

# Aplicación de Programación por Objetivos para la priorización de proyectos de inversión en infraestructura eléctrica

## Application of Goal Programming for prioritizing electrical infrastructure projects

Eliana Mirledy Toro Ocampo<sup>1\*</sup>, Juan José Franco Mejía<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Docente asociada, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Perera, Colombia

elianamtoro@gmail.com

<sup>2</sup>Estudiante Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia

jjfrancom@gmail.com

**Resumen**— Este trabajo usa el Análisis Multi-criterio y la Programación por Objetivos para generar un modelo que permita elegir entre una lista de alternativas, los proyectos a los cuales dirigir la inversión de una compañía de energía eléctrica, de manera que se logre el máximo cumplimiento de los objetivos organizacionales y los límites de capital. La metodología planteada incluye varios sub-procesos de manejo de información. El resultado de este estudio es la emisión de juicios de aceptación o rechazo sobre las propuestas planteadas.

**Palabras clave**— Análisis Multi-criterio, evaluación de inversiones, programación por objetivos.

**Abstract**— This work uses the Multi-criteria Analysis and Objectives Programming to generate a model to choose from a list of alternatives, which projects to direct the investment of a power company, so as to achieve maximum compliance organizational objectives and limits of capital. The proposed methodology includes several sub-processes of information management. The result of this study is to issue judgments of acceptance or rejection of the proposals.

**Key Words**— Goal Programming, investment evaluation, Multi-criteria Analysis.

### I. INTRODUCCIÓN

Una razón de ser de la Ingeniería es la de incrementar la productividad y rentabilidad de las organizaciones, lo cual se puede lograr agilizando los procesos y mejorando la calidad de los resultados. Dentro de los aspectos claves para la operación de las empresas está la definición de presupuestos que a grandes rasgos contemplan aspectos como: Ingresos, costos, gastos operacionales y no operacionales, e inversión, los cuales son el resultado de proyecciones económicas,

evaluaciones financieras, análisis de fenómenos medioambientales, políticas y direccionamiento corporativo, decisiones gubernamentales entre otros factores internos y externos de la organización.

Dada la importancia de la evaluación del presupuesto de inversión de una empresa, en este artículo se plantea una metodología cuyo objetivo es agilizar y estandarizar el proceso que permita emitir juicios de aceptación o rechazo sobre las alternativas de inversión, de acuerdo a los criterios planteados por las organizaciones teniendo en cuenta también la disponibilidad de recursos durante cada período.

Para resolver problemáticas donde deben tomarse decisiones de inversión, Lee y Kim (2000)[1], proponen un análisis de red, que es un Análisis Multi-criterio donde se reflejan las interdependencias entre los criterios de evaluación y los proyectos candidatos, posterior al análisis de red, se utiliza un modelo de programación por objetivos binario.

Meade y Presley (2002)[2], plantean un proceso para seleccionar proyectos de investigación y desarrollo para destinar la inversión de una organización mediante un análisis de red, el cual evalúa aspectos como necesidad de corresponder las estrategias corporativas con los criterios de selección, la necesidad de considerar beneficios cualitativos y los riesgos de los proyectos candidato; Además de la necesidad de conciliar e integrar los requerimientos en intenciones de las diferentes partes interesadas. Considerando factores técnicos, factores mercadológicos y organizacionales.

Karydas y Gifun (2006) [3], muestran una metodología denominada MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) para la priorización eficiente de los proyectos de renovación de infraestructuras en el campus del MIT, que consiste en asignar a las alternativas un valor numérico en una cierta medida de interés dentro de una escala de 0-1, donde 0 representa el de menor preferencia y 1 la mayor preferencia.

Ahern y Anandarajah (2007)[4], presentan un modelo que combina la Programación por Objetivos, el Análisis Multi-criterio y una matriz denominada como Logro de Metas, buscando priorizar los proyectos identificados para inversión, alcanzando el mayor cumplimiento de los objetivos cualitativos y cuantitativos sin exceder el capital disponible.

Wakefield et al (2010) [5], presentan un marco metodológico con el fin de definir una técnica estándar para estimar los costos y beneficios de los proyectos de redes inteligentes (*Smart Grid*), que abarca desde la identificación de las relaciones entre los beneficiarios de los proyectos hasta la categorización de los beneficios. Se exponen estudios beneficio-costos, factibilidad, incertidumbre y tiene en cuenta problemas relacionados con la monetización de las estimaciones e indisponibilidad de información para evaluar las alternativas.

