

## **XIV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA**

### **USO DE ANÁLISIS MULTI OBJETIVO PARA LA EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y DEFINICIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO**

William Angel R.<sup>(1)</sup>, M.SC., I.C. y Ricardo Smith Q.<sup>(2)</sup>, PH.D., M.SC., I.C.

(1) Integral S.A. Ingenieros Consultores, Medellín, Colombia

[warobledo@integral.com.co](mailto:warobledo@integral.com.co)

(2) Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

Apartado Aéreo 1027, Medellín, Colombia

#### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta la metodología propuesta y los resultados obtenidos dentro del proceso de definición de las características principales de un proyecto hidroeléctrico mediante la aplicación de técnicas de Análisis Multiobjetivo, dentro del proceso de evaluación y toma de decisiones encaminados a la definición de las características y esquema de desarrollo del proyecto que será recomendado para continuar con la etapa de diseños. En este sentido, el objetivo de este estudio es la definición de las variables de diseño más importantes sobre las cuales se deberán adoptar las decisiones relacionadas con el dimensionamiento de los principales parámetros del proyecto, así como la configuración del esquema de desarrollo. Se presentan finalmente algunas conclusiones sobre la aplicación de la metodología propuesta.

#### **ABSTRACT**

A methodology to define the main characteristics of hydropower project is presented. This methodology based in multiobjective analysis is used in the evaluation and decision processes to define the project characteristics and development scheme that will be recommended to the design stage. The objective is to develop a decision tool that will allow the definition of the most important design variables and parameters. An application of the proposed methodology with some results are presented followed by some conclusions.

# 1. EL ANÁLISIS MULTI OBJETIVO COMO HERRAMIENTA PARA LA DEFINICIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO

## Generalidades

El Manejo Integral de los Recursos Hidráulicos se cataloga como una actividad interdisciplinaria, que a menudo involucra la necesidad de resolver problemas de Toma de Decisiones afectando diversos intereses que por lo general están en conflicto. Para la solución de estos conflictos a través de procesos de negociación es imprescindible tratar de inferir o predecir los mecanismos y las dinámicas de los impactos generados con las diferentes decisiones evaluadas en cada uno de los aspectos considerados. Las anteriores consideraciones sobre el carácter interdisciplinario, la presencia de intereses en conflicto y la necesidad de sustentar y soportar las decisiones tomadas, motivaron el desarrollo de modelos de Análisis Multiobjetivo. No obstante, tal como lo advierten Bogardi y Sutanto (1994), el desarrollo reciente de las últimas décadas en modelos de Análisis Multiobjetivo no ha estado acompañado de las aplicaciones prácticas deseadas o previstas, siendo el motivo de esta situación el rezago inherente entre la aplicación y el desarrollo metodológico.

## Definición de Objetivos, Atributos y Criterios de Medición

Desde siempre se ha reconocido la importancia de los aspectos sociales y ambientales en el planeamiento y manejo de los recursos hidráulicos. Sin embargo, en los análisis tradicionales de beneficio - costo la consideración de los *intangibles* dentro de la decisión sólo se limitaba a una descripción cualitativa para formular recomendaciones, sin garantía de ser tomadas en cuenta posteriormente en las decisiones adoptadas (Major, 1977). Con el Análisis Multiobjetivo la consideración de todos los aspectos relevantes se hace de forma explícita, interviniendo directamente en la decisión, de acuerdo con la importancia que se asigne a cada aspecto.

Varios autores han establecido y recomendado procedimientos para la definición de los objetivos relevantes en el problema, Teclé y Duckstein (1994), por ejemplo, sugieren: examinar la literatura técnica para identificar los objetivos considerados en problemas similares, realizar un estudio analítico para detectar los aspectos relevantes en la decisión y observar la forma en que normalmente se están tomando decisiones en el mundo real. En todos los casos es imprescindible la participación activa del decisor; por otra parte, se recomienda limitar el número de objetivos, ya que en el análisis de resultados con numerosos objetivos el decisor puede perder la capacidad para diferenciar claramente las alternativas.

## Selección de los Métodos de Análisis Multiobjetivo

En la búsqueda de los métodos mas adecuados es muy importante considerar la forma de insertar al algoritmo la estructura de preferencias del decisor, partiendo del hecho de que éste por lo general no está acostumbrado a su terminología y formulación matemática. En este sentido, numerosos investigadores resaltan la importancia de la transparencia en la estructura del modelo, de modo que permita un control apropiado del problema y las implicaciones de la solución adoptada; la sencillez en la forma de articular las preferencias del decisor y la flexibilidad del método para permitir modificaciones y análisis de sensibilidad.

