



**COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS AHP Y TOPSIS COMO ENFOQUE DE
SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE SELECCIÓN DE COMPONENTES DE UN
PORTAFOLIO**

Julián Alberto Rojas Cepeda

John Jairo Flórez Mora

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C., Colombia

2023



**Comparación De Las Metodologías AHP y TOPSIS Como Enfoque De Solución Al
Problema De Selección De Componentes De Un Portafolio**

Julián Alberto Rojas Cepeda

John Jairo Flórez Mora

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de Proyectos

Director (a):

Milton Januario Rueda Varón

Modalidad:

Monografía

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá, Colombia

2023

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C., día/mes/año



El maestro, es aquel que puede hacer una obra útil a terceros,

Antonio Escotado



Agradecimientos

Son muchas las personas especiales a las que nos gustaría agradecer su colaboración, ánimo y compañía en las diferentes etapas de la culminación no solo de este trabajo, sino, de esta fase de estudios superiores.

A nuestras familias por brindarnos su apoyo incondicional, su sabiduría y experiencia que nos permiten continuar a pesar de las dificultades y dudas que se presentan en este camino.

Al profesor Milton Januario Rueda Varón, nuestro director que con su experiencia y conocimiento nos enseñó gran parte de los que es hoy este trabajo. Su compromiso y entrega constituyen un ejemplo digno de admiración.

Por último, gracias a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a llegar a este punto de nuestras vidas, donde se espera con deseo genuino aportar para la solución de problemas complejos de nuestra área de conocimiento y la vida en general, que permitan dejar un lugar mejor que aquel que encontramos.

Resumen

El propósito de la investigación es comparar el desempeño de los modelos de selección de proyectos AHP y TOPSIS, en la selección de proyectos de un portafolio. Para tal fin, se desarrolló la simulación de las metodologías más utilizadas en este tipo de problemas, a través de la técnica Monte Carlo; con los resultados obtenidos, se realizó la comparación estadística de su desempeño utilizando la prueba de rangos signados de Wilcoxon.

Los resultados mostraron que el desempeño de las dos técnicas de decisión multicriterio no es estadísticamente diferente. En términos de eficiencia, la técnica TOPSIS resulta computacionalmente menos complicada ya que requiere una menor cantidad de pasos para generar la solución, comparado con la metodología AHP.

La principal implicación académica de la investigación desarrollada, es la verificación del desempeño de las dos metodologías analizadas para la selección de proyectos, no obstante, sus conclusiones se limitan a una aplicación general y no a una industria particular. En este sentido, se desarrolló un algoritmo que permite la implementación de las metodologías en cualquier ámbito, parametrizando los valores deseados.

Al demostrar que no se presenta una diferencia estadísticamente significativa entre los modelos de toma de decisiones AHP y TOPSIS, a nivel de su desempeño para la selección de proyectos únicos, su aplicación en las organizaciones dependerá de los recursos disponibles y el acceso a la información requerida para su implementación, más no del resultado esperado de las mismos.

Palabras clave: Selección de Proyectos, AHP, TOPSIS, Gestión de Portafolios de Proyectos, Simulación de Monte Carlo.

Abstract

The purpose of the research is to compare the performance of the AHP and TOPSIS project selection models, in the selection of projects from a portfolio. For this purpose, the simulation of the most used methodologies in this type of problems was developed, through the Monte Carlo technique; with the results obtained, the statistical comparison of their performance was made using the Wilcoxon signed rank test.

The results showed that the performance of the two multicriteria decision techniques is not statistically different. In terms of efficiency, the TOPSIS technique is computationally less complicated since it requires fewer steps to generate the solution, compared to the AHP methodology.

The main academic implication of the research developed is the verification of the performance of the two methodologies analyzed for the selection of projects; however, its conclusions are limited to a general application and not to a particular industry. In this sense, an algorithm was developed that allows the implementation of the methodologies in any field, parameterizing the desired values.

By demonstrating that there is no statistically significant difference between the AHP and TOPSIS decision-making models, at the level of their performance for the selection of unique projects, their application in organizations will depend on the available resources and the access to the required information for its implementation, but not the expected result thereof.

Keywords: Project Selection, AHP, TOPSIS, Project Portfolio Management, Monte Carlo Simulation.

Tabla de Contenido

Lista de Figuras	10
Lista de Tablas	11
Lista de Anexos	12
1. Introducción	13
1.1 Descripción del Problema	15
1.2 Pregunta de Investigación.....	16
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. Justificación	18
4. Marco Teórico	19
4.1 Métodos de Decisión y Evaluación Multicriterio	21
4.2 Metodología AHP (Proceso Analítico Jerárquico)	21
4.3 Estructura del Modelo AHP	22
4.4 Comparación de Pares.....	23
4.5 Construcción de las Matrices de Juicio	24
4.5.1 Matriz de Comparaciones Pareada.....	24
4.5.2 Matriz de Prioridades.....	25
4.6 Análisis de Consistencia	25
4.7 Metodología TOPSIS	26

	9
4.8 Simulación de Monte Carlo	27
4.9 Estado del Arte	28
4.10 Hipótesis.....	31
4.11 Variables.....	31
5. Metodología	33
5.1 Población y Muestra	33
5.2 Selección de Métodos o Instrumentos Para la Recolección de la Información	35
5.3 Diseño del Instrumento	37
5.4 Trabajo de Campo.....	38
6. Discusión.....	52
6.1 Costo Presupuesto.....	53
6.2 Plazo.....	57
6.3 Recursos de Mano de Obra.....	61
7. Conclusiones y Trabajos Futuros	67
8. Referencias	72

Lista de Figuras

Figura 1	20
Figura 2	23
Figura 3	36
Figura 4	54
Figura 5	55
Figura 6	58
Figura 7	59
Figura 8	62
Figura 9	63

Lista de Tablas

Tabla 1	24
Tabla 2	32
Tabla 3	34
Tabla 4	39
Tabla 5	42
Tabla 6	52
Tabla 7	53
Tabla 8	56
Tabla 9	56
Tabla 10	57
Tabla 11	60
Tabla 12	60
Tabla 13	61
Tabla 14	64
Tabla 15	64
Tabla 16	65

Lista de Anexos

Anexo A	69
---------------	----

1. Introducción

La administración de portafolios es un proceso complejo y crítico que traduce operativamente la misión de la empresa y la estrategia en proyectos (Abdallah & Sicotte, 2018). En este proceso, nuevos proyectos son evaluados, seleccionados y priorizados; los proyectos existentes pueden ser acelerados, eliminados o despriorizados, ajustando la asignación de recursos de forma constante (Cooper et al., 2001), es por esto que la toma de decisiones se caracteriza por la incertidumbre, oportunidades dinámicas, múltiples objetivos y consideraciones estratégicas, así como la interdependencia de los proyectos (Baptestone & Rabechini Jr., 2018), haciendo de la selección de componentes que constituirán el portafolio una parte crítica dentro de la gestión.

La selección de portafolios de proyectos se conoce como un esfuerzo periódico y continuo que implica la selección y financiación de proyectos alineados con las metas estratégicas de la compañía (Mohagheghi et al., 2019), en el cual generalmente se busca maximizar el valor del portafolio a través de la identificación de un conjunto de proyectos que permita a la compañía alcanzar la mayor rentabilidad comparada con otro conjunto de proyectos (Abdallah & Sicotte, 2018).

Este proceso es crucial para mantener la ventaja competitiva, permitiendo a la compañía enfocarse en los proyectos más relevantes y estratégicos; sin embargo, las empresas tienen dificultades para gestionar este proceso (Chaparro et al., 2019). La complejidad en la selección de proyectos de un portafolio se presenta principalmente por dos elementos: en primer lugar, la información requerida para determinar si un proyecto va ser exitoso o no es extremadamente difícil de identificar y obtener (Baker, 1974); y segundo, como las condiciones de los proyectos y del entorno son demasiado volátiles, los objetivos estratégicos pueden cambiar, promoviendo altos niveles de incertidumbre (Rice et al. 2008).

Se han propuesto diferentes métodos para abordar los retos que supone la selección de proyectos, apalancado en una variedad de técnicas las cuales se pueden agrupar según su enfoque, a saber: 1) criterios de selección y evaluación, 2) incertidumbre, 3) aproximación por modelamiento y 4) soluciones aproximadas (Mohagheghi et al., 2019). Sin embargo, la literatura actual presenta una dualidad: aunque existe un número creciente de marcos que respaldan la selección de proyectos en un portafolio, la adopción por parte de las empresas y su impacto sigue siendo limitado (Chaparro et al., 2019). Además, se presenta una falta de fundamentos teóricos para estos marcos (Kavadias & Chao, 2008).

En particular, para este trabajo de investigación, se analizó la aproximación por modelamiento, más específicamente los modelos de tomas de decisiones multicriterio (MCDM), dada la tendencia gradual en el incremento del número de artículos publicados sobre el tema (Wallenius, y otros, 2008), no obstante, existen metodologías basadas en inteligencia artificial (AI) o algoritmos genéticos que proponen una solución al problema de selección de proyectos de un portafolio.

Por otro lado, como lo menciona Danesh, Ryan y Abbasi (2018) dentro de los métodos multicriterios, se destacan en particular para el tópico tratado en este trabajo, los modelos de decisión discretos multiatributos (MADM), agrupados en las siguientes categorías expuestas por los autores: 1) Técnica Basadas en Utilidad, 2) Métodos de Superación, 3) Métodos de Compromiso y 4) Otras Técnicas MADM.

Para efectos del presente estudio, se seleccionaron las técnicas AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), las cuales están asociadas a las técnicas basadas en utilidad y los métodos de superación respectivamente. La elección de estas metodologías se debe a su reconocimiento por ser modelos de puntuación, los cuales hacen parte de las mejores prácticas para el proceso de selección, debido a sus resultados y facilidades en su implementación (Benaija & Kjiri,

2015), con el fin de explorar su desempeño y recomendar posibles usos en el entorno empresarial.

1.1 Descripción del Problema

La gestión sistémica de los portafolios de proyectos ha demostrado mejora en los beneficios para las organizaciones (Platje, Seidel, & Wadman, 1994), resaltando en varios estudios el interés específico por las prácticas de selección y priorización (Artto, Dietrich, , & Nurminen, 2004), ya que la escogencia de los proyectos hace parte de los procesos significativos para la administración de las compañías.

Dentro de los objetivos que enuncia Cooper, Edgett y Kleinschmidt (2022), como principal derrotero para la administración de portafolios, se destacan tres elementos: maximizar el valor del portafolio, desarrollar la estrategia organizacional y balancear la asignación de recursos. Dichos elementos pueden ser analizados simultáneamente a través del uso de metodologías de toma de decisión multicriterio (MDCM) (Danesh, Ryan, & Abbasi, 2018).

Sin embargo, determinar el o los métodos más adecuados para la administración del portafolio de proyectos y específicamente la selección de componentes, resulta una labor desafiante que implica una revisión constructiva y una comparación de los métodos disponibles, tal como lo señala Danesh et al. (2018), con el fin de encontrar el idóneo para la toma de decisión de los proyectos que aportan mayor valor a los objetivos corporativos.

Con base en lo descrito anteriormente, el presente estudio aborda la comparación de las metodologías AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), con el fin determinar a través de un mecanismo estadístico cuál de las dos presenta un mejor desempeño. Cabe resaltar que, para esta investigación, se define desempeño como la relación entre la selección de proyectos y un criterio fijado,

la cual está cuantificada a través del número de componentes del portafolio seleccionados por cada una de las metodologías, hasta cumplir una restricción asignada a las variables de decisión. Es importante mencionar que, para todos los casos, tanto las variables como el criterio de evaluación es el mismo en los dos modelos de toma de decisión multicriterio evaluados.

1.2 Pregunta de Investigación

¿Cuál de las metodologías AHP (Analytic Hierarchy Process) o TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) utilizadas en la selección de componentes de un portafolio de proyectos presenta mejor indicador de desempeño?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar una comparación de las metodologías AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) de selección de componentes de un portafolio, para establecer cuál de éstas presenta mejor indicador de desempeño.

2.2 Objetivos Específicos

1. Aplicar las metodologías de puntuación AHP y TOPSIS en la selección de componentes de un portafolio único.
2. Desarrollar un algoritmo para el cálculo de las metodologías AHP y TOPSIS e implementar la simulación de éstas.
3. Comparar a través de una prueba de igualdad de medias o medianas las metodologías de selección para establecer cuál de éstas presenta un mejor indicador de desempeño.
4. Analizar los resultados del ejercicio comparativo y emitir las conclusiones y recomendaciones para la aplicación de las metodologías evaluadas.

3. Justificación

Durante las últimas cuatro décadas, la selección de proyectos en un portafolio ha sido uno de los temas cruciales para los investigadores, gerentes de proyectos, empresas orientadas a proyectos e instituciones públicas en todo el mundo (Raada et al., 2019). Esto ocurre principalmente porque los recursos requeridos para la implementación de los proyectos candidatos superan con creces los recursos de inversión disponibles (Mohagheghi et al., 2017).

La investigación planteada resulta conveniente, en la validación de dos de las técnicas de toma de decisiones multicriterios de mayor uso para la selección de componentes de un portafolio (AHP y TOPSIS), buscando evaluar cuál de estas presenta un mejor desempeño, estadísticamente hablando, con el fin de aportar a la revisión y comparación de los métodos disponibles, ya que como lo menciona Geraldí (2008), se requiere más investigación para determinar exactamente los tipos de métodos más convenientes para la evaluación y selección de proyectos.

Por otro lado, el presente estudio aporta en la discusión y propone nuevos elementos de investigación sobre los criterios a tener en cuenta para las metodologías analizadas, además, el resultado obtenido, puede ser empleado como base para futuros trabajos de validación y revisión de modelos de toma de decisiones multicriterio (MCDM) en la selección de componente de un portafolio, ya sea a nivel académico o empresarial.

