donde con poca agua se pueden obtener buenas ganancias. Un enfoque multisectorial, basado en un mejor uso del agua y la aplicación de tecnologías y buenas prácticas en las actividades productivas, puede tener un impacto significativo en el aumento de los beneficios y la reducción de la pobreza en zonas rurales. (Dallman et al., 2021; Durodola et al., 2020; Malik et al., 2014a).

Tabla 11

Beneficios totales para un año de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal - escenarios 1 y 2

		<i>Beneficios totales para 1 año</i>		
		Alt 1	Alt 2	Alt 3
<i>Escenario 1</i>	Costos evitados domésticos	\$ 248,756.3	\$ 129,907.9	\$ 238,802.1
	Beneficios actividades productivas	0	\$ 2'614,858	\$ 7'869,800
	Total	\$ 248,756.3	\$ 2'744,765.9	\$ 8'108,602.1
<i>Escenario 2</i>	Costos evitados domésticos	\$ 248,756.3	\$ 129,907.9	\$ 238,802.1
	Costos evitados actividades productivas	\$ 0	\$ 8,030.1	\$ 22,629.9
	Total	\$ 248,756.3	\$ 137,938	\$ 261,432

5.6 Relación costo beneficio de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) propuestos en Garbanzal

A continuación, se presentan los resultados del ACB para cada una de las tres alternativas evaluadas. Estos resultados fueron obtenidos considerando un periodo de evaluación del proyecto de 25 años, siguiendo las recomendaciones de la literatura (Ngigi, 2005; Sturm et al., 2009a), donde se estipula, tomar como referencia la vida útil del componente principal, en este caso el tanque de almacenamiento. Para la tasa de inflación, se descartó el uso de la media como indicador principal, teniendo en cuenta la notable variabilidad en los datos en los últimos 30 años. En su lugar, se seleccionó una tasa promedio proyectada de inflación para el horizonte temporal del proyecto de 6.5%. Esta estimación tiene en cuenta la información histórica y las perspectivas futuras, con el objetivo de obtener una medida más precisa y confiable de la inflación esperada. (Banrep, 2023)

En cuanto a la tasa de descuento, aún no hay consenso en la teoría económica sobre qué enfoque utilizar para determinar la tasa que mejor se adapte a las decisiones de los agentes

económicos (Lara & Franco, 2017). Por lo tanto, se consideraron los dos enfoques más relevantes para evaluar un proyecto: i) perspectiva financiera; y ii) perspectiva económico-social. La óptica privada prioriza los aspectos financieros, en donde se busca maximizar la rentabilidad del inversionista (Deora & Nanore, 2019). La evaluación social se focaliza en los efectos económicos, entendidos éstos como aquellos que afectan la distribución de recursos y la generación de riqueza de la sociedad, sin importar si generan un flujo de fondos o quiénes generan o reciben esos fondos (Jose & Miranda, 2019).

Para el presente trabajo, la construcción del SAAL en una vivienda se considera como una iniciativa centrada en satisfacer una necesidad social básica: el acceso al agua. Aunque los sistemas son construidos por los propietarios (privados), su propósito no radica en obtener beneficios económicos, sino en satisfacer dicha necesidad en un contexto donde el acceso a otras fuentes de abastecimiento es limitado. Por lo tanto, se considera inviable utilizar métodos de evaluación financiera, como el costo promedio ponderado de capital por sus siglas en inglés (CAPM) para determinar la tasa de descuento. En su lugar, se optó por utilizar un enfoque que reflejara de manera más precisa el objetivo del proyecto.

Se examinaron detalladamente las tasas de descuento utilizadas en los artículos científicos sobre el tema, identificando el contexto en el que se aplicaban y los criterios que tuvieron en cuenta para usarlos. Se observó que, en general, las tasas de descuento son más bajas en los países desarrollados, donde rondan entre el 3 y 4 % (Amos et al., 2016; Melville-Shreeve et al., 2014; Rahman et al., 2012). Mientras que, en los países en desarrollo pueden ser hasta del 12%, como lo encontrado en algunos países africanos (Amos et al., 2018; Islam et al., 2010; Ngigi, 2005a; Schürkmann et al., 2014). La elección de las tasas de descuento en estos estudios involucra parámetros económicos como el índice Precios del Consumidor (IPC), la inflación, investigaciones

de programas ambientales, comisiones nacionales de desarrollo, tasas de interés del mercado entre otras.