El trabajo planteado en este documento, se enfoca en la organización de proyectos de inversión recurrentes mediante una matriz de priorización de alternativas, que utiliza Programación por Objetivos y Análisis Multi-criterio, enfocada en proyectos de infraestructura eléctrica, tomando como base la inversión de una empresa colombiana de generación, distribución y comercialización teniendo en cuenta las políticas de la organización.

## II. METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN

### A. Proceso de Análisis Jerárquico.

Se origina desde la comparación por pares usada primero en la psicología y que Saaty mejora matemáticamente para convertirlo en el Proceso de Análisis Jerárquico [6].

En el Análisis jerárquico, el tomador de decisiones en principio hace comparaciones lingüísticas por pares, luego obtiene una comparación numérica mediante la asignación de una escala numérica y finalmente deriva en un vector de prioridades para la escala de comparación, Dong (2008)[7].

### B. Programación por Objetivos (GP)

Programación por objetivos GP (*goal programming*), se basa en un modelo matemático en el que uno o más objetivos son formulados como las restricciones y las funciones objetivo buscan reducir al mínimo la suma de las desviaciones absolutas de estas restricciones. Por ejemplo, una función objetivo del GP sería minimizar el costo sujeto a limitaciones

especiales del sistema, tales como limitaciones de la producción y la demanda, Ignizio (1985)[8].

Otra diferencia importante entre GP y la Programación lineal es el concepto de restricciones blandas y rígidas. En un programa lineal, las restricciones se tratan como rígidas. Es decir, si la producción debe ser mayor que un valor dado, incluso una pequeña desviación negativa de ese valor no está permitida. GP reconoce tanto restricciones rígidas como blandas. Las restricciones suaves utilizan variables de desviación (permitiendo desviaciones positivas y negativas) que miden la diferencia entre el valor deseado (o meta) y el valor obtenido en el modelo, Ahern, y Anandarajah (2007)[4].

### C. Análisis Multi-criterio

Análisis de criterios múltiples o Análisis Multi-criterio, MCA (*Multi-criteria Analysis*), proporciona herramientas para estimar en valores numéricos, la información cualitativa que haya sido aportada. Esta técnica ofrece varios métodos para tomar decisiones o establecer preferencias entre los proyectos, sobre la base de la importancia relativa asignada a los diversos criterios [9]. El principal papel de MCA es permitir el manejo de grandes cantidades de información de manera consistente. Además, las bondades del MCA se pueden utilizar para identificar a una sola como la mejor alternativa, para clasificar las opciones, acortar la lista de alternativas para una evaluación detallada posterior, o simplemente para distinguir entre aceptables o inaceptables las posibilidades. [10].

### D. Método de ponderación lineal.

Una rama del Análisis Multi-Criterio es el Método *Scoring*, que se convierte en una manera rápida y sencilla de identificar la alternativa preferible en un problema de decisión Multi-criterio. El modelo para calcular es *Score* o Puntaje que utiliza un sistema de puntuación para cada criterio, el cuál posteriormente se opera con una ponderación asignada también a cada criterio [5].

### E. Planteamiento del problema

La acelerada dinámica que vive por estos días la economía colombiana, obliga a las empresas a llevar un elevado ritmo de crecimiento que les permita por lo menos mantenerse competitivas. Este fenómeno se evidencia más fuertemente en el sector minero-energético, donde se han generado nuevos espacios de crecimiento para las empresas locales en mercados internacionales, así como también se ha visto la llegada de grandes capitales extranjeros. Ambos factores están cambiando las reglas de juego del sector, lo que a su vez afecta los estilos de dirección de las compañías, influenciados por los planes del gobierno nacional que se empeña en perfilar a Colombia como un país exportador de energía eléctrica.

La selección de los proyectos en los cuales se invertirán los recursos de cada año es de gran trascendencia ya que las decisiones que se tomen al respecto establecen los ingresos futuros de una compañía, su tasa de crecimiento y su productividad. Son además estas inversiones las que harán de ella, una empresa sostenible y determinarán su perdurabilidad en el mercado. Así pues, resulta indispensable escoger las alternativas más beneficiosas, de manera que se garantice un uso eficiente de los recursos.

Las características particulares de las inversiones de la empresa analizada, obligan a generar una solución específica para cada caso. Entre esas particularidades se encuentra la clasificación de los proyectos de inversión, ya que los divide entre proyectos de expansión, proyectos de continuidad y proyectos estratégicos.

*i) Proyectos de expansión*

Se ubican en este grupo, los proyectos que permitan el incremento de la cobertura del servicio como nuevas conexiones al sistema de transmisión nacional, repotenciaciones de líneas, cambio de activos existentes por otros de mayor capacidad, construcción de circuitos, de plantas de generación o subestaciones.