4. Marco Teórico

La planeación estratégica en una organización es la hoja de ruta para alcanzar las metas y objetivos que están alineados con la visión y misión. Los proyectos son los elementos claves para la ejecución o puesta en marcha de dicha estrategia, y es acá cuando aparece la **Gestión de Portafolios de Proyectos**. The Standard for Portfolio Management- Fourth Edition (Project Management Institute, 2017) define la gerencia de portafolios como “la gestión centralizada de uno o más portafolios que contribuyen al alcance de los objetivos estratégicos de una organización”. El estándar internacional ISO 21504:2015 (International Organization for Standardization, 2015) define como portafolio al agrupamiento de proyectos, programas, subportafolios o trabajos relacionados que juntos permiten cumplir los objetivos estratégicos de una organización. El estándar Management of Portfolios- First Edition (Jenner, Office of Government Commerce, & Craig Kilford, 2011) define la gestión de portafolios como “la totalidad de la inversión de una organización (o de una parte de ella) en los cambios requeridos para conseguir sus objetivos estratégicos”, por lo cual, gestionar el portafolio, desde el punto de vista de MoP, implica la integración coordinada de procesos y decisiones encaminadas a lograr el balance entre el negocio habitual y el cambio organizacional. Sin embargo, no es suficiente con tener un universo de proyectos que en la teoría podrían o no estar apuntando a alcanzar los objetivos estratégicos de las organizaciones, sino que, a su vez, se debe introducir una herramienta que logre el consenso técnico de cuáles de esos proyectos deben ser ejecutados más prontamente, permitiendo determinar la asignación y distribución de los recursos financieros y humanos de estos.

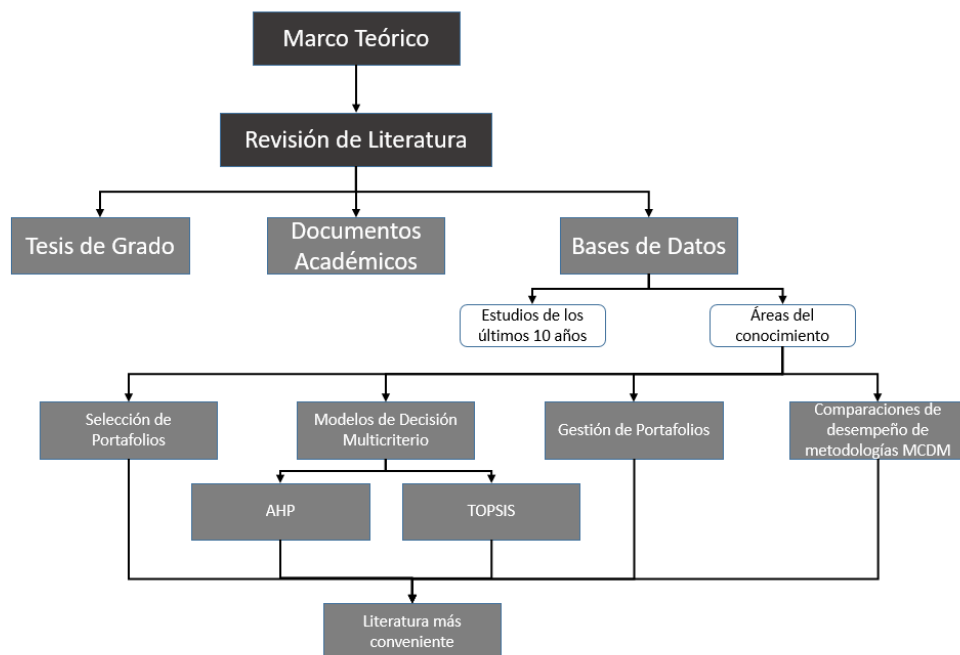
En este contexto, existen varios grupos de metodologías que se pueden implementar en esta área de la gestión de portafolios, los cuales se resumen, como lo propone Mohagheghi

et al. (2019), en: 1) criterios de selección y evaluación, 2) incertidumbre, 3) aproximación por modelamiento y 4) soluciones aproximadas. Para el análisis desarrollado en el presente estudio, se tendrán en cuenta los métodos de decisión y evaluación multicriterio, que hacen parte de la categoría de aproximación por modelamiento.

En la construcción del marco teórico de la presente investigación, se desarrolló un proceso sistémico de búsqueda y selección de la literatura más conveniente, el cual se describe en la Figura 1 que se presenta a continuación:

Figura 1

Mapa Conceptual



Nota. El gráfico representa el proceso para la construcción del Marco Teórico. Fuente:

Elaboración propia.

4.1 Métodos de Decisión y Evaluación Multicriterio

Los métodos de decisión y evaluación multicriterio se concentran en la elección entre un grupo de opciones factibles, las cuales se evalúan a través de varias funciones objetivos y un agente de toma de decisiones (Vergara Rodríguez et al, 2018). Por otro lado, se denominan problemas de decisión multicriterio discretos aquellos que presentan alternativas de decisión finitas y que resultan ser los más comunes.

Dos de los métodos más conocidos de decisión y evaluación multicriterio son **AHP** (Analytic Hierarchy Process), la cual ha sido aplicada mayormente en modelos multiobjetivo, multicriterio y multi interesado con relativo éxito ya que permite incorporar la diversidad que implica la toma de decisiones, además de criterios tangibles e intangibles a través de la integración del juicio de expertos en términos expresados numéricamente, los cuales se comparan recíprocamente con pares (Saaty, 2016); y **TOPSIS** (Technique for order preference by similarity to ideal solution), la cual selecciona la mejor alternativa a través de la minimización de la distancia a la solución ideal positiva y maximiza la distancia a la solución ideal negativa. Según Aruldoss et al. (2013) dicha técnica es una de las más aplicadas en la toma de decisiones multicriterio.

4.2 Metodología AHP (Proceso Analítico Jerárquico)

Según Nantes (2019), AHP es un método cuantitativo para la toma de decisiones multicriterio basado en rangos de prioridades construidas a partir de juicios de expertos expresados en comparaciones por pares, utilizando una gama de preferencia. Dicha escala permite aplicar un modelo de decisión sobre percepciones, juicios y experiencias, incorporando la preferencia de una opción frente a otra en relación con un atributo.

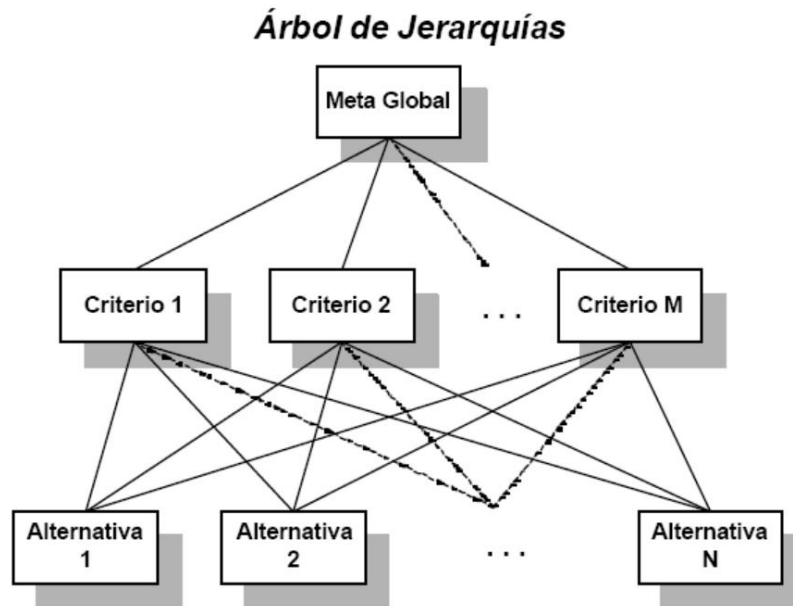
4.3 Estructura del Modelo AHP

La manera de estructurar el problema de forma jerárquica, tal como se muestra en la Figura 2, es la primera y más importante parte del método AHP. En esta sección se realiza la desintegración del problema en sus partes más importantes. El principio de la jerarquía básica está constituido por el objetivo general, los criterios y las alternativas. Según Saaty (2008), la fabricación del modelo jerárquico se resume en los siguientes 4 pasos:

1. **Identificación del Problema:** Corresponde al evento del cual se desea darle una solución a través de la elección de una alternativa.
2. **Definición del Objetivo:** Recoge de forma independiente la necesidad de la organización.
3. **Identificación de Criterios:** Corresponde a los puntos principales que impactan a los objetivos y deben influir en la preferencia de los tomadores de la decisión.
4. **Identificación de Alternativas:** Hace referencia a las opciones factibles que permiten la consecución del objetivo. Cada una de las alternativas presenta características con elementos a favor y en contra.

Figura 2

Árbol de Jerarquías-Modelo AHP



Nota. El gráfico representa la relación entre la meta buscada a través de la selección de una o varias alternativas que se relacionan a través de criterios. Tomado de *The Analytic Hierarchy Process: A Survey of the Method and Its Applications* (Zahedi, 1986).

4.4 Comparación de Pares

Esta comparación es la base fundamental de la metodología AHP, la cual utiliza una escala con valores del 1 al 9, como se puede ver en la Tabla 1, para calificar las referencias relativas de dos elementos, es decir, medir escalarmente la preferencia de un elemento sobre otro.

Tabla 1

Escala Fundamental de Preferencia

INTENSIDAD	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	De igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta e incuestionable
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
Recíprocos	$a(ij) = 1/(ji)$	Cuanto i tiene un valor respecto a j igual a un entero de los indicadores de arriba, entonces el valor de j respecto a i es igual a $1/a$

Nota. La tabla precisa cuantas magnitudes es preferible un criterio o alternativa sobre otro.

Tomada de *Escala fundamental de preferencia* (Saaty T. , 1980)

4.5 Construcción de las Matrices de Juicio de Valor

Como lo define Julca (2009), se deben construir dos tipos de matrices de juicio de valor:

4.5.1 Matriz de Comparaciones Pareadas: Permite comparar parejas de criterios o alternativas. Una vez desarrollada, se procede al cálculo de la prioridad de cada una de las opciones (sintetización). Luego, se calcula matemáticamente los valores y vectores característicos de la siguiente manera:

Paso 1: Sumatoria de los valores de cada una de las columnas que componen la matriz de comparaciones pareadas.

Paso 2: Se normaliza la matriz, dividiendo cada uno de los elementos de la columna entre la sumatoria calculada en el paso anterior.

Paso 3: Se calcula el promedio de cada fila de la matriz.

Al finalizar la construcción de la matriz, se obtienen las prioridades generales y las alternativas incluidas en el análisis de forma ordenada.

4.5.2 Matriz de Prioridades: Agrupa las prioridades para cada una de las alternativas en función de los criterios de toma de decisión. Adicionalmente, asigna a cada criterio una prioridad en términos de una meta global, para obtener al final la prioridad global de cada alternativa de decisión como el producto entre la matriz de prioridades y el vector de prioridades de los criterios.

4.6 Análisis de Consistencia

El análisis de consistencia asegura que la toma de decisión sea lo más objetiva posible; sin embargo, conseguir una consistencia perfecta es complicado y siempre existirá un cierto grado de inconsistencia en cualquier conjunto de comparaciones pareadas.

Esta técnica suministra un modelo para cuantificar la consistencia entre las prioridades ofrecidas a los tomadores de decisiones, generando una compuerta para continuar con el proceso si su consistencia es aceptable; de lo contrario, se debe reconfigurar las preferencias sobre las comparaciones antes de continuar con el análisis.

Matemáticamente se puede decir que una matriz de comparación es consistente si todas las columnas y filas que componen la matriz son linealmente dependientes. Como resultado, la técnica computa la razón de consistencia (RC), la cual de ser menor o igual al 10%, se puede concluir que presenta una consistencia razonable.

4.7 Metodología TOPSIS

Según Alberto y Carignan (2007), la técnica TOPSIS se basa en la idea que una alternativa es mejor en función de su cercanía a una solución ideal y alejada respecto a una solución anti ideal.

La solución ideal hace referencia a un conjunto de puntuaciones de los atributos considerados en el problema, los cuales representan el mejor estado que pueden tomar los niveles que conforman la decisión, aun cuando estos no sean factibles de obtener. En consecuencia, lo que se busca con la aplicación del modelo es encontrar una solución factible que esté lo más cerca posible a la solución ideal y, a su vez, lo más alejada de una solución anti ideal.

Para esto, la metodología TOPSIS define un criterio de similaridad o proximidad relativa, con el cual se mide de forma conjunta la cercanía a la solución ideal y la lejanía respecto a la solución anti ideal, también conocida como **ideal negativo**, con el cual se selecciona aquella alternativa con el índice más alto.

La metodología TOPSIS determina en un primer paso el valor normalizado ponderado de cada *alternativa i* respecto al *criterio j* a través del cálculo de la distancia euclidiana como:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Los coeficientes obtenidos para cada alternativa son ponderados como se describe a continuación:

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

Se procede a calcular las distancias de cada *alternativa i* al ideal positivos $S(+)$ y al ideal negativo $S(-)$ de la siguiente manera:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad S_j^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

Finalmente, se obtiene el índice de similaridad al ideal positivo evaluado como el cociente:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}$$

Se concluye entonces que, cuanto más elevado es el índice de similaridad, más lejos se ubica la alternativa evaluada respecto a la solución anti ideal, en relación con la distancia entre las dos soluciones marco de referencia (ideal y anti ideal).