## 2. APLICACIÓN PRÁCTICA, DEFINICIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO.

Como ilustración de la aplicación práctica del Análisis Multiobjetivo en la definición de un proyecto hidroeléctrico se presentan en los siguientes numerales la metodología empleada y los resultados obtenidos dentro del proceso de definición de las características principales del Proyecto Hidroeléctrico Nechí.

### Descripción del Proyecto Hidroeléctrico Nechí

El Proyecto Hidroeléctrico Nechí, localizado en la región central de Colombia en la cordillera oriental de los Andes Colombianos, consistía inicialmente en el represamiento del río Nechí mediante una presa localizada inmediatamente aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Santa Bárbara, para conformar un embalse de 378 millones de m<sup>3</sup> de capacidad total y un salto bruto de 450 m, mediante una central hidroeléctrica subterránea. Durante el estudio de prefactibilidad del proyecto se identificó la posibilidad de incrementar el caudal aprovechado mediante la desviación al embalse de los caudales del río Espíritu Santo y la quebrada La Plancha; así mismo se recomendó incrementar la altura de la presa en cerca de 60 m. En este estudio se adoptó una capacidad instalada de 750 MW, correspondiente a un caudal de diseño de 162,0 m<sup>3</sup>/s y a un salto nominal de 537,0 m.

### Criterios para la Evaluación y Selección del Proyecto

Como criterios fundamentales para la evaluación y selección del proyecto que pasaría a la etapa de diseños se tuvieron en cuenta los siguientes:

- **Viabilidad económica del proyecto.** El proyecto debe ser rentable teniendo en cuenta los beneficios económicos resultantes de valorar únicamente la producción de energía firme, los ingresos adicionales resultantes de la venta de energía secundaria no se tienen en cuenta para la definición de la viabilidad económica básica del proyecto, aunque sí para el proceso de definición de los parámetros del proyecto. Como indicador del criterio de rentabilidad se adoptó la tasa interna de retorno del proyecto (sin apalancamiento financiero) del 12 %, para una evaluación en moneda constante.
- **Viabilidad ambiental.** Las alternativas consideradas deben ser ambientalmente viables. Los costos asociados con la realización de las medidas de mitigación están considerados dentro de los costos totales de cada alternativa proyectada.
- **Caudal remanente en el cauce.** Para la estimación de la producción energética de las alternativas consideradas se supuso un caudal remanente en el sitio de la presa igual al 5% de las afluencias hidrológicas medias al sitio de captación (5 m<sup>3</sup>/s).

### Alternativas Evaluadas

Las alternativas se establecieron a partir de la variación sistemática de los siguientes parámetros de diseño:

- **Altura y tipo de la presa.** Se consideró un rango de altura entre los 40 m (filo de agua) y los 230 m para presas en enrocado con núcleo impermeable.
- **Caudal de diseño de la central.** Se analizó en forma discreta, modulado por el número de las unidades de generación, las cuales se supusieron del tipo Pelton, cada una de unos 30 m<sup>3</sup>/s de capacidad; de esta forma se consideraron caudales de diseño entre 60 m<sup>3</sup>/s y 180 m<sup>3</sup>/s (entre 2 y 6 unidades).

- **Derivación del río Espíritu Santo.** Esta variable es de tipo binario, ya que una de las alternativas es realizar la desviación, mientras que la otra es no ejecutarla.

El sistema de identificación de las alternativas está asociado a un código de tres números que distingue los tres parámetros analizados. El código tiene la siguiente estructura: PPP-*QQQ*-*D*, los tres primeros dígitos (*PPP*) corresponden a la altura de la presa, en metros, los siguientes tres dígitos (*QQQ*) corresponden al caudal de diseño de la central en  $\text{m}^3/\text{s}$ , y el último dígito (*D*) corresponde a la realización ( $D = 1$ ) o no ( $D = 0$ ) de la derivación del río Espíritu Santo. Por ejemplo, el código 060-120-1 corresponde a una altura de la presa de 60 m, un caudal de diseño de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  y realizando la derivación del río Espíritu Santo.

