

## **ANÁLISIS MULTI OBJETIVO ECONOMICO AMBIENTAL DEL PROYECTO YACAMBU - QUIBOR. ESTADO LARA Y PORTUGUESA. VENEZUELA.**

**Francisco Rivas Vergara<sup>1</sup>**

### **RESUMEN**

El presente estudio se elaboró utilizando técnicas de análisis de sistemas, para evaluar un conjunto de medidas y alternativas diseñadas para el aprovechamiento del recurso hídrico en una región de Venezuela, conformada por los Estados Lara y Portuguesa.

La planificación se realizó bajo el enfoque de escenarios. Se presenta un amplio inventario de los recursos del área de estudio así como su diagnóstico, se determina la disponibilidad del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo y se estiman las demandas urbanas y de riego, para luego formular y prediseñar un conjunto de alternativas tanto estructurales como no estructurales.

Se elaboró el estudio de impacto ambiental, adaptando una lista de verificación y se aplicó un conjunto de técnicas de economía ambiental, para la cuantificación de los costos y beneficios ambientales. La valoración de los beneficios y costos se realizó a precios de mercado y de cuenta.

En el análisis se evalúan dos objetivos; el de maximizar el ingreso económico nacional y el de maximizar el flujo económico ambiental cuantificado, los cuales contribuyen en un caso a mejorar la economía en conjunto para la sociedad y el otro a la valoración de aquellas variables ambientales afectadas por el proyecto, para su conservación. Fue elaborado a nivel de prefactibilidad, y comprende el diseño de un modelo matemático en programación lineal entera mixta a un conjunto de soluciones prediseñadas para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos en las cuencas de los ríos Turbio y Tocuyo y la cuenca alta del río Portuguesa de los estados Lara y Portuguesa al centro occidente de la República de Venezuela, en una superficie aproximada a los 8.000 km<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Mérida – Venezuela, Correo-E: vergara@ula.ve

Con la aplicación de la técnica de programación lineal entera mixta, se evalúa todo el conjunto de alternativas posibles en la búsqueda de la mejor solución para la región. Los resultados obtenidos definen el tamaño y el tiempo de construcción en que entrarían en funcionamiento las alternativas, así como establecer la relación de intercambio entre los objetivos considerados. Se analiza el sistema desde tres puntos de vista: un sistema con fuentes locales con 651 variables y 552 restricciones, con un resultado de 62,92 millones de \$, un sistema con fuentes locales más embalse Yacambú con 752 variables y 603 restricciones, con un resultado de 76,22 millones de \$ y finalmente un sistema con fuentes locales, embalse Yacambú más embalses Dos Bocas con 816 variables y 652 restricciones, con un resultado de 115,82 millones de \$.

**Palabras Claves:** Multiobjetivo, ambiente, Lara, Portuguesa, programación lineal.

## **MULTIOBJECTIVE ENVIRONMENTAL ECONOMIC ANALYSIS OF THE YACAMBU QUIBOR, LARA AND PORTUGUESA, VENEZUELA PROJECT.**

**Francisco Rivas Vergara**

### **ABSTRAC**

The present study was carried out using systems analysis techniques to evaluate a series of solutions designed to take advantage of hydraulic resources in Lara and Portuguesa States in the Republic of Venezuela.

Planning was carried out using scenarios. Initially, a large inventory of area resources and their evaluation are presented; the availability of the superficial and subterranean hydraulic resources are determined; the urban and irrigation demands are estimated and series of structural and non-structural solutions are formulated and pre-designed.

An environmental impact study was made, adapting a verification list to the case study was applied to a series of environmental economic techniques in order to quantify environmental costs and benefits derived from the project. Benefit and cost value of each solution was carried out using market prices and accounting costs.

Later, a mathematical model was designed with lineal programming considering the contribution of the different alternatives to the formulated objectives, in this case, the economic objectives: maximizing the national income and the environmental objective: maximizing environmental benefit.