4.8 Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo, desarrollada y utilizada sistémicamente por primera vez en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial, permite abordar analíticamente sistemas complejos o modelos de experimentación donde la consecución de los resultados es lenta, costosa o poco práctica. Este método de simulación, utiliza un muestreo aleatorio y modelado estadístico para estimar funciones matemáticas e imitar las operaciones de sistemas complejos (Harrison, 2010). Para el caso particular del presente estudio, la técnica de simulación requiere funciones de densidad de probabilidad para describir los valores de los criterios que determinan la selección de los componentes del portafolio. En otras palabras, se debe tener claro el comportamiento de las variables dado por su función de probabilidad y de esta forma simular sus valores.

En el marco de la selección de proyectos de un portafolio, se ha empleado esta técnica de simulación, junto con el uso de modelos de toma de decisiones multicriterios (MCDM),

con el fin de generar herramientas eficientes, en problemas a gran escala como el propuesto por Mavrotas y Makryvelios (2020), en donde para un caso real de estudio de Grecia con 2.437 proyectos de investigación y desarrollo, el uso combinado de las metodologías generó resultados factibles, en tiempos computacionales asequibles, a pesar de la magnitud del problema y el número de cálculos requeridos.

4.9 Estado del Arte

A partir de la comprensión del papel vital que juega la selección de proyectos y su alineación con la estrategia para lograr el éxito en las organizaciones, en los últimos años buena parte de los estudios se ha volcado sobre este tema (Mahmoudi et al., 2021).

Como los proyectos hacen parte activa del alto desempeño de las compañías, resulta crítica la habilidad que éstas tengan para hacer la selección de dichos proyectos con base en indicadores claves (Shields & Boyer-Wright, 2017). La revisión de literatura propone para el proceso de toma de decisiones utilizar más de un parámetro en la selección de proyectos, centrandolo en el análisis en la capacidad de selección basado en el desempeño de diferentes indicadores claves de rendimiento (Allen et al., 2014). Según el estudio de Mahmoudi et al., (2021), una de las aproximaciones más usadas son las técnicas de toma de decisiones multicriterio.

Según Danesh, Ryan y Abbasi (2018), las herramientas de decisión multicriterio se pueden clasificar en dos categorías: modelos de decisión discretos multiatributos (MADM) y modelos de decisión multiobjetivos (MODM), donde se destacan las aproximaciones por programación lineal, no lineal, multi-objetivos y por metas. Para el caso particular de esta investigación, son analizadas dos metodologías que forman parte de los modelos de decisión discretos multiatributos (MADM): AHP y TOPSIS, las cuales tratan de solucionar problemas que, por lo general, no presentan una respuesta óptima que pueda satisfacer todos los

criterios al mismo tiempo. Por el contrario, se debe buscar una solución factible lo más cercana posible a la ideal (Awasthi et al., 2011). El objetivo primario es asistir a los tomadores de decisiones para obtener perspectivas sobre el problema, aprender sobre los objetivos de la organización y a través del problema de selección, detectar el curso de acción preferido (Jabbarzadeh, 2018), dando lugar a la discusión sobre cuál de las técnicas hoy desarrolladas se adapta mejor al tipo de decisión que se está tomando.

Por otro lado, al revisar las investigaciones realizadas sobre la medición y comparación de técnicas de toma de decisiones multicriterio, buscando determinar cuáles presentan un mejor desempeño, estadísticamente hablando, existen aproximaciones como la realizada por Saaty y Ergu (2015) en la que proponen una serie de criterios metodológicamente relevantes con el fin de evaluar este tipo de herramientas; además, plantean el reto al que se enfrentan los tomadores de decisiones a la hora de elegir cual es más valiosa para su problema.

Dentro del campo específico de los modelos evaluados (AHP y TOPSIS), existen algunos trabajos de comparación entre dichos métodos en áreas como la ingeniería eléctrica, en la que, para el caso de estudio de generación óptima, los dos modelos coinciden en la misma solución (Kittur et al., 2015). Así mismo, al indagar en la literatura sobre sus aplicaciones en la resolución de problemas de decisión, se resalta el éxito en la aplicación de la técnica TOPSIS en una amplia variedad de áreas y sectores industriales con diferentes términos y temas, requiriendo un mayor énfasis en los problemas interdisciplinarios y de decisión social. Además, resulta particularmente versátil para combinarse con otras técnicas, permitiendo ampliar su rango de manejo de problemas prácticos y teórico (Behzadian et al., 2012).

A su vez, AHP es una de las técnicas más usadas por los investigadores de todo el mundo debido a su simplicidad y versatilidad con alta precisión, hallando gran acogida en

la resolución de problemas de identificación de selección de equipos, máquina crítica y métodos de diagnóstico (Khairaa & Dwivedib, 2018).

Ahora bien, en el campo de los proyectos, el uso de modelos multicriterio no se queda atrás, encontrando aplicaciones con resultados sobresalientes en la evaluación y selección de proyectos basados en criterios financieros (Vijayakumar et al., 2021). De igual manera, se destaca el amplio uso de técnicas como AHP, ANP o TOPSIS en la selección de proyectos de un portafolio (Sadi-Nezhad, 2017). Esta primera, en particular, con aplicaciones en problemas clásicos en la administración de proyectos como lo es el de la precalificación de contratistas (Al-Subhi Al-Harbi, 2001), o en TOPSIS donde se destaca su popularidad en aplicaciones relacionadas con proyectos de mejora, revestimiento ecológico, tecnologías de información, desarrollo de yacimientos petrolíferos, entre otros (Behzadian et al., 2012).

En esta misma línea, se encuentra el uso de la combinación de más de una técnica, lo cual resultan conveniente en situaciones de incertidumbre, sobresaliendo la aplicación de AHP en problemáticas de selección de proyectos para analizar su estructura y determinar el peso de los criterios; seguido de TOPSIS (difuso) para obtener el ranking de proyectos a elegir dentro del portafolio (Pakdin Amiri, 2010), concluyendo que estos métodos (multicriterio) proporcionan el enfoque sistémico para la toma de decisiones, ayudando a los gerentes de proyectos a seleccionar y priorizar proyectos.

Con base en lo analizado, resulta relevante en el estudio del problema de selección de proyectos evaluar el desempeño de las herramientas de toma de decisiones más utilizadas en este campo, esto con el fin de guiar a los gerentes de proyectos en la elección de la solución que resulte de mayor conveniencia, para lo cual se propone el desarrollo dentro de un ambiente controlado y acotado, un comparativo con significancia estadística de los modelos AHP y TOPSIS.

Aunado a lo anterior, esta iniciativa, a pesar de su validez estadística y pertinencia en el análisis de decisiones, ve limitado su alcance por los paradigmas y desafíos que plantea el uso de técnicas multicriterio para la toma de decisiones, en el que, a pesar del resultado matemático, existe un límite difuso entre la factibilidad y no factibilidad en un contexto real de toma de decisiones debido a otros factores de tipo organizacional, pedagógicos o culturales que contribuyen a su calidad y éxito (Roy, 2015). Por lo tanto, las conclusiones que se generen de esta investigación, corresponden a una recomendación y dependerá del tomador de decisiones si se ajusta a su problema particular.

4.10 Hipótesis

A continuación, se describe la hipótesis evaluada dentro del trabajo de investigación:

- La metodología TOPSIS presenta mejor desempeño que la metodología AHP en la selección de proyectos únicos de un portafolio.

4.11 Variables

A continuación, se presenta en la Tabla 2 las variables empleadas en esta investigación para la aplicación y evaluación de las metodologías de selección de componentes de un portafolio:

Tabla 2*Variables de la investigación*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Costo Presupuesto	Monto asignado de recursos financieros para la ejecución del proyecto.	Pesos (\$) COL
Plazo	Tiempo de implementación de los componentes del portafolio hasta su cierre o puesta en operación.	Meses
Recursos de mano de obra	Cantidad de profesionales requeridos para cada proyecto.	Número de Personas
Riesgo	Determina el grado de seguridad de la inversión.	Alto-Medio-Bajo
Impacto estratégico	Determina como afecta positivamente la implementación del proyecto.	Alto-Medio-Bajo
Retorno de la inversión	Índice de recuperación de la inversión	Meses
Desempeño	Relación entre la selección de proyectos y el criterio fijado.	Número de Proyectos Asignados

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

5. Metodología

Para el desarrollo de los objetivos planteados se realizó un estudio cuantitativo de tipo correlacional. Utilizando un análisis estadístico, se verificó para una configuración de portafolio (en este caso único) el desempeño de las metodologías analizadas en la selección de los componentes.

El alcance del análisis se limita a hacer una comparación del desempeño de la metodología AHP y TOPSIS en la selección de un portafolio único conformado por proyectos. Cabe aclarar que las configuraciones que se tuvieron en cuenta en la investigación no corresponden a ningún caso particular de la industria.

5.1 Población y Muestra

Esta investigación se desarrolla sobre técnicas de simulación, de esta forma, los conceptos de población y muestra no corresponden a las definiciones convencionales dadas a este respecto. Buscando analogías a este punto y para un mejor entendimiento, se podría mencionar que la población que se utilizó para la evaluación de las metodologías, corresponde a las configuraciones de proyectos únicos, los cuales se generarán a partir de la combinación de las seis variables de decisión definidas para la investigación: Costo Presupuesto, Plazo, Recursos de mano de obra, Riesgo, Impacto Estratégico y Retorno de la inversión. De esta manera, las configuraciones con mayor probabilidad, corresponderán a la muestra seleccionada para el análisis, sobre las cuales se hace el desarrollo de la investigación. Cada uno de los elementos mencionados toma los valores según la distribución de probabilidad que describe su comportamiento; el tipo de distribución y los parámetros de las mismas, se establecieron tal y como se explica en la Tabla 3 presentada a continuación:

Tabla 3

Tipo de Variable/ Factor

Variable	Tipo	Unidad	Distribución	Parámetros	Explicación
Retorno de la Inversión	Continua	Meses	Normal	Media 66 meses. Desviación Estándar 25 meses.	Yeta et al. (2016) modelaron a través de una red bayesiana el cálculo del costo, los beneficios y el retorno de la inversión de proyectos, obteniendo una distribución de probabilidad Normal para esta última variable en cada uno de los años de evaluación de la inversión (10 años).
Plazo	Continua	Meses	Normal	Media 32 meses. Desviación Estándar 15 meses.	Ballestín y Leus (2007) argumentan que, para distintas distribuciones de duración de proyectos, el intervalo de una secuencia dada se vuelve aproximadamente Normal cuando un gran número de proyectos están involucrados.
Costo Presupuesto	Continua	Pesos (\$)	Normal	Media 550 M. Desviación Estándar 180 M.	Como lo indica Geberemariam (2018), las distribuciones de probabilidad son útiles en la estimación de costos de proyectos de ingeniería. En particular, la distribución Normal es comúnmente usada en diferentes industrias como la de construcción.
Recursos de mano de obra	Continua	Número de Personas	Normal	Media 150 personas. Desviación Estándar 35 personas.	Djedovic et al. (2018) relacionan dentro de los métodos empleados para la modelación de la asignación de recursos humanos el uso de algoritmos que emplean la distribución normal.
Riesgo	Discreta	Alto-Medio-Bajo	Uniforme Discreta	Min 1, Max 3	Olson y Wu (2011) mencionan como una de las técnicas de valoración del riesgo la simulación de Monte Carlo, la cual utiliza dentro de sus supuestos las distribuciones de probabilidad, que, para este caso, es la distribución uniforme discreta dadas las categorías asignadas para la medición del riesgo.
Impacto Estratégico	Discreta	Alto-Medio-Bajo	Uniforme Discreta	Min 1, Max 3	Al-Sobai et al. (2020) resaltan la importancia del impacto estratégico de los proyectos por los beneficios que generan a largo plazo. Para efectos de la simulación, se seleccionó la distribución uniforme discreta dada la naturaleza equiprobable de los valores que esta variable puede tomar.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de muestras que conforman cada una de las simulaciones se determinó a partir de la evaluación de la calidad de los resultados con 10, 100 y 1.000 corridas del programa de simulación utilizando la metodología de Bootstrap (remuestreo hasta lograr la estabilidad de los resultados). Dada la estabilidad de los resultados obtenidos de la metodología mencionada, por práctica general se emplea la mínima cantidad de muestras necesarias para obtener resultados confiables, que para este caso es de diez corridas con

seis configuraciones de proyectos (60 combinaciones). Con el algoritmo diseñado, es posible realizar la simulación con cualquier cantidad de muestras.

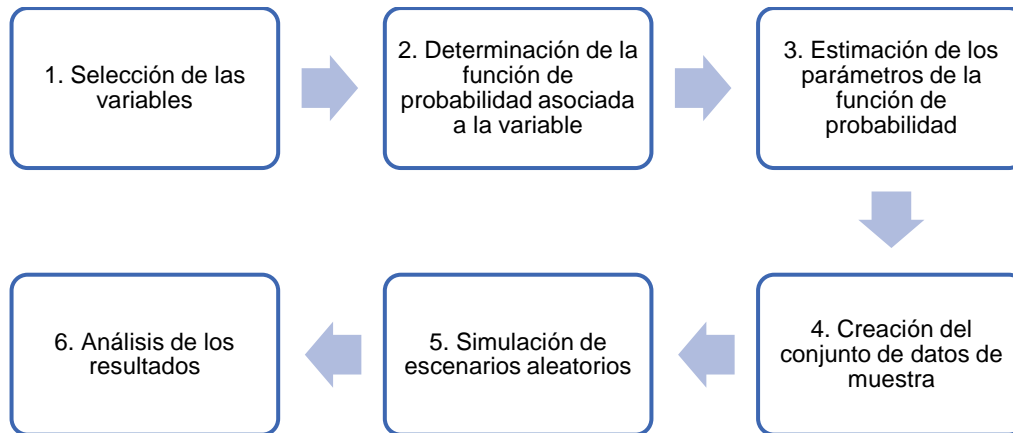
5.2 Selección de Métodos o Instrumentos para la Recolección de la Información

La recolección de la información se fundamenta en la simulación de un grupo de proyectos determinados por la combinación de las variables objeto de estudio. Lo anterior se desarrolla sistémicamente, garantizando la evaluación de forma significativa a nivel estadístico para cada una de las metodologías y su respectiva medición de desempeño, la cual está determinada por el número de proyectos seleccionados dentro de un límite definido para la investigación de costo presupuestado, plazo y recurso de mano de obra, evaluado de forma independiente. Cabe destacar que las demás variables incluidas en el estudio interactúan dentro de la simulación, pero no hacen parte de los criterios de medición de desempeño de las técnicas analizadas.

