

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/268811839>

# PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO COMO METODOLOGÍA DE SELECCIÓN. APLICACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

Conference Paper · November 2014

DOI: 10.13140/2.1.4596.3848

CITATIONS

0

READS

677

3 authors, including:



Laura Andrea Gutiérrez-Bucheli

Los Andes University (Colombia)

6 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



José Luis Ponz-Tienda

Los Andes University (Colombia)

73 PUBLICATIONS 168 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Smart Scheduling [View project](#)



Causes of delay and cost overruns in Colombian construction projects [View project](#)

# **PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO COMO METODOLOGÍA DE SELECCIÓN. APLICACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA.**

José Agustín Vallejo-Borda<sup>1</sup>

Laura Andrea Gutiérrez-Bucheli<sup>2</sup>

José Luis Ponz-Tienda<sup>3</sup>

## **RESUMEN**

El presente documento aplica metodologías de decisión multicriterio, en específico el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), en la selección de una alternativa para el almacenamiento de agua. Para llegar a este punto se realiza inicialmente una explicación detallada del proceso a seguir con el fin de aplicar correctamente PAJ a un proceso de selección. Acto seguido, se comparan las soluciones obtenidas con el fin de ilustrar los alcances de la metodología. Se busca por medio de este documento llamar la atención en la importancia alrededor de los procesos de toma de decisión y buscar en todo momento un mayor soporte a las decisiones tomadas.

## **INTRODUCCIÓN**

En el mundo estamos destinados a tomar decisiones a cada momento de nuestras vidas. Estas decisiones pueden nacer de lo más básico de la vida tal como es alimentarse para vivir. De igual forma puede ir trascendiendo hasta generar un impacto sobre toda una comunidad. Por esta razón, nace la importancia de profundizar en las herramientas de apoyo para la toma de decisiones que generan un impacto en toda una comunidad.

En la teoría de la decisión, el primer factor al que se ve enfrentado el decisor (o grupo de decisores) es la complejidad alrededor de la decisión a tomar. Esta complejidad se

---

<sup>1</sup> PhD candidate, MSci, BSc. Assistant researcher. Departamento Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. [ja.vallejo907@uniandes.edu.co](mailto:ja.vallejo907@uniandes.edu.co)

<sup>2</sup> PhD candidate, MSci, BSc. Assistant researcher. Departamento Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. [la.gutierrez725@uniandes.edu.co](mailto:la.gutierrez725@uniandes.edu.co)

<sup>3</sup> PhD, MSci, BEng. Professor. Departamento Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. [jl.ponz@uniandes.edu.co](mailto:jl.ponz@uniandes.edu.co)

puede basar principalmente en las variables que influyen en la decisión, los valores o clasificaciones que las variables pueden obtener y la relación entre ellas.

Por esta razón, la complejidad de las decisiones debe ser sometida a un análisis riguroso con el fin de obtener un claro panorama o mapa de los diferentes escenarios resultantes a un proceso específico de decisión. En otras palabras se deberá analizar en conjunto los múltiples resultados que pueden surgir y a su vez de forma individual cada uno de estos con el fin de generar una decisión enfocada en alcanzar el objetivo que se desea cumplir por medio de la alternativa seleccionada.

A partir de esto, se ve la necesidad de contar con herramientas para la toma de decisiones. El PAJ es una de las herramientas utilizadas para el desarrollo de las decisiones multicriterio. Este método consiste en la determinación de pesos que determinan la importancia a criterios definidos y preferencia a las alternativas. Estos pesos tienen como significado la importancia que tiene cada uno de los criterios de un mismo nivel entre sí para el cumplimiento de los objetivos y la preferibilidad de las alternativas alrededor del logro del objetivo.

Por medio del PAJ se pueden llevar a cabo un sin número de procesos que desencadenen la toma de una decisión. Un ejemplo de estos procesos es la utilización del PAJ para la gestión del agua. El agua es un recurso de vital importancia para obtener un máximo aprovechamiento de los terrenos por medio de suelos productivos en la agricultura ([Peace Corps, 1985](#)). Por esta razón es necesaria la presencia de agua alrededor de proyectos agrícolas exitosos.

En Colombia, se vive en un ambiente cambiante en cuanto a lluvias y presencia de recursos hídricos, por lo cual para poder asegurar una alta productividad de los suelos es necesario asegurar la máxima capacidad disponible de agua ([Krois & Schulte, 2014](#)).

Por lo expresado anteriormente, a lo largo de la historia se han desarrollado diversas técnicas enfocadas en el almacenamiento de agua entre las que se encuentran sistemas de captación de aguas lluvias, estructuras de contención, gestión de suelos, entre otros ([Krois & Schulte, 2014](#)). Cada una de las técnicas mencionadas, puede

sacar su mayor potencial en la conservación de agua acorde con las características propias del lugar en donde se va a implantar.

Con el fin de realizar una toma de decisión soportada en métodos matemáticos y con la certeza en cuanto a que se está tomando la mejor decisión, se aplicara PAJ a un caso en el cual se buscará seleccionar la mejor técnica de almacenamiento de agua acorde con las características propias de la zona y de los tomadores de la decisión.

## **OBJETIVOS**

Con el fin de aprovechar las ventajas que se pueden obtener por medio de la aplicación del PAJ, se busca desarrollar los siguientes objetivos:

- Entender la complejidad alrededor de los procesos de toma de decisión.
- Proveer herramientas para la realización de procesos de toma de decisión.
- Entender la utilización del Proceso Analítico Jerárquico.
- Aplicar a un caso el Proceso Analítico Jerárquico.

## **METODOLOGÍA**

El proceso de toma de decisiones depende de diversos criterios. En muchos casos, para tomar una decisión, es tenido en cuenta un solo criterio el cual puede representar que se están dejando de lado factores importantes para la decisión, al igual que una decisión tomada basándose en interpretaciones subjetivas. Debido a lo comentado anteriormente, con el fin de disminuir la subjetividad y ampliando el conocimiento alrededor de un problema específico, se desarrollan modelos capaces de soportar decisiones que se basan en múltiples criterios. Entre estos modelos se encuentra el PAJ.

El PAJ busca como método ser una herramienta capaz de apoyar la toma de decisiones por medio de la jerarquización de los criterios más importantes de la decisión y las alternativas a seleccionar. Dichos criterios, pueden ser medidos tanto de forma cuantitativa como de forma cualitativa buscando en todo momento la mejor alternativa con el fin de cumplir el objetivo específico.