*ii) Proyectos de continuidad*

Todo proyecto que permite la continuidad y sostenibilidad del negocio tales como modernizaciones, reposiciones, mantenimientos, reparaciones, y compra de equipos y herramientas.

*iii) Proyectos estratégicos*

Se consideran proyectos estratégicos, aquellos que permitan mejorar la eficiencia operativa, y reformas debidas a nuevas normas o regulaciones, así como proyectos que permitan la reducción de las pérdidas de energía.

**III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La estrategia matemática se divide en dos etapas: en la primera, Análisis Multi-criterio, se instauran criterios de evaluación y se identifican las contribuciones de los proyectos a cada uno de los objetivos estratégicos (OE), asignando calificaciones.

Se escoge el Análisis Multi-criterio para este problema, ya que proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión y adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.

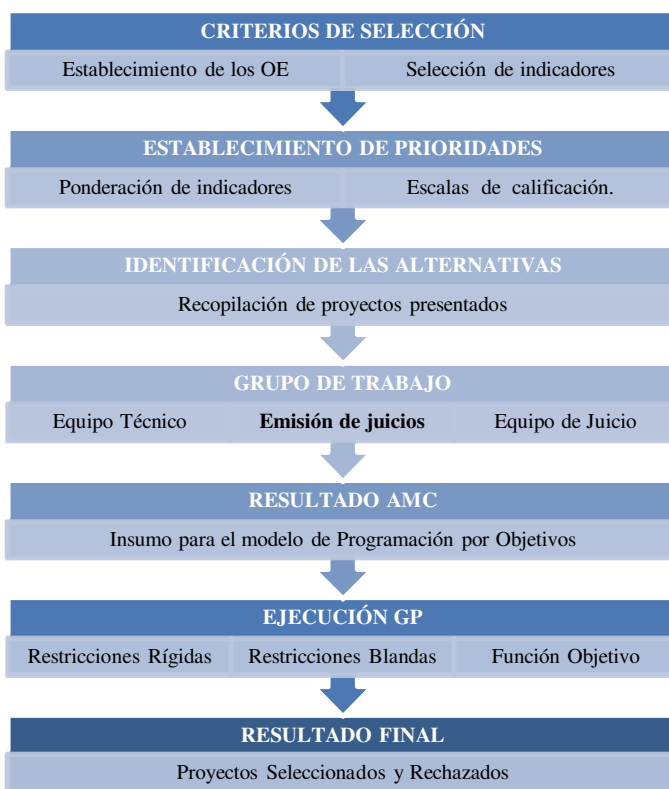
El campo del Multi-Criterio ofrece varios métodos que trabajan con las preferencias del tomador de la decisión. Uno de ellos es el Método de ponderación lineal, que representa

una de las maneras más ágiles en la identificación de alternativas preferibles dentro de los modelos de decisión multi-criterio.

En él, después de identificar los criterios de evaluación y las alternativas de selección, se procede a generar una escala numérica para cada uno de los primeros, y dentro de ella se califican las segundas, lo cual manifiesta en qué medida se satisface ese criterio si se escogiese tal alternativa.

En la segunda etapa, Modelo de Programación por Objetivos, se establecen prioridades y una meta, se definen restricciones, y se escoge el conjunto que cumpla con la meta

En la figura 1, se ilustra paso a paso del proceso que se sigue en la ejecución del modelo y posteriormente se describe cada elemento del mismo.



**Fig 1.**Proceso de ejecución del modelo

**A. Criterios de selección.**

Para cada uno de los tres grupos (expansión, continuidad y estratégicos), se construye una ficha de calificación: En tales fichas se evalúa la contribución de los proyectos a cada objetivo estratégico midiendo tal contribución a través de indicadores.

La diferencia entre una ficha y otra no es más que la ponderación de los indicadores respecto al resultado global. Los objetivos estratégicos tenidos en cuenta en este estudio fueron tomados de la Planeación Estratégica de la Empresa,

que es revisada anualmente por la Junta Directiva. Los indicadores fueron definidos de acuerdo al discernimiento de los miembros del departamento de planeación financiera, quienes se encargan de seguir periódicamente los lineamientos de la Junta. Es importante mencionar que para este proyecto, los objetivos estratégicos y los indicadores manejados por la Empresa sufrieron algunos ajustes convenientes para la simplificación de la información. Ambos se enuncian a continuación:

- 1) *OE 1 Crecer con rentabilidad y promover la diversificación de la matriz energética*
  - Tasa Interna de Retorno
  - Índice de Rentabilidad (VPN/Inversión)
  - Relación Beneficio Costo
  - Periodo (años) de retorno de la inversión.
- 2) *OE 2 Asegurar la excelencia tecnológica y operativa y promover la innovación*
  - Crecimiento de la demanda
  - Reducción de pérdidas de distribución y de mercado.
- 3) *OE 3 Fortalecer el servicio y la interacción con los clientes*
  - Tiempo de Atención de Fallas
  - Frecuencia de Fallas
  - Contribución al ISE (Índice de satisfacción del cliente)
- 4) *OE 4 Asegurar la sostenibilidad ambiental y social*
  - Cumplimiento de normas ambientales
  - Cumplimiento de programas sociales

#### B. Establecimiento de prioridades.

En este fragmento se establecen las escalas de calificación de cada indicador, de manera que cada uno sea medido según una escala de 5 intervalos, otorgando valores entre 0 y 4 y siendo 4 la calificación óptima del indicador. En la tabla 1 se muestran las escalas y criterios de calificación para el indicador *Relación Beneficio Costo* perteneciente al *OE 1*.

Valor	Criterio
0	R B/C inferior a 1
1	R B/C igual o mayor a 1 y menor a 1.25
2	R B/C igual o mayor a 1.25 y menor a 1.5
3	R B/C igual o mayor a 1.5 y menor a 1.75
4	R B/C igual o mayor a 1.75

**Tabla 1:** Escala de calificación para cada criterio de evaluación del indicador *relación beneficio-costo (R B/C)*

Asimismo, se define el peso de cada indicador dentro del objetivo estratégico al cual pertenece, como se observa en la tabla 2.

Es importante mencionar que las escalas y criterios de calificación (Tabla 1) son los mismos para todo tipo de proyectos, mientras que la ponderación de los indicadores (Tabla 2) varía entre los proyectos de expansión, de continuidad y estratégicos. Con lo anterior se busca objetividad en el resultado final del modelo, al tener en cuenta la naturaleza de cada uno de los tres tipos de proyectos.

#### OE1 - Crecer con rentabilidad

Indicador	Ponderación
TIR - Tasa Interna de Retorno	20%
IR - Índ. de Rentabilidad (VPN/Inversión)	60%
R B/C - Relación Beneficio - Costo	10%
PRI - Period. de Retorno de la Inversión	10%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

**Tabla 2:** Ponderación de los indicadores del *OE 1* para los proyectos de expansión.

#### C. Identificación de las alternativas.

En la tabla 3, se mencionan los proyectos tenidos en cuenta para la aplicación del modelo.

Proyectos de Expansión	
<b>Proyecto 1 (P1)</b>	Construcción de la subestación
<b>Proyecto 2 (P2)</b>	Extensión de las redes de una urbanización
Proyectos de Continuidad	
<b>Proyecto 3 (P3)</b>	Adquisición de centros de control de motores de una hidroeléctrica
<b>Proyecto 4 (P4)</b>	Modernización de <i>Trunking</i>
Proyectos Estratégicos	
<b>Proyecto 5 (P5)</b>	Modernizando equipos de medida y redes de distribución
<b>Proyecto 6 (P6)</b>	Diseño e instalación de puntos de anclaje en las casas de máquinas de las hidroeléctricas

**Tabla 3:** Identificación de las alternativas de inversión.

#### D. Grupo de trabajo.

Un equipo técnico conformado por representantes de Área de Proyectos se reunió en grupos de trabajo con miembros de las gerencias: una gerencia cada vez, para calificar los proyectos correspondientes a cada área dentro de la estructura de la organización, utilizando las fichas de calificación construidas en este modelo.

Un equipo de juicio por gerencia, cuyo rol fue otorgar la calificación y conformado por los miembros de cada gerencia, teniendo en cuenta las apreciaciones y especificaciones hechas por el equipo técnico. Este último, se encargó de mantener la

imparcialidad, comparabilidad, y consistencia en las valoraciones otorgadas a las alternativas de inversión.

En los grupos de trabajo, el equipo técnico (siempre los mismos integrantes), debatió con cada una de los equipos de juicio de manera independiente buscando que las consideraciones emitidas en cada grupo de trabajo fueran ecuanímes

E. Resultado del AMC.

Las calificaciones obtenidas en las mesas de trabajo para los indicadores y las ponderaciones de estos últimos, arrojan una nota final de cada OE para todos los proyectos. Estas notas o valores, son el resultado del AMC que se muestra en la tabla 4. Esta misma tabla, será llamada más adelante Matriz B.