### Procedimiento Utilizado

- **Evaluación energética.** La evaluación de la producción energética de las alternativas se realizó a partir de la simulación de la operación dentro del sistema de plantas de la empresa propietaria del proyecto, mediante la utilización del Módulo de Despacho Hidrotérmico, del modelo de planeamiento energético SUPER/OLADE-BID. Como características energéticas analizadas, se evaluaron las producciones de energía firme y secundaria. La energía firme se definió como aquella para la cual un conjunto de plantas del sistema considerado permite atender la demanda proyectada con un valor de racionamiento esperado del 1 % de la misma. La energía secundaria se calcula con base en la definición convencional, o sea la diferencia entre la energía media y la firme.
- **Evaluación ambiental.** La identificación y evaluación de los impactos ambientales se realizó mediante el análisis de dos tipos de información: la *oferta ambiental* de la zona de influencia del proyecto, definida por las características de los elementos y procesos que conforman el entorno donde se construirá y operará el proyecto y la *demanda ambiental*, que hace referencia al conjunto de efectos ambientales causados o atribuibles a las características estructurales o funcionales del proyecto.  
Entre los principales impactos identificados están: relocalización de viviendas, llegada de personal foráneo a la zona del proyecto, interrupción de rutas de intercambio por el embalse, pérdida de zonas productivas por inundación de tierras, intensificación de procesos erosivos en sitios de obras embalse, incremento en el arrastre de sedimentos durante la construcción, grandes movimientos de tierra, apertura de las condiciones de accesibilidad que facilitarían la explotación de maderas, creación de lechos semisecos en las quebradas desviadas, reducción severa del caudal del río Nechí, aparición inmediata de pequeña minería en el lecho del río, disminución de la navegabilidad del río Nechí.
- **Indicadores de la eficiencia económica.** Con base en los estimados de los presupuestos asociados a cada una de las alternativas y los resultados de las simulaciones energéticas se calcularon diferentes indicadores, tales como la tasa interna de retorno, la relación beneficio/costo, el costo unitario de generación y el costo unitario de instalación.

### 3. ANÁLISIS MULTIOBJETIVO.

Teniendo en cuenta que en el análisis de las diferentes alternativas del proyecto intervienen diferentes factores (económicos, energéticos, ambientales, tecnológicos, políticos, etc.) que

influyen en distinto grado y, consecuentemente, en la decisión sobre el proyecto a ser finalmente adoptado, resulta sumamente importante apoyar la decisión sobre una base formal, de manera que permita tomar una decisión de una manera objetiva ante la presencia de los diferentes aspectos e intereses. Por esta razón se decidió la utilización de técnicas de apoyo en la toma de decisiones basadas en análisis multiobjetivo, las cuales permiten considerar en forma explícita y de manera simultánea, condicionantes del proyecto adicionales al clásico criterio de la eficiencia económica.

La aplicación de técnicas de análisis multiobjetivo se basó en criterios de consideración exhaustiva de alternativas y objetivos relevantes, sensibilidad en las ponderaciones de los objetivos, y utilización de diferentes metodologías con el fin de examinar la consistencia de los resultados obtenidos

Para el análisis se definieron los siguientes objetivos como relevantes en el proceso de selección de las características del proyecto:

- **Objetivo de eficiencia de la inversión.** Representado a través de la tasa interna de retorno de la alternativa considerada. Este indicador es equivalente a la relación beneficio/costo en las soluciones adoptadas (valores óptimos), teniendo la ventaja de controlar la selección con base en un indicador de rentabilidad. Como función de valor de este objetivo en el proceso de reescalación se adopta, tanto para el método de los Promedios Ponderados como para el método de las Funciones de Valor Multiobjetivo, una función lineal creciente que caracteriza una actitud indiferente al riesgo
- **Objetivo ambiental.** Este objetivo se considera con base en la calificación ambiental de la alternativa, a partir de la estimación de la magnitud del deterioro, la cual a su vez es calculada mediante la consideración de los diferentes aspectos que constituyen la evaluación ambiental. Para este objetivo se consideran dos funciones de valor: una lineal decreciente (que caracteriza una actitud indiferente al riesgo) en el método de los Promedios Ponderados y otra cóncava hacia abajo, también decreciente (típica de una actitud adversa al riesgo) en el método de las Funciones de Valor Multiobjetivo.
- **Objetivo energético.** Trata de incorporar las preferencias asociadas a la capacidad instalada, que no alcanzan a ser introducidas en la evaluación de los beneficios energéticos o económicos, en razón del nivel de resolución temporal considerado en las simulaciones (mensual), en el que no es posible detectar la importancia de disponer de una capacidad adicional para producir potencia durante los períodos horarios de máxima demanda de potencia, períodos en los cuales el valor (tarifa en bolsa) de la producción es significativamente mayor. Para este objetivo se adopta una función de valor lineal creciente o indiferente al riesgo en el método de los Promedios Ponderados y otra no lineal creciente con característica de actitud adversa al riesgo en el método de las Funciones de Valor Multiobjetivo.
- **Objetivo tecnológico.** Con este objetivo se pretenden incorporar en el proceso de toma de decisiones aspectos relacionados con incertidumbres y desventajas técnicas y constructivas que se presentan para las mayores alturas de presa. Así mismo, se incluyen en este objetivo, las ventajas relativas que poseen las alternativas con presas hasta de 150 m de altura debido a la existencia de diferentes posibilidades constructivas (arco, arco gravedad, y enrocado con membrana de hormigón ) con las cuales es posible obtener economías sobre el costo estimado en la evaluación correspondiente a una presa de enrocado con núcleo en arcilla.