Con el fin de desarrollar de manera ordenada y consistente el PAJ se deben realizar cuatro etapas primordiales. 1) Estructuración del problema, 2) Análisis cualitativo, 3) Análisis cuantitativo y 4) Análisis de los resultados. Estas cuatro etapas generales cuentan de igual forma con otras etapas internas tal como se ve en la Ilustración 1.

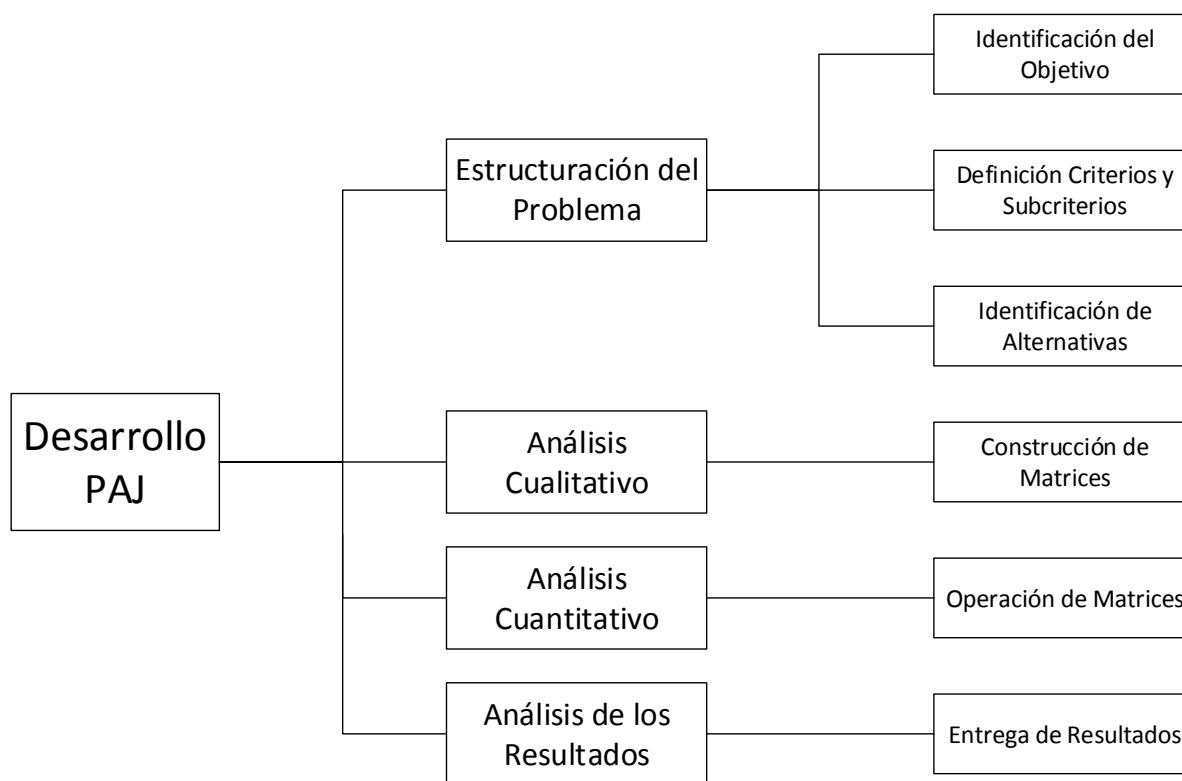


Ilustración 1. Metodología para el Desarrollo del PAJ

A partir de la Ilustración 1, se ilustrará la metodología para el desarrollo del PAJ con el fin de entregar las herramientas para llevar a cabo de manera efectiva el proceso completo.

La primera etapa es de gran importancia puesto que sobre los entregables de esta etapa se desarrollara el proceso completo. Para esta etapa, es necesario identificar el objetivo principal, realizar un correcto desglose de criterios a evaluar en diferentes niveles y visualizar el conjunto de alternativas disponibles. El desarrollo de esta etapa generará la estructura base para el proceso completo y es necesario realizarlo con un equipo de trabajo experto en las áreas involucradas alrededor de la toma de decisión.

La primera actividad a desarrollar dentro de esta etapa es la identificación del objetivo principal. Es necesario tener en cuenta que el objetivo a identificar deberá cumplir o

suplir las necesidades que llevaron a la toma de decisión. Lo anterior con el fin de resolver de manera efectiva el problema correcto.

Una vez identificado el objetivo, se deben desglosar los diferentes criterios tanto como sean más manejables y menos subjetivos. Esto debido a que a medida que se toma una decisión subjetiva, basada en un mayor número de factores, dicha subjetividad tenderá a disminuir. A partir del desarrollo de esta etapa se tendrán entonces los criterios de diferentes niveles sobre los cuales será evaluada cada alternativa.

Como paso último de la etapa 1, se tiene la visualización de las alternativas posibles. Para llegar a este punto es necesario tener un buen desarrollo de los criterios para evaluar las alternativas, al igual que el objetivo que la alternativa seleccionada deberá cumplir. Al terminar el desarrollo de la presente etapa se podrá contar con la estructura tipo del problema a desarrollar por medio de PAJ (Ilustración 2).