		Objetivos Estratégicos			
		Bi1 (OE1)	Bi2 (OE2)	Bi3 (OE3)	Bi4 (OE4)
Proyectos	X1(P1)	0.70	1.00	1.30	1.00
	X2(P2)	0.50	1.60	1.40	0.00
	X3(P3)	1.81	1.00	2.00	1.00
	X4(P4)	0.34	1.00	2.00	1.00
	X5(P5)	3.10	2.20	1.35	1.00
	X6(P6)	0.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 4: Matriz B. Resultado del Análisis Multi criterio.

F. Implementación de la Programación por Objetivos.

Consecutivamente, se implementa la Programación por Objetivos que admite la utilización de los OE como las metas del modelo, logrando generar una restricción blanda para cada OE (en adelante llamado atributo). Tales restricciones han sido planteadas en ecuaciones con variables de desviación negativa  $d_{Bj}^-$  y positiva  $d_{Bj}^+$ , que toleran algún incumplimiento de la meta.

i. Parámetros básicos del modelo de programación por objetivos.

Para el planteamiento de las ecuaciones:

- $d_{Bj}^-$  Variable de desviación negativa de la meta j.
- $d_{Bj}^+$  Variable de desviación positiva de la meta j.
- $b_{ij}$  Representa el valor del atributo j para el proyecto i.
- $B_j$  Atributo j considerado en la decisión.
- $C$  Total de capital disponible para la inversión.
- $c_i$  Costo de la inversión en el proyecto i.
- $d_{ij}$  Valor normalizado del atributo j para el proyecto i.

- $D_j$  Objetivo para el atributo j, considerado en la decisión.
- $m$  Número de metas/atributos.
- $n$  Número de proyectos evaluados.
- $W_{Bj}$  Peso asignado por el usuario al atributo j.

ii. Establecimiento de prioridades.

Resultado del criterio y el análisis del equipo técnico, buscando el logro de los objetivos de la organización y de acuerdo con la estrategia planteada por las directivas, se establecen los pesos para cada uno de los Objetivos Estratégicos, cuya sumatoria debe ser igual a uno (1). Lo anterior está planteado en la tabla 5.

	GP Model
	Ponderación del OE
Crecer con rentabilidad y promover la diversificación de la matriz	42%
Asegurar la excelencia tecnológica y operativa y promover la innovación	35%
Fortalecer el servicio y la interacción con los clientes	23%
<b>TOTAL GP Model</b>	<b>100%</b>

Tabla 5: Establecimiento de Prioridades

iii. Variables de decisión.

La variable de decisión  $X_i$  será usada para la selección de proyectos. Tiene un valor de uno (1) cuando el proyecto i es seleccionado y cero (0) cuando el proyecto i no es seleccionado.

La decisión de escogencia o no de los proyectos será el resultado de este modelo de Programación por Objetivos Ponderados con Variables de Decisión Enteras (WIGP), que busca maximizar la contribución de las alternativas elegidas a la consecución de todos los objetivos estratégicos de la empresa analizada. Sin embargo, se considera que algunos son más relevantes que otros al momento de tomar tal determinación. Así entonces, son establecidos pesos  $W_{Bj}$  para cada atributo  $B_j$ .

El modelo incluye tres atributos que serán analizados como restricciones blandas, y uno que será analizado como restricción rígida, además de la disponibilidad de capital que será considerada una restricción rígida.

iv. *Función objetivo.*

El objetivo del modelo es reducir al mínimo el valor de las variables de desviación establecidas para cada atributo. Sólo las desviaciones negativas se consideran en la función objetivo, como se muestra en la ecuación (1). La minimización de las desviaciones es simultánea pero implica una ponderación asignada a las variables de desviación.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^m W_{B_j} d_{B_j}^- \quad (1)$$

Como se mencionó anteriormente,  $W_{B_j}$  es el peso asignado por el usuario a los atributos, con el fin de tener en cuenta la importancia de cada uno en la selección de los proyectos. La suma de las ponderaciones asignadas por el usuario debe ser igual a 1, ecuación 2:

$$\sum_{j=1}^m W_{B_j} = 1 \quad (2)$$

En el caso estudiado, resulta entonces la Función Objetivo, ecuación 3:

$$\text{Min} \sum 0,42d_{B_1}^- + 0,35d_{B_2}^- + 0,33d_{B_3}^- \quad (3)$$

Hay que señalar que en este trabajo se presume que los proyectos de inversión estudiados comprometen el presupuesto de un único año, siendo este el período en el cual se da inicio al proyecto.

v. *Restricciones blandas.*

Se considera una restricción para cada uno de los tres primeros objetivos estratégicos, según la ecuación 4:

$$\sum_{i=1}^n b_{ij}X_i + d_{B_j}^- - d_{B_j}^+ = B_j \forall j \quad \text{dónde } j = [1,2,3] \quad (4)$$

Las restricciones blandas son los valores de la matriz D (Tabla 6) expresados en ecuaciones. La matriz D se obtiene de la normalización de la matriz B (Tabla 4), siendo esta última el producto del Análisis Multi-criterio.