En el caso de Colombia, se revisaron trabajos de grado de pregrado y maestría, donde se encontró gran variedad en las tasas de descuento empleadas. Además, se analizó la Guía para la definición de la Tasa de Descuento emitida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2022), donde se reporta que, en las últimas décadas se ha utilizado una tasa del 12%. Sin embargo, teniendo en cuenta que las condiciones económicas del país han cambiado, un estudio reciente del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2022) actualizó la tasa al considerar la evolución del Producto Interno Bruto (PIB), inflación, desarrollo industrial y de servicios, entre otros indicadores. Como resultado de este análisis, la tasa social de descuento recomendada por el DNP para la evaluación socioeconómica de proyectos ambientales y de recursos naturales en Colombia con horizontes entre 6 y 25 años, como el presente caso es del 6.4%.

5.6.1 Relación costo- beneficio para el escenario 1

En el escenario 1, se quiere conocer el impacto de analizar en conjunto los SAAL con las actividades asociadas, incluido el costo evitado para el consumo doméstico. La Tabla 12 muestra la relación ACB encontrada para las tres alternativas en el escenario 1. Además, se incluyen otros indicadores económicos como (VAN) y (TIR) que permiten un análisis más detallado de las alternativas.

Tabla 12

Relación costo-beneficio y otros indicadores economicos para el escenario 1 en las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

	<i>Alt 1</i>	<i>Alt 2</i>	<i>Alt 3</i>
<i>ACB</i>	0.81	1.32	1,45
<i>VAN</i>	\$ -1'379,599.24	\$ 15'810,702.01	\$ 59'023,703.60
<i>TIR</i>	---	21.87%	47.90%

Los resultados obtenidos en la alternativa 1 son consistentes con los hallazgos de otros estudios realizados en áreas urbanas (Alim et al., 2020; Dallman et al., 2016b; Hajani & Rahman, 2014; Kim et al., 2016), donde se ha cuantificado únicamente el costo evitado en las tarifas de agua. En estos estudios, las relaciones obtenidas suelen ser inferiores a 1, ya que las bajas tarifas de los acueductos no permiten que se amorticen rápidamente los costos. Aunque en esta investigación se utilizó una tarifa que representa el valor real que paga la comunidad por las otras fuentes y que es casi el doble que las tarifas de los municipios cercanos, se obtienen beneficios mensuales cercanos a los 20 mil pesos. Con una relación ACB de 0.81 y (VAN) de -\$1,379,599.24, se concluye que la alternativa 1 no es económicamente viable durante el período de análisis del proyecto, necesitando más años para amortizar la inversión inicial y cubrir los costos de operación y mantenimiento.

Las alternativas que consideran los beneficios de las actividades productivas mostraron relaciones ACB superiores a 1. En el caso de la alternativa 2, se obtuvo una relación ACB de 1.32 y VAN de \$15,810,702.01. En esta alternativa, tener gallinas para consumo propio resultó en ahorros significativos para la familia al reducir la compra de huevos y carne. En cuanto al cultivo, su impacto en la relación costo-beneficio fue menor debido a la cantidad limitada de maíz que se puede cosechar en las dimensiones del terreno propuestas y su bajo valor de mercado.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

La alternativa 3 mostró la mejor relación ACB, con un valor de 1.45, y un VAN cercano a los 60 millones. Estos resultados sugieren que actividades como la venta de huevos y carne, con alto valor en el mercado, tienen un impacto positivo significativo en la economía de campesinos que se dedican a actividades de subsistencia.

5.6.2 Relación costo- beneficio para el escenario 2

En contraparte con el escenario 1, el escenario 2 busca identificar la viabilidad de los sistemas tomando en cuenta únicamente el costo evitado en uso doméstico y en las actividades productivas. La Tabla 13 muestra que los resultados no fueron alentadores.