Con base en los criterios presentados en el numeral 1.4 se escogieron los siguientes cinco métodos de análisis, con tres diferentes maneras de llegar a la solución óptima (Smith y otros, 1.993).

- **Método de los Promedios Ponderados (PP).** Consiste en la búsqueda de la alternativa que posea la mayor calificación o valor multiobjetivo; el cual se obtiene como la suma ponderada de los logros en los diferentes objetivos. Debido a que se requieren hacer sumas ponderadas de logros en objetivos medidos en unidades diferentes, se hace necesario reescalar dichos logros a una escala uniforme (entre 0 y 1, por ejemplo) mediante funciones lineales.

El valor multiobjetivo  $U_i$  de la alternativa  $i$  se define como:

$$U_i = \sum_{j=1}^p w_j r_{ij} \quad (1)$$

Donde:  $w_j$  es el factor de ponderación del objetivo  $j$ ,  $r_{ij}$  es el logro reescalado de la alternativa  $i$  en el objetivo  $j$ .

- **Método de las Funciones de Valor Multiobjetivo en su forma aditiva (FVM).** Al igual que el anterior, consiste en la búsqueda de la alternativa que posea la mayor calificación o valor multiobjetivo. La forma aditiva de este método es equivalente al método de los Promedios Ponderados en el cálculo del valor multiobjetivo (ecuación (1)), residiendo la diferencia de los dos métodos en las funciones que se utilizan en el reescalamiento de los objetivos; así, el método de los Promedios Ponderados supone funciones lineales o indiferentes al riesgo (la satisfacción es directamente proporcional al logro obtenido), mientras que el método de las Funciones de Valor Multiobjetivo permite la consideración de diferentes tipos de funciones para valorar la satisfacción respecto al logro obtenido en el objetivo.
- **Método ELECTRE I (EI).** Realiza una comparación de alternativas con el fin de reducir el conjunto de alternativas no dominadas y, de esta forma, facilitar al decisor el proceso de selección de la alternativa a implementar. El método ELECTRE I restringe este conjunto de alternativas *no dominadas* a partir de las "Relaciones de Mejor Rango" (R) entre pares de alternativas. Una alternativa  $i$  tiene una relación de *mejor rango* sobre una alternativa  $j$  ( $iR_j$ ), si escoger  $i$  y no  $j$  produce al decisor mucha satisfacción y poca insatisfacción (Smith y otros, 1.993).
- **Método ELECTRE IV (EIV).** Al igual que el anterior, se basa en una comparación pareada de alternativas con el fin de realizar un ordenamiento o jerarquización de las mismas. Dicho ordenamiento es posible gracias a la definición de una serie de *sobrecalificaciones* entre alternativas (criterio semejante a las relaciones de mejor rango del método ELECTRE I) con diferentes niveles de exigencia que son utilizadas para eliminar eventuales empates entre alternativas en alguna posición del ordenamiento (Smith y otros, 1.993).
- **Método de la Programación de Compromiso (PC).** Consiste en formular una alternativa ideal, generalmente inalcanzable, la cual posee los máximos logros alcanzables en todos los objetivos, y se trata de encontrar la alternativa factible que minimice la distancia ponderada a la solución ideal; para lo cual se utiliza la siguiente definición de distancia a la alternativa ideal (Smith y otros, 1.993):

$$L_m = \sum_{i=1}^p w_i^m \left\{ \frac{Z_{i,\max} - Z_{i,(x)}}{Z_{i,\max} - Z_{i,\min}} \right\}^m \quad (2)$$

Donde:  $L_m$  es la distancia de la alternativa  $x$  a la solución ideal,  $w_i$  es el factor de ponderación del objetivo  $i$ ,  $Z_{i,\max}$  y  $Z_{i,\min}$  son los valores máximos y mínimos (mejores y peores) del objetivo  $i$ ,  $Z_{i,(x)}$  es el logro de valor la alternativa  $x$  en el objetivo  $i$ .