De esta manera los OE (Objetivos Estratégicos) pasan a llamarse  $B_j$  y el valor de un OE para cada proyecto será  $b_{ij}$ . Los P (Proyectos), serán en adelante  $X_i$ .

La matriz de parámetros B, puede ser representada con la ecuación 5. Allí se observan m proyectos y n metas o

atributos. Es decir 6 y proyectos y 3 atributos para el caso de estudio.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \dots & b_{1j} \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} \dots & b_{2j} \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} \dots & b_{ij} \dots & b_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} \dots & b_{mj} \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Es importante mencionar que el valor numérico de las variables de desviación no corresponde con la distancia geométrica causando una posible desviación en la solución del problema. Por ello, *Hannan (1985)* plantea que “Para hacer comparables las escalas entre los objetivos, las desviaciones de las correspondientes distancias geométricas deben variar en valores numéricos equivalentes”. Según lo anterior, para obtener una verdadera correspondencia entre los valores numéricos y las diferencias geométricas, los objetivos deben ser ajustados usando la técnica de Normalización Euclidiana.

De esta manera, y como el OE4 referente a la sostenibilidad será representado por una restricción rígida y en cuya ecuación no se incluyen variables de desviación, sólo serán normalizados los 3 primeros OE representados en las restricciones blandas que sí incluyen variables de desviación.

Usando la técnica de Normalización Euclidiana, los elementos de la matriz normalizada  $D, d_{ij}$ , pueden ser calculados usando la ecuación 6 (Hwang and Yoon, 1981):

$$d_{ij} = b_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m b_{ij}^2} \quad (6)$$

De esta manera, la matriz D normalizada, construida con las variables de decisión es la siguiente:

		Parámetros		
		D1 (OE1)	D2 (OE2)	D3 (OE3)
Proyectos	X1	0.19	0.30	0.34
	X2	0.13	0.47	0.37
	X3	0.49	0.30	0.53
	X4	0.09	0.30	0.53
	X5	0.84	0.65	0.35
	X6	0.00	0.30	0.26

Tabla 6: Matriz D normalizada.

Las ecuaciones normalizadas para las restricciones blandas serán construidas a partir de la ecuación 7:

$$\sum_{i=1}^m d_{ij}X_i + d_{Bj}^- - d_{Bj}^+ = D_j \quad \forall j \quad (7)$$

Donde la meta  $D_j$  para cada atributo, será el máximo valor posible para el mismo, según la ecuación 8:

$$D_j = \sum_{i=1}^m d_{ij} \quad \forall j \quad (8)$$

Para las ecuaciones 7 y 8,  $m = 6$  y  $j = [1, 2, 3]$

Finalmente, las ecuaciones para las restricciones blandas se modelan como sigue:

vi. *Restricción asociada al crecimiento rentable de la Compañía.*

$$0,19X_1 + 0,13X_2 + 0,49X_3 + 0,09X_4 + \dots + 0,84X_5 + 0X_6 + d_{B_1}^- - d_{B_1}^+ = 1,74 \quad (9)$$

vii. *Restricción asociada a la excelencia tecnológica y operativa.*

$$0,30X_1 + 0,47X_2 + 0,30X_3 + 0,30X_4 + \dots + 0,65X_5 + 0,30X_6 + d_{B_2}^- - d_{B_2}^+ = 2,31 \quad (10)$$

viii. *Restricción asociada al fortalecimiento del servicio y de la interacción con los clientes.*

$$0,34X_1 + 0,37X_2 + 0,53X_3 + 0,53X_4 + \dots + 0,35X_5 + 0,26X_6 + d_{B_3}^- - d_{B_3}^+ = 2,38 \quad (11)$$

ix. *Restricción rígida asociada a la sostenibilidad ambiental y social.*

Como se había expresado unas páginas más arriba, durante las revisiones que los colaboradores de la Empresa realizaron de este trabajo, se planteó la necesidad de fijar la sostenibilidad ambiental y social como un requisito invulnerable, el cual todos los proyectos seleccionados deberán cumplir a cabalidad. Por ello, este OE determina una de las restricciones rígidas.