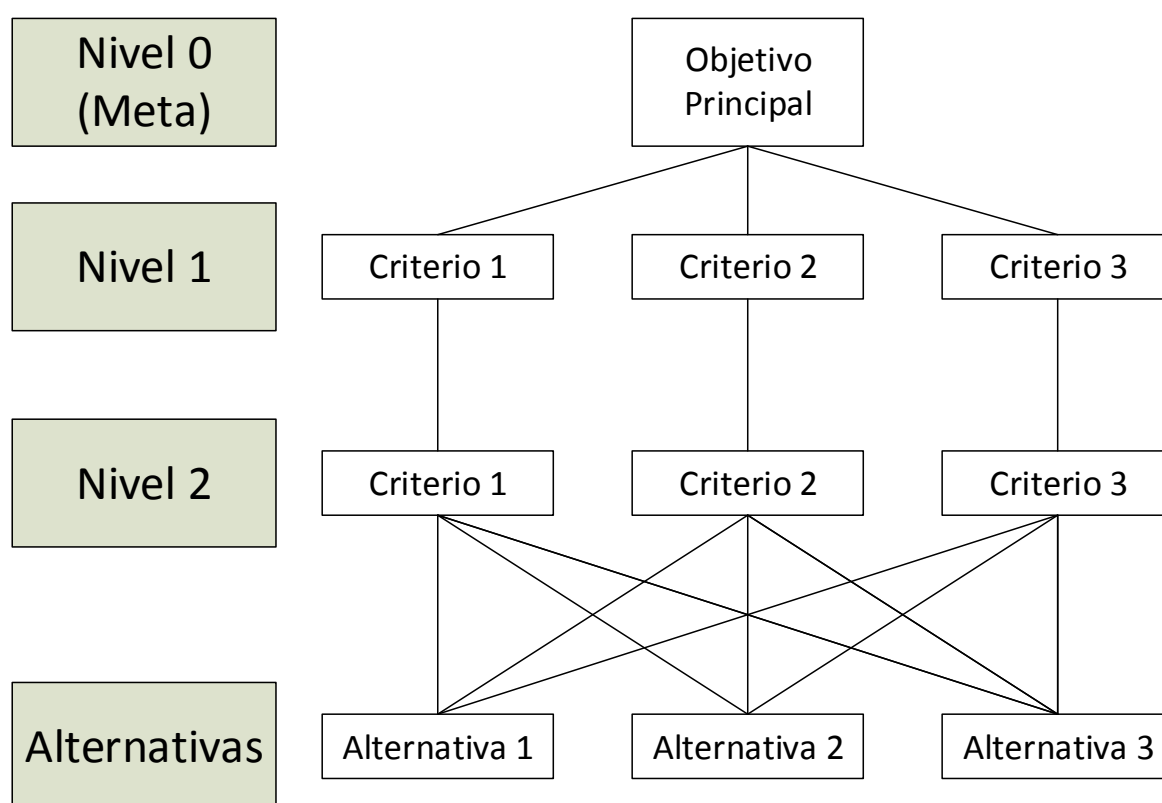


Ilustración 2. Estructura Tipo PAJ

La estructura mostrada en la Ilustración 2 es presentada únicamente como guía, sin embargo no existen límites en cuanto a número de criterios por nivel, niveles o

alternativas. De igual forma, es necesario indicar que no existe ningún tipo de restricción en cuanto a criterios dependientes de criterios de nivel superior.

En la segunda etapa se busca realizar un análisis cualitativo por medio de la construcción de las diferentes matrices alrededor del problema. Para esta etapa, es necesario entender que las matrices a armar serán en algunos casos matrices de importancia y en otros de preferencia. De igual forma, es importante conocer las estrategias o procedimientos para construir las matrices de forma consistente.

Inicialmente se explicara la diferencia entre matrices de importancia y matrices de consistencia. Las matrices de importancia son aquellas utilizadas para comparar los criterios establecidos en el paso anterior entre sí con respecto a su nivel superior. En otras palabras, es encontrar que tan importante es un criterio con respecto a otro a partir del nivel superior que los contiene. Por el lado, las matrices de preferencia son aquellas que comparan las alternativas a partir de cada grupo de criterios superiores.

Como se ha mencionado anteriormente, para armar las matrices es necesario comparar entre si los componentes de dicha matriz. Para esta labor, es posible recurrir a evaluaciones tanto cualitativas como cuantitativas. Según sea el caso existen metodologías para poder construir la matriz de forma consistente.

En el caso de las evaluaciones cualitativas, se necesitará contar con la opinión de expertos con el fin de evaluar los diferentes criterios y alternativas. Para realizar este procedimiento de manera más consistente, Thomas Saaty (1979) propone una escala para construir las matrices de importancia y preferencia. Dicha escala numérica puede ser utilizada tanto para la comparación de importancia como para la comparación de preferencia donde únicamente cambia su significado (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Saaty

Valor	Importancia	Preferencia
9	A es extremadamente más importante que B	A es extremadamente mejor que B
7	A es marcadamente más importante que B	A es marcadamente mejor que B
5	A es más importante que B	A es mejor que B
3	A es ligeramente más importante que B	A es ligeramente mejor que B
1	A es igual de importante que B	A es igual que B
1/3	B es ligeramente más importante que A	B es ligeramente mejor que A
1/5	B es más importante que A	B es mejor que A
1/7	B es marcadamente más importante que A	B es marcadamente mejor que A
1/9	B es extremadamente más importante que A	B es extremadamente mejor que A

Basándose en la escala presentada en la Tabla 1, los expertos podrán construir las matrices cuando no se tengan datos conocidos sobre aquello que se está buscando evaluar. Con el fin de eliminar la subjetividad en este proceso, es recomendable generar una partición adecuada de los criterios en donde se aplicara el análisis de expertos con el fin de diversificar la toma de decisiones. Dicha división se deberá realizar teniendo en cuenta factores diferenciadores entre los criterios o alternativas.

Existen otros casos en los cuales la matriz puede ser armada a partir de datos cuantitativos. En este caso específico, tendríamos de primera mano valores que funcionaran para realizar la respectiva comparación entre criterios o alternativas. Cuando la situación nos lleva a poder comparar los criterios o alternativas por medio de datos, es posible indicar que la subjetividad disminuirá al igual que el procedimiento a seguir para su análisis debe variar también.

Al poder trabajar sobre datos existentes de los criterios/alternativas, es posible indicar que estos datos serán pesos de cada criterio/alternativa y se podrán comparar cuantitativamente. La matriz de comparación  $A$ , es aquella que contendrá las comparaciones de criterios/alternativas y  $w_i$  el peso correspondiente a cada criterio/alternativa. Partiendo de lo anterior se tiene la [ecuación 1](#).



$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La ecuación 1 muestra la matriz de comparación general a armar tanto para importancias como para preferencias. El proceso de dicha matriz a nivel cuantitativo fue establecido para aquel caso en los cuales los valores mayores indican que una alternativa/criterio es mejor que otro. Por esta razón, es necesario realizar un análisis cuidadoso con el fin de adaptar la matriz en casos donde se cuente con un orden invertido de importancia o cuando se cuente con datos positivos y negativos.

Como definición general para las matrices de importancia/preferencia, se establece una comparación partiendo desde las filas y comparando cada fila con las respectivas columnas. Si el criterio/alternativa de la fila es más importante/preferible que el establecido en la columna, en dicha posición la matriz contendrá un número superior a 1. En caso contrario, dicho espacio de la matriz será ocupado por un número menor a 1. En el caso en el cual un espacio de la matriz contenga el número 1, esto indica que no existe ninguna diferencia entre los criterios/alternativas que se están comparando. Esto ocurre en la diagonal de la matriz  $A$ , donde se compara un criterio/alternativa consigo mismo.

