

Pasantía en investigación apoyando el proyecto: Evaluación de la sostenibilidad de abastecimiento de aguas rurales colectivas en ecosistemas de páramo: caso de estudio

Berlín (Santander- Colombia)

Karen Melissa Hurtado Arciniegas

Trabajo de Grado para Optar el título de ingeniero civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

Ingeniera Sanitaria, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad Físico-mecánico

Escuela de Ingeniería civil

Bucaramanga

2018

### **Agradecimientos**

Le agradezco primero que todo a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por darme sabiduría y brindarme una vida llena de aprendizaje, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis padres por ser mi apoyo en todo momento, por los valores que me inculcaron desde pequeña, y por qué gracias a su sacrificio tuve la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser mí ejemplo a seguir.

A mi hermano por ser parte importante de mi vida, por sus consejos y sobre todo por su apoyo incondicional. A mi abuela por ser mi segunda figura maternal, por estar presente en mi vida y por su incondicional amor.

A mi mejor amigo, mi persona favorita y compañero de locuras, por llenar mi vida de risas, travesuras y amor cuando más lo he necesitado, por su paciencia y sobre todo por motivarme a seguir con mis metas. A mis padrinos por haberme apoyado en las buenas y en las malas y principalmente por sus consejos incondicionales.

Le agradezco a la profe Isabel, por la confianza, apoyo y dedicación que me brindó en el desarrollo de mi proyecto, por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y ser parte del grupo de investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) y mayormente por compartir sus conocimientos conmigo.

A mis amigos por haber hecho mi etapa universitaria la mejor experiencia de mi vida.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Metodología.....	15
2.1 Apoyo a las actividades de recolección de información y escritura de informes .....	15
2.2 Apoyo a la gestión administrativa de los proyectos en curso del grupo GPH .....	16
2.3 Revisión sistemática de literatura sobre análisis multi-criterio aplicado a la evaluación de acueductos rurales.....	16
3. Resultados .....	18
3.1 Apoyo a las actividades de recolección de información y escritura de informes .....	18
3.2 Apoyo a la gestión administrativa de los proyectos en curso del grupo GPH .....	19
3.3 Revisión de literatura sobre análisis multi-criterio aplicado en abastecimientos de acueductos rurales.....	20
3.3.1 Análisis multi-criterio.....	20
3.3.2 Origen y aplicación del análisis multi-criterio en el campo de los recursos hídricos .....	22
3.3.3 Aplicación del análisis multi-criterio en el abastecimiento de agua en zona rural	23
3.3.4 Criterios de sostenibilidad criterios y atributos de la sostenibilidad en sistemas de abastecimiento de agua rurales empleados en AMC .....	33

3.3.5 Métodos de asignación de pesos. ....	37
3.3.6 Método AHP .....	41
4. Conclusiones.....	54
Referencias bibliográficas .....	56

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Aspectos claves de los documentos seleccionados en la revisión sistemática de literatura .....	27
Tabla 2. Criterios y atributos .....	34
Tabla 3. Ventajas y Desventajas de los métodos de asignación de peso .....	39
Tabla 4. Valoración de los juicios y construcción de la matriz de comparación pareada .....	42
Tabla 5. Matriz de comparación por pares .....	45
Tabla 6. Consistencia en función del tamaño de la matriz .....	46
Tabla 7. Formación académica de los Expertos .....	47
Tabla 8. Matrices de comparación de pares de cada Experto .....	48
Tabla 9. Matriz de comparación por pares del Experto I .....	49
Tabla 10. Priorización de los Criterios .....	50
Tabla 11. Priorización Final de los atributos .....	52

### Lista de Figuras

Figura 1. Personas participando en el grupo de apoyo durante diferentes actividades ..	19
Figura 2. Resultados Revisión sistemática de Literatura .....	24
Figura 3. Número de artículos de análisis multi-criterio de acueductos rurales por año.	24
Figura 4. Tipos de sistemas de abastecimientos estudiados en el análisis multi-criterio	26
Figura 5. Métodos de asignación de pesos .....	37
Figura 6. Mapa Conceptual de la SLR .....	41
Figura 7. Etapas del Proceso AHP .....	42
Figura 8. Árbol de jerarquía .....	44
Figura 9. Distribución de pesos entre los criterios, de acuerdo a la valoración de cada experto.....	52
Figura 10. Intervalos individuales de los atributos modelados en Minitab.....	54

## RESUMEN

**TÍTULO:** PASANTÍA EN INVESTIGACIÓN APOYANDO EL PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ABASTECIMIENTO DE AGUAS RURALES COLECTIVAS EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO BERLÍN (SANTANDER- COLOMBIA). \*

**AUTOR:** KAREN MELISSA HURTADO ARCINIEGAS. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** MULTI-CRITERIO, SOSTENIBILIDAD, CRITERIOS, ATRIBUTOS, AHP

**DESCRIPCIÓN:** No se puede desconocer la relación existente entre el desarrollo de las comunidades y poblaciones rurales y su acceso al agua, ya sea para su consumo doméstico de quienes la habitan o para poder mantener sus propios cultivos para su subsistencia. Se debe reconocer que el desarrollo es un proceso que debe propiciar el progreso continuo del bienestar de las comunidades, así como el mejoramiento constante en la calidad de vida de quienes hacen parte de ellas. Sin embargo, estos sistemas presentan problemas técnicos, financieros y administrativos, que limitan su sostenibilidad. La investigación presentada en este documento describe los resultados de las actividades realizadas durante una pasantía en el Grupo de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), tales como: recolección de información, apoyo a la escritura de informes finales, y revisión de literatura sobre el Análisis Multi-Criterio (MCA), aplicado a la evaluación de sostenibilidad de acueductos rurales. En esta revisión de literatura se identificaron los orígenes del método, aplicaciones, criterios evaluados, y mecanismos para la asignación de pesos a los criterios, especialmente la metodología Analytical Hierarchy Process (AHP). Con la comprensión sobre las metodologías MCA y AHP se planteó un ejemplo de aplicación, con cinco expertos. Todas estas actividades permitieron familiarizarse con el uso de las metodologías, sus beneficios y limitaciones, de tal forma que pueda ser empleada en el futuro en situaciones prácticas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, PhD.

**ABSTRACT**

**TITLE:** RESEARCH INTERNSHIP SUPPORTING THE PROJECT: ASSESSMENT OF THE SUSTAINABILITY OF COLLECTIVE RURAL WATER SUPPLY IN PARALLEL ECOSYSTEMS: CASE STUDY BERLIN (SANTANDER- COLOMBIA).\*

**AUTHOR:** KAREN MELISSA HURTADO ARCINIEGAS. \*\*

**KEYWORDS:** MULTI-CRITERIA, SUSTAINABILITY, CRITERIA, ATTRIBUTES, AHP.

**DESCRIPTION:** We can not ignore the relationship between the development of communities and rural populations and their access to water, the sea for their internal consumption of those they inhabit or to be able to maintain their own crops for their subsistence. It must be recognized that development is a process that should promote the continuous progress of the wellbeing of the communities, as well as the constant improvement in the quality of life of those who are part of them. However, these systems present technical, financial and administrative problems that limit their sustainability. The research presented in this document describes the results of the activities carried out during an internship in the Water Resources and Environmental Sanitation Group (GPH) from Universidad Industrial de Santander (UIS), such as: gathering information, supporting the writing of final reports, and reviewing literature on Multi-Criteria Analysis (MCA), applied to the sustainability assessment of rural water supply systems. In this review, the origins of the method, applications, criteria evaluated, and mechanisms for assigning weights to the criteria, especially the Analytical Hierarchy Process (AHP) methodology were identified. With the understanding of the MCA and AHP methodologies an application example was developed, with five experts. All these activities allowed familiarizing with the methodologies, their benefits and limitations, so that they can be used in practical situations in the future.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, PhD.

### **Introducción**

Un sistema de abastecimiento de agua es aquel que recoge el agua desde la fuente de captación, que puede ser una naciente u ojo de agua; un pozo o un río y la lleva, a través de tuberías, a cada una de las viviendas o hacia una fuente de uso público (Internacional-Avina, 2012). La construcción de estos acueductos tiene un alto costo, principalmente cuando las condiciones del terreno son muy irregulares, las viviendas están muy dispersas o las fuentes de agua están muy lejos de la comunidad (Internacional-Avina, 2012).

El contar con un sistema de abastecimiento de agua es el sueño de muchas comunidades rurales en donde muchas veces tienen que caminar largas distancias para obtener el agua que necesitan para las labores domésticas y con frecuencia esa agua no cumple con los requisitos para el consumo humano (Internacional-Avina, 2012). Estas comunidades rurales necesitan una red extensa y costosa de pequeños sistemas de abastecimiento de agua, debido a su lejanía y baja densidad de población. Por lo tanto, en muchos casos, no es atractivo para empresas privadas proveer servicios a estas localidades (Gómez, 2014). No obstante, los sistemas de abastecimiento de agua en zonas rurales alrededor del mundo, especialmente aquellos en países en desarrollo, se caracterizan por el déficit en infraestructura, tecnología, y falta de información adecuada por parte de la comunidad para la toma de decisiones (Dickson, Schuster-Wallace, & Newton, 2016).

A nivel mundial, solo el 29% de la población de las zonas rurales tiene el acceso al líquido conducido por medio de tuberías, el 52% la obtienen de otras fuentes de agua como pozos, manantiales y nacimientos, y el 19% restante no tienen el líquido en condiciones aptas para consumo humano (Fernando, Agüero, Valle, Fernando, & Agüero, 2014). En estas comunidades, además de la falta de infraestructura, la baja

cobertura de agua apta para consumo humano se debe en parte a la implementación de alternativas insostenibles desde el punto de vista social, técnico, político, ambiental y económico (Fernando et al., 2014). El problema de estas comunidades no es sólo la calidad del agua; también es importante que la población tenga acceso a una cantidad mínima de agua potable al día. En promedio una persona debe consumir entre 1,5 y 2 litros de líquido al día dependiendo del peso, de lo contrario se pueden presentar algunos problemas de salud. Por esto es importante que el servicio de acueducto no sólo tenga una cobertura universal, sino que sea continuo (Unicef, 2006).

El agua es fundamental para el desarrollo sostenible y el crecimiento económico de una comunidad, el acceso a este servicio es considerado uno de los activos fundamentales para lograr resultados positivos en los medios de vida de las comunidades rurales (Garfi, Ferrer-Martí, Bonoli, & Tondelli, 2011), por esta razón la juventud juega un papel importante en lograr el uso sostenible, la gobernanza y el acceso universal a los recursos hídricos. Su formación e involucramiento en los temas relacionados con el agua ofrece oportunidades para compartir información con la familia, y proporciona un espacio único para un cambio cultural en las prácticas de gestión del agua dentro de la sociedad (De & Mundial, n.d.). Los jóvenes necesitarán conocimientos para comprender el estado de los recursos hídricos y para estimular un cambio conductual hacia una nueva cultura hídrica (De & Mundial, n.d.).