Así pues, el planteamiento previo se expresa a través de la ecuación 12:

$$\sum_{i=1}^m b_{i4}X_i = \sum_{i=1}^m X_i \quad (12)$$

Donde  $m$  nuevamente es el número de proyectos evaluados.

Para nuestro caso, lo anterior puede ser representado a través de la ecuación 13:

$$b_{14}X_1 + b_{24}X_2 + b_{34}X_3 + b_{44}X_4 + b_{54}X_5 + \dots + b_{64}X_6 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 \quad (13)$$

Introduciendo el resultado de la calificación del OE4 en la ecuación 13, obtenemos la ecuación 14:

$$(1)X_1 + (0)X_2 + (1)X_3 + (1)X_4 + (1)X_5 + \dots + (1)X_6 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 \quad (14)$$

Operando, obtenemos:

$$(1 - 1)X_1 + (0 - 1)X_2 + (1 - 1)X_3 + (1 - 1)X_4 + \dots + (1 - 1)X_5 + (1 - 1)X_6 = 0 \quad (15)$$

Resultando finalmente:

$$X_2 = 0 \quad (16)$$

x. *Restricción rígida asociada al presupuesto.*

El costo total de los proyectos seleccionados debe estar por debajo o ser igual a la disponibilidad de capital financiero para inversiones  $C$ .

$$\sum_{i=1}^m c_i X_i \leq C \quad (17)$$

Aplicando la ecuación 17 al caso de estudio:

$$7.577X_1 + 18X_2 + 800X_3 + 1.500X_4 + 6.862X_5 + 23X_6 \leq C$$

b. *Resultados.*

Para ejecutar el modelo de Programación por Objetivos, se ha utilizado el software WinQSB que brinda las herramientas necesarias para modelar los parámetros que conforman el mismo. La tabla 7 describe la distribución que toma la información al ser introducida en el software:

Allí mismo en la tabla 7 se puede ver un límite presupuestal de COP 8.400.000. Sin embargo, es sólo uno de los casos, ya que el modelo fue corrido en numerosas ocasiones modificando esta restricción para analizar los resultados posibles.

		Variables de Decisión					Variables de Desviación						
		P1 (X1)	P2 (X2)	P3 (X3)	P4 (X4)	P5 (X5)	P6 (X6)	dB1+	dB1-	dB2+	dB2-	dB3+	dB3-
<b>Función Objetivo:</b>													
<b>Minimizar:</b>									0.42		0.35		0.23
<b>Restricciones</b>	Di1 (OE1)	0.19	0.13	0.49	0.09	0.84	0.00	-1.00	1.00				= 1.74
	Di2 (OE2)	0.30	0.47	0.30	0.30	0.65	0.30			-1.00	1.00		= 2.31
	Di3 (OE3)	0.34	0.37	0.53	0.53	0.35	0.26					-1.00	1.00 = 2.38
	Di4 (OE4)		1.00										= 0
	Presupuesto	7577	18	800	1500	6862	23						≤ 8400
<b>Tipo de Variable</b>		Binaria					Continua						

Tabla 7: Modelo imputado en WinQSB. (Presupuesto en Millones de Pesos).

Proyectos Seleccionados														
<b>Proyectos</b>	P1 (X1)													
	P2 (X2)													
	P3 (X3)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P4 (X4)	✓	✓	✓	✓								✓	✓
	P5 (X5)					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	P6 (X6)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		7000	7200	7400	7600	7800	8000	8200	8400	8600	8800	9000	9200	9400
<b>Presupuesto permitido por el modelo</b>														

Tabla 8: Proyectos seleccionados para diferentes montos de capital disponible (Millones de Pesos).

Ejecutando el modelo para diferentes presupuestos entre COP 7.000.000 y COP 9.400.000, se obtuvieron diferentes grupos de proyectos que dan solución al modelo, como se muestra en la tabla 8.

#### IV. CONCLUSIONES

- Se planteó un modelo lineal binario por metas que permite optimizar el proceso de selección de alternativas de inversión, definiendo variables de decisión y ponderadores de los mismos como insumos para el planteamiento del modelo.
- El modelo es efectivo para seleccionar los elementos que cumplan con los objetivos planteados por la organización en su planeación estratégica teniendo en cuenta la amplitud presupuestaria, ya que la prioridad que en este caso fue la generación de valor de los proyectos, plasmada en la ponderación de los OE, también se ve reflejada en los resultados: En la medida que el presupuesto se hace más amplio, las

propuestas escogidas son las de mayor TIR y mejor Relación Beneficio/Costo.