En la ecuación (2) los factores de ponderación  $w_i$  reflejan las importancias relativas de los objetivos y el exponente  $m$  resalta la importancia de los objetivos mas lejanos al valor óptimo.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Logros en los objetivos.** En la Tabla 1 se presentan las principales características y los logros en los diferentes objetivos energético, de eficiencia económica, ambiental y tecnológico de las alternativas consideradas.
- **Ponderación de los objetivos.** Con el fin de analizar la sensibilidad de los resultados y la robustez de la alternativa óptima con respecto a las ponderaciones de los objetivos, se definieron quince arreglos de factores de ponderación de los cuatro objetivos (ver Figura 1), con base en las siguientes consideraciones:
  - El objetivo de eficiencia de la inversión, el más importante en la decisión, se varió sistemáticamente entre 0,8 y 0,4, con intervalos de 0,1 (cinco valores).
  - El excedente de ponderación (1,0 menos ponderación de eficiencia de la inversión) se redistribuyó entre los demás objetivos (ambiental, energético y tecnológico) de tres formas.

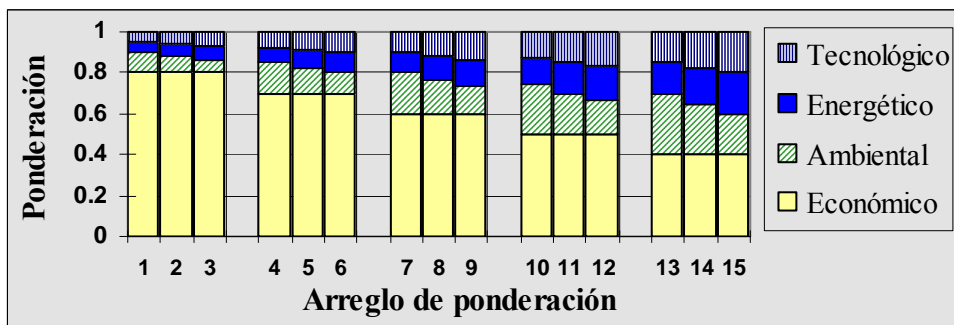


Figura 1 Arreglos de ponderación de los objetivos

- **Método de los Promedios Ponderados.** En la gráfica superior de la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de este método en todas las alternativas consideradas; el eje de las abscisas indica el número del arreglo de ponderación y el eje de las ordenadas las franjas de variación de las calificaciones multiobjetivo de las alternativas con igual altura de presa (diferente caudal de diseño, con y sin la derivación del río Espíritu Santo); se puede observar que las alternativas de presa de 40 m 210 m y 230 m son significativamente inferiores a las alternativas de alturas de presa de 130 m 150 m y 180 m; esta tendencia general fue observada en todos los métodos y por lo tanto no se presentará en los siguientes.

En la gráfica inferior se presentan, con mejor resolución y para apreciar el efecto del caudal de diseño y las derivaciones, las calificaciones de las mejores alternativas; en este caso se puede observar que para todas las ponderaciones supuestas se insinúan como mejores alternativas las correspondientes a una altura de presa de 130 m con un caudal de diseño de 120 m<sup>3</sup>/s, con o sin la derivación del río Espíritu Santo (Alternativas 130-120-1 y 130-120-0, respectivamente); tales alternativas son equivalentes en los objetivos energético y tecnológico y difieren en el objetivo de eficiencia de la inversión, en favor de la derivación, y en el objetivo ambiental, en favor de la no derivación; el punto de indiferencia entre estas dos alternativas se presenta para ponderaciones de la eficiencia de la inversión del 60%. A las alternativas de presa de 130 m le siguen (muy de cerca en términos relativos) las mismas alternativas pero con presa de 150 m.