Por lo expuesto anteriormente, es necesario identificar las variables que determinan la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua rurales y determinar el comportamiento de estos indicadores en contextos específicos a nivel global (Garfi et al., 2011); que no solo se base en variables económicas, sino que se incorporen al análisis, aspectos ecológicos y socioculturales, que conforman los pilares de la

sustentabilidad. El Análisis Multi-Criterio (AMC) permite explicitar y ponderar los diversos puntos de vista de todos los grupos de interés actuantes, facilitando a los equipos técnicos multidisciplinarios a cargo del planeamiento, analizar las diferentes alternativas de estudios y proyectos desarrollo en diferentes escenarios (“UNIVERSITARIOS DE COSTOS Análisis multicriterio: una herramienta innovadora en la gestión sustentable de los recursos hídricos . Autor María de la Paz Moral ( Alumno de posgrado- Socio ),” 2016).

En este trabajo, se realiza una revisión de literatura a cerca del análisis multi-criterio aplicado a la evaluación de acueductos rurales, como un apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación, que permita integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de actores en un solo marco de análisis para dar una visión integral (Tobón, 2013). Con esta revisión, se apoyará al grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander en las actividades de recolección e información de datos y en la gestión administrativa del proyecto: “Evaluación de la sostenibilidad de abastecimiento de aguas rurales colectivas en ecosistemas de páramo: Caso de estudio Berlín (Santander-Colombia)”. El documento comprende cuatro capítulos, de los cuales el primero contiene los objetivos del estudio. El Capítulo 2 describe la metodología empleada para el estudio. El Capítulo 3 comprende las actividades realizadas durante la pasantía de investigación, en este capítulo también se sintetiza los resultados de la revisión de literatura sobre los aspectos en los que se basa la investigación: i) análisis multi-criterio, ii) origen y aplicación del análisis multi-criterio en el campo de recursos hídricos; iii) análisis multi-criterio aplicado en el campo de abastecimiento de agua rural; iv) criterios de sostenibilidad; v) métodos de asignación de pesos; vi) proceso de jerarquía analítica (AHP). El Capítulo 4 presenta las conclusiones obtenidas del estudio.

De esta manera la investigación presentada en este documento describe la metodología propuesta para el análisis multi-criterio sobre la evaluación de acueductos rurales, estudiando los criterios y atributos que afectan directamente la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua rural a nivel mundial. Para evaluar estos criterios se estudian los métodos que utilizan los diferentes expertos en los artículos consultados para estimar los pesos, con el fin de observar la importancia que tiene un criterio sobre otro.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Apoyar las actividades de investigación del grupo de recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH).

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Apoyar las actividades de recolección de información y escritura de informes para el proyecto de investigación: Evaluación de la sostenibilidad de abastecimiento de agua rurales colectivos en ecosistema de páramo: Caso de estudio Berlín (Santander-Colombia), que se encuentran en curso, en el grupo GPH.
- Apoyar la gestión administrativa de los proyectos en cursos en el grupo GPH.
- Revisión de literatura sobre análisis multi-criterio aplicado a la evaluación de acueductos rurales

## **2. Metodología**

Los métodos usados en la investigación para abordar los objetivos específicos propuestos se describen a continuación:

### **2.1 Apoyo a las actividades de recolección de información y escritura de informes**

Para la recolección de información fue necesario acompañar al grupo de investigación en las labores de campo, estas actividades incluyeron la recolección de muestras de agua, participar en reuniones con la comunidad y ayudar en la

organización de los informes finales del proyecto donde se integró toda la información obtenida durante la investigación realizada.

## **2.2 Apoyo a la gestión administrativa de los proyectos en curso del grupo GPH**

La gestión administrativa incluyó el apoyo a las actividades como: preparación de los documentos requeridos por Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad (VIE), y por la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), para la liquidación del proyecto.

## **2.3 Revisión sistemática de literatura sobre análisis multi-criterio aplicado a la evaluación de acueductos rurales**

Se realizó una revisión sistemática de literatura (SLR) con el fin de recolectar, organizar, evaluar y sintetizar la evidencia disponible respecto al uso de la metodología de análisis multi-criterio aplicado a la evaluación de acueductos rurales, con el fin de identificar la manera en que esta metodología es empleada en este tema. Esta revisión se desarrolló en varias etapas:

**2.3.1 Recolección de información.** La elaboración de la revisión de literatura consistió en tres grandes fases: i) investigación documental, ii) lectura y registro de la información, iii) elaboración de un texto escrito (Peña, 2010). Inicialmente se realizó una indagación de documentos con información acerca de AMC aplicado a evaluación de acueductos rurales a nivel global, esto con el fin de identificar si el tema de investigación ha sido previamente abordado, y así conocer qué criterios utilizaron para realizar los estudios. El acceso al material de búsqueda se hizo a través de las bases de datos de la UIS, tales como: *Scopus*, *ELSEVIER*, *Springer Link*, debido a que brindan una mayor cobertura, ya que se puede revisar referencias bibliográficas completas y

acceso al documento original, facilitando la selección de cada artículo. Para la revisión de literatura, las palabras claves utilizadas para la búsqueda fueron “multi-criteria”, “analysis”, “assessment”, “rural water supply” y “multi-attribute”; los criterios de inclusión se basaron en el estudio de criterios para la sostenibilidad y/o funcionamiento de acueductos rurales. En primer lugar, se realizó una combinación de palabras claves, por ejemplo, (multi-criteria AND Evaluation AND Water AND rural), se seleccionaron los documentos o artículos que tenían alguna relación con las combinaciones de palabras claves, seguidamente se observó que el título de los artículos concediera con el tema a estudiar, por último, se revisó el resumen de dicho documento seleccionado, para determinar si este era de interés para la investigación.

**2.3.2 Análisis.** Los documentos finalmente seleccionados fueron analizados como un todo; buscando responder las preguntas de la investigación:

- ¿Qué es el análisis multi-criterio?
- ¿Cuál es su origen?
- ¿En qué campos se ha aplicado?
- ¿Cuándo empezó a aplicarse en el área de recursos hídricos?
- ¿Cómo ha sido su aplicación al análisis de acueductos rurales?
- ¿Dónde se han realizado estos estudios?
- ¿En qué tipo de acueductos?
- ¿Qué resultados se han obtenido?
- ¿Qué criterios se han utilizado para el análisis?
- ¿Existe participación de la comunidad?
- ¿Cómo han definido los criterios de evaluación?

Se realizó la lectura y elaboración de registros escritos, con el fin de plasmar las ideas centrales de los textos consultados (Peña, 2010). Se tomó en cuenta para cada artículo seleccionado la siguiente información: título, autor, unidad de análisis, tipo de sistema de abastecimiento, métodos para asignar pesos, quién asigna los pesos; a partir de esta información, se procedió a tabular la información extraída para comparar los distintos criterios utilizados por cada autor para el análisis de cada investigación relacionada con el uso de AMC en la evaluación de acueductos rurales.

### **3. Resultados**

A continuación, se relacionan los resultados de las diferentes actividades asociadas a la pasantía:

#### **3.1 Apoyo a las actividades de recolección de información y escritura de informes**

Con ayuda del grupo GPH de la UIS, se realizaron salidas al Páramo de Berlín, sobre el kilómetro 54 en la vía Bucaramanga-Pamplona en la vereda El Progreso- Los Andes, con el fin de recolectar información acerca del suministro de agua en el área de estudio. Con ayuda de un líder de la comunidad, se conformó un equipo de trabajo compuesto por varias personas de la zona, estas personas que participaron constantemente en el desarrollo de la investigación estaban involucradas en diferentes actividades relacionadas con el acueducto.

En estas salidas técnicas se recolectó información específica del acueducto como los aspectos legales, financieros, la participación de la comunidad, entre otros. Las actividades correspondían a las estipuladas en el cronograma del proyecto para los meses de octubre y noviembre de 2017. Se brindó apoyo a los integrantes del grupo de investigación, en la recolección los datos más importantes para evaluar la sostenibilidad de abastecimiento del acueducto.

Para evaluar la sostenibilidad del acueducto del Páramo de Berlín, los integrantes del grupo GPH se basaron en los siguientes criterios: técnicos ambientales, sociales y económicos; estos criterios fueron claves para valorar la sostenibilidad en sistemas de abastecimiento de agua rurales. Como parte de la pasantía se participó en actividades de recolección de información como: entrevistas semi-estructuradas a líderes locales, grupos focales para construcción de la línea de tiempo de la comunidad, aforo y monitoreo a la calidad del agua en bocatoma, tanque de almacenamiento y vivienda más alejada del sistema y reuniones con la comunidad para la devolución, discusión y análisis de la información recopilada.



*Figura 1. Personas participando en el grupo de apoyo durante diferentes actividades*

### **3.2 Apoyo a la gestión administrativa de los proyectos en curso del grupo GPH**

Para esta actividad se realizaron visitas a la corporación autónoma para la defensa de la meseta de bucaramanga (CDBM) en el área de gestión del conocimiento ambiental, con el fin de adelantar trámites que permitieran el cierre del proyecto: “Evaluación de la

sostenibilidad de abastecimiento de aguas rurales colectivas en ecosistemas de páramo: Caso de estudio Berlín (Santander-Colombia)”, estos trámites se realizaban por medio de cartas, en las cuales se trataban temas correspondientes al avance general de la investigación.

Así mismo, se realizaron diferentes labores para el apoyo a la preparación de los informes finales presentados a la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y a la comunidad del caso de estudio.

Para la edición de estos informes fue necesario estudiar, y derivar la información más importante recolectada por los integrantes del grupo GPH, con el fin de establecer los parámetros que se necesitan para evaluar la sostenibilidad de abastecimiento del acueducto; también gracias al grupo de apoyo formado en la comunidad se logró plantear diferentes propuestas de mejorar para el acueducto que fueron plasmadas en los informes finales.

### **3.3 Revisión de literatura sobre análisis multi-criterio aplicado en abastecimientos de acueductos rurales**

A continuación, se sintetizan los resultados de la revisión de literatura sobre AMC aplicado a la evaluación de acueductos rurales, abordando los criterios y atributos que afectan directamente la sostenibilidad de estos sistemas.

**3.3.1 Análisis multi-criterio.** El enfoque de Análisis Multi-Criterio (AMC) se considera completo y apropiado para evaluar la sostenibilidad de los proyectos hídricos y analiza un conjunto similar de factores principales que afectan la sostenibilidad de proyectos de agua (Peter & Nkambule, 2012). Los métodos de evaluación multi-criterio provienen fundamentalmente del área de Investigación de Operaciones (I.O.). El AMC

compara alternativas, de manera cualitativa o cuantitativa (Galarza Molina, Torres, Fajardo, & Pérez muzuzu, 2011), incluyéndose entre las primeras variables monetarias y no monetarias, y entre las variables cualitativas, juicios de valor. Los resultados del análisis se expresan en términos cuantitativos (Aguilera, 2011). Existe una gran diversidad de términos para referirse al AMC como son: Soporte a la Decisión con Múltiples Objetivos (SDMO), Atributos Múltiples para la Toma de Decisiones (AMTD) y Análisis Multi-Criterio de Decisión (AMCD) (Galarza Molina et al., 2011). El AMC ha ganado credibilidad en el campo de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos debido a su capacidad para superar los límites humanos para combinar intuitivamente diferentes fuentes de información de una manera racional, sin requerir la estimación de los valores monetarios (Nnaji & Banigo, 2018).