La tercera etapa se caracteriza por ser una etapa netamente cuantitativa. En el desarrollo de esta etapa se necesitarán como insumos los resultados obtenidos en las etapas anteriores. A partir del desarrollo de la matriz  $A$ , se conocerá la importancia entre criterios de un mismo nivel y la jerarquización de las alternativas. En otras palabras, se conocerá el orden en que las alternativas quedaran establecidas.

Con el fin de realizar el procedimiento general para desarrollar la totalidad de matrices (importancia y preferencia) se puede seguir un procedimiento común para todas. Para explicar dicho procedimiento se tomara una matriz cuantitativa  $A$  de tamaño  $3 \times 3$  (ecuación 2). Sin embargo, este procedimiento podrá ser utilizado para cualquier matriz  $n \times n$ .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_1}{w_3} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \frac{w_2}{w_3} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \frac{w_3}{w_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \quad (3)$$

A partir de la matriz  $A$ , es posible indicar que si existe un valor  $\lambda$  tal que se cumpla la [ecuación 3](#), entonces el vector  $\mathbf{v}$  es un vector propio de  $A$  correspondiente al valor propio  $\lambda$ . Cuando estamos hablando de una matriz consistente, la [ecuación 3](#) puede reescribirse tal como aparece en la [ecuación 4](#), donde  $n$  es el tamaño de la matriz.

$$A\mathbf{v} = n\mathbf{v} \quad (4)$$

La consistencia de las matrices solo es posible en aquellos casos donde el grupo de decisores conoce plenamente y sin contradicciones la importancia entre los diferentes aspectos a tener en cuenta. En otras palabras, una matriz es consistente cuando ya son conocidos los diferentes pesos del ejercicio. Por esta razón, y debido a que en los proyectos a enfrentar estos pesos son el resultado al que queremos llegar, en la mayoría de oportunidades no se contara con matrices consistentes. A pesar de esto, si es posible a partir del tamaño de la matriz un medidor de consistencia.

Saaty ([1979](#)) demostró que para una matriz  $A$  reciproca si  $\lambda_{max}$  es el máximo valor propio de  $A$ , entonces se cumple lo descrito en la [ecuación 5](#) ([Castillo Hernandez, 2006](#)).

$$\lambda_{max} \geq n \quad (5)$$

$$\lambda_{max} = n; \text{ cuando } A \text{ es consistente}$$

Con lo descrito en la [ecuación 5](#), se establece que es necesario calcular  $\lambda_{max}$ , para a partir de este máximo valor propio encontrar su respectivo vector propio  $W$ . En otras palabras, el vector de pesos será aquel vector  $W$  que cumpla con lo descrito en la [ecuación 6](#).

$$A \cdot W = \lambda_{max} \cdot W \quad (6)$$

Puesto a que el vector  $W$  correspondiente a los pesos que se requieren debe ser un vector normalizado, es necesario realizar el procedimiento requerido para que la suma de sus componentes sea igual a 1. Este vector resultante se denotara como  $\hat{W}$ .

En el caso en que se estén comparando criterios de un nivel con el respectivo nivel superior, se obtendrá inmediatamente el respectivo vector  $\hat{W}$ . Sin embargo, cuando se esté realizando dicho procedimiento para la preferencia de las alternativas, es recomendable realizar la normalización del vector resultante de la suma de todos los vectores  $W$  obtenidos por la comparación de preferencia para alternativas con los respectivos criterios.

Una vez se termine el procedimiento para la obtención de  $W$ , es importante probar la consistencia de la matriz. Para esto, existen tres índices diferentes los cuales son el índice de consistencia (IC), razón de consistencia (RC) y el “índice de consistencia aleatorio promedio (ICAP)” (Toskano Hurtado, 2005). Para poder considerar una matriz consistente, es necesario que la razón de consistencia (RC) sea menor al 10% acorde con lo establecido en la ecuación 7 (Saaty, 1979).

$$IC(A) = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$ICAP = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad (7)$$

$$RC(A) = \frac{IC(A)}{ICAP}$$

En la cuarta etapa se entregará un análisis basado en los resultados obtenidos en las etapas anteriores. Dicho análisis deberá contener la decisión a tomar al igual que los aspectos importantes del proceso. Este análisis deberá ser una guía para los decisores y deberá estructurarse con el fin de ilustrar los riesgos y oportunidades basados en los pesos establecidos.

En conclusión, el proceso a seguir con el fin de desarrollar correctamente la aplicación de un caso a partir de PAJ es mostrado en la Ilustración 3.