Como puede observarse en la Figura 3, el proceso de simulación requiere, además de las interacciones lógicas del fenómeno de estudio, la selección de las variables que lo representan y la asignación para cada una de ellas de una función de probabilidad, la cual describe su comportamiento dentro del sistema. Lo anterior permite predecir el valor futuro de la variable de respuesta seleccionada, teniendo como base la interacción aleatoria de los parámetros elegidos previamente.

Figura 3

Proceso de simulación de las metodologías AHP y TOPSIS



Nota. El gráfico representa el proceso para la construcción de la simulación de las metodologías AHP y TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.

Una de las técnicas más utilizadas de simulación es el método Monte Carlo, la cual se emplea principalmente para generar observaciones a partir de distribuciones conocidas (Hogg et al., 2012).

En este tipo de simulación, X es la variable de entrada con una distribución conocida de:

$$f(x) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad -\infty < x < \infty$$

En esta situación, $f(x)$ es la función de densidad de probabilidad (PDF). Integrando $f(x)$, la función de distribución acumulativa (CDF) de X sería:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 \leq y \leq 1$$

El CDF es estrictamente monótono creciente y está limitado por [0, 1]. Invertiendo la función de distribución acumulativa anterior, se obtiene:

$$F^{-1}(u) = (u_1, u_2, \dots, u_n), 0 \leq u \leq 1$$

Con la función invertida, se pasa a generar una serie de números aleatorios entre 0 y 1 para conectarlos a la función inversa $F^{-1}(u)$. Con este propósito, se generó un script (Ver anexo A) para simular los datos en cada una de las metodologías de acuerdo con la distribución establecida para cada variable.

Para este estudio, se definió desarrollar la simulación propuesta en el lenguaje de programación para el modelado y análisis estadístico R, dado sus ventajas de acceso al ser un lenguaje de código abierto y la variedad de paquetes y funcionalidades estadísticas que posee, las cuales resultan útiles para el análisis y comparación de los resultados.

5.3 Diseño del Instrumento

Una vez generados los escenarios de simulación a partir de las combinaciones de las variables anteriormente expuestas, es necesario comparar los resultados obtenidos con el fin de evaluar el desempeño de las metodologías AHP y TOPSIS.

Para esto, se desarrolló una prueba de rangos signados de Wilcoxon con el fin de comparar los conjuntos de datos obtenidos de la evaluación de los portafolios únicos simulados a través de las metodologías AHP y TOPSIS, esto frente al límite determinado para cada una de las variables incluidas en el estudio.

Se determinó la técnica de evaluación a partir del objetivo de la investigación, el cual consiste en comparar la variable de desempeño de las dos metodologías simuladas (número de proyectos seleccionados), que para este caso y dada la naturaleza de los

resultados, requiere una prueba no paramétrica. Lo anterior, ya que se cuenta con dos muestras en las que las variables no siguen en su totalidad las condiciones tradicionales de normalidad, las cuales, como lo indican Rubio y Berlanga (2012), corresponden al uso de variables cuantitativas continuas, la distribución normal de las muestras, varianzas similares y tamaño de las muestras mayor a 30 casos.

La prueba empleada para esta investigación, consiste en contrastar la hipótesis de igualdad entre dos medianas poblacionales. Con este fin, se define una hipótesis de referencia, llamada hipótesis nula (H_0), la cual se acepta o no de acuerdo con el comportamiento de los datos. De esta forma, la hipótesis nula a aprobar es que la mediana de la población de diferencias de los datos emparejados es cero; la hipótesis alternativa (H_1) es que no lo es.

Para facilitar la interpretación, la hipótesis nula (H_0) se rechaza si el valor de p (p_value), el cual mide la probabilidad para un modelo estadístico dado y que, cuando la hipótesis nula es verdadera, el resumen estadístico sería igual o más extremo que los resultados reales observados (Wasserstein & Lazar, 2016), **es menor a 0,05** (nivel de significancia estándar utilizado $\alpha=0,05$).

5.4 Trabajo de Campo

El caso de estudio a resolver en este trabajo requirió el desarrollo de las metodologías AHP y TOPSIS aplicadas al problema de selección de un portafolio de proyectos únicos. Para esto, se utilizó el ambiente de software libre para computación estadística y gráficos R, en el que se programaron las dos técnicas evaluadas. A continuación, se presenta un ejemplo que describe el proceso lógico desarrollado:

Tabla 4

Ejemplo Fase de Construcción Metodología TOPSIS

Datos de Entrada Ponderación de los Criterios:
Se asigna un peso porcentual a cada uno de los criterios de acuerdo con su importancia dentro de la organización. La suma total debe dar 100%

ROI	20%
Plazo	15%
Costo - Presupuesto	15%
Riesgo	15%
Impacto Estratégico	25%
Recurso Mano de Obra	10%

Para efectos de la simulación, se asignaron los pesos porcentuales para cada uno de los criterios. Estos valores se tomaron como referencia y serán los mismos datos de entrada para simular cada una de las metodologías, en otras palabras, el algoritmo permitirá variar la paramétrica ya que estos pueden cambiar o variar de acuerdo con el sector, tipo de industria u organización que implemente los proyectos.

Paso 1 Categorización de los criterios de decisión:

Se califica cada criterio de decisión de modo tal que facilite la construcción de las matrices de decisión con características que permitan realizar operaciones matemáticas.

Calificación 1 si el riesgo de implementar el proyecto es Muy Bajo

Calificación 2 si el riesgo de implementar el proyecto es Bajo

Calificación 3 si el riesgo de implementar el proyecto es Moderado

Calificación 4 si el riesgo de implementar el proyecto es Alto

Calificación 5 si el riesgo de implementar el proyecto es Muy Alto

Paso 2 Construcción de la Matriz de Decisión:

Con la cantidad de proyectos a evaluar y sus criterios categorizados y calificados, se construye la Matriz de Decisión

Matriz de Decisión

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos
PROYECTO 1	2	1	5	4	1	2

PROYECTO 2	3	5	3	4	5	2
PROYECTO 3	4	4	1	2	3	2
S-	2	1	1	2	1	2
S+	4	5	5	4	5	2

Paso 3 Normalización de la Matriz de Decisión:

Una vez se tiene la matriz de decisión, se procede a encontrar la matriz normalizada aplicando la fórmula que indica el procedimiento TOPSIS

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos
PROYECTO 1	0,37	0,15	0,85	0,67	0,17	0,58
PROYECTO 2	0,56	0,77	0,51	0,67	0,85	0,58
PROYECTO 3	0,74	0,62	0,17	0,33	0,51	0,58
S-	0,37	0,15	0,17	0,33	0,17	0,58
S+	0,74	0,77	0,85	0,67	0,85	0,58

Paso 4 Matriz de Decisión Normalizada Ponderada:

Matriz Normalizada Ponderada

	20%	15%	15%	15%	25%	10%
	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos
PROYECTO 1	0,07	0,02	0,13	0,10	0,04	0,06
PROYECTO 2	0,11	0,12	0,08	0,10	0,21	0,06
PROYECTO 3	0,15	0,09	0,03	0,05	0,13	0,06
S-	0,07	0,02	0,03	0,05	0,04	0,06
S+	0,15	0,12	0,13	0,10	0,21	0,06

Paso 5 Determinación de la Solución Ideal Positiva (A+) y la Solución Anti ideal o Ideal Negativa (A-):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad S_j^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

Distancia a solución ideal negativa:

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos	Distancia A-
PROYECTO 1	0,0000	0,0000	0,0103	0,0025	0,0000	0,0000	0,1131
PROYECTO 2	0,0014	0,0086	0,0026	0,0025	0,0286	0,0000	0,2088
PROYECTO 3	0,0055	0,0048	0,0000	0,0000	0,0071	0,0000	0,1322

Distancia a solución ideal positiva:

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos	Distancia A+
PROYECTO 1	0,0055	0,0086	0,0000	0,0000	0,0286	0,0000	0,2065
PROYECTO 2	0,0014	0,0000	0,0026	0,0000	0,0000	0,0000	0,0629
PROYECTO 3	0,0000	0,0005	0,0103	0,0025	0,0071	0,0000	0,1431

Paso 6 Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}$$

	Distancia A-	Distancia A+	Proximidad Relativa	x100
PROYECTO 1	0,1131	0,2065	0,3538	35,3779
PROYECTO 2	0,2088	0,0629	0,7686	76,8614
PROYECTO 3	0,1322	0,1431	0,4803	48,0318

Paso 7 Priorización:

	Distancia A-	Distancia A+	Proximidad Relativa	x100	Ranking
PROYECTO 1	0,1131	0,2065	0,3538	35,3779	3
PROYECTO 2	0,2088	0,0629	0,7686	76,8614	1
PROYECTO 3	0,1322	0,1431	0,4803	48,0318	2

La priorización se realiza ordenando las alternativas tomando como parámetro el radio de similitud en orden descendente.

Entonces, para este caso podemos decir que el *Proyecto 2* es el que genera mayor beneficio para la organización en términos de los criterios establecidos.

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5

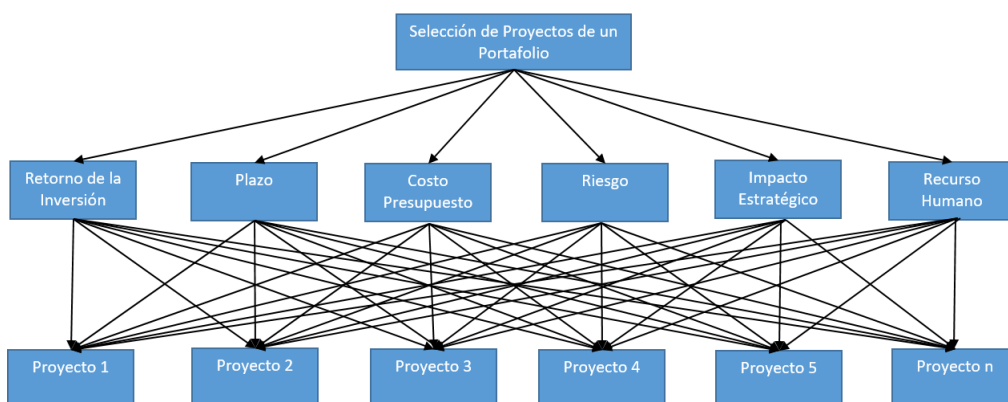
Ejemplo Fase de Construcción Metodología AHP

Paso 1

Establecer la Estructura Jerárquica AHP:

Declaración del enunciado: Se debe tomar una decisión sobre 3 posibles proyectos a ejecutar en una compañía, valorados de acuerdo con seis (6) criterios: ROI, Plazo, Costo – Presupuesto, Riesgo, Impacto Estratégico, Recurso Humano.

Con este enunciado, la estructura jerárquica quedaría de la siguiente manera:



En donde:

Nivel 3: Objetivo principal (Selección de proyectos de un portafolio).

Nivel 2: Criterios (ROI, Plazo, Costo – Presupuesto, Riesgo, Impacto Estratégico, Recurso Humano).

Nivel 1: Alternativas (Proyecto 1, Proyecto 2, Proyecto 3, Proyecto 4, Proyecto 5, Proyecto 6).

Paso 2

Para desarrollar los cálculos definidos en la metodología, se deben establecer comparaciones por parejas. Tomando como referencia la estructura jerárquica, se comparan los proyectos o alternativas respecto a cada criterio de decisión.

Para establecer esta comparación y poder reflejar esos juicios cualitativos y transformarlos en cuantitativos, utilizando la escala de Saaty (1978).

INTENSIDAD	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	De igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta e incuestionable
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
Recíprocos	$a(ij) = 1/(ji)$	Cuanto i tiene un valor respecto a j igual a un entero de los indicadores de arriba, entonces el valor de j respecto a i es igual a $1/a$

Paso 3 Categorización de los Criterios de Decisión:

La construcción de la matriz de decisión se hace mediante la valoración de las preferencias o juicios de valor, ya sea por el juicio de expertos, o por parte del tomador de decisiones o conocedor de todo el ámbito que rodean los criterios sobre los que se están comparando (Nivel 2 de la estructura jerárquica).

Matriz de Comparaciones Entre Criterios

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos
ROI	1	5	2	3	1	9
Plazo	1/5	1	1	2	1	3
Costo Presupuesto	1/2	1	1	2	3	3
Riesgo	1/3	1/2	1/2	1	1	3
Impacto estratégico	1	1	1/3	1	1	5
Recursos	1/9	1/3	1/3	1/3	1/5	1

Paso 4 Cálculo del Vector Propio:

Una vez obtenida la matriz de comparaciones entre criterios, se calcula el vector propio aproximado. Para nuestro caso, vamos a hacerlo mediante la suma de los elementos de cada fila con el fin de normalizar dividiendo cada una de las sumas entre la suma de todas las filas.

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos	Vector Propio	Vector Propio Normalizado
ROI	1	5	2	3	1	9	21,00	0,36
Plazo	1/5	1	1	2	1	3	8,20	0,14
Costo Presupuesto	1/2	1	1	2	3	3	10,50	0,18
Riesgo	1/3	1/2	1/2	1	1	3	6,33	0,11
Impacto estratégico	1	1	1/3	1	1	5	9,33	0,16
Recursos	1/9	1/3	1/3	1/3	1/5	1	2,31	0,04

Paso 5 Cálculo del Autovalor de Mayor Valor Asociado:

Con el vector propio calculado, procedemos a utilizar la relación proporcionada por Saaty para poder conocer el autovalor de mayor valor asociado:

$$\delta_{max} = V * B$$

En donde:

δ_{max} : Es el autovalor máximo de la matriz evaluada.