En los modelos multi-criterio se busca optimizar un conjunto de funciones objetivo. Para ello, se deben tener en cuenta los siguientes pasos (Arancibia, Contreras, Mella, Torres, & Villablanca, 2005):

- Definir los criterios (objetivos intermedios), y sus respectivas restricciones (Arancibia et al., 2005).
- Definir tipos de variables: discretas o continuas (Arancibia et al., 2005).
- Moldear las preferencias. Existen básicamente dos alternativas: optimizar por separado para cada objetivo y luego agregar los subconjuntos de soluciones o asignar pesos a los distintos objetivos y encontrar una sola solución (Arancibia et al., 2005).
- Definir si se usan modelos determinísticos (sin incertidumbre) o aleatorios. En el último caso se aplica la teoría de preferencias sobre contingencias:

programación dinámica, simulación, análisis probabilístico (Arancibia et al., 2005).

- Si se opta por agregar objetivos se deben definir los métodos de agregación. Dentro de estos métodos están: método de "juicio de expertos", funciones de utilidad multi-atributadas: (transforman los múltiples criterios en uno sólo), factor analysis, escalamiento multidimensional, y analytic hierarchy process (AHP) (Arancibia et al., 2005).
- Se considera que la aplicación de métodos de AMC permite tener una más clara y lógica definición del problema a resolver y de sus alternativas y un ordenamiento de ellas en términos de preferencias, a partir de la inclusión de variables cuantitativas y cualitativas y de juicios de valor relevantes, de manera lógica y coherente con las prioridades de quien decide. (Aguilera, 2011).

**3.3.2 Origen y aplicación del análisis multi-criterio en el campo de los recursos hídricos.** El AMC tiene su origen en las ciencias económicas y la ingeniería industrial. Fue desarrollado en la década de los 60 y a partir de la segunda mitad de la década de 70 comenzó a experimentar un importante desarrollo, hasta convertirse en una herramienta científica. Los principios del AMC se derivan de: Teoría de Matrices, Teoría de Grafos, Teoría de las Organizaciones, Teoría de la Medida, Teoría de las Decisiones Colectivas, Investigación de Operaciones y de Economía (Muñoz & Romana, 2016).

El AMC ha sido implementado en el sector privado, para resolver problemas empresariales, como método relevante en el apoyo a la toma de decisiones. Posteriormente, se empezó a adaptar y aplicar para solucionar problemas ambientales, surgiendo de esta forma, una herramienta innovadora en la gestión de recursos naturales

en el sector público (“UNIVERSITARIOS DE COSTOS Análisis multicriterio : una herramienta innovadora en la gestión sustentable de los recursos hídricos . Autor María de la Paz Moral ( Alumno de posgrado- Socio ),” 2016). A partir de los 70s, diferentes investigadores adelantaron estudios de la AMC en el manejo de los recursos hídricos (Hajkowicz & Collins, 2007). En estos estudios se identificaron ocho tipos de aplicaciones AMC en la gestión de los recursos hídricos tales como (Hajkowicz & Collins, 2007):

- Gestión de la cuenca
- Gestión de aguas subterráneas
- Selección de infraestructura
- Evaluación de proyectos
- Asignación de agua
- Política de agua y planificación de suministro
- Gestión de la calidad del agua
- Manejo de áreas marinas protegidas.

Una de las razones para aplicar el AMC en el manejo de los recursos hídricos es que ayuda a garantizar que el análisis sea lógico y sólido, también se ha demostrado que mejora, la transparencia y el rigor analítico de las decisiones de gestión del agua (Hajkowicz & Collins, 2007). La aplicación de AMC en la gestión de los recursos hídricos es generalizada y está creciendo con una tasa de publicaciones anuales en constantemente aumento desde finales de los años ochenta y los noventa (Hajkowicz & Collins, 2007).

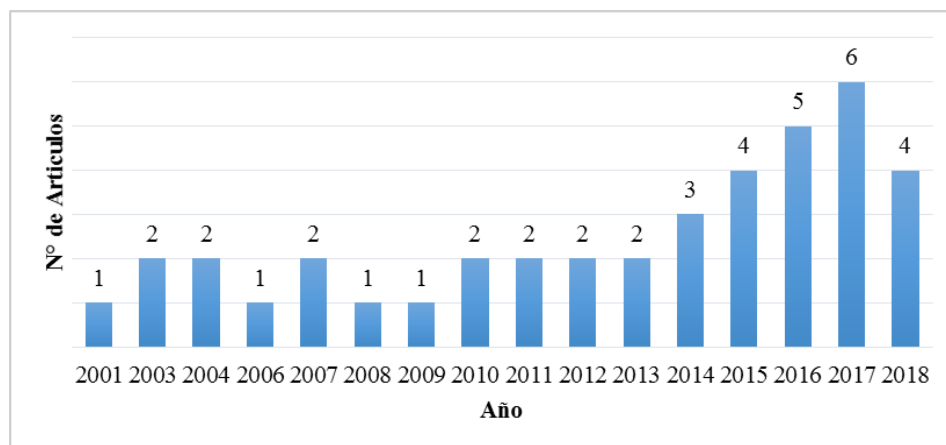
**3.3.3 Aplicación del análisis multi-criterio en el abastecimiento de agua en zona rural.** La Figura 1Figura 2; representa el resultado de la revisión de literatura sobre

AMC aplicado a la evaluación de acueductos rurales. En la mayoría de los casos estudiados se utilizó este método argumentando que es completo y apropiado para evaluar la sostenibilidad de los proyectos hídricos, al considerar un conjunto similar de factores principales que afectan la sostenibilidad de proyectos de agua (Peter & Nkambule, 2012).



*Figura 2. Resultados Revisión sistemática de Literatura*

Las estadísticas básicas iniciales muestran una pequeña parte de la cantidad de artículos publicados por año, con crecimiento en las publicaciones de AMC en acueductos rurales comenzando después de 2013, como se muestra en la Figura 3; algunos de los artículos consultados y excluidos de la revisión, incluían información sobre la importancia de la sostenibilidad de los acueductos rurales, pero no describían detalladamente los criterios que afectan la sostenibilidad y/o funcionamiento de las aguas rurales utilizando un enfoque de AMC.



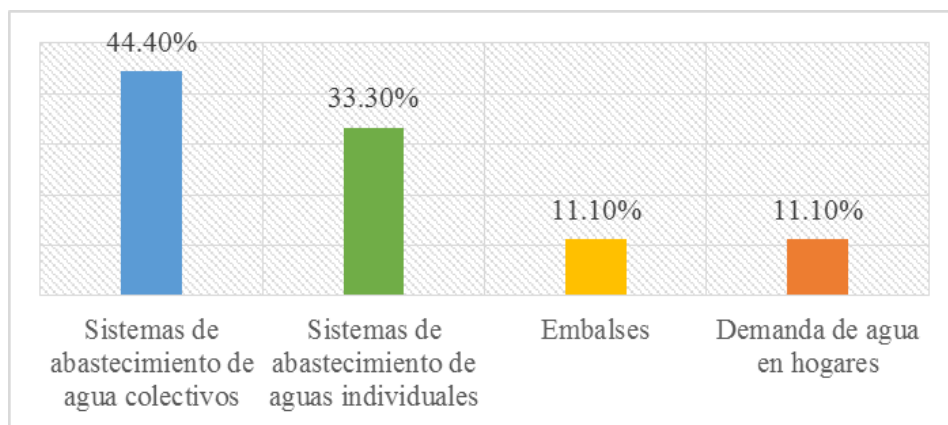
*Figura 3. Número de artículos de análisis multi-criterio de acueductos rurales por año.*

La gran mayoría de los documentos encontrados, corresponden a estudios en países en desarrollo especialmente en África subsahariana (Zimbabwe (Kativhu, Mazvimavi, Tevera, & Nhapi, 2016), Swazilandia (Peter & Nkambule, 2012), Senegal (Fatoumata, Bouchard, & Abi-Zeid, 2011), Uganda (Mutikanga, Sharma, & Vairavamoorthy, 2011)). El énfasis en estas zonas geográficas obedece a que en estos países se combinan el crecimiento rápido de la población, la sequía y la falta de medios económicos para la explotación de los recursos hídricos, donde la mayoría son regiones de bajo ingreso y no poseen acceso a fuentes de aguas confiables y seguras. Las personas que viven en estas zonas rurales y aquellas pertenecientes a grupos pobres o marginados tienen menos acceso a agua e instalaciones sanitarias mejoradas, y tienen menos probabilidad de disfrutar de agua potable en su hogar (Naciones Unidas, 2015). Los objetivos propuestos por los autores, en los artículos seleccionados incluyen:

- Evaluar sostenibilidad de sistemas (Kativhu et al., 2016), (Peter & Nkambule, 2012) .
- Seleccionar tecnologías para el suministro de agua (Santos, Pagsuyoin, & Latayan, 2016), (Pagsuyoin, Santos, Latayan, & Barajas, 2015).
- Priorizar las intervenciones de suministro de agua (Fatoumata et al., 2011).
- Planificación estratégica para la gestión de las pérdidas de agua (Mutikanga et al., 2011).

La similitud entre estos estudios es que la mayoría buscan evaluar la sostenibilidad, considerando una priorización de los criterios que influyen directamente en el funcionamiento de los abastecimientos rurales, determinando el comportamiento de estos indicadores en contextos específicos, con el fin de producir soluciones positivas en los medios de vida de las comunidades rurales.

En los estudios predomina la aplicación de MCA en los sistemas de abastecimiento de agua colectivos ((Kativhu et al., 2016), (Fatoumata et al., 2011), (Calizaya, Meixner, Bengtsson, & Berndtsson, 2010), (Nnaji & Banigo, 2018)) (44.4%); esto significa que evalúan la sostenibilidad de sistemas administrados en forma comunitaria (ver Figura 4) . Se encontró que en cada caso de estudio se tuvo en cuenta más de una aldea o municipio para evaluar la sostenibilidad. El beneficio de evaluar varios sistemas permite a los investigadores obtener diferencias o similitudes significativas entre sistemas con respecto a los resultados de sostenibilidad, y con esta información establecer criterios con mayor impacto o influencia sobre el funcionamiento de los abastecimientos rurales.



*Figura 4. Tipos de sistemas de abastecimientos estudiados en el análisis multi-criterio*

La Tabla 1, sintetiza los artículos que evalúan los criterios que afectan el funcionamiento de acueductos rurales en diferentes partes del mundo, el tipo de acueducto en donde se realizó el estudio, el lugar, el objetivo del análisis y los métodos utilizados para asignar los pesos a estos criterios y las personas que asignaron dichos pesos.

Tabla 1.