Tabla 13

Relación costo beneficio para el escenario 2 en las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

	<i>Alt 1</i>	<i>Alt 2</i>	<i>Alt 3</i>
<i>ACB</i>	0.81	0.41	0.78
<i>VAN</i>	\$ -1'379,599.24	\$- 4'703,414.39	-\$ 1'755,903.58
<i>TIR</i>	---	---	----

Las tres alternativas mostraron relaciones costo-beneficio por debajo de uno, siendo la alternativa 2 la que obtuvo la relación más baja, con un valor de 0.41. Dado que este supuesto implica la disponibilidad de fuentes de agua alternativas para satisfacer las necesidades, no se tuvieron en cuenta los beneficios generados por las actividades productivas, sino los costos evitados por no comprar agua.

La alternativa 1 logró una relación de 0.81, mientras que la alternativa 3 obtuvo una relación menor de 0.78. La razón detrás de las relaciones más bajas en las alternativas productivas se debe en gran medida a que una parte significativa del agua se destina a estas actividades, lo que

reduce la disponibilidad de agua para los usos domésticos. Si se estableciera un costo por el consumo de agua proveniente del acueducto comunitario, se podrían mejorar las relaciones costo-beneficio, aunque es probable que se requiera aumentar el periodo de vida del proyecto para que alcancen a amortizarse cada uno de los costos involucrados.

El análisis de los 2 escenarios destaca el impacto que tiene la elección de criterios en el análisis económico. Los supuestos seleccionados por cada investigador pueden llevar a resultados divergentes, lo cual explica en gran medida las discrepancias que a menudo se encuentran en los resultados de la literatura (Gines de Rus, 2020).

5.6.3 Análisis de la relación costo beneficio bajo diferentes fuentes de financiación de la inversión inicial

Además de los escenarios previamente descritos, se evaluaron tres propuestas para financiar la inversión inicial del sistema, analizando su impacto en la relación costo-beneficio para el escenario 1, la cual arrojo los mejores indicadores económicos: i) la totalidad del sistema es financiado por recursos de los propietarios; ii) el sistema se financia a través de un crédito; y iii) el gobierno subsidiara la inversión inicial. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14

Resultados económicos de las diferentes fuentes de financiamiento para el escenario 1 para las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

<i>Financiación</i>	<i>Alt 1</i>		<i>Alt2</i>		<i>Alt 3</i>	
<i>Capital propio</i>	ACB: 0.8108	VAN: -\$ 1'379,599.24	ACB: 1.32	VAN \$ 15'810,702.01	ACB: 1.45	VAN: \$ 59'023,703.60
<i>Crédito</i>	ACB: 0.6750	VAN: -\$ 2'845,960.89	ACB: 1.28	VAN: \$ 14'233,598.78	ACB: 1.43	VAN: \$ 57'446,600.36
<i>Subsidiada</i>	ACB: 2.54	VAN: \$ 3'582,784.28	ACB: 1.49	VAN: \$ 21'147,851.35	ACB: 1.51	VAN: \$ 64'360,852.94

En zonas de alto estrés hídrico, como Garbanzal, es necesario promover la instalación de sistemas SAAL (Jin et al., 2023). Los resultados de la Tabla 14 muestran que, las entidades gubernamentales desempeñan un papel fundamental al respaldar y promover la implementación de estos sistemas, pues su participación puede marcar la diferencia en la expansión y adopción. En el estudio, se observó que las mejores relaciones costo-beneficio se obtuvieron cuando se aplicó un subsidio a la inversión inicial, este enfoque tuvo un impacto significativo en los resultados, como se evidencia en el caso de la alternativa 1, donde la relación costo-beneficio pasó de 0.81 a 2.54. Esto demuestra la importancia y el impacto positivo que tiene el subsidio en la viabilidad económica de los proyectos evaluados, resultados coincidentes con varios estudios en el área (Alim et al., 2020; Jin et al., 2023; Ngigi, 2005b).

En el escenario de financiamiento a través de crédito, la duración de los créditos establecida en 3 años resulta en una reducción de las relaciones costo-beneficio, debido a los costos asociados al financiamiento. Pero igualmente las alternativas con actividades productivas siguen siendo viables.