V: Vector propio de la matriz evaluada.

B: Es una matriz que se corresponde con la suma de los elementos de cada columna de la matriz.

	ROI	Plazo	Costo Presupuesto	Riesgo	Impacto estratégico	Recursos	Vector V
ROI	1	5	2	3	1	9	0,36
Plazo	1/5	1	1	2	1	3	0,14
Costo Presupuesto	1/2	1	1	2	3	3	0,18
Riesgo	1/3	1/2	1/2	1	1	3	0,11
Impacto estratégico	1	1	1/3	1	1	5	0,16
Recursos	1/9	1/3	1/3	1/3	1/5	1	0,04
Vector B	3,1	8,8	5,2	9,3	7,2	24,0	

Se procede a calcular y tenemos como resultado que:

$$\delta_{\max} = 6,49$$

Paso 6 Cálculo del Índice de Consistencia:

Con el autovalor propio máximo, se calcula el Índice de Consistencia de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

Donde n es el tamaño de la matriz evaluada.

Se aplica la ecuación y tenemos que: $CI = 0,10$

Paso 7 Cálculo de la Relación de Consistencia:

Para obtener la Relación de Consistencia, utilizaremos la tabla propuesta por Saaty que muestra los Índices Aleatorios en función del tamaño de la matriz:

Tabla 5.2 Valores de los índices aleatorio de consistencia de A (IA)

Nº de Elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio de Consistencia (IA)	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

La ecuación de relación de consistencia de Saaty:

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,10}{1,24} = 0,079$$

De acuerdo con la metodología de Saaty se tiene que:

RC menor o igual a 0,10: Consistencia Razonable.

RC mayor a 0,10: Inconsistencia.

Dado que el valor calculado para RC es menor que $= 0,10$, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos expresados en la matriz de comparaciones de criterios.

Paso 8 Cálculos para Nivel 1 o Nivel de alternativas de Proyectos:

Los expertos o los tomadores de decisiones deberán volver a emitir sus juicios relativos de los niveles inferiores para el cálculo de los auto vectores asociados al mayor valor propio (preferencias). Se realizarán comparaciones entre proyectos (alternativas) para cada uno de los seis criterios (ROI, Plazo, Costo – Presupuesto, Riesgo, Impacto Estratégico, Recurso Humano) utilizando la misma metodología que se empleó para la evaluación de los criterios anteriormente expuesta.

Paso 9 Matriz para el tercer nivel de la estructura jerárquica: ROI**Matriz de Comparaciones Criterio ROI**

	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3	PROYECTO 4	PROYECTO 5	PROYECTO 6	Vector Propio	Vector V
PROYECTO 1	1	1	1	1	2	5	11,00	0,24
PROYECTO 2	1	1	2	3	2	2	11,00	0,24
PROYECTO 3	1	1/2	1	2	4	1	9,50	0,20
PROYECTO 4	1	1/3	1/2	1	3	1	6,83	0,15
PROYECTO 5	1/2	1/2	1/4	1/3	1	1	3,58	0,08
PROYECTO 6	1/5	1/2	1	1	1	1	4,70	0,10
Vector B	4,7	3,8	5,8	8,3	13,0	11,0		

$$\delta \max = 6,52$$

Paso 10 Matriz para el tercer nivel de la estructura jerárquica: Costo - Presupuesto**Matriz de Comparaciones Criterio COSTO - PRESUPUESTO**

	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3	PROYECTO 4	PROYECTO 5	PROYECTO 6	Vector Propio	Vector V
PROYECTO 1	1	1	2	2	4	1	11,00	0,23
PROYECTO 2	1	1	2	1	5	3	13,00	0,27
PROYECTO 3	1/2	1/2	1	3	1	3	9,00	0,19
PROYECTO 4	1/2	1	1/3	1	1	2	5,83	0,12
PROYECTO 5	1/4	1/5	1	1	1	1	4,45	0,09
PROYECTO 6	1	1/3	1/3	1/2	1	1	4,17	0,09
Vector B	4,3	4,0	6,7	8,5	13,0	11,0		

$$\delta \max = 6,58$$

Paso 11 Matriz para el tercer nivel de la estructura jerárquica: Riesgo**Matriz de Comparaciones Criterio RIESGO**

	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3	PROYECTO 4	PROYECTO 5	PROYECTO 6	Vector Propio	Vector V
PROYECTO 1	1	1	4	2	4	1	13,00	0,27

PROYECTO 2	1	1	3	1	2	4	12,00	0,25
PROYECTO 3	1/4	1/3	1	1	1	2	5,58	0,12
PROYECTO 4	1/2	1	1	1	3	2	8,50	0,18
PROYECTO 5	1/4	1/2	1	1/3	1	1	4,08	0,09
PROYECTO 6	1	1/4	1/2	1/2	1	1	4,25	0,09
Vector B	4,0	4,1	10,5	5,8	12,0	11,0		

δ max = 6,43

Paso 12 Matriz para el tercer nivel de la estructura jerárquica: Impacto Estratégico

Matriz de Comparaciones Criterio IMPACTO ESTRATEGICO

	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3	PROYECTO 4	PROYECTO 5	PROYECTO 6	Vector Propio	Vector V
PROYECTO 1	1	2	1	2	4	2	12,00	0,24
PROYECTO 2	1/2	1	3	2	3	4	13,50	0,27
PROYECTO 3	1	1/3	1	2	1	3	8,33	0,17
PROYECTO 4	1/2	1/2	1/2	1	3	2	7,50	0,15
PROYECTO 5	1/4	1/3	1	1/3	1	2	4,92	0,10
PROYECTO 6	1/2	1/4	1/3	1/2	1/2	1	3,08	0,06
Vector B	3,8	4,4	6,8	7,8	12,5	14,0		

δ max = 6,59

Paso 13 Matriz para el tercer nivel de la estructura jerárquica: Recursos

Matriz de Comparaciones Criterio RECURSOS

	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3	PROYECTO 4	PROYECTO 5	PROYECTO 6	Vector Propio	Vector V
PROYECTO 1	1	1	1	2	1	1	7,00	0,16
PROYECTO 2	1	1	3	1	3	4	13,00	0,29
PROYECTO 3	1	1/3	1	3	1	3	9,33	0,21
PROYECTO 4	1/2	1	1/3	1	1	2	5,83	0,13
PROYECTO 5	1	1/3	1	1	1	2	6,33	0,14
PROYECTO 6	1	1/4	1/3	1/2	1/2	1	3,58	0,08

Vector B	5,5	3,9	6,7	8,5	7,5	13,0
----------	-----	-----	-----	-----	-----	------

$$\delta_{\max} = 6,55$$

Paso 14 Matriz para el tercer nivel de la estructura jerárquica: Plazo

Matriz de Comparaciones Criterio PLAZO

	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3	PROYECTO 4	PROYECTO 5	PROYECTO 6	Vector Propio	Vector V
PROYECTO 1	1	1	6	2	4	5	19,00	0,36
PROYECTO 2	1	1	3	1	2	4	12,00	0,23
PROYECTO 3	1/6	1/3	1	3	1	1	6,50	0,12
PROYECTO 4	1/2	1	1/3	1	1	2	5,83	0,11
PROYECTO 5	1/4	1/2	1	1	1	2	5,75	0,11
PROYECTO 6	1/5	1/4	1	1/2	1/2	1	3,45	0,07
Vector B	3,1	4,1	12,3	8,5	9,5	15,0		

$$\delta_{\max} = 6,55$$

Paso 15 Cálculo del Índice de y Relación de Consistencia: ROI

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

Se aplica la ecuación y tenemos el índice de consistencia: $CI = 0,10$

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,10}{1,24} = 0,083$$

Dado que el valor calculado para RC es menor que 0,10, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos; RC menor o igual a 0,10 da una Consistencia Razonable.

Paso 16 Cálculo del Índice de y Relación de Consistencia: COSTO PRESUPUESTO

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

Se aplica la ecuación y tenemos el índice de consistencia: $CI = 0,12$

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,12}{1,24} = 0,094$$

Dado que el valor calculado para RC es menor que 0,10, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos; RC menor o igual a 0,10 da una Consistencia Razonable.

Paso 17 Cálculo del Índice de y Relación de Consistencia: RIESGO

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

Se aplica la ecuación y tenemos el índice de consistencia: $CI = 0,09$

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,09}{1,24} = 0,070$$

Dado que el valor calculado para RC es menor que 0,10, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos; RC menor o igual a 0,10 da una Consistencia Razonable.

Paso 18 Cálculo del Índice de y Relación de Consistencia: IMPACTO ESTRATEGICO

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

Se aplica la ecuación y tenemos que el índice de consistencia: $CI = 0,12$

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,12}{1,24} = 0,095$$

Dado que el valor calculado para RC es menor que 0,10, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos; RC menor o igual a 0,10 da una Consistencia Razonable.

Paso 19 Cálculo del Índice de y Relación de Consistencia: RECURSOS

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

Se aplica la ecuación y tenemos el índice de consistencia: $CI = 0,11$

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,11}{1,24} = 0,089$$

Dado que el valor calculado para RC es menor que 0,10, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos; RC menor o igual a 0,10 da una Consistencia Razonable.

Paso 20 Cálculo del Índice de y Relación de Consistencia: PLAZO

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

Se aplica la ecuación y tenemos el índice de consistencia: $CI = -0,11$

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

Y aplicando la ecuación tenemos que:

$$RC = \frac{0,11}{1,24} = 0,089$$

Dado que el valor calculado para RC es menor que 0,10, no es necesario volver a establecer los juicios de expertos; RC menor o igual a 0,10 da una Consistencia Razonable.

Paso 21 Construcción de la Matriz de Pesos Globales:

Terminada la comprobación de Consistencia de las matrices de criterios, podemos construir la matriz de pesos globales para cada proyecto o alternativas.

Esta matriz la conformarán los auto vectores calculados para cada criterio.

Los pesos globales se calcularán mediante una suma ponderada de las preferencias con los pesos locales calculados en la matriz del nivel 2.

La matriz de pesos globales quedaría así:

Matriz de Pesos Globales

	ROI	Plazo	Costo Presupue sto	Riesgo	Impacto estratégi co	Recursos	Pesos Globales
PROYECTO 1	0,24	0,36	0,23	0,27	0,24	0,16	0,255
PROYECTO 2	0,24	0,23	0,27	0,25	0,27	0,29	0,252
PROYECTO 3	0,20	0,12	0,19	0,12	0,17	0,21	0,175

PROYECTO 4	0,15	0,11	0,12	0,18	0,15	0,13	0,141
PROYECTO 5	0,08	0,11	0,09	0,09	0,10	0,14	0,092
PROYECTO 6	0,10	0,07	0,09	0,09	0,06	0,08	0,085

En donde:

$$0,255 = 0,24 \cdot 0,3641 + 0,36 \cdot 0,1422 + 0,23 \cdot 0,1820 + 0,27 \cdot 0,1098 + 0,24 \cdot 0,1618 + 0,16 \cdot 0,0401$$

$$0,252 = 0,24 \cdot 0,3641 + 0,23 \cdot 0,1422 + 0,27 \cdot 0,1820 + 0,25 \cdot 0,1098 + 0,27 \cdot 0,1618 + 0,29 \cdot 0,0401$$

$$0,175 = 0,20 \cdot 0,3641 + 0,12 \cdot 0,1422 + 0,19 \cdot 0,1820 + 0,12 \cdot 0,1098 + 0,17 \cdot 0,1618 + 0,21 \cdot 0,0401$$

$$0,141 = 0,15 \cdot 0,3641 + 0,11 \cdot 0,1422 + 0,12 \cdot 0,1820 + 0,18 \cdot 0,1098 + 0,15 \cdot 0,1618 + 0,13 \cdot 0,0401$$

$$0,092 = 0,08 \cdot 0,3641 + 0,11 \cdot 0,1422 + 0,09 \cdot 0,1820 + 0,09 \cdot 0,1098 + 0,10 \cdot 0,1618 + 0,14 \cdot 0,0401$$

$$0,085 = 0,10 \cdot 0,3641 + 0,07 \cdot 0,1422 + 0,09 \cdot 0,1820 + 0,09 \cdot 0,1098 + 0,06 \cdot 0,1618 + 0,08 \cdot 0,0401$$

Paso 22 Determinación del Ranking de los Proyectos:

Proyecto Evaluado	Pesos Globales	Ranking
PROYECTO 1	0,255	1
PROYECTO 2	0,252	2
PROYECTO 3	0,175	3
PROYECTO 4	0,141	4
PROYECTO 5	0,092	5
PROYECTO 6	0,085	6

Por último, se realiza la jerarquización de los proyectos de acuerdo con su valoración y se enlistan en orden descendente, tomando como primera alternativa el proyecto que obtenga el mayor peso global.