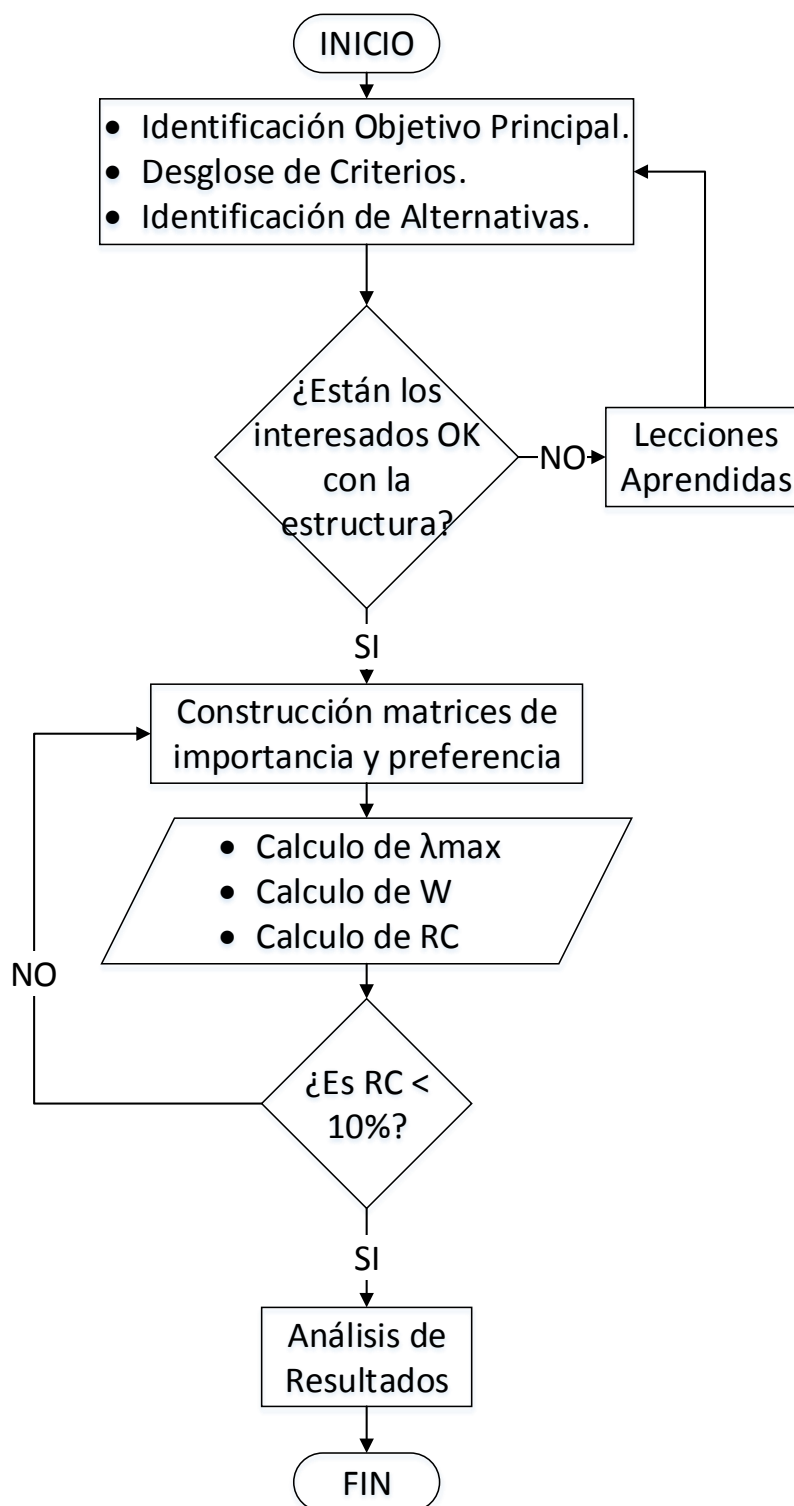


Ilustración 3. Diagrama Aplicación PAJ

## **CASO DE APLICACIÓN**

Caso para realizar la selección de la estructura de almacenamiento de agua más eficiente para una zona específica.

### *Etapas 1 – Estructuración del Problema*

En algunas zonas del país se ha sufrido en los últimos años temporadas de sequías que han generado grandes problemas con la producción en el campo. Estos espacios temporales de sequías han generado insuficiencia de agua para atender las necesidades de animales y plantas, al igual que las necesidades propias de consumo humano. Por esta razón, en una granja de Cundinamarca han decidido cubrir el riesgo de falta de agua en futuros años por medio de la construcción de una estructura de almacenamiento de agua que se acomode a las características de su problema.

Con la necesidad de la granja e investigación bibliográfica sobre el tema se encuentra que se debe tener en cuenta aspectos tales como el uso que le darán al agua, los requerimientos del agua a conservar, las características propias de la zona y los costos totales de la obra ([Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013](#)). En cuanto al uso es necesario definir si el agua será para su consumo, el de animales o el de plantas. Los requerimientos principales son la cantidad y calidad de agua a almacenar. Entre las características de la zona se encuentra la disponibilidad de agua por gravedad y la baja calidad de los suelos. Por último, los costos de infraestructura deberán medirse en cuanto a la obra y al mantenimiento de la estructura a construir.

Una vez conocidos los criterios a tener en cuenta, es necesario proceder a identificar las alternativas que pueden suplir la necesidad. Entre estas, y por la disponibilidad de la zona se cuenta con la posibilidad de construir o instalar estanques, tanques de PVC, embalses, surcos y camellones. A partir de esta información, se procede a armar la estructura del caso (Ilustración 4).



Ilustración 4. Estructura Caso de Aplicación

Adicional a la información anterior, se conoce que la granja cuenta con un área de cultivo de 1 Ha y su mayor producción es animal. De igual forma, también se conoce que existe un área disponible de 1000 m<sup>2</sup> para la construcción o implantación de la alternativa a seleccionar. Por otro lado, fue entregada por una empresa de la zona información sobre alternativas con respecto a capacidad de almacenamiento y costos de las alternativas (Tabla 2).

Tabla 2. Información de Alternativas según la Zona

	Almacenamiento [m <sup>3</sup> ]	Costo (\$)	Mantenimiento 10 años(\$)
Estanque	1.200,0	6'570.000	2'190.000
Tanques PVC	1.376,0	206'400.000	1'032.000
Embalse	300,0	1'638.350	546.150
Surcos	23,1	12'678.400	12'678.400
Camellones	850,0	37'170.000	12'390.000

## Etapa 2 – Análisis Cualitativo

A partir de la estructura, es posible determinar que con el fin de llegar a una solución en este caso de aplicación, es necesario el desarrollo de cinco matrices de importancia y nueve matrices de preferencia. Entre las matrices de importancia es necesaria la construcción de una matriz de primer nivel y cuatro matrices de segundo nivel. En cuanto a las matrices de preferencia es necesario armar una por cada criterio de segundo nivel para las cinco alternativas.

El desarrollo de las matrices de origen cualitativo fue realizado por expertos del área de influencia del proyecto. En cuanto las matrices de origen cuantitativo fueron desarrolladas con la información que se presentó en la etapa 1. Inicialmente se muestra la matriz de importancia con respecto al objetivo principal (Tabla 3).

Tabla 3. Importancia con respecto al Objetivo Principal

<b>OBJETIVO</b>	<i>Finalidad Uso</i>	<i>Requerimientos</i>	<i>Características Zona</i>	<i>Costos Infraestructura</i>
<i>Finalidad Uso</i>		3	5	3
<i>Requerimientos</i>			4	2
<i>Características Zona</i>				1/5
<i>Costos Infraestructura</i>				

De importancia con respecto a los criterios de primer nivel.