Later, in order to searching for the best possible solution for the region, a mathematical programming technique with multiple objectives for evaluating all the series of alternatives possible was applied. The results obtained permitted to establish the construction size and time in which the alternatives would function as well as permit establishing the exchange relation between the objectives considered.

The results indicate that first, rehabilitation measures are considered and measures which imply large investments. The estimated transformation curves allowed knowing that to increase the environmental objective for the hydraulic resource development plan, the economic objective value must be decreased.

**Key Words:** Multiobjective, environmental, Lara, Portuguesa, lineal programming.

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una metodología para la evaluación de proyectos de aprovechamientos de recursos hidráulicos, basada en las técnicas de programación matemática con objetivos múltiples y en los conceptos de la evaluación económico-social de proyectos, así como la aplicación de esta metodología a un estudio de caso en Venezuela.

La evaluación de proyectos bajo objetivos múltiples conflictivos, conocida también como análisis multiobjetivo, representa un enfoque innovador en relación al criterio usado comúnmente para la toma de decisiones, basado en un solo objetivo. En el análisis multiobjetivo se genera y evalúa más de un plan alternativo antes de llegar a una decisión. En cambio, bajo el enfoque de un solo objetivo, los planes alternativos se jerarquizan de acuerdo a ese solo criterio y se escoge el mejor de ellos para su aprobación o rechazo por los encargados de tomar las decisiones. Puede decirse que en el análisis multiobjetivo se estudia simultáneamente las contribuciones que cada plan alternativo hace a los diferentes objetivos seleccionados para la planificación.

Al formular y evaluar proyectos de aprovechamiento de recursos hidráulicos, Rivas (1996), se plantean objetivos que no sólo proporcionan el estándar comparativo para definir costos y beneficios del proyecto, sino que llevan al analista a tomar en cuenta otros aspectos relevantes que pueden influir en la toma de decisiones. Estos proyectos toman como objetivos principales el incremento del ingreso nacional, sabiendo que existen otros objetivos importantes, entre los que se mencionan la conservación del ambiente donde se desarrolla el proyecto, se destaca este objetivo, debido a que los modelos económicos y las actividades de dependencia del hombre respecto a su ambiente han considerado la naturaleza como un bien gratuito, una riqueza externa de la cual se puede disponer en cantidades ilimitadas.

Al plantear los objetivos mencionados anteriormente, conduce a la tarea de estimar los costos y beneficios del proyecto, incluida la variable ambiental, valorando en lo posible los impactos ambientales generados en el proyecto evaluado y pasar de una apreciación subjetiva con poca repercusión sobre la toma de decisiones a una evaluación más objetiva.

La metodología de análisis multiobjetivo tiene un campo de aplicación amplio, dependiendo del problema a tratar, bien sea de interés público, privado, ambiental, de distribución de la riqueza o de seguridad nacional. Este tipo de

análisis estudia simultáneamente las contribuciones que cada plan alternativo hace a los diferentes objetivos seleccionados para la planificación y aplicado al presente estudio, representa simultáneamente las contribuciones que los planes formulados hacen a los diversos objetivos seleccionados en el proceso de planificación, lo que puede contribuir a una mayor eficiencia económica, financiera, social y ambiental de la solución escogida.

## **MARCO TEORICO, ANÁLISIS MULTI OBJETIVO**

La teoría sobre el análisis con objetivos múltiples y sobre la evaluación económica-social que se presenta a continuación, está basada en Cohon (1978), Dasgupta et al (1972), Little y Mirrlees (1974) y Mayor (1977). A fin de ilustrar los principales conceptos sobre esta teoría se presenta el siguiente ejemplo hipotético.

Se está evaluando la contribución de diferentes proyectos a dos objetivos: el crecimiento económico nacional y el crecimiento económico de una determinada región de la misma nación. De acuerdo a la figura 1, en el eje horizontal se representa el beneficio neto regional producido por un determinado proyecto y en el eje vertical se representa el beneficio neto nacional producido por el mismo proyecto. Se entiende que estas cantidades representan el total de beneficios actualizados sobre el horizonte de planificación.