Así entonces para este caso podemos decir que el Proyecto 1 es el que genera mayor beneficio para la organización en términos de los criterios establecidos.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

6. Discusión

A partir de los datos obtenidos de las simulaciones realizadas utilizando el lenguaje de programación para el modelado y análisis estadístico R, se comparó la selección de proyectos generada para cada una de las metodologías con los criterios que se muestran en la Tabla 6 presentada a continuación:

Tabla 6

Criterios para la medición de desempeño de las metodologías de selección de proyectos

Variable	Unidad	Valor
Costo Presupuesto	Pesos (\$) en MM	2.150
Plazo	Meses	102
Recursos de mano de obra	Número de Personas	570

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Dicha comparación consiste en cuantificar la cantidad de proyectos únicos que pueden ser seleccionados antes que su valor acumulado (dependiendo la variable que se esté analizando) tome el valor definido como criterio de comparación del desempeño. Este proceso analítico se realiza para cada una de las simulaciones, por cada una de las metodologías evaluadas, y la tabulación de los datos generados constituyen el grupo de muestras que fueron evaluadas a través de la prueba de rangos signados de Wilcoxon. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las variables de desempeño analizadas dentro del estudio:

6.1 Costo Presupuesto

Hace referencia al monto asignado de recursos financieros que requieren ser destinados para la ejecución del proyecto evaluado. Los valores obtenidos a partir de la simulación son:

Tabla 7

Resultados de la simulación para la variable Costo Presupuesto

Simulación	# Proyectos Seleccionados		Costo Presupuesto (\$)	
	TOPSIS	AHP	TOPSIS	AHP
1	4	4	\$ 2.036	\$ 2.081
2	4	3	\$ 2.140	\$ 1.683
3	3	3	\$ 1.542	\$ 1.739
4	3	3	\$ 1.812	\$ 1.812
5	3	3	\$ 1.761	\$ 1.700
6	3	3	\$ 1.810	\$ 1.777
7	4	4	\$ 1.929	\$ 1.929
8	3	3	\$ 1.591	\$ 1.789
9	4	4	\$ 2.000	\$ 2.148
10	3	3	\$ 1.466	\$ 1.466

Nota. Fuente: Elaboración propia.

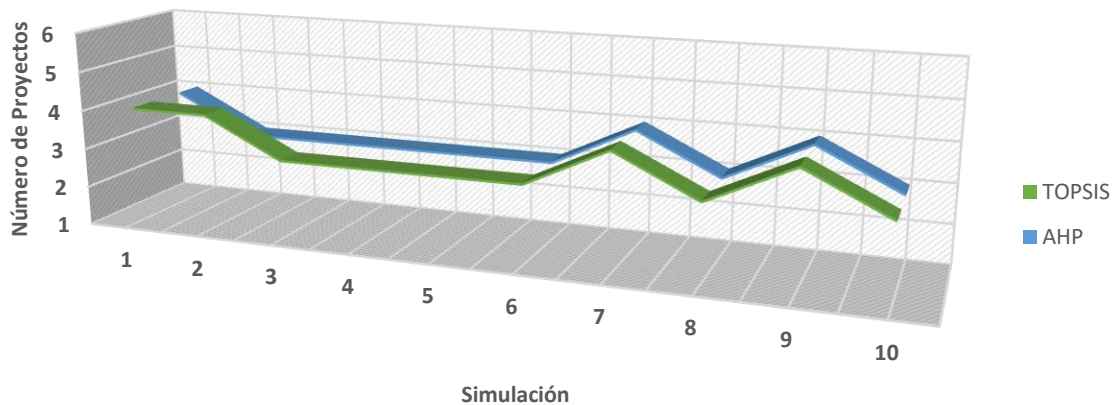
El Costo Presupuesto es la suma de los valores unitarios de los proyectos seleccionados por cada una de las metodologías, la cual se compara frente al criterio de desempeño y permite determinar el conjunto de proyectos ordenados que cumplen la condición establecida para su comparación.

Por otro lado, el número de proyectos seleccionados corresponde a la cantidad de proyectos ordenados según cada una de las metodologías que no superan el monto establecido como criterio para la medición del desempeño, en este caso \$2.150 M.

A continuación, en la Figura 4 se presenta de forma gráfica el resultado de la cantidad de proyectos seleccionados por las metodologías AHP y TOPSIS, en donde el 90% de las simulaciones evaluadas, seleccionaron la misma cantidad de proyectos.

Figura 4

Gráfico comparativo del número de proyectos seleccionados con el criterio de Costo Presupuesto

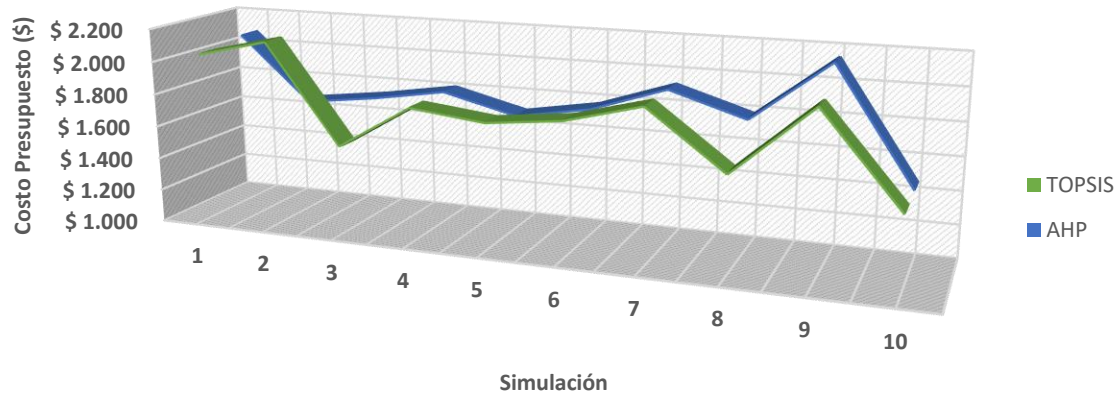


Nota. El gráfico muestra la cantidad de proyectos seleccionados que cumplen con el criterio Costo Presupuesto para cada una de las simulaciones realizadas con la metodología AHP y Topsis. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 5, el resultado de la suma del costo presupuestado de los proyectos seleccionados por cada una de las metodologías es el mismo en el 30% de las simulaciones, mientras que el 70% restante presentan una diferencia promedio de \$162,7 M.

Figura 5

Gráfico comparativo de la sumatoria de la variable Costo Presupuesto



Nota. El gráfico muestra la suma de los valores obtenidos de la variable Costo Presupuesto para los proyectos seleccionados en cada una de las simulaciones realizadas con la metodología AHP y TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de comparar el desempeño de las metodologías de selección de proyectos evaluadas, se procedió a aplicar la prueba estadística definida para esta investigación. Los resultados se presentan en las Tablas 8 y 9 mostradas a continuación:

Tabla 8

Resultados de la prueba estadística aplicada al número de proyectos seleccionados con el criterio de Costo Presupuesto

Prueba de Rangos Signados de Wilcoxon	
Hipótesis Nula (H_0)	La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS, para el número de proyectos ordenados, seleccionados con el criterio de Costo Presupuesto es cero.
Resultados	data: Proy_Costo_AHP y Proy_Costo_TOPSIS V=0 (Estadístico de Wilcoxon) p-value=1
Conclusión	Como la condición del valor p es mayor a 0,05, se puede afirmar que la diferencia entre las medianas de la metodología AHP y TOPSIS para la comparación del número de proyectos ordenados seleccionados no es significativa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Resultados de la prueba estadística aplicada a la variable de Costo Presupuesto

Prueba de Rangos Signados de Wilcoxon	
Hipótesis Nula (H_0)	La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS, para la variable de Costo Presupuesto es cero.
Resultados	data: Costo_AHP y Costo_TOPSIS V=17 (Estadístico de Wilcoxon) p-value=0,6726
Conclusión	Como la condición del valor p es mayor a 0,05, se puede afirmar que la diferencia entre las medianas de la metodología AHP y TOPSIS para la variable analizada no es significativa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Plazo

Se refiere al tiempo de implementación de los componentes del portafolio o proyectos únicos hasta su cierre y puesta en producción. Los valores obtenidos a partir de la simulación son:

Tabla 10

Resultados de la simulación para la variable Plazo

Simulación	# Proyectos Seleccionados		Plazo (meses)	
	TOPSIS	AHP	TOPSIS	AHP
1	2	3	75	102
2	3	3	90	87
3	3	3	93	90
4	3	3	68	75
5	2	2	82	72
6	3	2	80	71
7	4	4	101	101
8	4	3	91	99
9	3	3	95	93
10	2	2	58	58

Nota. Fuente: Elaboración propia.

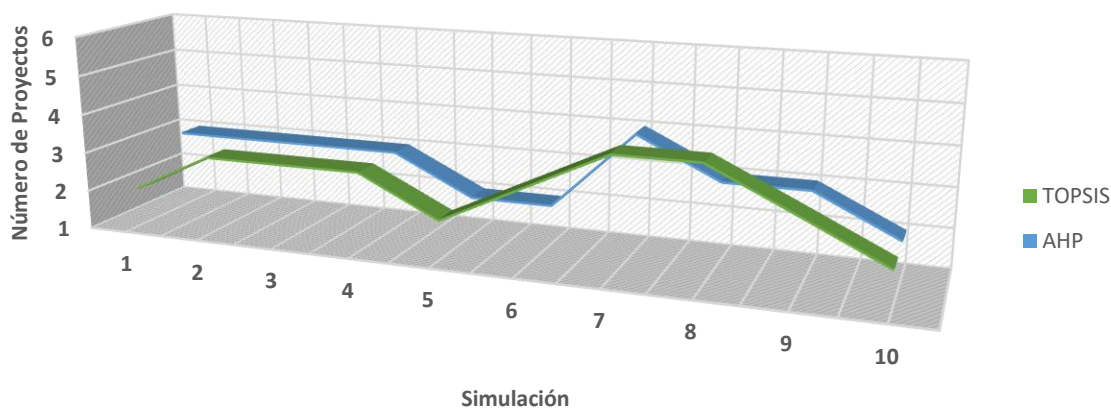
El Plazo es la suma de los valores unitarios de los proyectos seleccionados por cada una de las metodologías, el cual se compara frente al criterio de desempeño y permite determinar el conjunto de proyectos ordenados que cumplen la condición establecida para su comparación.

Por otro lado, el número de proyectos seleccionados corresponde a la cantidad de proyectos ordenados según cada una de las metodologías que no superan el monto establecido como criterio para la medición del desempeño, en este caso es de 102 meses.

A continuación, en la Figura 6 se presenta de forma gráfica el resultado de la cantidad de proyectos seleccionados por las metodologías AHP y TOPSIS, en el cual 70% de las simulaciones evaluadas seleccionaron la misma cantidad de proyectos.

Figura 6

Gráfico comparativo del número de proyectos seleccionados con el criterio de Plazo



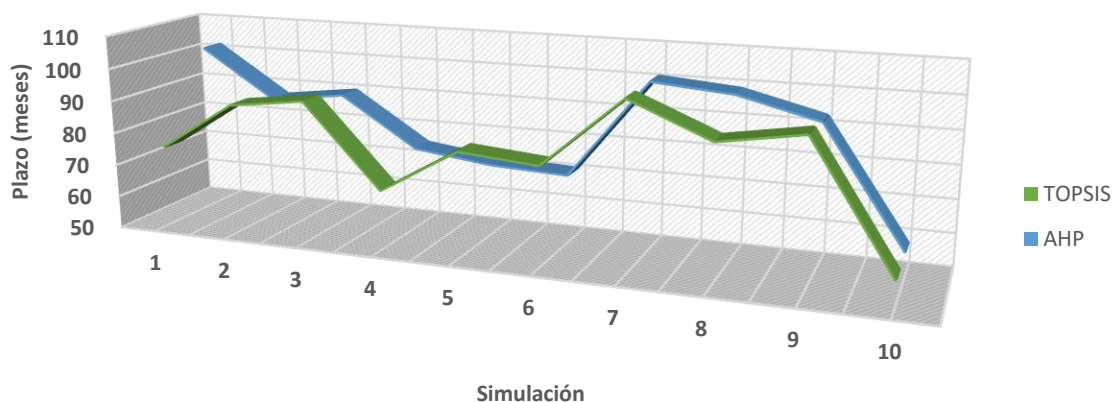
Nota. El gráfico muestra la cantidad de proyectos seleccionados que cumplen con el criterio de Plazo para cada una de las simulaciones realizadas con la metodología AHP y TOPSIS.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 7, el resultado de la suma del Plazo de los proyectos seleccionados por cada una de las metodologías es el mismo en el 20% de las simulaciones, mientras que el 80% restante presentan una diferencia promedio de 8,6 meses.

Figura 7

Gráfico comparativo de la sumatoria de la variable Plazo



Nota. El gráfico muestra la suma de los valores obtenidos de la variable Plazo para los proyectos seleccionados en cada una de las simulaciones realizadas con la metodología AHP y TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de comparar el desempeño de las metodologías de selección de proyectos evaluadas, se procedió a aplicar la prueba estadística definida para esta investigación. Los resultados se presentan en las Tablas 11 y 12 mostradas a continuación:

Tabla 11

Resultados de la prueba estadística aplicada al número de proyectos seleccionados con el criterio de Plazo

Prueba de Rangos Signados de Wilcoxon	
Hipótesis Nula (H_0)	La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS, para el número de proyectos ordenados, seleccionados con el criterio de Plazo es cero.
Resultados	data: Proy_Plazo_AHP y Proy_Plazo_TOPSIS V=2 (Estadístico de Wilcoxon), p-value=0,7728
Conclusión	Como la condición del valor p es mayor a 0,05, se puede afirmar que la diferencia entre las medianas de la metodología AHP y TOPSIS para la comparación del número de proyectos ordenados seleccionados, no es significativa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Resultados de la prueba estadística aplicada a la variable de Plazo

Prueba de Rangos Signados de Wilcoxon	
Hipótesis Nula (H_0)	La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS, para la variable de Plazo es cero.
Resultados	data: Plazo_AHP y Plazo_TOPSIS V=17(Estadístico de Wilcoxon), p-value=0,9441
Conclusión	Como la condición del valor p es mayor a 0,05, se puede afirmar que la diferencia entre las medianas de la metodología AHP y TOPSIS para la variable analizada no es significativa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

6.3 Recursos de Mano de Obra

Hace referencia a la cantidad de profesionales que se necesitan para la implementación de cada uno de los proyectos. Los valores obtenidos a partir de la simulación son:

Tabla 13

Resultados de la simulación para la variable Recurso de mano de obra

Simulación	# Proyectos Seleccionados		Recursos de mano de obra (personas)	
	TOPSIS	AHP	TOPSIS	AHP
1	3	3	510	566
2	4	4	522	495
3	3	3	547	487
4	3	3	515	515
5	3	3	562	556
6	3	3	408	541
7	3	3	426	426
8	3	3	446	447
9	3	3	528	540
10	3	3	407	407

Nota. Fuente: Elaboración propia.