*Aspectos claves de los documentos seleccionados en la revisión sistemática de literatura*

TÍTULO	FECHA DE PUBLICACIÓN	PAIS	UNIDAD DE ANALISIS	TIPO DE SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	OBJETIVO DEL ANALISIS	CATEGORIAS DEFINIDAS	MÉTODO PARA ASIGNAR PESOS	QUIEN ASIGNA PESOS	REFERENCIA
Factores que influyen en la sostenibilidad de las instalaciones de agua de gestión comunitaria en las zonas rurales de Zimbabwe.	Agosto de 2017	Zimbabwe,	Tres provincias de Zimbabwe	Sistemas de abastecimiento de agua colectivos.	Analizar los factores que influyen en la sostenibilidad de las instalaciones de suministro de agua.	Cinco categorías: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Económicos, financieros</li> <li>• Sociales</li> <li>• Institucionales</li> <li>• Tecnológicos</li> <li>• Ambientales.</li> </ul>	Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)	4 expertos de campo	(Kativhu et al., 2016)
Un marco de análisis de decisión multicriterio para evaluar alternativas de tratamiento de agua en el POU	Junio de 2016	Filipinas	28 aldeas	Sistema de abastecimiento de aguas individuales.	Estructurar y aplicar varios criterios en la evaluación de alternativas de tratamiento de agua POU.	Cuatro categorías: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ambiental,</li> <li>• El desempeño tecnológico</li> <li>• Financiero</li> <li>• Social</li> </ul>	El proceso de jerarquía analítica (AHP)	Autores Pagsuyoin et al (3 autores).	(Santos et al., 2016)

TÍTULO	FECHA DE PUBLICACIÓN	PAIS	UNIDAD DE ANALISIS	TIPO DE SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	OBJETIVO DEL ANALISIS	CATEGORIAS DEFINIDAS	MÉTODO PARA ASIGNAR PESOS	QUIEN ASIGNA PESOS	REFERENCIA
Factores que afectan la sostenibilidad de los planes de agua rural en Swazilandia	Septiembre del 2012	Swazilandia	Región de Lubombo. e n 11 comunidades	Quince esquemas funcionales de agua para satisfacer las demandas de agua en los hogares.	Evaluar la sostenibilidad y establecer los factores precisos que afectan la sostenibilidad de los planes hídricos.	Cinco categorías: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Financiero</li> <li>• Social</li> <li>• Técnico</li> <li>• Ambiental</li> <li>• institucional.</li> </ul>	Cuestionarios, lista de verificación y una guía de discusión grupal específica.	Líderes de la comunidad un total de 174 cabezas de familia.	(Peter & Nkambule, 2012)
Análisis multicriterio para la priorización de intervenciones de suministro de agua rural en Senegal: caso de la región Diourbel	Abril de 2010	Senegal,	Ocho distritos (Babagaraje, Lambaye Ngoye, Ndoulo, Ndindy, Ndame, Kael y Taif)	Sistemas de abastecimiento de agua colectivos.	Proponer un enfoque estructurado para la toma de decisiones para priorizar las intervenciones de suministro de agua rural en Senegal.	Tres criterios: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La disponibilidad de agua</li> <li>• La aceptabilidad de los costos del agua</li> <li>• El potencial de desarrollo</li> </ul>	Entrevistas privadas	13 personas de las diferentes entidades. Actores de la gestión de recursos hídricos en Senegal.	(Fatoumata et al., 2011)

TÍTULO	FECHA DE PUBLICACIÓN	PAIS	UNIDAD DE ANALISIS	TIPO DE SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	OBJETIVO DEL ANALISIS	CATEGORIAS DEFINIDAS	MÉTODO PARA ASIGNAR PESOS	QUIEN ASIGNA PESOS	REFERENCIA
Análisis de decisión multicriterio: una herramienta de planificación estratégica para la gestión de pérdida de agua	Agosto del 2011	Uganda,	El estudio se realizó en 1 comunidad	Sistema de abastecimiento de aguas individuales.	Presentar un marco de identificación para la planificación estratégica de la gestión de la pérdida de agua.	Los criterios utilizados son: <ul style="list-style-type: none"> <li>•Económico-financieros</li> <li>•Ambientales</li> <li>•Salud pública</li> <li>• Técnica</li> <li>• social.</li> </ul>	Método PROMETH EE II	3 investigadores	(Mutikanga et al., 2011)
Un enfoque de toma de decisiones multiatributo para la selección del tratamiento del agua en el punto de uso	Diciembre del 2015	Filipinas	Comunidad dadas sus necesidades y limitaciones específicas.	Sistema de abastecimiento de aguas individuales.	Desarrollar y aplicar una metodología para priorizar las tecnologías de tratamiento de agua POU.	Cuatro categorías: <ul style="list-style-type: none"> <li>•Tecnológico</li> <li>•Sostenibilidad</li> <li>•Viabilidad económica</li> <li>•Aceptabilidad</li> </ul>	El proceso de jerarquía analítica (AHP)	4 autores Sheree A. Et al.	(Pagsuyoin et al., 2015)

TÍTULO	FECHA DE PUBLICACIÓN	PAIS	UNIDAD DE ANALISIS	TIPO DE SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	OBJETIVO DEL ANALISIS	CATEGORIAS DEFINIDAS	MÉTODO PARA ASIGNAR PESOS	QUIEN ASIGNA PESOS	REFERENCIA
Identificación de áreas prioritarias para el desarrollo de viviendas rurales utilizando los métodos participativos de valoración multicriterio y contingente en el área del embalse de Alange, Extremadura Central (España).	Febrero del 2016	España	Municipios rurales	Embalse de Alange (la franja rural-urbana de la provincia de Badajoz, España),	Identificar y comparar los diversos intereses de los participantes públicos mediante el análisis de un mapa de prioridad a través de una valoración de visibilidad	Los criterios utilizados son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecológico-naturales</li> <li>• Socioeconómicos</li> <li>• Físicos</li> </ul>	Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)	5 investigadores y expertos locales	(Jeong, García-Moruno, Hernández-Blanco, Sánchez-Ríos, & Ramírez-Gómez, 2017)

TÍTULO	FECHA DE PUBLICACIÓN	PAIS	UNIDAD DE ANALISIS	TIPO DE SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	OBJETIVO DEL ANALISIS	CATEGORIAS DEFINIDAS	MÉTODO PARA ASIGNAR PESOS	QUIEN ASIGNA PESOS	REFERENCIA
Análisis de decisión multicriterio (MCDA) para la gestión integrada de los recursos hídricos (IWRM) en la cuenca del lago Poopo, Bolivia	Marzo del 2009	Bolivia	La cuenca del lago Poopo.	Sistemas de abastecimiento de agua colectivos.	Desarrollar un análisis de decisión multi-criterio (MCDA) con el fin de apoyar a los interesados en la gestión de sus recursos hídricos.	Los criterios se clasifican en: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Económicos</li> <li>• Sociales</li> <li>• Ambientales</li> </ul>	Proceso de jerarquía analítica (AHP)	4 grupos de actores clave.	(Calizaya et al., 2010)

TÍTULO	FECHA DE PUBLICACIÓN	PAIS	UNIDAD DE ANALISIS	TIPO DE SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	OBJETIVO DEL ANALISIS	CATEGORIAS DEFINIDAS	MÉTODO PARA ASIGNAR PESOS	QUIEN ASIGNA PESOS	REFERENCIA
Evaluación multicriterio de fuentes para el suministro de agua doméstica de autoayuda	Diciembre del 2015	Jordania,	Evaluación de seis fuentes de agua	Sistemas de abastecimiento de agua Comunitarios	Servir de guía a los hogares para seleccionar fuentes o una combinación de fuentes para el suministro de agua doméstica.	Cinco criterios: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Económico-financieros</li> <li>• Ambientales</li> <li>• Salud pública,</li> <li>• Técnicos</li> <li>• Sociales</li> </ul>	Se empleó el método AHP	Expertos de la Universidad de Nigeria, Nsukka y la Universidad Estatal de Ciencia y Tecnología de Enugu.	(Nnaji & Banigo, 2018)

**3.3.4 Criterios de sostenibilidad criterios y atributos de la sostenibilidad en sistemas de abastecimiento de agua rurales empleados en AMC.** Durante la investigación de estos artículos, se evidencio que la mayoría de estos estudios se basan en reducir la proporción de personas sin acceso sostenible al agua potable, que es un gran desafío para el avance en muchos entornos rurales de países en desarrollo; para corroborar esta meta los investigadores se enfocaron más en garantizar la sostenibilidad del sistemas de suministro de agua, que en construir nuevas instalaciones (Kativhu et al., 2016). Hay diferentes puntos de vista sobre por qué los sistemas de suministro de agua no son sostenibles. Hay quienes consideran que proporcionar agua potable en las zonas rurales es un desafío importante porque no es fácil establecer arreglos institucionales que aseguren que las instalaciones se proporcionen, mantengan y gestionen de manera eficiente, equitativa y sostenible (Peter & Nkambule, 2012).

La sostenibilidad de los servicios de suministro de agua está influenciada por una serie de factores que se han discutido en numerosos discursos de servicios de suministro de agua rural (Kativhu et al., 2016); estos factores dependen de una multitud de variables interrelacionadas (Jeong et al., 2017). Con base en esta información se identifican que factores y atributos afectan la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua rural y según las características de la zona estudiada, se emplean diferentes criterios para hacer una evaluación y generar un diagnóstico de la situación. Es importante tener en cuenta que cada caso de estudio es único, algunos criterios de la sostenibilidad pueden tener más peso según el objetivo del análisis. Cabe resaltar que cada criterio o factores le corresponde una cantidad de subfactores o atributos que han sido evaluados por medio de distintos instrumentos de recolección de información, según cada uno de los artículos seleccionados.

Mediante la revisión de los artículos, fue posible identificar cinco factores de la sostenibilidad que se consideran en la mayoría de las evaluaciones realizadas aplicadas a casos de estudio específicos: financiero, técnicos, social, ambiental e institucional.

En la Tabla 2 representa estos criterios derivados de la literatura sobre el abastecimiento de agua rural, con los atributos más recurrentes de cada uno de los estudios, que afectan la sostenibilidad de los esquemas de agua rural.

Tabla 2.  
*Criterios y atributos*

<b>CRITERIOS</b>	<b>ATRIBUTOS</b>	<b>REFERENCIA</b>
<b>Financiero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecimiento de un fondo O &amp; M</li> <li>• Transparencia en el uso de fondos</li> </ul>	(Kativhu et al., 2016), (Peter & Nkambule, 2012), (Mutikanga et al., 2011), (Pagsuyoin et al., 2015)
<b>Técnicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condición física del sistema</li> <li>• Satisfacción de la demanda</li> <li>• Funcionamiento del punto de agua</li> </ul>	(Kativhu et al., 2016), (Peter & Nkambule, 2012), (Mutikanga et al., 2011), (Pagsuyoin et al., 2015)
<b>Social</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de la instalación de agua</li> <li>• Participación de la comunidad</li> <li>• Manejo de conflictos</li> </ul>	(Kativhu et al., 2016), (Peter & Nkambule, 2012), (Santos et al., 2016), (Mutikanga et al., 2011), (Jeong et al., 2017), (Pagsuyoin et al., 2015)
<b>Ambiental</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calidad de la Fuente</li> <li>• Potencial de contaminación</li> </ul>	(Kativhu et al., 2016), (Peter & Nkambule, 2012), (Jeong et al., 2017), (Mutikanga et al., 2011), (Pagsuyoin et al., 2015)
<b>Institucional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existencia de un comité de usuarios</li> <li>• Comité de O &amp; M</li> <li>• Disponibilidad de reglas</li> </ul>	(Kativhu et al., 2016), (Peter & Nkambule, 2012), (Fatoumata et al., 2011)

A continuación, se describen los factores y subfactores propuestos en los estudios analizados.