Cada proyecto puede estar conformado por una determinada combinación de obras físicas y/o planes de manejo a implementar y representar un diferente curso de acción que va a lograr determinados niveles, positivos o negativos, en los dos objetivos. Entonces, cada proyecto producirá un punto en el plan formado por los dos ejes de objetivos. Las coordenadas de cada punto serán las contribuciones de cada proyecto a los dos objetivos. De esta manera, se pueden ir graficando los puntos correspondientes a los proyectos bajo consideración.

En la figura 1 aparecen graficados todos los proyectos situados en el cuadrante nor-este. Los puntos ubicados en los demás cuadrantes no son de interés en este caso, pues representan proyectos cuyo beneficio neto es negativo para el objetivo de crecimiento nacional y/o el objetivo de crecimiento regional. El conjunto de todos los puntos graficados forman las soluciones factibles del problema. Si ahora se unen con una línea continua todos los puntos situados

en el límite o borde del conjunto de soluciones factibles, se obtiene lo que conoce como *curva de transformación*. En la figura 1, la línea continua LMAN representa la curva de transformación que es denominada también *frontera de viabilidad*.

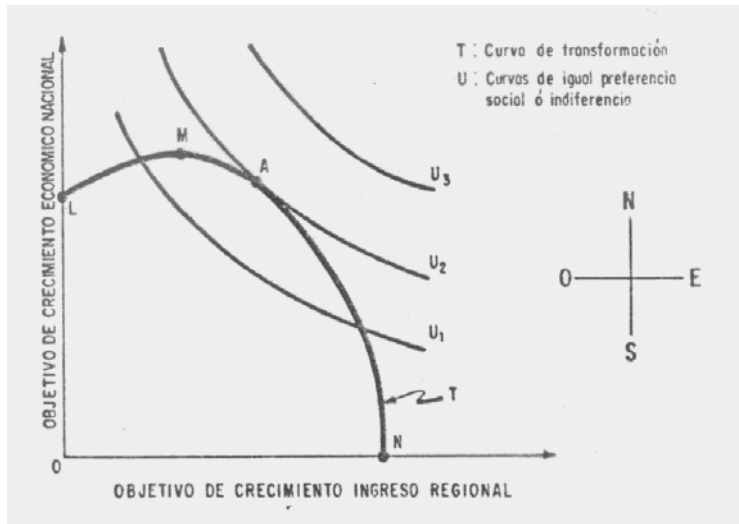


Figura 1. Curvo de transformación y curvas de indiferencia.

Tal como está trazada la curva de transformación en la Figura 1, los proyectos pertinentes para el análisis son los situados en el segmento MN, ya que en el segmento LM no hay conflicto entre los dos objetivos; no tendrá objeto elegir el proyecto correspondiente a cualquier punto situado en LM, pues el proyecto M prevalece sobre todos ellos. Los proyectos situados en el segmento MN reciben la denominación de *soluciones no-inferiores*.

Los puntos ubicados en el área encerrada por la curva de transformación se llaman *soluciones inferiores*. En general, cada solución no-inferior proporciona el nivel óptimo de un objetivo para niveles fijos de los demás objetivos.

El siguiente paso en esta versión idealizada del proceso de planificación, consiste en seleccionar uno de los puntos situados en el segmento MN. Si se estuviera trabajando bajo el enfoque de un solo objetivo la decisión sería sencilla el plan seleccionado sería el M en caso de que el objetivo fuera el crecimiento nacional o, el N en caso de que el objetivo fuera el crecimiento

regional. En cambio, en el análisis multiobjetivo la decisión depende de las preferencias del encargado de tomar las decisiones.

Supóngase, hipotéticamente, que las preferencias del encargado de tomar las decisiones están representadas en la figura 1 por las curvas  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ . Estas curvas son denominadas también curvas de *bienestar social equivalente*, de *isopreferencia* o de *indiferencia*. Estas curvas representan las infinitas combinaciones de valores de los objetivos, que proporcionan el mismo nivel de satisfacción o bienestar, a la sociedad o el grupo encargado de tomar las decisiones. Si es deseable obtener más de ambos objetivos al mismo tiempo, entonces el nivel de satisfacción aumentará conforme se pasa de una curva de numeración inferior a otra de numeración superior, como en la figura 1.