El valor de implementar estos sistemas varía considerablemente dependiendo de la situación de cada individuo o comunidad. En una ciudad o zonas rurales donde aún no existen restricciones de agua, el impacto de estos sistemas puede no ser tan evidente como en una comunidad rural que carece de opciones para abastecerse adecuadamente. En áreas donde el suministro de agua puede ser más accesible y abundante, la implementación de SAAL puede ser vista como una medida preventiva o de mejora a largo plazo. Con el escenario 2 se buscaba evaluar justamente esta situación donde el adoptante aún puede elegir entre varias opciones de suministro, por lo cual en este caso se consideraron únicamente los costos ahorrados, y en donde casi siempre se obtenían relaciones ACB poco alentadoras. El escenario 1 se presenta, enmarcado en un

contexto de mayor carencia, donde el tener agua adicional, se ve como una oportunidad para diversificar sus actividades.

La viabilidad de los SAAL es altamente influenciada por el nivel de las precipitaciones en el lugar de implementación. Cuanto mayor sea la cantidad de lluvia, más agua podrá captarse y utilizarse de manera más eficiente en las distintas actividades que lo requieran, aumentando considerablemente los beneficios (Rahman et al., 2012).

5.6.4 Costo de oportunidad

Se analizó la influencia de otra tasa de descuento, en este caso una tasa que refleje el costo de oportunidad que tiene el propietario al elegir entre realizar el sistema o ingresar su dinero a un certificado de depósito a término (CDT 360 días), cuya tasa seleccionada fue de 8.74 EA, usando los datos históricos suministrados por el banco de la república para los años comprendidos entre 2015 y 2022. El análisis se hizo para el escenario 1 ya que este arroja mejores relaciones costo-beneficio y se buscaba determinar la viabilidad de las tres alternativas al trabajar con esta tasa. La Tabla 15 muestra los resultados de la relación costo-beneficio.

Tabla 15

Relación costo-beneficio para tasa CDT 360 días para el escenario 1 en las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
0.6694	1.28	1.43

Como se puede observar en la tabla, al ser mayor la tasa de descuento la relación decreció en cada una de las alternativas, pero aun con este incremento las alternativas con actividades productivas siguen siendo favorables, y se pueden implementar los sistemas.

5.6.5 Análisis de sensibilidad

Se encontró que ninguna distribución paramétrica de uso en este software (Minitab) era adecuada debido al alta variabilidad experimentada por la inflación en el período analizado. Por lo tanto, se utilizó un rango de sensibilidad de 3.5 a 9%, en concordancia con lo encontrado en otras investigaciones (Amos et al., 2016; Jin et al., 2023). El intervalo de sensibilidad con el que se trabajó para la tasa de descuento fue de 3.5 a 9.5% según recomendaciones del DNP (DNP, 2022).

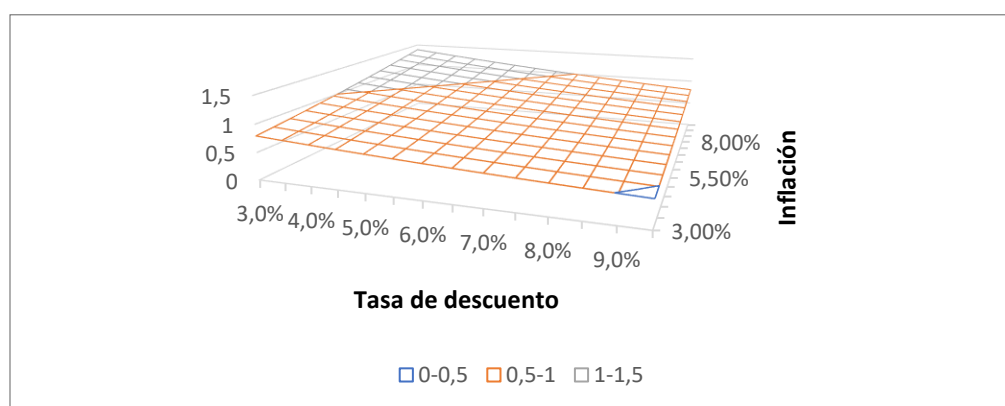
En concordancia con la literatura (Birol et al., 2006; Hajani & Rahman, 2014b; Jin et al., 2023), se encontró que a medida que la tasa de descuento disminuye, la relación costo-beneficio tiende a aumentar. En el caso de la alternativa 1, se identificó un punto de inflexión aproximadamente alrededor del 4% de tasa de descuento, a partir del cual la implementación del sistema deja de ser factible. A medida que la tasa de descuento aumenta, la viabilidad de la alternativa disminuye, llegando a una relación costo-beneficio de 0.63 para una tasa de descuento del 9.5%. En cuanto a las otras dos alternativas, debido al impacto positivo de las actividades productivas, lograron mantener relaciones costo-beneficio positivas en todo el rango propuesto.