#### ***3.3.4.1 Criterio financiero:***

- Establecimiento de un fondo de Operación y Mantenimiento (O & M): la existencia de un fondo de O & M y la adecuación de las contribuciones financieras son fundamentales para la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua (Sun et al., 2016).
- Transparencia en el uso de fondos: el éxito de una organización radica en su liderazgo y en la confianza de la comunidad. La organización y sus dirigentes deben buscar diferentes alternativas para mantener informada a la comunidad y rendir cuentas de las acciones realizadas y la situación financiera (Tafara, 2013).

#### ***3.3.4.2 Criterio técnico:***

- Condición física del sistema: es la opción técnica, que permite el aprovisionamiento de agua para consumo humano y doméstico (Sun et al., 2016), también representa que toda la instalación de la tubería se encuentre en buen estado para cada conexión (Agua, n.d.)
- Satisfacción de la demanda: cubrir la necesidad básica del recurso hídrico a la comunidad (Pagsuyoin et al., 2015).

#### ***3.3.4.3 Criterio social:***

- Uso de la instalación de agua: para disponer de agua potable en las viviendas, la comunidad debe garantizar el uso correcto del recurso hídrico (Agua, n.d.).

- Participación de la comunidad: la participación tiene como objetivo aumentar el sentido de pertenencia sobre el suministro de agua dentro de los miembros de la comunidad (Sun et al., 2016).
- Manejo de conflictos: es fundamental que conozcan cómo resolver cualquier problema que se pueda presentar entre los miembros de la comunidad, esto permitirá mantener la armonía y así alcanzar todos objetivos (Sun et al., 2016).

#### ***3.3.4.4 Criterio ambiental***

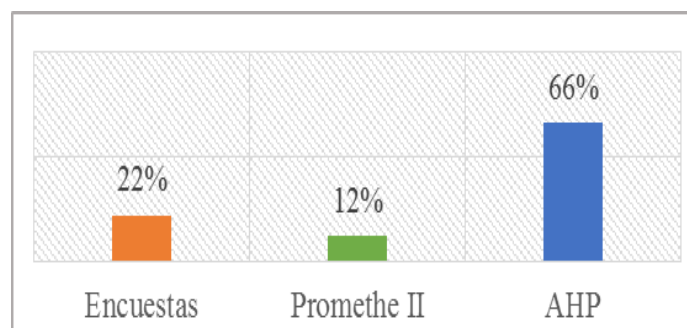
- Calidad de la Fuente: cumplimiento de los estándares de calidad de agua para consumo humano.
- Posibles fuentes de contaminación: potencial contaminación en la fuente, asociada a las actividades humanas que ocurren alrededor y aguas arriba de la zona de captación.

#### ***3.3.4.5 Criterio institucional***

- Existencia de un comité de usuarios: la existencia de los comités de usuarios funcionales atribuye la fiabilidad de sus puntos de agua a la funcionalidad y la participación de los miembros de la comunidad. Estos comités deben contar con los medios técnicos, las competencias financieras y de gestión y el apoyo a la sostenibilidad (Tafara, 2013), ya que en muchos de estos artículos enfatizan que la presencia de comités de usuarios es fundamental para influir en la sostenibilidad y mantener los sistemas de suministro de agua.
- Comité de O & M: son los encargados de coordinar las labores de mantenimiento preventivo y correctivo y ejecuta las labores de fontanería (Tafara, 2013).

- Disponibilidad de reglas: Deben existir reglas acorde a las condiciones locales, teniendo en cuenta el modo como se usará el recurso y cuál será su manejo; así mismo se deben implementar sanciones cuando no se cumpla con las reglas (Sun et al., 2016).

**3.3.5 Métodos de asignación de pesos.** Otro aspecto importante es la asignación de peso a los criterios; según el estudio realizado de cada uno de los artículos seleccionados, se evidencia que para determinar los pesos de los diferentes factores de sostenibilidad, el método más comúnmente usado fue el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), que usa estructuras jerárquicas para representar un problema y hace juicios basados en expertos para derivar escalas de prioridad (Toskano Hurtado & Gérard Bruno, 2000). De acuerdo a la información obtenida de la Figura 5, se evidencia que el 66% ((Kativhu et al., 2016), (Santos et al., 2016), (Pagsuyoin et al., 2015), (Jeong et al., 2017), (Calizaya et al., 2010), (Nnaji & Banigo, 2018)) de los artículos estudiados utilizan este método para realizar comparaciones de los diferentes factores en términos de cuán importantes son para influenciar la sostenibilidad. Cabe resaltar que también se mencionan otros métodos para la asignación de peso como lo son las encuestas y el método promethe ii.



*Figura 5. Métodos de asignación de pesos*

**3.3.5.1 Encuestas.** Las encuestas se pueden realizar sobre el total de la población o sobre una parte representativa de la misma (muestra) (Hernández M, Cantin, Lopez, & Rodriguez, 2012). La encuesta es una técnica de investigación multi-criterio que consiste en una interrogación verbal o escrita que se realiza a las personas con el fin de obtener determinada información necesaria para una investigación. Cuando la encuesta es verbal se suele hacer uso del método de la entrevista; y cuando la encuesta es escrita se suele hacer uso del instrumento del cuestionario, el cual consiste en un documento con un listado de preguntas, las cuales se hacen a las personas a encuestar (Hernández M et al., 2012). En el caso de AMC en los artículos revisados, este método para asignar peso se realizó de la siguiente manera: los datos se recopilaron mediante cuestionarios, lista de verificación y una guía de discusión grupal específica. Se encontró que el cuestionario (cara a cara) era una técnica apropiada debido a su capacidad para aumentar las tasas de respuesta, así como para recopilar datos completos (Peter & Nkambule, 2012).

**3.3.5.2 Método *promethee ii*.** El método *promethee ii* hace referencia a las siglas Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, y se incluye dentro de los métodos basados en relaciones de sobre clasificación (Ospina Blandón, 2012).

En los estudios revisados, *promethee ii* se aplicó para priorizar las opciones de reducción de la pérdida de agua en la ciudad de Kampala (Sun et al., 2016), donde las estrategias de reducción de pérdidas de clasificación en el orden de sus flujos netos decrecientes, usando comparaciones por parejas. Para el desarrollo de este método se requiere del software D-Sight que permite llevar a cabo análisis de sensibilidad (Sun et al., 2016).

**3.3.5.3 AHP.** El Método Analytic Hierarchy Process (AHP) se clasifica en el grupo de AMC Discreto y es capaz de emplear variables cualitativas y cuantitativas frente a múltiples objetivos. Fue desarrollado por Thomas L. Saaty a fines de la década de los 70 (Fontana, 2015).

El AHP es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad (Kativhu et al., 2016).

El AHP involucra todos los aspectos del proceso de toma de decisiones: Modela el problema a través de una estructura jerárquica, utiliza una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, de este modo combina la multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetiza los juicios emitidos y entrega un ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos (prioridades) (Arancibia et al., 2005).

La *Tabla 3* representa la comparación de los métodos de asignación de peso, describiendo sus ventajas y desventajas.

Tabla 3.  
*Ventajas y Desventajas de los métodos de asignación de peso*

MÉTODO	VENTAJA	DESVENTAJA
<b>Encuestas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo (Wallgren, 2011).</li> <li>• Cobertura casi total de la población (Wallgren, 2011).</li> <li>• Las encuestas contestan cuidadosamente a preguntas administrativas importantes (Wallgren, 2011).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad de los encuestadores de acceder a determinadas zonas, unido al elevado número de hogares vacíos durante gran parte del día (de Rada, 2012).</li> </ul>

---

**Método  
PROMETHE  
II**

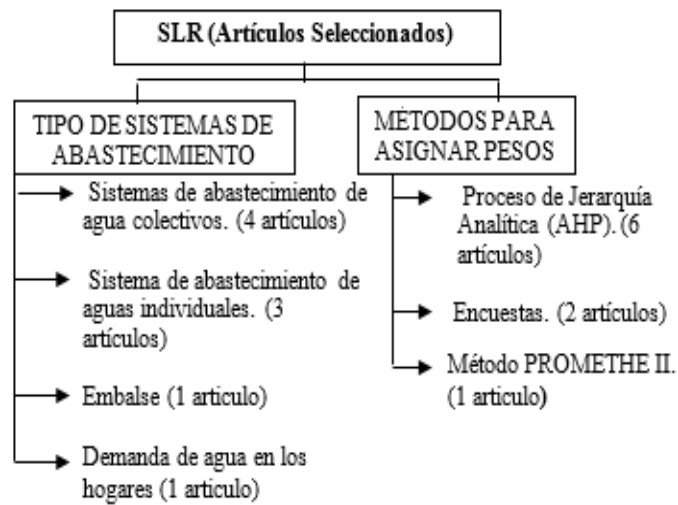
- Proporcionan una clara visión en la estructura del problema, modelan las preferencias del decisor de una manera realista e identifican dudas en la intensidad de las preferencias de los decisores (Fontana, 2015).
- No se utilizan para la selección real de alternativas, pero son adecuados para el proceso de selección inicial (Fontana, 2015).
- No provee la posibilidad de armar una estructura del problema (Tesis, 2010).
- No provee guías específicas para la determinación de los pesos de los criterios (Tesis, 2010).

---

**Proceso de  
Jerarquía  
Analítica  
(AHP)**

- El método se adapta bien a situaciones muy diversas y su cálculo es sencillo, consiste en la selección de alternativas, ya sean estrategias, inversiones o actuaciones, en función de una serie de variables o criterios (Ospina Blandón, 2012).
  - Los cálculos realizados por AHP siempre van guiados por la experiencia del usuario por lo que es una herramienta muy útil de transformar evaluaciones (tanto cualitativas como cuantitativas) en un ranking multi-criterio (Fontana, 2015).
  - Requiere mucho tiempo cuando el número de alternativas y / o criterios es grande (Fontana, 2015).
  - Presentan muchas complicaciones en el proceso de decisión, especialmente en relación con la evaluación de las probabilidades y la fijación de las ventajas asociadas a los criterios específicos (Fontana, 2015).
- 

La Figura 6, representa una breve recopilación de los datos más importantes mencionados anteriormente, en forma de mapa conceptual de la revisión de literatura realizada.



*Figura 6. Mapa Conceptual de la SLR*

En la siguiente sección, se explica en detalle el método AHP, por ser el más frecuentemente empleado en la asignación de los pesos en aplicación de AMC a evaluación de sistemas de abastecimiento de agua rural.

**3.3.6 Método AHP.** Este método usa estructuras jerárquicas para representar un problema y hace juicios basados en expertos para derivar escalas de prioridad (Kativhu et al., 2016).

El método consiste en formalizar la comprensión intuitiva de un problema multicriterio complejo, mediante la construcción de un modelo jerárquico, que le permite al agente decisor estructurar el problema en forma visual. El proceso analítico jerárquico tiene las etapas mostradas en la Figura 7.