Si se conocen las curvas de indiferencia, puede determinarse la solución óptima. Esta corresponde al punto A en la figura 1, que es donde el segmento MN toca la curva de indiferencia más alta que puede alcanzarse. Si las curvas de indiferencia cambian, entonces cambiará la solución óptima, llamada también *solución del mejor compromiso*, pues está determinada de acuerdo a una preferencia que puede variar.

Para concluir con esta introducción, conviene referirse a la forma en que debe valorarse el flujo de beneficios y costos que intervienen para cada objetivo. Cuando el proyecto evaluado es de interés privado, los beneficios y costos se valorarán a los precios de mercado, pues esos son los precios con que tienen que enfrentarse la firma comercial o la empresa privada para lograr sus objetivos de maximizar beneficios netos, minimizar costos de producción y otros. No tiene que ocuparse de lo que representan esos precios para la totalidad de la economía nacional.

En cambio, cuando el proyecto evaluado es de interés público, el encargado de tomar las decisiones deberá estudiar si es que los precios de mercado reflejan el costo de oportunidad de los insumos y productos del proyecto. Por ejemplo, es muy posible que en un país en vías de desarrollo como Venezuela, el precio de mercado de la mano de obra no-calificada sobreestime su verdadero costo de oportunidad o costo real para la economía del país. Esto es fácil de explicar. El precio de mercado de la mano de obra no-calificada o jornal mínimo, está determinado por presiones políticas. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la mano de obra no-especializada en Venezuela está en gran parte desempleada o subempleada, es evidente que su costo verdadero es inferior al precio de

mercado. En cambio, en condiciones de pleno empleo el costo de la mano de obra será el que ocurra al privar de su uso a otro punto del sistema económico. En este último caso, el precio de mercado puede reflejar su costo de oportunidad.

Un análisis similar puede hacerse en cuanto a los productos del proyecto. Es posible que un proyecto de riego logre la sustitución de importaciones de alimentos. En este caso, los productos deben valorarse a los precios de importación y no a los precios locales de mercado, pues el efecto neto del proyecto es el ahorro de divisas más bien que la existencia del producto.

Fundamentalmente, cuando el proyecto evaluado es de interés público se deberán utilizar precios diferentes a los de mercado, llamados *precios corregidos* o *precios de cuenta*, a fin de reflejar los beneficios y costos reales del proyecto para la economía del país. Dasgupta et al (1972) así como Little y Mirrles (1974), han presentado metodologías para la determinación de estos precios. En un comienzo se desató una polémica entre ambas ponencias, debido a la diferente terminología usada y a que en uno se enfatiza diferentes aspectos del problema en relación al otro. Sin embargo, análisis y consideraciones posteriores han logrado un consenso entre ambas metodologías, por cuanto convergen en los aspectos relevantes del problema de análisis y permiten llegar a una misma decisión.

## **METODOLOGÍA**

La metodología de evaluación preparada puede ser descrita en tres etapas: definición de los objetivos, planteamiento de alternativas básicas, generación y evaluación de soluciones no-inferiores.

La primera etapa consiste en la definición de los objetivos bajo los cuales se va a realizar la evaluación. Los objetivos pueden identificarse a partir de las conclusiones de un diagnóstico efectuado por el equipo técnico encargado de la evaluación o por medio de encuestas sucesivas realizadas entre los sectores sociales involucrados. En cualquiera de los casos, debe establecerse el tipo de relación que guardan los objetivos entre sí. La relación es de tipo complementario cuando la consecución de un objetivo coadyuva a la consecución del otro; es neutra si los recursos empleados en uno y otro objetivo no son competitivos y es conflictiva si el logro de un objetivo implica un sacrificio en el otro. La relación conflictiva entre objetivos es la que más



frecuentemente aparece en los problemas de planificación y es la que se trata en este trabajo.