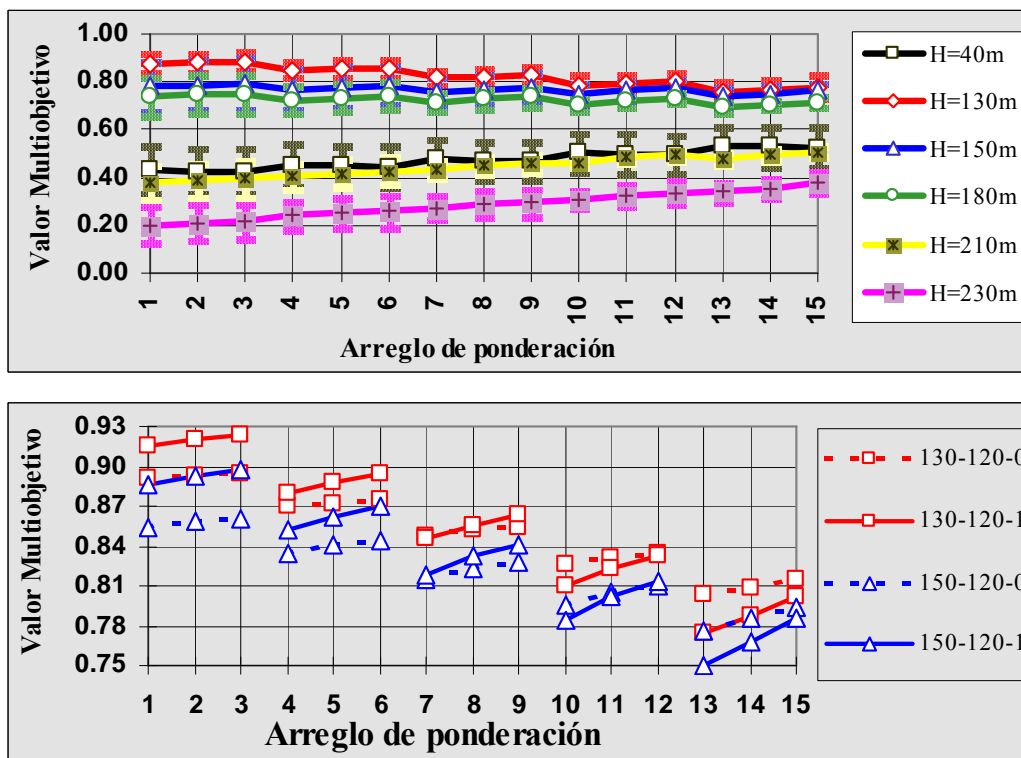


Figura 2 Resultados del método de los Promedios Ponderados

- **Método de las Funciones de Valor Multiobjetivo.** En la Figura 3 se aprecian resultados comparables con los obtenidos en el método anterior, pero con un dominio relativamente evidente de la derivación del río Espíritu Santo (alternativa 130-120-1) sobre la no derivación (alternativa 130-120-0). La indiferencia entre estas dos alternativas, encontrada en el método anterior, es atribuible a la actitud de indiferencia al riesgo en el objetivo ambiental, mientras que la ventaja de la alternativa 130-120-1 sobre la alternativa 130-120-0 (ventajas de la derivación del río Espíritu Santo), se debe a la actitud adversa al riesgo, implícita en el método de las Funciones de Valor Multiobjetivo.
- **Método de la Programación de Compromiso.** En la Figura 4 se presentan las mejores alternativas al utilizar exponentes iguales a 1,0 y 2,0; se debe recordar que este método busca minimizar la distancia con respecto a la solución ideal y por lo tanto las mejores alternativas son las de valores mínimos en este parámetro. A medida que se aumenta el exponente de la ecuación de distancia se favorece en la selección las alternativas con



logros más parejos en los objetivos. En este sentido, para el exponente igual a 1,0 se presenta una situación de indiferencia entre las alternativas 130-120-1 y 130-120-0, similar a la detectada en el método de los Promedios Ponderados; para el exponente igual a 2,0 se aprecia un ligero dominio de la no desviación del río Espíritu Santo, debido a las leves deficiencias en el objetivo ambiental atribuibles a la desviación del río y que se magnifican al elevar el exponente de la ecuación de distancias.