Tabla 4. Importancia con respecto al Criterio Finalidad de Uso

<b>FINALIDAD USO</b>	<i>Domestico</i>	<i>Animal</i>	<i>Vegetal</i>
<i>Domestico</i>		1/3	5
<i>Animal</i>			7
<i>Vegetal</i>			

Tabla 5. Importancia con respecto al Criterio Requerimientos

<b>REQUERIMIENTOS</b>	<i>Volumen</i>	<i>Calidad de Agua</i>
<i>Volumen</i>		1/3
<i>Calidad de Agua</i>		

Tabla 6. Importancia con respecto al Criterio Características de la Zona

CARACTERISTICAS ZONA	Agua por Gravedad	Calidad Suelo
Agua por Gravedad		5
Calidad Suelo		

Tabla 7. Importancia con respecto al Criterio Costos de Infraestructura

COSTOS INFRAESTRUCTURA	Obra	Mantenimiento
Obra		1/5
Mantenimiento		

De preferencia de las alternativas con respecto a los criterios de segundo nivel.

Tabla 8. Preferencia con respecto al Criterio Uso Doméstico

DOMESTICO	Estanques	Tanques PVC	Embalses	Surcos	Camellones
Estanques		1/3	3	5	5
Tanques PVC			5	7	7
Embalses				3	3
Surcos					1
Camellones					

Tabla 9. Preferencia con respecto al Criterio Uso Animal

ANIMAL	Estanques	Tanques PVC	Embalses	Surcos	Camellones
Estanques		4	1/2	7	7
Tanques PVC			1/4	5	5
Embalses				9	9
Surcos					1
Camellones					

Tabla 10. Preferencia con respecto al Criterio Uso Vegetal

VEGETAL	Estanques	Tanques PVC	Embalses	Surcos	Camellones
Estanques		4	1/5	1/7	1/7
Tanques PVC			1/7	1/9	1/9
Embalses				1/3	1/3
Surcos					1
Camellones					



Tabla 11. Preferencia con respecto al Criterio Requerimiento de Volumen de agua

<b>VOLUMEN</b>	<i>Estanques</i>	<i>Tanques PVC</i>	<i>Embalses</i>	<i>Surcos</i>	<i>Camellones</i>
<i>Estanques</i>		0.872	4	51.948	1.412
<i>Tanques PVC</i>			4.587	59.567	1.619
<i>Embalses</i>				12.987	0.353
<i>Surcos</i>					0.027
<i>Camellones</i>					

Tabla 12. Preferencia con respecto al Criterio Requerimiento de Calidad de Agua

<b>CALIDAD AGUA</b>	<i>Estanques</i>	<i>Tanques PVC</i>	<i>Embalses</i>	<i>Surcos</i>	<i>Camellones</i>
<i>Estanques</i>		1/3	4	7	7
<i>Tanques PVC</i>			6	8	8
<i>Embalses</i>				3	3
<i>Surcos</i>					1
<i>Camellones</i>					

Tabla 13. Preferencia con respecto al Criterio Disponibilidad de Agua por Gravedad en la Zona

<b>AGUA POR GRAVEDAD</b>	<i>Estanques</i>	<i>Tanques PVC</i>	<i>Embalses</i>	<i>Surcos</i>	<i>Camellones</i>
<i>Estanques</i>		1	3	5	4
<i>Tanques PVC</i>			3	5	4
<i>Embalses</i>				3	2
<i>Surcos</i>					1/3
<i>Camellones</i>					

Tabla 14. Preferencia con respecto al Criterio Baja Calidad del Suelo en la Zona

<b>CALIDAD SUELO</b>	<i>Estanques</i>	<i>Tanques PVC</i>	<i>Embalses</i>	<i>Surcos</i>	<i>Camellones</i>
<i>Estanques</i>		1/7	1/3	3	2
<i>Tanques PVC</i>			5	7	6
<i>Embalses</i>				3	2
<i>Surcos</i>					1/2
<i>Camellones</i>					

Tabla 15. Preferencia con respecto al Criterio Costo de la Obra

<b>OBRA</b>	<i>Estanques</i>	<i>Tanques PVC</i>	<i>Embalses</i>	<i>Surcos</i>	<i>Camellones</i>
<i>Estanques</i>		31.416	0.249	1.930	5.658
<i>Tanques PVC</i>			0.008	0.061	0.180
<i>Embalses</i>				7.739	27.164
<i>Surcos</i>					2.932
<i>Camellones</i>					

Tabla 16. Preferencia con respecto al Criterio Costo del Mantenimiento de la Infraestructura

MANTENIMIENTO	Estanques	Tanques PVC	Embalses	Surcos	Camellones
Estanques		0.471	0.249	5.789	5.658
Tanques PVC			0.529	12.285	12.006
Embalses				23.214	22.686
Surcos					0.977
Camellones					

### Etapas 3 – Análisis Cuantitativo

Una vez todas las matrices están construidas se procede a realizar el respectivo análisis cuantitativo de cada matriz. Sobre este análisis se encontraran los pesos de importancia y preferencia según sea el caso. De igual forma, es necesario tener presente la consistencia de cada matriz para asegurar la opinión de los expertos. Los resultados de importancia son mostrados en la Tabla 17.

Tabla 17. Importancia Criterios Primer y Segundo Nivel

Criterios de primer nivel		Peso	Criterios de segundo nivel		Peso
1	Finalidad de Uso	0,503	1.1	Domestico	0,279
			1.2	Animal	0,649
			1.3	Vegetal	0,072
2	Requerimientos	0,247	2.1	Volumen	0,250
			2.2	Calidad de Agua	0,750
3	Características de la Zona	0,062	3.1	Agua por Gravedad	0,833
			3.2	Calidad Suelo	0,167
4	Costos de Infraestructura	0,188	4.1	Obra	0,167
			4.2	Mantenimiento	0,833

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 17, es posible ahora realizar el respectivo análisis cuantitativo para definir la preferencia de las alternativas. Esta preferencia se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Preferencia de Alternativas con Respecto a los Criterios

	Finalidad de Uso 0,503			Requerimientos 0,247		Características de la Zona 0,062		Costos Infraestructura 0,188	
	Domestico	Animal	Vegetal	Volumen	Calidad de Agua	Disponibilidad de Agua	Calidad Suelo	Obra	Mantenimiento
	0,279	0,649	0,072	0,25	0,75	0,833	0,167	0,167	0,833
Estanque	0,502	0,702	0,162	0,872	0,551	1,000	0,184	0,240	0,249
Tanques PVC	1,000	0,307	0,078	1,000	1,000	1,000	1,000	0,008	0,529
Embalse	0,238	1,000	0,475	0,218	0,195	0,410	0,304	1,000	1,000
Surcos	0,103	0,086	1,000	0,017	0,085	0,153	0,088	0,124	0,043
Camellones	0,103	0,086	1,000	0,618	0,085	0,282	0,138	0,041	0,044