Al analizar conjuntamente el comportamiento de la inflación y la tasa de descuento en función a la relación costo-beneficio, se observó una tendencia en la cual se encontraron relaciones más significativas cuando la tasa de descuento era menor y la inflación mayor tal como lo encontrado en otros estudios (Jin et al., 2023; Liang & Van Dijk, 2011). La Figura 30 muestra que a mayor tasa de inflación y menor tasa de descuento se encuentran las mejores relaciones. En el análisis costo beneficio se necesita precaución al determinar la inflación y las tasas de descuento.

Otorgar una tasa de descuento alta puede conducir a menor valoración de los activos ambientales y pérdida de la equidad intergeneracional. Por otro lado, la tendencia conservadora de aplicar bajas tasas de descuento a proyectos a largo plazo refleja incertidumbre sobre el futuro (Jing et al., 2017a).

Figura 30

Comportamiento de la relación costo beneficio en función de la tasa de descuento y la inflación para la alternativa 1



Nota: Se observa cómo se comporta la relación costo beneficios, cuando se varían las dos tasas en conjunto

6. Conclusiones

La vereda Garbanzal en Santander ha adoptado el uso generalizado de Sistemas de Aprovechamiento de Agua de Lluvia (SAAL) como principal fuente de abastecimiento de agua para fines domésticos y productivos. Estos sistemas han sido implementados empíricamente por los habitantes, por lo que son susceptibles de mejora, desde el punto de visto técnico. Por lo tanto, considerando el contexto y las necesidades de agua para fines domésticos y productivos, se

propusieron tres alternativas de sistemas mejorados para la vereda, con su respectiva evaluación económica.

La evaluación económica, a través del análisis costo-beneficio, abordó dos escenarios de análisis para identificar el impacto de los supuestos en los resultados, escenario 1 con mayor estrés hídrico y escenario 2 con disponibilidad de otras fuentes para suplir las necesidades.

En el escenario 1, los beneficios considerados fueron el costo evitado por la tarifa para consumo doméstico, y los beneficios de las actividades productivas fruto de una mayor disponibilidad de agua otorgada por el SAAL. Las alternativas que permitían el desarrollo de actividades productivas obtuvieron relaciones costo beneficio por encima de 1, debido a la cuantificación de ganancias adicionales que el SAAL aportó a la economía familiar.

En el escenario 2, donde se consideró que había acceso al agua a través de diversas fuentes, el beneficio analizado fue el costo evitado en la tarifa tanto para consumo doméstico como para las actividades productivas. En este caso, los SAAL fueron no viables económicamente debido a las bajas tarifas pagadas para acceder a las otras fuentes. Esto ocasiona que la inversión inicial junto con los costos continuos asociados a los SAAL no se amortice rápidamente.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar no solo los beneficios directos del consumo doméstico, sino también los beneficios indirectos y económicos de las actividades productivas impulsadas por una mayor disponibilidad de agua. En este caso, bajo las características de diseño propuestas en las alternativas, el comportamiento de las precipitaciones de la región y la

elección de parámetros económicos, los resultados respaldan la viabilidad económica de SAAL en zonas afectadas por sequías y estrés hídrico, ya que demuestran que los beneficios superan los costos asociados, pero se destaca, desde el punto de vista económico, la importancia de que el agua disponible para fines productivos sea usada, preferiblemente, en actividades de alto valor comercial.

Se corroboró el impacto de los supuestos y la elección de parámetros importantes en el ACB como la tasa de descuento, la vida útil del proyecto y la inflación. El análisis de sensibilidad mostró que las tasas de descuento más bajas y tasas de inflación más altas generan mejores relaciones costo beneficio. No obstante, es imprescindible realizar la correcta elección de estas tasas, acorde con los objetivos del proyecto. No existe una metodología claramente definida para elegir estos parámetros, lo que a menudo implica subjetividad del investigador. Esta subjetividad puede conducir a relaciones costo-beneficio contradictorias.