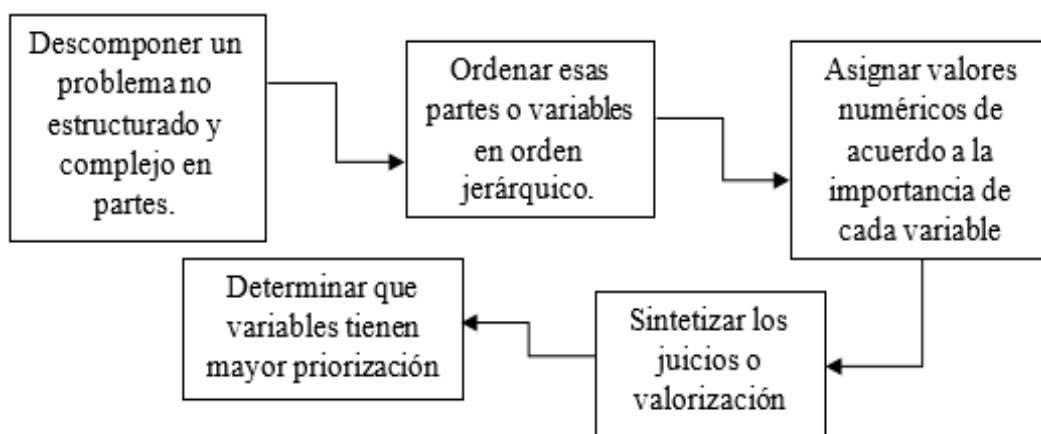


Figura 7. Etapas del Proceso AHP

El funcionamiento del AHP descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas involucradas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior de la cual desprende; para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9 (Toskano Hurtado & Gérard Bruno, 2000), como se muestra en la Tabla 4. En este caso se realiza una compararon de los diferentes factores en términos de cuán importantes son para influir en la sostenibilidad.

Tabla 4.

*Valoración de los juicios y construcción de la matriz de comparación pareada*

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	<b>Igual importancia</b>	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	<b>Importancia moderada</b> de un elemento sobre otro	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro
5	<b>Importancia fuerte</b> de un elemento sobre otro	un elemento es fuertemente favorecido
7	<b>Importancia muy fuerte</b> de un	un elemento es muy

	elemento sobre otro	dominante
9	<b>Extrema importancia</b> de un elemento sobre otro	un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia
2, 4, 6, 8	<b>Valores intermedios entre dos juicios adyacentes</b>	se usan como compromiso entre dos juicios
Incrementos 0, 1	<b>valores intermedios en incrementos</b>	utilización para graduación más fina de juicios

*Nota:* \* Valorización de los juicios estimado por Saaty. Adaptada de Toskano Hurtado and Gérard Bruno, “El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores,” pp. 47–68, 2000.

Este método se utiliza para resolver problemas en los cuales existe la necesidad de priorizar distintas opciones y posteriormente decidir cuál es la opción más conveniente. Es una herramienta de toma de decisiones multi-criterio, utilizada en problemas en los cuales necesitan evaluarse aspectos tanto cualitativos como cuantitativos. El AHP tiene en cuenta 4 axiomas (Saaty & Wiley, 2009):

- *Axioma 1:* referente a la condición de juicios recíprocos: La intensidad de preferencia de  $A_i/A_j$  es inversa a la preferencia de  $A_j/A_i$  (Ahp, 1990).
- *Axioma 2:* referente a la condición de homogeneidad de los elementos: Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud (Ahp, 1990).
- *Axioma 3:* referente a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente de reaprovechamiento (Ahp, 1990).
- *Axioma 4:* referente a condición de expectativas de orden de rango: Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas (Ahp, 1990).

A continuación, se plantea el procedimiento general de aplicación del método, de acuerdo con lo consultado en (GÓMEZ & CABRERA, 2008),(Fontana, 2015).

### 3.3.6.1 Procedimiento general.

- a) Definir los criterios en forma ordenada. Inicialmente se debe definir el objetivo principal del proceso, luego se concretan los niveles intermedios como los criterios y finalmente se describen los niveles más bajos como los atributos a ser comparados. Definidas las alternativas y definidos los criterios se construye el árbol de jerarquía. (ver Figura 8)

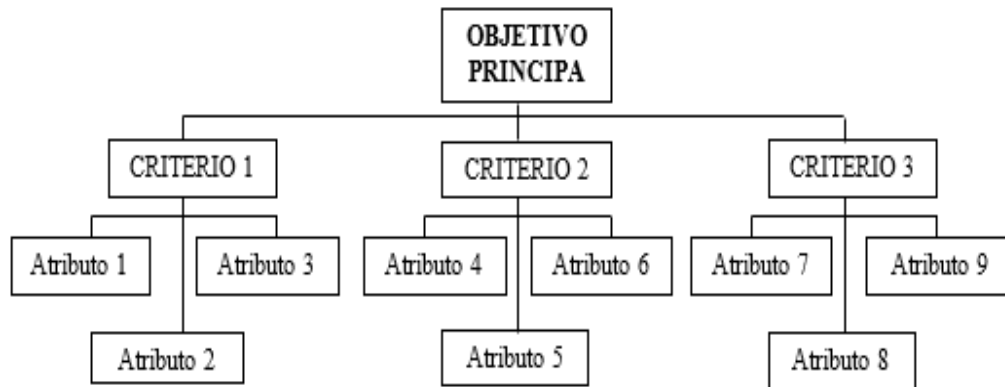


Figura 8. Árbol de jerarquía

- b) Evaluar los diferentes criterios y atributos en función de su importancia conveniente en cada nivel. Para evaluar estos criterios y atributos es necesario realizar una matriz de comparación por pares, donde el autor o experto solo se concentrará en dos criterios o atributos al tiempo y decide qué peso le corresponde a cada uno. Cabe resaltar que para este paso es necesario tener en cuenta los parámetros de la Tabla 4 para la asignación de los valores.

Tabla 5.

*Matriz de comparación por pares*

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>
<b>Criterio 1</b>	<b>1</b>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>
<b>Criterio 2</b>	1 / a <sub>12</sub>	<b>1</b>	a <sub>23</sub>
<b>Criterio 3</b>	1 / a <sub>13</sub>	1 / a <sub>23</sub>	<b>1</b>

*Nota:* \* Matriz de comparación por pares. Adaptada de J. C. O. GÓMEZ and J. P. O. CABRERA, "El Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp) Y La Toma De Decisiones Multicriterio. Ejemplo De Aplicación.," *Sci. Tech.*, vol. XIV, no. 39, pp. 247–252, 2008.

- c) Calcular el vector de priorización. Para este paso es necesario obtener la matriz normalizada, para esto se debe insertar una fila al final de la matriz de comparación de pares, esta fila tendrá como resultado la suma de cada columna. Seguidamente se calcularán los valores que le corresponden a la matriz normalizada, dividiendo cada componente de la matriz original por la suma que se encuentra en la última fila, y finalmente para obtener el vector de priorización se promediaran los valores de cada fila de la matriz normalizada, obteniendo el peso que le corresponde a cada criterio o atributo.
- d) El método AHP le permite a cada experto o autor revisar la consistencia de los juicios por medio del radio de consistencia (RC), de manera que exista consistencia cuando no se superan los porcentajes que aparecen en la Tabla 6, antes de evaluar el RC es necesario calcular el coeficiente de inconsistencia (CI) de una matriz  $n \times n$ , donde CI está definido por:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde  $\lambda_{max}$  corresponde a la suma total de los elementos que componen la matriz columna; esta matriz está formada por el producto entre la matriz original (Matriz de comparación por pares) y el vector de priorización. De esta forma el RC es definido por:

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

Donde RI es la consistencia aleatoria, que está función del rango de la matriz (n).

$$RI = 1.98 * \frac{n - 2}{n}$$

Los valores de RC se consideran aceptables si cumplen los parámetros consignados en la Tabla 6.

Tabla 6.  
*Consistencia en función del tamaño de la matriz*

<b>Tamaño de la matriz</b>	<b>Radio de consistencia</b>
3	5%
4	9%
5 o más	10%

*Nota:* \* Consistencia de los valores dados en la matriz de comparación por pares. Adaptada de M. J. Ospina Blandón, “Aplicación del modelo multicriterio metodologías AHP Y GP para la valoración económica de los activos ambientales = [Application of multicriteria model AHP and GP methodologies for the economic valuation of environmental assets],” p. 95, 2012.

- e) El AHP está diseñado como herramienta de modelización flexible y aceptable a las necesidades específicas de cualquier organización y permite, no sólo medir el grado de consistencia del experto al realizar comparaciones sino, también, conocer la estructura del problema por medio de una jerarquía

representativa (Ahp, 1990). A continuación, se plantea un ejemplo para ilustrar el proceso de aplicación del método.

**3.3.6.2 Aplicación del método AHP en la evaluación de atributos de sostenibilidad planteados en la revisión de literatura.** Con la información suministrada en la revisión de literatura en relación con los criterios y atributos de la sostenibilidad de sistemas de abastecimiento de aguas rurales, sintetizado en la Tabla 2 y explicado en la sección 3.3.4, se planteó un ejemplo de aplicación del método AHP, con el fin de comparar el punto de vista de cinco expertos (docentes del área de recursos hídricos de la escuela de ingeniería civil, de la Universidad Industrial de Santander), con conocimiento sobre sistemas de abastecimiento de agua rural. La Tabla 7 sintetiza la información sobre los expertos.

Tabla 7.

*Formación académica de los Expertos*

	<b>FORMACIÓN ACADEMICA</b>
<i>Experto I</i>	Ing. Sanitario-MSc. Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental-Doctorado en Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
<i>Experto II</i>	Ing. Sanitaria-Esp. Gerencia del medio ambiente-MSc. Aguas y Gestión Ambiental-Doc. En Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural.
<i>Experto III</i>	Ing. Civil-Ing. Sanitario-MSc. Informática.
<i>Experto IV</i>	Ing. Ambiental-MSc. en Desarrollo de Recursos de agua y tierra "Planificación y desarrollo de Recursos Hídricos".
<i>Experto V</i>	Ing. Civil-Esp. Ing. Ambiental-Master y Seguridad de explotación de Presas de Balsas-Exp. En Recursos Hídricos.

A partir de la revisión de literatura se procede a realizar matriz de comparación por pares, para la estimación de los valores de la matriz de comparación, se consultó la opinión de 5 expertos en el tema de abastecimientos de agua rurales,

con el fin de tener varios puntos de vista. Para este paso se tuvieron en cuenta los parámetros de la Tabla 4 estimados por Saaty, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8.