	TOTAL	PONDERACION
Estanque	0,562	0,266
Tanques PVC	0,636	0,302
Embalse	0,639	0,303
Surcos	0,115	0,054
Camellones	0,157	0,074

El último paso del análisis cuantitativo es el cálculo de la razón de consistencia. Estos resultados son mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19. Razón de Consistencia del Caso de Aplicación

Consistencia Respecto	Valor	Consistencia Respecto	Valor
Objetivo	7,06%	Calidad de Agua	3,63%
Finalidad de Uso	4,92%	Características Zona	0,03%
Domestico	2,86%	Agua por Gravedad	2,60%
Animal	3,74%	Calidad Suelo	5,35%
Vegetal	5,45%	Costos Infraestructura	0,03%
Requerimientos	0,03%	Obra	0,08%
Volumen	0,00%	Mantenimiento	0,00%

Como se observa en la Tabla 19, la razón de consistencia para todas las matrices planteadas no supera en ningún caso el 8%. De esta forma es posible indicar que los resultados son consistentes y pueden ser tomados para la realización del respectivo análisis.

#### Etapa 4 – Análisis de los Resultados

Lo primero a observar, es el resultado en cuanto a que la mejor alternativa acorde con las necesidades de la granja en Cundinamarca es la construcción de un *embalse*. Esta opción es seguida muy de cerca por la opción de instalar *tanques de PVC*. El puntaje de estas dos opciones es prácticamente el mismo cuando existen diferencias muy amplias en el criterio costo de la obra, entre otros.

De esto se destaca la importancia de los criterios de primer nivel con respecto al objetivo global y la preferencia respectiva a cada uno de estos criterios (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

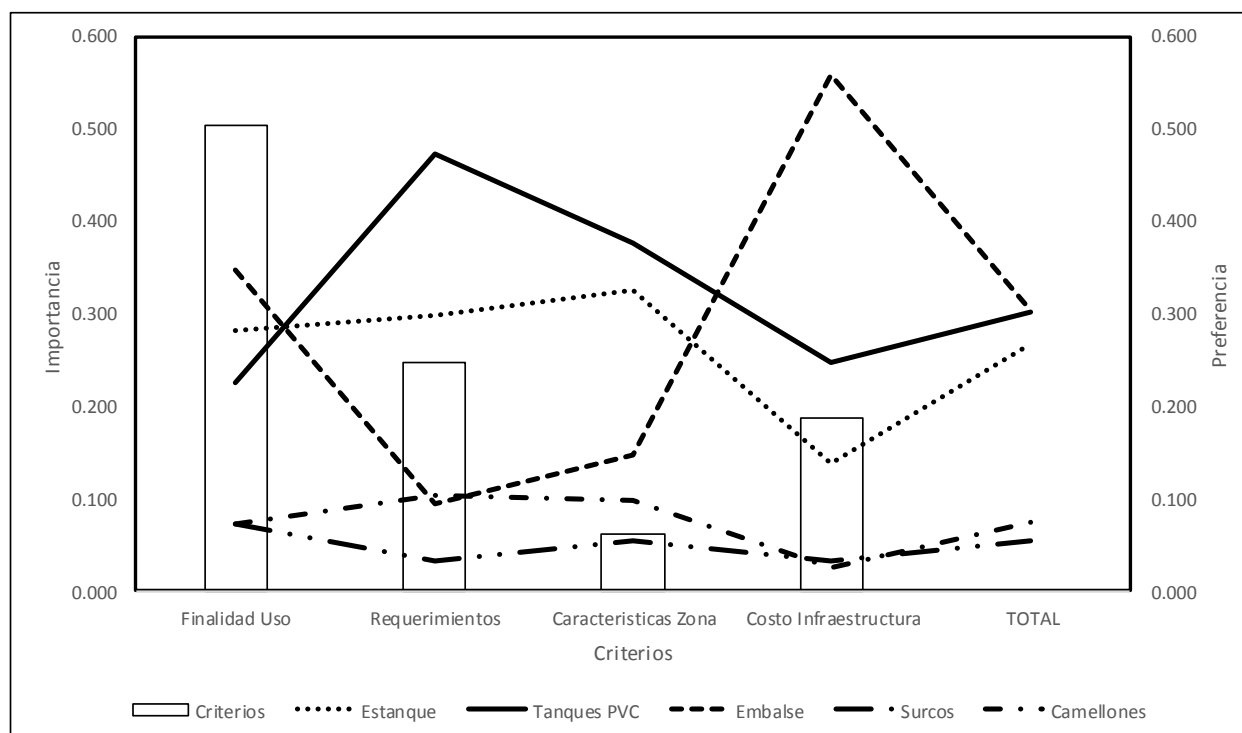


Ilustración 5. Importancia y Preferencia Respecto al Objetivo Principal

En la Ilustración 5 se detalla la cercanía en la calificación total del *embalse* y los *tanques de PVC* tal como se mencionó anteriormente. Sin embargo, dicha cercanía entre las 2 alternativas solo se da alrededor de la ponderación total de alternativas. Como se puede observar, el criterio que cuenta con una mayor importancia es la *finalidad de uso*, criterio en el cual la alternativa *embalse* es de mayor preferencia que

el resto de alternativas. Sucede lo mismo en cuanto al criterio *infraestructura*, donde *embalse* cuenta con una preferibilidad mucho mayor que las otras alternativas.

Por el lado de la alternativa de instalación de *tanques de PVC*, es posible que esta alternativa sobresale en el criterio *requerimientos*, el cual es el segundo en importancia. A pesar de la diferencia de costos entre la instalación de *tanques de PVC* y el resto de alternativas, es necesario indicar que la granja pondero el *costo* con un total de 0.188, lo cual indica que es la segunda alternativa menos importante por lo que su influencia en la decisión final no es tan alta.

Dicho lo anterior, y teniendo en cuenta que la producción de la granja es de mayor cantidad animal, es lógico encontrar que alternativas tales como *surcos* y *camellones* se encuentran en el último lugar, siendo estas específicas para cultivos. En conclusión, respetando la importancia dada por la granja a los diferentes criterios, es recomendable la construcción de un *embalse* para suplir sus necesidades de agua en épocas de sequía.