Al capitalizar los sistemas con crédito, se incurre en costos de financiamiento que pueden afectar la viabilidad del sistema, dependiendo de la tasa de interés pactada. Los sistemas en donde se subsidia la inversión inicial mejoran significativamente las relaciones costo beneficio debido a que los costos de mantenimiento y operación tienden a ser bajos. Esto podría ser una estrategia efectiva para mejorar la calidad de vida de muchas personas en ambientes rurales áridos.

En el contexto del caso de estudio, el escenario con mejor relación costo beneficio fue el sistema con inversión inicial subsidiada por el gobierno, con uso de agua para actividades

domésticas y productivas de alto valor (alternativa 3), en donde se tienen gallinas que demandan poca agua y generan mejor rentabilidad en comparación con el cultivo de maíz.

En conclusión, un precio del agua más alto, la tasa de descuento más bajas, las precipitaciones más altas, el acceso a crédito o subsidios y el tamaño adecuado de los tanques en relación con el perfil de la demanda contribuyen a que los SAAL sean económicamente más favorables. Además, si se pudieran cuantificar los numerosos beneficios secundarios que se han mencionado, la relación costo beneficio sería mucho más alta en todos los casos.

7. Recomendaciones

La herramienta de análisis costo beneficio tiene un amplio espectro de uso, en otros estudios se aplicó el ACB para comparar alternativas de diseño completamente diferentes, que incluían diferencias en capacidades de almacenamiento, demandas de agua, materiales utilizados, entre otros aspectos. Comparar diferentes diseños sería muy conveniente para encontrar el que mejor se ajuste a las necesidades de la comunidad.

Además de los beneficios más considerados en la literatura, se podrían considerar otros beneficios secundarios que aportarían significativamente al resultado de la relación. La dificultad radica en encontrar un método que permita cuantificar de manera óptima estos beneficios.

Implementar actividades productivas de mayor valor en el mercado, con el fin de evidenciar como mejora la viabilidad de estos sistemas.

Implementar un método de proyección de las precipitaciones, para el periodo de vida del proyecto que permita tener en cuenta las variaciones del clima por el cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- Abdulla, F. (2020a). Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17(5), 446–456. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648530>
- Abdulla, F. (2020b). Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17(5), 446–456. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648530>
- Aladenola, O. O., & Adeboye, O. B. (2010). Assessing the potential for rainwater harvesting. *Water Resources Management*, 24(10), 2129–2137. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y>
- Alim, M. A. M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M. M. M., & Shirin, S. (2020). Feasibility analysis of a small-scale rainwater harvesting system for drinking water production at Werrington, New South Wales, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122437>
- Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (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. In *Water (Switzerland)* (Vol. 8, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w8040149>
- Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2018). Economic analysis of rainwater harvesting systems comparing developing and developed countries: A case study of

- Australia and Kenya. *Journal of Cleaner Production*, 172, 196–207.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.114>
- ANLA. (2018). *Guía para la inclusión del Análisis Costo Beneficio en la matriz multicriterio para selección de la alternativa en el Diagnostico Ambiental de Alternativas*.
- Arnau, & Sala. (2020). La revisión de la literatura científica: Pautas, procedimientos y criterios de calidad. *Universidad Autónoma de Barcelona*, 1–22. Scielo
- Banco de la república. (30 de mayo 2023). Serie inflación total . Sitio web del Banco de la República. <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>
- Banco mundial. (6 de mayo 2022). Cambio climático. Sitio web del Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/climatechange/overview#:~:text=Seg%C3%BAn%20estudios%20m%C3%A1s%20recientes%20del,intensific%C3%A1ndose%20a%20partir%20de%20entonces.>
- Briceño, C., & Chaparro, D. (2022). *ANÁLISIS DE LA ACEPTACIÓN SOCIAL DE LOS SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN LA ZONA RURAL DE LOS SANTOS, SANTANDER (1)*.
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2016a). The Value of Rain: Benefit-Cost Analysis of Rainwater Harvesting Systems. *Water Resources Management*, 30(12), 4415–4428. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1429-0>
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2016b). The Value of Rain: Benefit-Cost Analysis of Rainwater Harvesting Systems. *Water Resources Management*, 30(12), 4415–4428. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1429-0>
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2017). Erratum to: The Value of Rain: Benefit-Cost Analysis of Rainwater Harvesting Systems (Water Resources