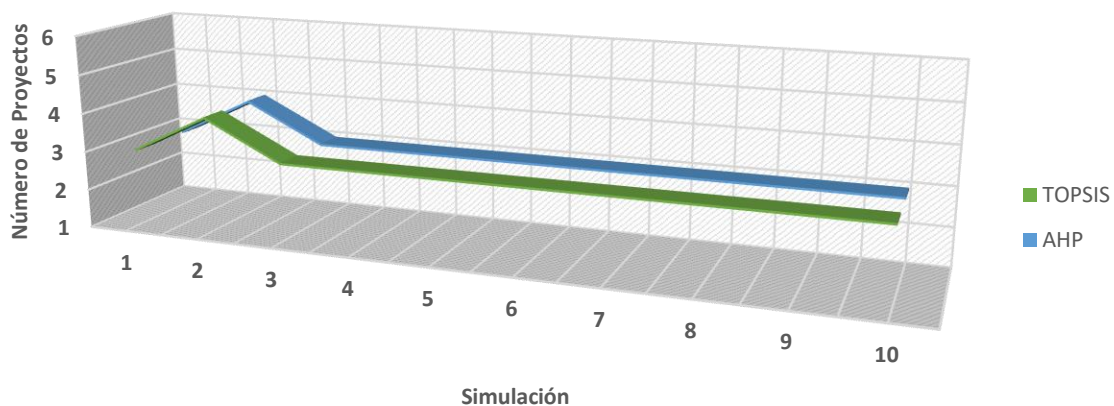
Los Recursos de mano de obra es la suma de los valores unitarios de los proyectos seleccionados por cada una de las metodologías, el cual se compara frente al criterio de desempeño y permite determinar el conjunto de proyectos ordenados que cumplen la condición establecida para su comparación.

Por otro lado, el número de proyectos seleccionados corresponde a la cantidad de proyectos ordenados según cada una de las metodologías que no superan el monto establecido como criterio para la medición del desempeño, en este caso es de 570 personas.

A continuación, en la Figura 8 se presenta de forma gráfica el resultado de la cantidad de proyectos seleccionados por las metodologías AHP y TOPSIS, en el cual el 100% de las simulaciones evaluadas seleccionaron la misma cantidad de proyectos.

Figura 8

Gráfico comparativo del número de proyectos seleccionados con el criterio de Recursos de mano de obra

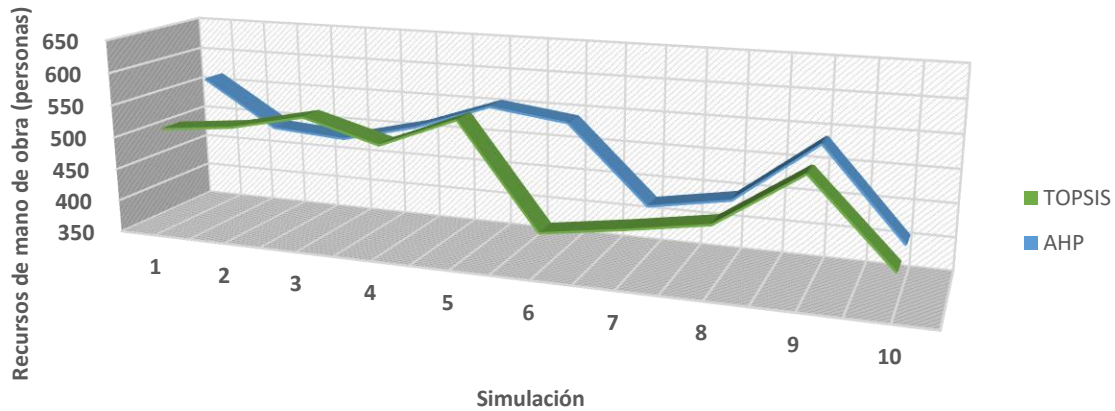


Nota. El gráfico muestra la cantidad de proyectos seleccionados que cumplen con el criterio de Recursos de mano de obra para cada una de las simulaciones realizadas con la metodología AHP y TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 9, el resultado de la suma del plazo de los proyectos seleccionados por cada una de las metodologías es el mismo en el 30% de las simulaciones, mientras que el 70% restante presentan una diferencia promedio de 42,1 personas.

Figura 9

Gráfico comparativo de la sumatoria de la variable Recursos de mano de obra



Nota. El gráfico muestra la suma de los valores obtenidos de la variable Recursos de mano de obra para los proyectos seleccionados en cada una de las simulaciones realizadas con la metodología AHP y TOPSIS. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de comparar el desempeño de las metodologías de selección de proyectos evaluadas, se procedió a aplicar la prueba estadística definida para esta investigación. Los resultados se presentan en las Tablas 14 y 15 mostradas a continuación:

Tabla 14

Resultados de la prueba estadística aplicada al número de proyectos seleccionados con el criterio de Recursos de mano de obra

Prueba de Rangos Signados de Wilcoxon	
Hipótesis Nula (H_0)	La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS, para el número de proyectos ordenados, seleccionados con el criterio de Recursos de mano de obra es cero.
Resultados	data: Recurso_Proj_AHP y Recurso_Proj_TOPSIS V=0 (Estadístico de Wilcoxon), p-value=1
Conclusión	Como la condición del valor p es mayor a 0,05, se puede afirmar que la diferencia entre las medianas de la metodología AHP y TOPSIS para la comparación del número de proyectos ordenados seleccionados no es significativa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Resultados de la prueba estadística aplicada a la variable de Plazo

Prueba de Rangos Signados de Wilcoxon	
Hipótesis Nula (H_0)	La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS, para la variable de Recursos de mano de obra es cero.
Resultados	data: Recurso_AHP y Recurso_TOPSIS V=16(Estadístico de Wilcoxon), p-value=0,7998
Conclusión	Como la condición del valor p es mayor a 0,05, se puede afirmar que la diferencia entre las medianas de la metodología AHP y TOPSIS para la variable analizada no es significativa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

A modo de resumen, se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de la prueba estadística de los rangos con signos de Wilcoxon para la comparación del desempeño de las metodologías de selección de proyectos analizadas en la presente investigación:

Tabla 16

Resumen de los resultados prueba de los rangos signados de Wilcoxon por variable

Variable	Criterio de comparación	Valor-p Prueba Wilcoxon	Análisis
Costo Presupuesto	Costo total de los proyectos seleccionados	0,6726	No se rechaza H_0 , por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas para este criterio.
	Número de proyectos seleccionados	1	No se rechaza H_0 , por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas para este criterio.
Plazo	Tiempo total estimado de ejecución de los proyectos seleccionados	0,9441	No se rechaza H_0 , por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas para este criterio.
	Número de proyectos seleccionados	0,7728	No se rechaza H_0 , por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas para este criterio.
Recursos de mano de obra	Cantidad total de personas requeridas en los proyectos seleccionados	0,7998	No se rechaza H_0 , por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas para este criterio.
	Número de proyectos seleccionados	1	No se rechaza H_0 , por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas para este criterio.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 16, una vez realizada la prueba de rangos signados de Wilcoxon, se observa que para ninguna de las variables analizadas la condición del valor p es menor a 0,05, por lo tanto se puede decir que no rechaza la Hipótesis Nula (H_0): La mediana de la población de diferencias entre los conjuntos de datos obtenidos por las metodologías AHP y TOPSIS es cero, concluyendo que no existen diferencias estadísticamente significativas para ninguno de los criterios evaluados.

7. Conclusiones y Trabajos Futuros

Este trabajo de investigación evaluó el desempeño de las metodologías AHP y TOPSIS aplicadas al problema de selección de un portafolio de proyectos únicos, a través de la simulación de éstas en el ambiente de software libre para computación estadística y gráficos R. Para este fin, a partir de los resultados obtenidos de la simulación, se comparó cuál de las metodologías de selección presentaba mejor desempeño confrontando el grupo de datos generados por cada técnica, utilizando la prueba estadística de los rangos signados de Wilcoxon con los criterios de comparación definidos para este estudio (Costo Presupuesto, Plazo y Recursos de mano de obra).

Los resultados mostraron que el desempeño, entendido como la relación entre la selección de proyectos y un criterio fijado, la cual está cuantificada a través del número de componentes del portafolio seleccionados por cada una de las metodologías, hasta cumplir una restricción asignada a las variables de decisión, para las dos técnicas que fueron objeto de estudio, no es estadísticamente diferente, rechazando la hipótesis inicial planteada para esta investigación.

Por otro lado, en términos de eficiencia, la técnica TOPSIS resulta computacionalmente menos complicada ya que requiere una menor cantidad de pasos para generar la solución, comparado con la metodología AHP. Teniendo en cuenta los resultados presentados anteriormente, sugiere mayor conveniencia la aplicación de la primera técnica, entendiendo que los componentes del portafolio seleccionados, no serán estadísticamente diferentes.

A nivel organizacional, el resultado obtenido permite a los administradores de proyectos, programas y portafolios, discernir entre las dos metodologías estudiadas, cual se ajusta mejor a sus condiciones de información y criterio, para la toma de la decisión de cuales proyectos aportan mayor valor a los objetivos corporativos, además que facilita el uso de

este tipo enfoques en el entorno empresarial, no obstante, se debe tener en cuenta que la factibilidad de la solución en un contexto real de toma de decisiones, está influenciado por otros factores de tipo organizacional, pedagógicos o culturales que contribuyen a su calidad y éxito. Adicionalmente, cuentan con la herramienta de simulación desarrollada para esta investigación, la cual se puede adaptar para evaluar distintos valores de los parámetros de decisión de acuerdo a su industria.

Para futuros trabajos, se propone evaluar nuevos parámetros o criterios para la simulación de las variables de decisión, los cuales pueden estar relacionados con una organización, industria o gremio en particular, con el fin de determinar si el resultado obtenido presenta variaciones estadísticamente significativas.

Anexo

Anexo A:

```
#####
#           SIMULACION ESCENARIOS           #
#           AHP y TOPSIS                     #
#####

#LIBRERIAS A UTILIZAR

library(readxl)
library(dplyr)
library(ggplot2)

# SIMULACION ALEATORIA DE VARIABLES #
# SE PUEDEN GENERAR DIFERENTES ITERACIONES
# PARA GENERAR MULTIPLES ESCENARIOS SIMPLEMENTE SE CORRE LA
# SIGUIENTE INSTRUCCION
# for(i in 1: seq_along(Output)){

Output<-data.frame(Replica=(seq(1:10)))

Proyectos <- data.frame(
Proyecto=seq(1:6),
ROI=as.integer( rnorm(6, mean=66, sd=25)),
Plazo =as.integer( rnorm(6, mean=32, sd=15)),
Costo =as.integer( rnorm(6, mean=550, sd=180)),
Riesgo=as.integer( runif(6, min=1, max=3)),
Impacto =as.integer( runif(6, min=1, max=3)),
Recursos=as.integer( rnorm(6, mean=150, sd=35)))

Proyectos$ROI2=Proyectos$ROI*Proyectos$ROI
Proyectos$Plazo2=Proyectos$Plazo*Proyectos$Plazo
Proyectos$Costo2 =Proyectos$Costo*Proyectos$Costo
Proyectos$Riesgo2 =Proyectos$Riesgo*Proyectos$Riesgo
Proyectos$Impacto2=Proyectos$Impacto*Proyectos$Impacto
Proyectos$Recursos2=Proyectos$Recursos*Proyectos$Recursos

Proyectos$ROI3<-(Proyectos$ROI2/sum(Proyectos$ROI2))*0.2
Proyectos$Plazo3<- (Proyectos$Plazo2/sum(Proyectos$Plazo2))*0.15
Proyectos$Costo3 <- (Proyectos$Costo2/sum(Proyectos$Costo2))*0.15
Proyectos$Riesgo3 <- (Proyectos$Riesgo2/sum(Proyectos$Riesgo2))*0.15
Proyectos$Impacto3 <- (Proyectos$Impacto2/sum(Proyectos$Impacto2))*0.25
Proyectos$Recursos3 <- (Proyectos$Recursos2/sum(Proyectos$Recursos2))*0.1

Proyectos$ROI4<-(Proyectos$ROI3-min(Proyectos$ROI3))^2
```

```

Proyectos$Plazo4<- (Proyectos$Plazo3-min(Proyectos$Plazo3))^2
Proyectos$Costo4 <- (Proyectos$Costo3-min(Proyectos$Costo3))^2
Proyectos$Riesgo4 <- (Proyectos$Riesgo3-min(Proyectos$Riesgo3))^2
Proyectos$Impacto4 <- (Proyectos$Impacto3-min(Proyectos$Impacto3))^2
Proyectos$Recursos4 <- (Proyectos$Recursos3-min(Proyectos$Recursos3))^2
Proyectos$POS <-
(Proyectos$ROI4+Proyectos$Plazo4+Proyectos$Costo4+Proyectos$Riesgo4+Proyectos$
Impacto4+Proyectos$Recursos4)