- Con la implementación del modelo en una plataforma digital, la toma de decisiones sobre las alternativas de inversión será más ágil, siempre y cuando se estandaricen los sub-procesos en los que intervienen los colaboradores de la organización, los cuales son el establecimiento de prioridades, la identificación de las alternativas de inversión y los grupos de trabajo.
- El modelo es flexible: Una vez los tres anteriores sub-procesos se hayan completado y su producto haya sido imputado en el modelo matemático, cualquier modificación será posible.
- El modelo propuesto puede procesar y permite comparar factores cualitativos con cuantitativos al poner en el mismo escenario de decisión, elementos monetarios, de eficiencia y de sostenibilidad.



## RECOMENDACIONES

El modelo matemático presentado en este trabajo puede resultar una herramienta de inmensa utilidad; que el producto de la misma sea valioso, dependerá de varios elementos:

- Rigurosidad en el estudio de las necesidades de Empresa y de las características particulares de los proyectos de inversión de la Empresa.
- Disponibilidad de información y eficiencia en la comunicación entre los desarrolladores del proyecto.
- Proposición de una metodología acertada para el manejo de posibles causas de error en el modelo como la subjetividad del evaluador.
- Alto compromiso por parte de cada una de las gerencias de la Organización; desde la Gerencia Financiera que lidera el proceso de construcción del presupuesto, hasta las demás gerencias que hacen parte de los grupos de trabajo.
- Manejo adecuado de un cronograma de implementación de manera que se logre una culminación oportuna del proceso de conformación del presupuesto.

Dentro de los desarrollos que complementarían este trabajo se encuentra la elección de una propuesta que busque la reducción de la parcialización de las calificaciones otorgadas a las alternativas de inversión, una vez que estas calificaciones pueden ser dadas a partir de visiones particulares, o intereses que disten de la visión global de la Organización.

## REFERENCIAS

- [1]. J. Woo Lee, y S. Hie Kim, "Using analytic process and goal programming for interdependent information system project selection", *Computers & Operations Research* 27, pp. 367-382, 2000.
- [2]. L. Meade, y A. Presley, "R&D Project selection using the analytic network process", *IEEE Transactions on Engineering Management* 49, pp. 59-66, 2002.
- [3]. J. F. Gifun, y D. M. Karydas, "A method for the efficient prioritization of infrastructure renewal projects", *Reliability Engineering and System Safety* 91, pp. 84-99, 2006.
- [4]. A. Ahern y G. Anandarajah, "Railway projects prioritization for investment: Application of goal programming", *Transport Policy* 14, pp. 70-80, 2007.
- [5]. Methodological Approach for Estimating the Benefits and Costs of Smart Grid Demonstration Projects. EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1020342.
- [6]. Electric Power Research Institute, "Methodological Approach for Estimating the Benefits and Costs of Smart Grid Demonstration Projects", Palo Alto, CA., 2010.
- [7]. T. Saaty, Ed., *The Analytical Hierarchical Process*. New York, NY: J Wiley, 1980 vol. 1
- [8]. Dong, Y., "A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP, *European Journal of Operational Research* 186, p. 230, 2008.
- [9]. J. Ignizio, "Introduction to Linear goal Programming," Series: Quantitative Applications in the Social Sciences, SAGE University Papers, SAGE publications, USA, 1985.
- [10]. L.L. Thurstone, "A law of comparative judgements", *Psychological Review* 34, pp. 273-286, 1927.
- [11]. Office of the Deputy Prime Minister Website [Online]. Multi-Criteria Analysis Manual. Available: [http://www.odpm.gov.uk/stellent/groups/odpm\\_](http://www.odpm.gov.uk/stellent/groups/odpm_)
- [12]. E. Hannan, Ed. "An Assessment of Some Criticisms of Goal Programming," *Computers and Operations Research* 12, pp. 525-541, 1985.
- [13]. C. Hwang y K. Yoon, *Multiple Attribute Decision-Making: Methods and Applications, A State Of The Art Survey, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. New York, NY: Springer, 1981.
- [14]. D. F. Manotas, "Análisis de decisiones de inversión utilizando el criterio Valor Presente Neto en riesgo (VPN en riesgo)," Facultad de Ingenierías de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 49, pp. 199-123, 2009.
- [15]. J. Wang, Y. Xu, y L. Xhun, "Research on project selection system of pre-evaluation of engineering design project bidding", *International Journal of Project Management* 27, pp. 584-599, 2009.
- [16]. H. Roche y C. Vejo, (2005) "Métodos cuantitativos aplicados a la administración," Material de Apoyo ANÁLISIS MULTICRITERIO, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Disponible: <http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catmetad/cvroche.htm>