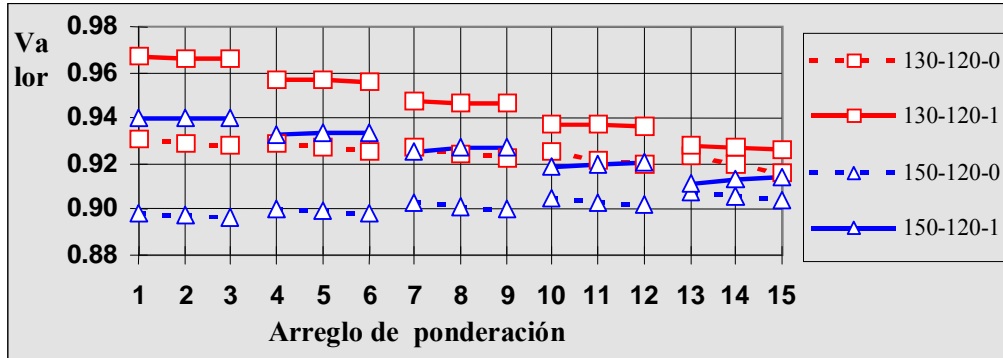


Figura 3 Resultados del método de las Funciones de Valor Multiobjetivo

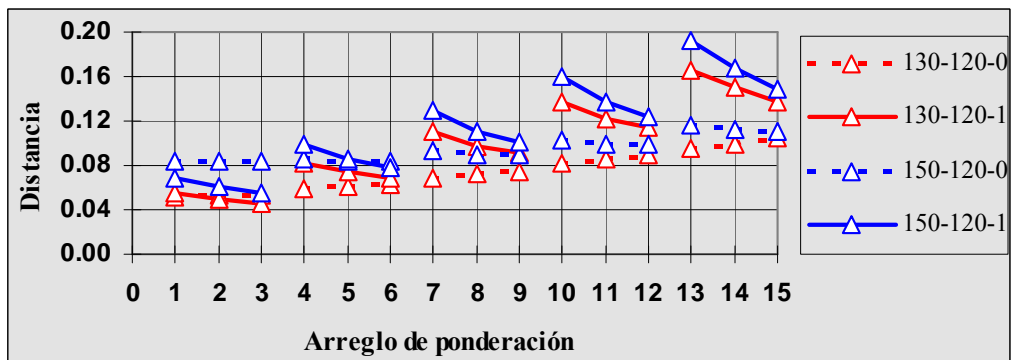
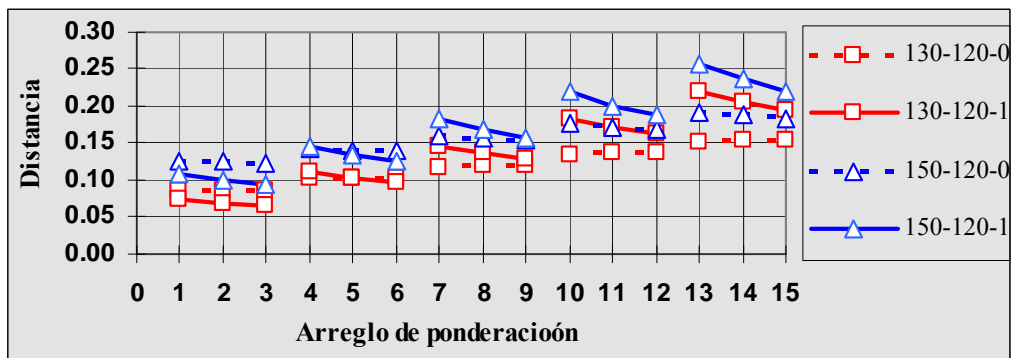


Figura 4 Resultados del método de la Programación de Compromiso

- **Método ELECTRE I.** Este método reduce el conjunto de soluciones no dominadas mediante una comparación pareada de alternativas en todos los objetivos. Para su aplicación se emplearon los mismos 15 arreglos de ponderaciones (ver Figura 1) y se combinaron con nueve criterios o exigencias derivados de la utilización de tres índices

de concordancia (0.9 0.8 y 0.7) y tres índices de discordancia (0.4 0.3 y 0.2); de esta forma, los quince arreglos de ponderación combinados con los nueve pares de índices de concordancia y discordancia implicaron la realización de 135 ejecuciones del modelo, que permitieron identificar alternativas robustas, en lugar de intentar definir las ponderaciones que reflejen la estructura de preferencias de decisor y los índices más adecuados para la identificación de las relaciones de mejor rango. Como resultado de los 135 ejecuciones del método se encontró que en el 100 % de los casos la alternativa 130-120-1 aparece como no dominada, encontrándose que la alternativa 130-120-0 aparece también como no dominada en el 61 % de los casos, y luego las alternativas 150-090-0 y 150-120-0 aparecen como no dominadas en el 56 % y el 47 % de los casos, respectivamente.