```

```

Proyectos$ROI5<-(Proyectos$ROI3-max(Proyectos$ROI3))^2
Proyectos$Plazo5<- (Proyectos$Plazo3-max(Proyectos$Plazo3))^2
Proyectos$Costo5 <- (Proyectos$Costo3-max(Proyectos$Costo3))^2
Proyectos$Riesgo5 <- (Proyectos$Riesgo3-max(Proyectos$Riesgo3))^2
Proyectos$Impacto5 <- (Proyectos$Impacto3-max(Proyectos$Impacto3))^2
Proyectos$Recursos5 <- (Proyectos$Recursos3-max(Proyectos$Recursos3))^2
Proyectos$NEG <-
(Proyectos$ROI5+Proyectos$Plazo5+Proyectos$Costo5+Proyectos$Riesgo5+Proyectos$
Impacto5+Proyectos$Recursos5)

```

```
Proyectos$PROX_REL <- Proyectos$POS/(Proyectos$POS+Proyectos$NEG)
```

```
Proyectos <- Proyectos[with(Proyectos, order(Proyectos$PROX_REL)), ] # Orden directo
```

```
Proyectos$TOPSIS_ORD<-seq(1:6)
```

```

Proyectos$ROI_A=Proyectos$ROI/sum(Proyectos$ROI)
Proyectos$Plazo_A=Proyectos$Plazo/sum(Proyectos$Plazo)
Proyectos$Costo_A=Proyectos$Costo/sum(Proyectos$Costo)
Proyectos$Riesgo_A=Proyectos$Riesgo/sum(Proyectos$Riesgo)
Proyectos$Impacto_A=Proyectos$Impacto/sum(Proyectos$Impacto)
Proyectos$Recursos_A=Proyectos$Recursos/sum(Proyectos$Recursos)

```

```

Proyectos$AHP<-Proyectos$ROI_A*0.2+
Proyectos$Plazo_A*0.15+Proyectos$Costo_A*0.15+
Proyectos$Riesgo_A*0.15+Proyectos$Impacto_A*0.25+Proyectos$Recursos_A*0.1

```

```
Proyectos <- Proyectos[with(Proyectos, order(Proyectos$AHP)), ] # Orden directo
```

```
Proyectos$AHP_ORD<-seq(1:6)
```

```

Proyectos$Discrepancia<- abs(Proyectos$TOPSIS_ORD-Proyectos$AHP_ORD)
sum(Proyectos$Discrepancia)

```

```

Output$Pr_T1[1] <- Proyectos$TOPSIS_ORD[1]
Output$Pr_T2[1] <- Proyectos$TOPSIS_ORD[2]
Output$Pr_T3[1] <- Proyectos$TOPSIS_ORD[3]
Output$Pr_T4[1] <- Proyectos$TOPSIS_ORD[4]
Output$Pr_T5[1] <- Proyectos$TOPSIS_ORD[5]
Output$Pr_T6[1] <- Proyectos$TOPSIS_ORD[6]

```

```

Output$Pr_AHP1[1] <- Proyectos$AHP_ORD[1]
Output$Pr_AHP2[1] <- Proyectos$AHP_ORD[2]
Output$Pr_AHP3[1] <- Proyectos$AHP_ORD[3]
Output$Pr_AHP4[1] <- Proyectos$AHP_ORD[4]
Output$Pr_AHP5[1] <- Proyectos$AHP_ORD[5]
Output$Pr_AHP6[1] <- Proyectos$AHP_ORD[6]

Output$DISCREPANCIA[1] <- sum(Proyectos$Discrepancia)

Proyectos <- Proyectos[with(Proyectos, order(Proyectos$Proyecto)), ] # Orden directo

# ARCHIVO FINAL RESULTADO DEL EJERCICIO - SE OBSERVAN LOS DATOS DE
# AMBAS METODOLOGIAS
# ORDENADAS POR PROYECTO

Sal<-Proyectos %>%
  select(Proyecto,Costo,Plazo,Recursos,TOPSIS_ORD,AHP_ORD)

# VISUALIZACION DE LAS DIFERENCIAS - CONTROL

sum(Proyectos$Discrepancia)

#####
# GENERACION DEL ARCHIVO DE SALIDA

write.table(Sal,"Sal1.txt")

#####

```

8. Referencias

- Abdallah, S. B., & Sicotte, H. (2018). A Real Options Analysis of Project Portfolios Practitioners' Assessment. *JOURNALMODERNPM.COM*, 37-53. doi:10.19255/JMPM01703
- Alberto, C., & Carignano, C. (2007). *Métodos No Paramétricos Y Apoyo Multicriterio A Las Decisiones: Eficiencia De La Educación Superior En Argentina*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Alberto, C., Passoni, L., Carignano, C., & Delgado, M. (2013). Eficiencia en investigación y desarrollo en países latinoamericanos. En J. Zanazzi, C. Alberto, & C. Carignano, *Aplicación de multi-metodologías para la gestión y evaluación de sistemas sociales y tecnológicos* (págs. 33-50). Córdoba.
- Allen, M., Alleyne, D., Farmer, C., McRae, A., & Turner, C. (2014). A framework for project success. *Journal of Information Technology and Economic Development*, 1-17.
- Al-Sobai, K., Pokharel, S., & Abdella, G. (2020). Perspectives on the Capabilities for the Selection of Strategic Projects. *Sustainability*, 1-20.
- Al-Subhi Al-Harbi, K. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19-27. doi:https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-1
- Artto, K., Dietrich, P., & Nurminen, M. (2004). Strategy implementation by projects. *Innovations: Project Management Research* (págs. 103–122). Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- Aruldoss, M., Lakshmi, T., & Venkatesan, V. (2013). A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*, 31-43.
- Awasthi, A., Chauhan, S., & Omrani, H. (2011). Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. *Expert Systems with Applications*, 12270-12280.
- Baker, N. P. (1974). R&D Project selection models: an assessment. *IEEE Transactions on Engineering*, 21(4), 165–170.
- Ballestin, F., & Leus, R. (2007). *Resource-constrained project scheduling for timely project completion with stochastic activity durations*. Leuven: Faculty of Economics and Applied Economics Katholieke Universiteit.

- Baptestone, R., & Rabechini Jr., R. (2018). Influence of Portfolio Management in Decision-Making. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 406-428. doi:<http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2464>
- Behzadian, M., Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 13051-13069. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Benaija, K., & Kjiri, L. (2015). Project portfolio selection: Multi-criteria analysis and interactions between projects. *ArXiv*.
- Chaparro, X. A., Gomes, L. A., & Nascimento, P. T. (2019). The evolution of project portfolio selection methods: from incremental to radical innovation. *Revista de Gestão*, 212-236. doi:10.1108/REG-10-2018-0096
- Cooper, R., Edgett, S. J., & Kleinschmidt, E. J. (2001). Portfolio management for new product development: results of an industry practices study. *R&D Management*, 361-380.
- Cooper, R., Edgett, S., & Kleinschmidt, E. (2022). Portfolio management: fundamental to. En P. Belliveau, A. Griffin, & S. Somermeyer, *The PDMA Toolbook for New Product Development* (págs. 159-173). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Danesh, D., Ryan, M., & Abbasi, A. (2018). Multi-criteria decision-making methods for project portfolio management: a literature review. *Int. J. Management and Decision Making*, Vol. 17, No. 1, 75-94.
- Djedovic, A., Karabegovic, A., Avdagic, Z., & Omanovic, S. (2018). Innovative Approach in Modeling Business Processes with a Focus on Improving the Allocation of Human Resources. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Geberemariam, T. (2018). Deterministic and Probabilistic Engineering Cost Estimating Approaches for Complex Urban Drainage Infrastructure Capital Improvement (CIP) Programs. *Preprints*.
- Geraldi, J. (2008). The balance between order and chaos in multi-project firms: a conceptual model. *International Journal of Project Management*, Vol. 26, No. 4, 348–356.
- Harrison, R. (2010). Introduction To Monte Carlo Simulation. *AIP Conf Proc*, (págs. 17-21).
- Hogg, R., McKean, J., & Craig, A. (2012). *Introduction to mathematical statistics (7th ed.)*. Boston, MA: Pearson Education, Inc.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 21504:2015 Project, programme and portfolio management-Guidance on portfolio management*. ISO.
- Jabbarzadeh, A. (2018). Application of the AHP and TOPSIS in project management. *Journal of Project Management*, 125-130.

- Jenner, S., Office of Government Commerce, & Craig Kilford. (2011). *Management of portfolios*. The Stationery Office.
- Julca, E. (2009). Modelo de indicadores para la mejora de calidad de atención al cliente, usando el proceso analítico jerárquico (AHP). *Tesina para optar el título profesional de Licenciado en Investigación Operativa*. Lima, Perú: Escuela Profesional de Investigación Operativa, Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Kavadias, S., & Chao, R. (2008). Resource allocation and new product development portfolio management. En *Handbook of New Product Development Management* (págs. 135–163). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Khairaa, A., & Dwivedib, R. (2018). A State of the Art Review of Analytical Hierarchy Process. *Materials Today: Proceedings*, 4029-4035.
- Kittur, J., Vijaykumar, S., Bellubbl, V., Vishal, P., & Shankara, M. (2015). Comparison of different MCDM Techniques used to Evaluate Optimal Generation. *International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology*, 172-177.
- Mahmoudi, A., Abbasi, M., & Deng, X. (2021). A novel project portfolio selection framework towards organizational resilience: Robust Ordinal Priority Approach. *Expert Systems With Applications*, 1-22. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116067
- Mavrotas, G., & Makryvelios, E. (2020). Combining multiple criteria analysis, mathematical programming and Monte Carlo simulation to tackle uncertainty in Research and Development project portfolio selection: A case study from Greece. *European Journal of Operational Research*, 794-806.
- Melo, O., López, L., & Melo, S. (2020). *Diseño de Experimentos Métodos y Aplicaciones*. Bogotá: Coordinación de publicaciones - Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia.
- Mohagheghi, V., Mousavi, S. M., Antuchevičienė, J., & Mojtahedi, M. (2019). Project Portfolio Selection Problems: A Review of Models, Uncertainty Approaches, Solution Techniques, and Case Studies. *Technological and Economic Development of Economy*, 1380-1412. doi:https://doi.org/10.3846/tede.2019.11410
- Mohagheghi, V., Mousavi, S., & Aghamohagheghi, M. (2017). A new approach of multi-criteria analysis for the evaluation and selection of sustainable transport investment projects under uncertainty: A case study. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 605-626. doi: https://doi.org/10.2991/ijcis.2017.10.1.41
- Nantes, E. (2019). El método analytic hierarchy process para la toma de decisiones. repaso de la metodología y aplicaciones. *Investigación Operativa*, 54-73.

- Olson, D., & Wu, D. (2011). The impact of distribution on value-at-risk measures. *Mathematical and Computer Modelling*, 1670-1676.
- Pakdin Amiri, M. (2010). Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. *Expert Systems with Applications*, 6218-6224. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.103>
- Platje, A., Seidel, H., & Wadman, S. (1994). Project and portfolio planning cycle-project-based management for the multiproject challenge. *International Journal of Project Management*, Vol. 12, No. 2 , 100-106.
- Project Management Institute. (2017). *The Standard for Portfolio Management*. PMI.
- Raada, N., Shirazi, M., & Ghodsypour, S. (2019). Selecting a portfolio of projects considering both optimization and balance of sub-portfolios. *Journal of Project Management* , 1-16.
- Rice, M., O'Connor, G., & Pierantozzi, R. (2008). Implementing a learning plan to counter project uncertainty. *MIT Sloan Management Review*, 54–62.
- Roy, B. (2015). Paradigms and Challenges. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of Art Surveys*, 4-24.
- Rubio Hurtado, M., & Berlanga Silvente, V. (2012). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 83-100.
- Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process*. New York: McGraw Hill.
- Saaty, T. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Saaty, T. (2016). The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. En S. Greco , M. Ehrgott , & J. Rui Figueira, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (págs. 345-408). Springer.
- Saaty, T., & Ergu , D. (2015). When is a Decision Making Method Trustworthy? Criteria for Evaluating Multi-criteria. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 1171-1187. doi:<https://doi.org/10.1142/S021962201550025X>
- Sadi-Nezhad, S. (2017). A state-of-art survey on project selection using MCDM techniques. *Journal of Project Management*, 1-10.
- Shields, P., & Boyer-Wright, K. (2017). Strategic planning characteristics applied to project management. *International Journal of Project Management*, 169-179.

- Tripp, L. (2007). Herramientas de selección y priorización del portafolio estratégico de proyectos: The tools for selecting and prioritizing strategic project portfolios. *Paper presented at PMI® Global Congress 2007—Latin America*. Cancún, Mexico: Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- Vergara Rodríguez, C., Mendoza Ortega, G., & Salgado Ordosgoitia, R. (2018). Implementación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la toma de decisiones en la gestión de abastecimiento; aplicación a una empresa productora de queso costeño. *Ingeniería Aplicada al Sector Agropecuario*, 41-57.
- Vijayakumar, S., Suresh, P., Sasikumar, K., Pasupathi, K., Yuvaraj, T., & Velmurugan, D. (2021). Evaluation and selection of projects using hybrid MCDM technique under fuzzy environment based on financial factors. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.138>
- Wallenius, J., Dyer, J., Fishburn, P., Steuer, R., Zionts, S., & Deb, K. (2008). Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: recent accomplishments and what lies ahead. *Management Science*, Vol. 54, No. 7, 1336–1349.
- Wasserstein, R., & Lazar, N. (2016). The ASA's statement on p-values: context, process, and purpose. *The American Statistician*, 129-133. doi:<https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
- Yeta, B., Constantinou, A., Fenton, N., Neil, M., Luedeling, E., & Shepherd, K. (2016). A Bayesian Network Framework for Project Cost, Benefit and Risk Analysis with an Agricultural Development Case Study. *Expert Systems with Applications*, 141–155.
- Yoon, K., & Hwang, C.-L. (1995). *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Zahedi, F. (1986). The analytic hierarchy process – A survey of the method and. *Interfaces*, 96-108.