- Management, (2016), 30, 12, (4415-4428), 10.1007/s11269-016-1429-0). *Water Resources Management*, 31(13), 4373–4374. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1798-z>
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2021). Is Rainwater Harvesting Worthwhile? A Benefit-Cost Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001361](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001361)
- DataRepublica. (28 de enero 2022). Reporte cobertura de agua en Colombia. Sitio web de DataRepublica. <https://datarepublica.org/>
- Deora, S., & Nanore, G. (2019). Socio economic impacts of Doha Model water harvesting structures in Jalna, Maharashtra. *Agricultural Water Management*, 221, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.007>
- DNP. (2022). *Justificación técnica - Tasa social de descuento*.
- Durodola, O. S., Bwambale, J., & Nabunya, V. (2020). Using every drop: Rainwater harvesting for food security in Mbale, Uganda. *Water Practice and Technology*, 15(2), 295–310. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.019>
- Estupiñan y Zapata. (2010). *Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá*.
- Florez. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE LA COBERTURA Y ABASTECIMIENTO DEL SERVICIO PÚBLICO DE AGUA*.
- Gines de Rus. (2020). *ANÁLISIS COSTO BENEFICIO 2021*.
- Gobernación de Boyacá. (2022). *GOBERNACIÓN DE BOYACÁ SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA PÚBLICA DE BOYACÁ LISTA OFICIAL DE PRECIOS*

UNITARIOS FIJOS PARA CONTRATISTAS CON TARJETA PROFESIONAL (NO INCLUYE AIU) LISTADO RESUMIDO DE ACTIVIDADES POR SUBCAPITULO.

- Hajani, E., & Rahman, A. (2014). Reliability and cost analysis of a rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater Sydney, Australia. *Water (Switzerland)*, 6(4), 945–960. <https://doi.org/10.3390/w6040945>
- Hatibu, N., Mutabazi, K., Senkondo, E. M., & Msangi, A. S. K. (2006). Economics of rainwater harvesting for crop enterprises in semi-arid areas of East Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1-3 SPEC. ISS.), 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.005>
- Id, S. R. G., & Johnston, J. M. (2019). *Journal.Pone.0216452.Pdf*. 1–23. <https://doi.org/10.23719/1500900>
- Ideam. (2021). Cambio climatico. Sitio web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>
- Islam, M. M., Chou, F. N. F., & Kabir, M. R. (2011). Feasibility and acceptability study of rainwater use to the acute water shortage areas in Dhaka City, Bangladesh. *Natural Hazards*, 56(1), 93–111. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9551-4>
- Islam, M. M., Chou, F. N.-F., & Kabir, M. R. (2010). Acceptability of the rainwater harvesting system to the slum dwellers of Dhaka City. *Water Science and Technology*, 61(6), 1515–1523. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.049>
- Jin, Y., Lee, S., Kang, T., Park, J., & Kim, Y. (2023). Capacity Optimization of Rainwater Harvesting Systems Based on a Cost–Benefit Analysis: A Financial Support Program

- Review and Parametric Sensitivity Analysis. *Water (Switzerland)*, 15(1).
<https://doi.org/10.3390/w15010186>
- Jing, X., Zhang, S., Zhang, J., Wang, Y., & Wang, Y. (2017a). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 126(March), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>
- Jing, X., Zhang, S., Zhang, J., Wang, Y., & Wang, Y. (2017b). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>
- Jose, J., & Miranda, M. (n.d.). *GESTION DE PROYECTOS IDENTIFICACION-FORMULACION EVALUACIÓN FINANCIERA-ECONÓMICA-SOCIAL-AMBIENTAL*.
- Khastagir, A., & Jayasuriya, N. (2011). Investment Evaluation of Rainwater Tanks. *Water Resources Management*, 25(14), 3769–3784. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9883-1>
- Kim, H. W., Li, M.-H., Kim, H., & Lee, H. K. (2016). Cost-benefit analysis and equitable cost allocation for a residential rainwater harvesting system in the city of Austin, Texas. *International Journal of Water Resources Development*, 32(5), 749–764. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1073142>
- Kitchenham. (2004). Service function chaining across openstack and kubernetes domains. *Procedures for Performing Systematic Reviews Barbara Kitchenham*, 33. <https://doi.org/10.1145/3328905.3332505>