*Matrices de comparación de pares de cada Experto*

<b>EXPERTO 1</b>	<b>CRITERIOS</b>	<i>Financiero</i>	<i>Técnico</i>	<i>Social</i>	<i>Ambiental</i>	<i>Institucional</i>
	<i>Financiero</i>	<b>1</b>	3	1/3	3	1
	<i>Técnico</i>	1/3	<b>1</b>	1/3	3	1/3
	<i>Social</i>	3	3	<b>1</b>	3	3
	<i>Ambiental</i>	1/3	1/3	1/3	<b>1</b>	1/3
	<i>Institucional</i>	1	3	1/3	3	<b>1</b>

<b>EXPERTO 2</b>	<b>CRITERIOS</b>	<i>Financiero</i>	<i>Técnico</i>	<i>Social</i>	<i>Ambiental</i>	<i>Institucional</i>
	<i>Financiero</i>	<b>1</b>	3	1	1/3	1
	<i>Técnico</i>	1/3	<b>1</b>	1/3	1	1/3
	<i>Social</i>	1	3	<b>1</b>	1	1
	<i>Ambiental</i>	3	1	1	<b>1</b>	1
	<i>Institucional</i>	1	3	1	1	<b>1</b>

<b>EXPERTO 3</b>	<b>CRITERIOS</b>	<i>Financiero</i>	<i>Técnico</i>	<i>Social</i>	<i>Ambiental</i>	<i>Institucional</i>
	<i>Financiero</i>	<b>1</b>	1	1/3	1/3	1
	<i>Técnico</i>	1	<b>1</b>	1/3	1/3	1
	<i>Social</i>	3	3	<b>1</b>	1	3
	<i>Ambiental</i>	3	3	1	<b>1</b>	1
	<i>Institucional</i>	1	1	1/3	1	<b>1</b>

<b>EXPERTO 4</b>	<b>CRITERIOS</b>	<i>Financiero</i>	<i>Técnico</i>	<i>Social</i>	<i>Ambiental</i>	<i>Institucional</i>
	<i>Financiero</i>	<b>1</b>	2	1/2	1	1
	<i>Técnico</i>	½	<b>1</b>	1/3	1/3	1
	<i>Social</i>	2	3	<b>1</b>	1	1
	<i>Ambiental</i>	1	3	1	<b>1</b>	3
	<i>Institucional</i>	1	1	1	1/3	<b>1</b>

<b>EXPERTO 5</b>	<b>CRITERIOS</b>	<i>Financiero</i>	<i>Técnico</i>	<i>Social</i>	<i>Ambiental</i>	<i>Institucional</i>
	<i>Financiero</i>	<b>1</b>	2	1	1	2
	<i>Técnico</i>	½	<b>1</b>	1/2	1	1/2
	<i>Social</i>	1	2	<b>1</b>	1/2	1
	<i>Ambiental</i>	1	1	2	<b>1</b>	1
	<i>Institucional</i>	½	2	1	1	<b>1</b>

- *Vector de prioridad.* Para calcular el vector de priorización es necesario obtener inicialmente la matriz normalizada, para este paso se debe tener en cuenta la matriz de comparación de pares de cada experto. Se deben sumar cada columna y el resultado se refleja en la última fila incorporada. Luego se procede a calcular los elementos de la matriz normalizada, dividiendo cada componente de la matriz original por la suma que se encuentra en la última fila. Por último, se estima el vector de prioridades o peso, utilizando el promedio simple de cada fila, obteniendo el valor de los criterios respecto del objetivo global.
- *Radio de consistencia.* Para calcular el CR se debe realizar el producto de la matriz original por el vector de priorización calculado anteriormente, obteniendo una matriz columna. Se suman todos los elementos de esta matriz columna obteniendo  $\lambda_{Max}$ . Calculado  $\lambda_{Max}$  y teniendo en cuenta el número de variables utilizadas (n) en la matriz, se calcula el coeficiente de inconsistencia (CI), Seguidamente se calcula la consistencia aleatoria (RI) en función del rango de la matriz (n). Teniendo en cuenta estos resultados se calcula el radio de consistencia.

A continuación, se presenta un cálculo tipo, para el experto I.

Tabla 9.  
*Matriz de comparación por pares del Experto I*

CRITERIOS	<i>Financiero</i>	<i>Técnico</i>	<i>Social</i>	<i>Ambiental</i>	<i>Institucional</i>	<i>Matriz Normalizada</i>					<i>vector de priorización</i>	<i>matiz columna</i>
<i>Financiero</i>	<b>1</b>	3	1/3	3	1	0.18	0.29	0.14	0.23	0.18	0.20	1.12
<i>Técnico</i>	1/3	<b>1</b>	1/3	3	1/3	0.06	0.10	0.14	0.23	0.06	0.12	0.61
<i>Social</i>	3	3	<b>1</b>	3	3	0.53	0.29	0.43	0.23	0.53	0.40	2.20
<i>Ambiental</i>	1/3	1/3	1/3	<b>1</b>	1/3	0.06	0.03	0.14	0.08	0.06	0.07	0.38
<i>Institucional</i>	1	3	1/3	3	<b>1</b>	0.18	0.29	0.14	0.23	0.18	0.20	1.12
$\sum r_i$	<b>5.67</b>	<b>10.33</b>	<b>2.33</b> <b>3</b>	<b>13</b>	<b>5.67</b>							

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 3 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1 & 3 & 1/3 & 3 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.12 \\ 0.40 \\ 0.07 \\ 0.20 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.12 \\ 0.61 \\ 2.20 \\ 0.38 \\ 1.12 \end{pmatrix}$$

- $\lambda_{max} = \sum(1.12 + 0.61 + 2.2 + 0.38 + 1.12) = 5.42$
- $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5.42 - 5}{5 - 1} = 0.1175$
- $IR = 1.98 * \frac{n-2}{n} = 1.98 * \frac{5-2}{5} = 1.188$
- $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.1017}{1.188} = 0.085 \approx 8.5\% < 10\%$

Como el CR es menor al 10% se puede afirmar que se ha ponderado o priorizado correctamente, esto quiere decir que se ha completado de manera adecuada la matriz de comparación de parejas de puntos de referencia AHP. En la Tabla 10 se evidencia la priorización de los criterios y la consistencia de los datos según cada experto.

Tabla 10.

*Priorización de los Criterios*

EXPERTO	Radio de consistencia (RC)	VECTOR DE PRIORIZACIÓN	
1	9%	<i>Financiero</i>	0.20
		<i>Técnico</i>	0.12
		<i>Social</i>	0.40
		<i>Ambiental</i>	0.07
		<i>Institucional</i>	0.20
2	10%	<i>Financiero</i>	0.22
		<i>Técnico</i>	0.09
		<i>Social</i>	0.23
		<i>Ambiental</i>	0.26
		<i>Institucional</i>	0.20
3	8%	<i>Financiero</i>	0.10
		<i>Técnico</i>	0.11
		<i>Social</i>	0.37
		<i>Ambiental</i>	0.30
		<i>Institucional</i>	0.12

4	8%	<i>Financiero</i>	0.17
		<i>Técnico</i>	0.11
		<i>Social</i>	0.27
		<i>Ambiental</i>	0.3
		<i>Institucional</i>	0.16
5	6%	<i>Financiero</i>	0.23
		<i>Técnico</i>	0.11
		<i>Social</i>	0.29
		<i>Ambiental</i>	0.24
		<i>Institucional</i>	0.18

Con los datos obtenidos de cada uno de los expertos, se evidencia en la Figura 9 que de acuerdo a la formación académica, los expertos II y IV con valor del 26%, y el experto V con el 30%, coinciden en que el criterio más importante para evaluar la sostenibilidad de acueductos rurales es el criterio ambiental, mientras que para los expertos I con valores del 40% y el experto III con un 37%, concuerdan que el criterio más importante es el social.

Al unir los puntos de los valores de cada criterio se obtiene un polígono irregular que representa el perfil del conjunto en estudio de acuerdo a los criterios considerados; conforme a la gráfica radial (Figura 9), donde los valores muestran cambios con relación a un punto central, se evidencia que los expertos II, IV y V poseen semejantes polígonos, esto significa que el pensamiento de estos expertos con respecto a la distribución de pesos entre los criterios es similar.



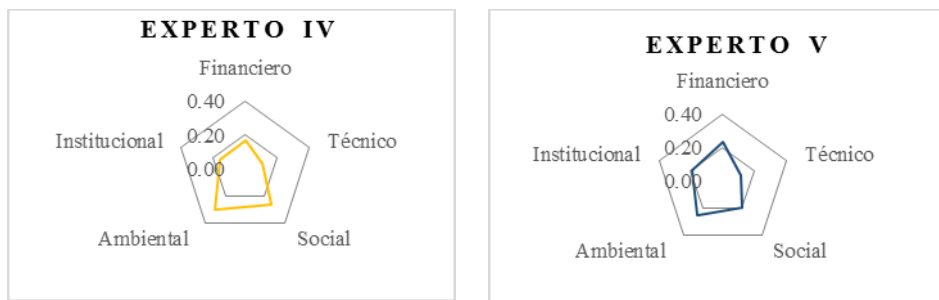


Figura 9. Distribución de pesos entre los criterios, de acuerdo con la valoración de cada experto

- *Asignación de valores numéricos del atributo.* Seguidamente se procede a realizar el mismo procedimiento, pero con todos los atributos para analizar cuál de ellos posee mayor importancia con respecto a los otros. Cabe resaltar que para realizar esta parte del procedimiento del método AHP, se consultó la opinión de estos cinco expertos que realizaron la asignación de peso a los criterios.
- *Resultado final.* En la Tabla 11 se evidencia los resultados de las matrices de comparación de pares. En donde cada columna representa la priorización final, que es el resultado del producto del vector de priorización de los criterios con los vectores de priorización de cada atributo. Se debe tener en cuenta, que para cada matriz se debe medir el radio de consistencia (RC) para comprobar la consistencia de las ponderaciones obtenidas, para esto se debe acceder a los parámetros de la Tabla 6.

Tabla 11.

*Priorización Final de los atributos*

		PRIORIZACIÓN FINAL				
		Experto I	Experto II	Experto III	Experto IV	Experto V
<b>FINANCIERO</b>	Establecimiento de un fondo O & M	0.05	0.16	0.03	0.13	0.02
	Transparencia en el uso de fondos	0.15	0.05	0.08	0.04	0.21
<b>TECNICO</b>	Condición física	0.06	0.02	0.09	0.03	0.06

	del sistema					
	Satisfacer la demanda	0.06	0.07	0.02	0.08	0.06
<b>SOCIAL</b>	Uso de la instalación de agua	0.04	0.03	0.23	0.03	0.02
	Participación de la comunidad	0.25	0.10	0.10	0.17	0.09
	Manejo de conflictos	0.10	0.10	0.04	0.07	0.09
<b>AMBIENTAL</b>	Calidad de la Fuente	0.04	0.20	0.05	0.15	0.23
	Posibles fuentes de contaminación	0.04	0.07	0.25	0.15	0.03
<b>INSTITUCIONAL</b>	Existencia de un comité de usuarios	0.13	0.13	0.02	0.03	0.02
	Comité de O & M	0.02	0.05	0.02	0.10	0.15
	Disponibilidad de reglas	0.05	0.02	0.08	0.03	0.02

En la Figura 10 se evidencia que existen atributos para los que la valoración de los expertos es bastante parecida, como los atributos de condición física del sistema y satisfacer la demanda, ambos correspondientes al criterio técnico; mientras que en otros como el uso de la instalación de agua (perteneciente al criterio social) o incluso las posibles fuentes de contaminación (perteneciente al criterio Ambiental) el valor del peso para cada experto incluye un rango amplio de valores.

Comparando la ubicación de los símbolos de la media, donde estos valores son estimaciones del centro de proceso para cada atributo y su intervalo de confianza es del 95%, se evidencia que para los expertos el atributo de participación de la comunidad con un 14%, perteneciente al criterio Social y la calidad de la fuente con el 13%, correspondiente al criterio Ambiental, son de gran importancia para la sostenibilidad y/o funcionamiento de los acueductos rurales.