## CONCLUSIONES

La toma de decisiones es quizás la actividad más importante en el desarrollo de proyectos, especialmente cuando aún no se ha realizado una fuerte inversión económica en el proyecto. En muchos casos, las decisiones son tomadas con base en datos existentes y análisis/comparación de los mismos. Usualmente las metodologías utilizadas se basan en expertos donde se generan sus opiniones, sin cuantificarlas o jerarquizarlas, produciendo un alto nivel de incertidumbre en la decisión adoptada.

La aplicabilidad del PAJ surge para permitir cuantificar las opiniones del panel de expertos por medio de criterios y subcriterios organizados en una estructura jerárquica, que permite decidir cuál de las alternativas es mejor para conseguir el objetivo propuesto. Por esta razón, el poder disponer de herramientas para asistir en ambientes de alta incertidumbre se convierte en algo fundamental en un proyecto, proporcionando seguridad a la decisión a tomar, disminuyendo los riesgos causados por la incertidumbre en la decisión tomada.

El resultado obtenido al utilizar PAJ en el caso de aplicación fue asistir en la selección de infraestructura de almacenamiento de agua a una granja que cuenta con temporadas de sequía. Esta decisión se basó en la opinión de un grupo de expertos de la zona y la necesidad propia del cliente. A partir de la opinión de estos expertos se concluyó que la selección de la infraestructura de almacenamiento puede variar de forma significativa acorde con cada uno de los criterios a evaluar.

De igual forma, se evidencio que cuando existe un factor diferenciador en una de las opciones en el criterio de mayor peso, se podría generar una gran ventaja para esta alternativa, destacándola como aquella con más opciones de ser seleccionada.

En el caso de aplicación se evidencian las ventajas de eliminar las decisiones basadas en la intuición o experticia de los decisores con valoraciones subjetivas, cuantificando efectivamente los diferentes criterios que afectan o influyen en la decisión de seleccionar la infraestructura adecuada para almacenar agua en una zona con características específicas.

En conclusión, la utilización del PAJ como herramienta para la toma de decisiones resultara en decisiones mejor soportadas que proporcionarán mejores resultados en los proyectos.

## **AGRADECIMIENTOS**

El desarrollo del presente trabajo fue posible debido al apoyo prestado por INgeco. INgeco es un grupo de investigación de la Universidad de los Andes encargado en profundizar sobre temas de gerencia de la construcción con el fin de proveer soluciones y mejores al sector. Por esta razón, es necesario agradecer a este gran equipo de trabajo.

Agradecemos de igual forma al equipo de trabajo de USRA V por la invitación y confianza depositada en el equipo de trabajo de INgeco. Agradecimientos especiales al Dr. Miguel German Cifuentes Perdomo quien como director general de este evento nos ha tenido en cuenta para generar un intercambio de conocimientos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bagchi, P. K. (1989). Carrier Selection: The Analytic Hierarchy Process. *Logistics and Transportation Review*, 63-73.
- Casañ Perez, A., Ponz Tienda, J. L., & Bustos Chocomeli, O. H. (2013). *La Decision Multicriterio; Aplicacion en la seleccion de ofertas competitivas en edificacion*. Valencia.
- Castillo Hernandez, M. (2006). *Toma de Decisiones en las Empresas: Entre el arte y la técnica*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Gutierrez Bucheli, L. A. (2014). *Aplicacion de Teorias de Decision Multicriterio en la Seleccion de Predios en Procesos de Estructuracion de Proyectos Inmobiliarios*. Bogota.
- Irlayici Cakmak, P., & Cakmak, E. (2013). An Analysis of Causes of Disputes in the Construction Industry Using Analytical Hierarchy Process (AHP). *AEI 2013: Building Solutions for Architectural Engineering* (págs. 94-102). State College: Chimay J. Anumba & Ali M. Memari.
- Jin Lin, S. C., Shah Ali, A., & Bin Alias, A. (2014). Analytic Hierarchy Process Decision-Making Framework for Procurement Strategy Selection in Building Maintenance Work. *Journal of Performance of Constructed Facilities*.
- Kim, K., & Sato, S. (2000). Evaluation of Urban Landscape Problem Using Analytic Hierarchy Process Method. *Computing in Civil and Building Engineering (2000)* (págs. 442-448). Stanford: Renate Fruchter; Feniosky Peña Mora & W.M. Kim Roddis.
- Krois, J., & Schulte, A. (2014). GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. *Applied Geography*, 131 - 142.
- Multicriteria Decision Making. (1975).

- Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura. (2013). *Captacion y Almaceamiento de Agua de LLuvia* . Santiago.
- Peace Corps. (1985). *A Manual on Conservation of Soil and Water. Appropriate Technologies for Development*. Washington.
- Project Management Institute. (2008). *Fundamento para la Direccion de Proyectos (Guia del PMBOK)*. Newtown Square, Pennsylvania: PMI.
- Saaty, T. (1979). *Optimization by the Analytic Hierarchy Process*. Philadelphia.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1994). *Decision Making in Economic, Political, Social and Technological Environments*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Siddiqui, M. Z., Everett, J. W., & Vieux, B. E. (1996). Landfill Siting Using Geographic Information Systems: A Demonstration. *Journal of Environmental Engineering*, 515-523.
- Skibniewski, M. J., & Chao, L. C. (1992). Evaluation of Advanced Construction Technology with AHP Method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 577-593.
- Toskano Hurtado, G. B. (2005). *El Proceso de Analisis Jerarquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Seleccion de Proveedores*. Lima.
- Vallejo Borda, J. A., Ponz Tienda, J. L., & Alzate Alzate, G. A. (2014). *Evaluación a los Procedimientos de Selección de Oferentes en Procesos de Contratación del Sector Público Enfocados a la Construcción (Consultoría) por Medio de la Decisión Multicriterio*. Bogota.
- Wang, F., Chen, F., & Cheng, Y. (2009). Application of Analytic Hierarchy Process to Slope Greening Design. *Characterization, Modeling, and Performance of Geomaterials: Selected Papers From the 2009 GeoHunan International*



*Conference* (págs. 109-115). Changsha: Xiong Zhang; Xiong Yu; Hongyuan Fu & Jie Zhang.

Yu, F., Xu, H., & Li, G. (2010). An Improved Analytic Hierarchy Process of Evaluation. *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable* (págs. 3788-3796). Beijing: Heng Wei; Yinhai Wang; Jian Rong & Jiancheng Weng.