- Lara, I., & Franco, O. (2017). Analisis del costo-beneficio una herramienta de gestion. *Contribuciones a La Economía, 2017–02*.
- Liang, X., & van Dijk, M. P. (2011). Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing. *Resources, Conservation and Recycling, 55*(11), 1100–1108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.009>
- Liang, X., & Van Dijk, M. P. M. P. M. P. (2011). Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing. *Resources, Conservation and Recycling, 55*(11), 1100–1108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.009>
- Malik, R. P. S., Giordano, M., & Sharma, V. (2014a). Examining farm-level perceptions, costs, and benefits of small water harvesting structures in Dewas, Madhya Pradesh. *Agricultural Water Management, 131*, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.002>
- Malik, R. P. S., Giordano, M., & Sharma, V. (2014b). Examining farm-level perceptions, costs, and benefits of small water harvesting structures in Dewas, Madhya Pradesh. *Agricultural Water Management, 131*, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.002>
- Melville-Shreeve, P., Ward, S., & Butler, D. (2014). A preliminary sustainability assessment of innovative rainwater harvesting for residential properties in the UK. *Journal of Southeast University (English Edition), 30*(2), 135–142. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7985.2014.02.001>

- Moges, G., Hengsdijk, H., & Jansen, H. C. C. (2011). Review and quantitative assessment of ex situ household rainwater harvesting systems in Ethiopia. *Agricultural Water Management*, 98(8), 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.009>
- Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2012). Financial feasibility and environmental analysis of potential rainwater harvesting systems: A case study in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 69(2012), 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.014>
- Morales-Pinzón, T., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2015). Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*, 87(C), 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.021>
- Mwenge Kahinda, J. marc, Taigbenu, A. E., & Boroto, J. R. (2007). Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15–18), 1050–1057. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.007>
- Ngigi, S. N. (2005a). Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya. *Agricultural Water Management*, 73(1), 21–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.021>
- Ngigi, S. N. (2005b). Hydro-economic evaluation of rainwater harvesting and management technologies: Farmers' investment options and risks in semi-arid Laikipia district of Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(11-16 SPEC. ISS.), 772–782. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.020>
- ONU. (12 de abril 2022). Cambio climático. Sitio web de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

- ONU. (12 de abril 2022). Informe sobre la Brecha de Emisiones 2021. Sitio web de la ONU. <https://www.unep.org/es/resources/emissions-gap-report-2021>
- Philco. (2021). *UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL TESIS PRESENTADO POR.*
- Planeacion, municipal. (2005). *ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DOCUMENTO TECNICO LIBRO 2. DIAGNOSTICO.*
- Procuraduría. (8 de marzo 2022). Sitio web de la Procuraduría General de Colombia. <https://www.procuraduria.gov.co/portal/Publicaciones.page>
- Rahman, A., Keane, J., & Imteaz, M. A. (2012). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.002>
- Requejo. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL.*
- Rincón y Mendoza. (2016). *Evaluación de la viabilidad social, técnica y económica de la implementación de un sistema de recolección, tratamiento y aprovechamiento de aguas de lluvia y aguas grises en un proyecto de vivienda de interés social.*
- Rivera y Zaraza. (2016). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Schürkmann, A. K., Biewald, A., & Rolinski, S. (2014). A Global Approach to Estimating the Benefit-Cost Ratio of Water Supply Measures in the Agricultural Sector. In *The*

- Global Water System in the Anthropocene* (pp. 73–87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07548-8_6
- Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009a). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(13–16), 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.07.004>
- Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009b). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(13–16), 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.07.004>
- UPC. (2017). *Análisis y Gestión Ambiental*.
- Washdata. (12 de junio 2022). Reporte cobertura de agua en Colombia. Sitio web de Washdata. <https://washdata.org/data/household#!/table?geo0=country&geo1=COL>
- Zaraza y Peña. (2018). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Zingiro, A., Okello, J. J. J. J. J. J. J., & Guthiga, P. M. P. M. P. M. (2014). Assessment of adoption and impact of rainwater harvesting technologies on rural farm household income: the case of rainwater harvesting ponds in Rwanda. *Environment, Development and Sustainability*, 16(6), 1281–1298. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9527-8>