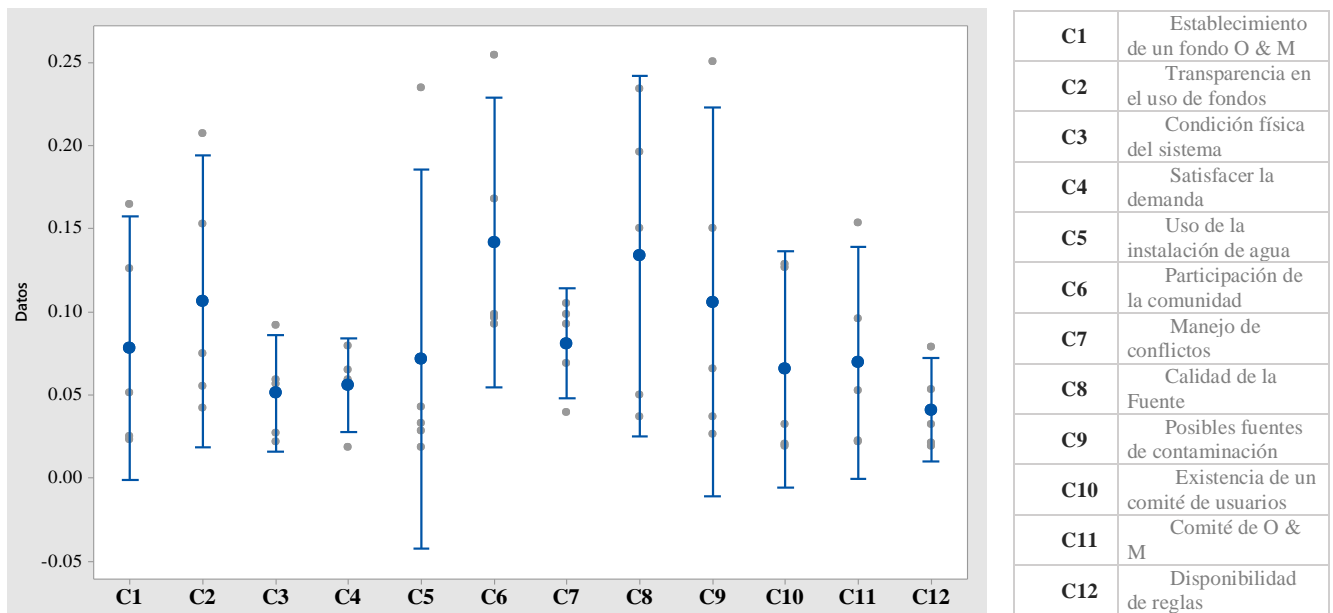


Figura 10. Intervalos individuales de los atributos modelados en Minitab

#### 4. Conclusiones

Una pasantía de investigación es complemento ideal para la formación académica, donde se adquieren diversos beneficios como, por ejemplo: trabajar en equipo con personas que tienen distinta formación académica, adquirir experiencia laboral, y aplicar los conocimientos teóricos a situaciones prácticas.

Los resultados de la investigación de la revisión de literatura del análisis multicriterio, muestran el beneficio del modelo propuesto para seleccionar alternativas de tratamiento de agua sostenibles que sean adecuadas a las necesidades de una comunidad específica. Este análisis interpreta adecuadamente la toma de decisiones que los expertos de cada artículo decidieron plantear, considerando la importancia de los efectos al medio ambiente, por lo que resulta viable su aplicación en la evaluación de acueductos rurales.

Durante la valoración de cada uno de los artículos relacionados con la evaluación de acueductos rurales, se identificaron los criterios que influyen directamente con la sostenibilidad de estos sistemas. La investigación se apoyó en una revisión de literatura exhaustiva, que permitió identificar estos factores de sostenibilidad, así como indicadores usados para evaluarla en sistemas de abastecimiento estudiados previamente. Los indicadores encontrados se clasificaron de acuerdo con cinco criterios de la sostenibilidad: social, técnico, ambiental, financiero e institucional, con potencial de ser aplicadas a cada caso de estudio de la investigación.

El método de evaluación más común en los estudios analizados fue el proceso de análisis jerárquico (AHP), que se fundamenta en el hecho que permite dar valores numéricos a cada factor o criterio y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad; una de las desventajas de este método cualitativo es que depende del juicio subjetivo de los expertos o de las personas que asignan los pesos de los criterios; de esta manera, el método puede ofrecer diferentes resultados, dependiendo de cada juicio experto. Sin embargo, este método está demostrado como confiable para estudios regionales a pequeña escala.

El método AHP tiene como una de sus limitaciones que requiere de mucho tiempo cuando el número de alternativa y/o criterios es grande, como es a menudo el caso en problemas de recursos hídricos; otra limitación o desventajas es la valoración numérica presentada por Saaty, ya que se podrían sobreestimar la preferencia por una alternativa y/o criterio.

### Referencias Bibliográficas

- Agua, I. D. E. (n.d.). 3.- instalaciones de agua., 11–27.
- Aguilera, R. (2011). *Evaluación Social de Proyectos (Orientaciones de su Aplicación)*.
- Ahp, E. (1990). Capítulo 4: 4.1, 46–49.
- Arancibia, S., Contreras, E., Mella, S., Torres, P., & Villablanca, I. (2005). Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva, 60.
- Calizaya, A., Meixner, O., Bengtsson, L., & Berndtsson, R. (2010). Multi-criteria decision analysis (MCDA) for integrated water resources management (IWRM) in the Lake Poopo basin, Bolivia. *Water Resources Management*, 24(10), 2267–2289. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9551-x>
- De, A., & Mundial, A. (n.d.). Estrategia de GWP para el involucramiento de la juventud.
- de Rada, V. D. (2012). Ventajas e inconvenientes de la encuesta por internet. *Papers*, 97(1), 193–223. <https://doi.org/10.5565/rev/papers/v97n1.71>
- Dickson, S. E., Schuster-Wallace, C. J., & Newton, J. J. (2016). Water Security Assessment Indicators: The Rural Context. *Water Resources Management*, 30(5), 1567–1604. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1254-5>
- Fatoumata, B., Bouchard, C., & Abi-Zeid, I. (2011). Analyse multicritère pour la priorisation des interventions en matière d’approvisionnement en eau en milieu rural au Sénégal : cas de la région de Diourbel. *Erudit*, 24(1), 9–22. <https://doi.org/10.7202/045824ar>
- Fernando, D., Agüero, M., Valle, U. D. E. L., Fernando, D., & Agüero, M. (2014). No Title.
- Fontana, M. (2015). Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil, 113.

- Galarza Molina, S. L., Torres, A., Fajardo, S. M., & Pérez muzuzu, B. C. (2011). Herramienta de análisis multi-criterio como soporte para el diseño del programa social de la facultad de ingeniería. *Estudios Gerenciales*, 27(121), 175–194. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(11\)70187-5](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(11)70187-5)
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., Bonoli, A., & Tondelli, S. (2011). Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semi-arid region of Brazil. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 665–675. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.007>
- Gómez, C. (2014). El desarrollo sostenible: conceptos básicos, alcance y criterios para su evaluación. *Cambio Climático Y Desarrollo Sostenible. Bases Conceptuales Para La Educación En Cuba*, 3, 91–111.
- GÓMEZ, J. C. O., & CABRERA, J. P. O. (2008). El Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp) Y La Toma De Decisiones Multicriterio. Ejemplo De Aplicación. *Scientia Et Technica*, XIV(39), 247–252. <https://doi.org/0122-1701>
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, 21(9), 1553–1566. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>
- Hernández M, M. A., Cantin, S., Lopez, A., & Rodriguez, M. (2012). Estudio De Encuestas, 21.
- Internacional-Avina, C. (2012). Operación y Mantenimiento de sistemas de agua potable . *Programa Unificado de Fortalecimiento de Capacidades*, 5, 126.
- Jeong, J. S., García-Moruno, L., Hernández-Blanco, J., Sánchez-Ríos, A., & Ramírez-Gómez, Á. (2017). Identifying priority areas for rural housing development using the participatory multi-criteria and contingent valuation methods in Alange reservoir area, Central Extremadura (Spain). *Journal of Rural Studies*, 50, 117–128.

<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.01.006>

- Kativhu, T., Mazvimavi, D., Tevera, D., & Nhapi, I. (2016). Factors influencing sustainability of communally-managed water facilities in rural areas of Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.04.009>
- Muñoz, B., & Romana, M. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 27–45.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. *Water Resources Management*, 25(14), 3947–3969. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9896-9>
- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio Informe de 2015. *Naciones Unidas*, 72. <https://doi.org/10.1108/17427370810932141>
- Nnaji, C. C., & Banigo, A. (2018). Multi-criteria evaluation of sources for self-help domestic water supply. *Applied Water Science*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0657-2>
- Ospina Blandón, M. J. (2012). Aplicación del modelo multicriterio metodologías AHP Y GP para la valoración económica de los activos ambientales = [Application of multicriteria model AHP and GP methodologies for the economic valuation of environmental assets], 95. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/9040/>
- Pagsuyoin, S. A., Santos, J. R., Latayan, J. S., & Barajas, J. R. (2015). A multi-attribute decision-making approach to the selection of point-of-use water treatment. *Environment Systems and Decisions*, 35(4), 437–452. <https://doi.org/10.1007/s10669-015-9567-0>
- Peña, L. (2010). Proyecto de indagación, 1–12.
- Peter, G., & Nkambule, S. E. (2012). Factors affecting sustainability of rural water schemes

- in Swaziland. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 50–52, 196–204.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2012.09.011>
- Saaty, T. L., & Wiley, J. (2009). Capítulo Iii Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp). *Revista Digital UMMSM*.
- Santos, J., Pagsuyoin, S. A., & Latayan, J. (2016). A multi-criteria decision analysis framework for evaluating point-of-use water treatment alternatives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 1263–1279. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1066-y>
- Sun, S., Wang, Y., Liu, J., Cai, H., Wu, P., Geng, Q., & Xu, L. (2016). Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework. *Journal of Hydrology*, 532(November 2015), 140–148.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.028>
- Tafara, A. (2013). Factors Influencing Sustainability of Rural Community Based Water Projects In Mtito Andei, Kibwezi Sub-County, Kenya. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, 2(3), 74–79.
- Tesis, D. E. (2010). T e s i s.
- Tobón, W. (2013). Análisis multicriterio. Taller: Información sobre la biodiversidad para la conservación medioambiental. *Conabio*, 16.
- Toskano Hurtado, & Gérard Bruno. (2000). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores, 47–68.
- Unicef. (2006). El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. *La Infancia, El Agua Y El Saneamiento Básico En Los Planes de Desarrollo Departamentales Y Municipales.*, 31–56. Retrieved from <http://www.unicef.org.co/pdf/Agua3.pdf>
- UNIVERSITARIOS DE COSTOS Análisis multicriterio : una herramienta innovadora en la

gestión sustentable de los recursos hídricos . Autor María de la Paz Moral ( Alumno de posgrado- Socio ). (2016).

Wallgren, B. (2011). Similitudes y diferencias Ventajas y desventajas.