- **Método ELECTRE IV.** Para la aplicación del método ELECTRE IV se definieron métricas individuales para cada uno de los objetivos a partir de los rangos de variación de las métricas seleccionadas para cada objetivo se estableció como criterio de preferencia estricta de una alternativa sobre otra, en algún objetivo, cuando la diferencia en el logro en dicho objetivo es superior a 1.5; como criterio de preferencia débil se estableció un valor de 0.7 y por lo tanto, para diferencias con valor absoluto inferior a 0.7 se establece una condición de indiferencia entre las alternativas. En el ordenamiento descendente de alternativas encontrado con la aplicación del método se observó un empate en el primer lugar entre las alternativas 130-120-1 y 130-120-0; luego aparecieron las alternativas equivalentes pero con presa de 150 m.
- **Sensibilidad al criterio del objetivo de eficiencia económica.** Con este análisis se pretende tener elementos de juicio adicionales para el análisis de la indiferencia encontrada entre las alternativas correspondientes a alturas de la presa de 130 m y 150 m, y de examinar la relevancia del criterio del objetivo de eficiencia económica (valor presente de los beneficios netos o tasa interna de retorno). En la Figura 5 se presenta un resumen comparativo de los resultados, en la cual se ilustra el efecto del criterio adoptado para definir el objetivo de la eficiencia económica. En esta figura se puede apreciar claramente que las mayores diferencias absolutas en la calificaciones multiobjetivo se presentan cuando solo se considera la tasa interna de retorno, siendo menores cuando se consideran los beneficios netos. Por lo tanto, se puede afirmar que debido a las bajas diferencias relativas encontradas, las alternativas 130-120-1 y 150-120-1 se pueden considerar como indiferentes en términos prácticos; así mismo, se puede afirmar que la alternativa 180-120-1 solamente compite en la selección cuando se consideran únicamente los beneficios netos.

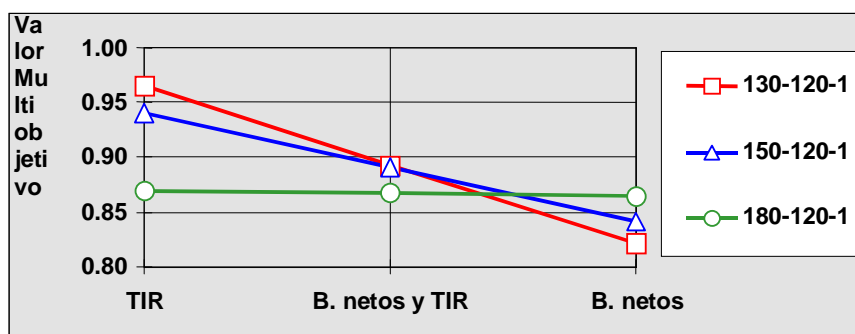


Figura 5 Sensibilidad al criterio del objetivo de eficiencia económica.

## 5. CONCLUSIÓN

La consideración de los criterios u objetivos complementarios al criterio de eficiencia económica de la inversión y la aplicación de técnicas de Análisis Multiobjetivo, permiten definir un desarrollo del proyecto que, en primer lugar, satisface las condiciones de viabilidad financiera y ambiental, y en segundo lugar logra que la selección de la alternativa y de sus principales parámetros de diseño sea más clara, gracias a la utilización de técnicas que permiten incorporar en forma explícita y simultánea diferentes tipos de consideraciones, no necesariamente homogéneas en términos dimensionales.

## 6. REFERENCIAS

- (1) BOGARDI, J. And y SUTANTO A., 1994. Discrete decisions in water resources planning: An interactive sequential approach with multiple objectives. Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management. Edited by Janos J. Bogardi and Hans-peter Nachtnebel. International Hydrological Programme, UNESCO, Paris.
- (2) MAJOR, D., 1977. Multi Objective Water Resource Planning. American Geophysical Union. Water Resources Monograph 4 Washington D. C.
- (3) SMITH, R., Mesa, O., Dyner, I., Valencia, D. y Poveda, G. 1993. Decisiones con Múltiples Objetivos e Incertidumbre. Posgrado de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín. Medellín.
- (4) TECLE, A. y DUCKSTEIN, L. 1994. Concept of multicriterion decision making. Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management. Edited by Janos J. Bogardi and Hans-peter Nachtnebel. International Hydrological Programme, UNESCO, Paris.