Debe ponerse especial cuidado en considerarse sólo los objetivos relevantes del problema, es decir, aquellos que sean factibles de ser logrados en algún grado en caso de aplicarse cualquiera de las soluciones posibles.

La segunda etapa consiste en el planteamiento de las alternativas básicas, es decir, de las variables cuya combinación de valores va a dar origen posteriormente a las diferentes soluciones no-inferiores. En el caso del aprovechamiento de recursos hidráulicos, estas alternativas básicas estarán dadas por la construcción de obras físicas como presas o canales, o por programas de manejo de recursos. El rango dentro del cual podrán tomar valores estas alternativas básicas, está determinado por restricciones de tipo físico, económico, ambiental, legal u otros. En vista de que esta etapa constituye en sí una primera discriminación de soluciones, se requiere que el analista posea un conocimiento profundo del sistema que se está analizando, a fin de no obviar ninguna alternativa básica.

Paralelo a esta etapa se realiza la identificación de los beneficios y costos que son pertinentes a cada objetivo de la planificación. En este proceso se establece si las transferencias de pagos representan un costo, si es que existen costos no recuperables, si se van a tomar en cuenta en el análisis las llamadas externalidades y los efectos multiplicadores provocados por las acciones a efectuarse, si se va a considerar los beneficios y costos posteriores al período de análisis y además, deberá estudiarse que rubros de costos para un objetivo representan beneficios para otro objetivo.

Igualmente se procede a la valoración del flujo de beneficios y costos para cada objetivo. La forma en que se realiza esta valoración está en función directa del objetivo bajo análisis. Si el objetivo es la maximización del ingreso nacional, se deben utilizar precios corregidos a fin de tomar en cuenta el verdadero valor de los insumos y productos en un proyecto para la economía nacional. De acuerdo a la metodología de valoración de Little y Mirrlees (1974), seguida en este trabajo, los insumos y productos del proyecto deben valorarse según los precios del mercado internacional, pues dichos precios estarán representando para el país los costos de oportunidad de los bienes insumidos y producidos. De acuerdo a Little y Mirrlees (1974), si el evaluador se encuentra en un sistema de precios caóticos en el cual un subconjunto de precios reflejan las oportunidades reales con que cuenta la economía, entonces ese subconjunto

puede ser usado por el evaluador como marco de referencia para determinar los precios del resto del sistema. Según dichos autores, los precios del mercado internacional proveen tal subconjunto.

La utilización de recursos en calidad de insumos, por un proyecto, tendrá el efecto de elevar el nivel de importaciones del país o de reducir los suministros disponibles para exportación. El costo de tales bienes a la economía nacional será el precio CIF que prevalezca en el momento en que el insumo sea requerido. De manera análoga, el valor de cualquier producto del proyecto, que sustituye previas importaciones será medido por el precio de importación CIF.

Por otro lado, los productos del proyecto que sean directamente exportados o que conduzcan a exportaciones adicionales debido a la saturación del mercado local, tendrán un valor para la economía medido por el precio de exportación FOB. En todos los casos anteriores, los precios de frontera, CIF ó FOB, deben ser ajustados en relación a los gastos de transporte interno, manejo, servicios aduanales y además, a fin de lograr valores los insumos y productos a *puerta de fábrica*, es decir, a la entrada o salida del proyecto. Es importante resaltar que la utilización de precios de frontera, asume implícitamente que la oferta de bienes importados o bienes exportados es perfectamente elástica, es decir, se supone que la implementación del proyecto no afecta los precios ni de sus insumos ni de sus productos.

Existen algunos insumos y productos que no se transan en el mercado internacional, tales como la energía o el transporte interno. El procedimiento en este caso consiste en desglosar cada uno de estos bienes no-comerciales en sus propios insumos, los que a su vez consistirán en renglones que son transados y otros que no lo son. Estos últimos se desglosan nuevamente en sus elementos componentes y así sucesivamente. Siguiendo esta cadena se llegará finalmente a elementos que son exportados o importados.

El costo de la mano de obra para la economía nacional, debe ser evaluado también de acuerdo a su costo de oportunidad. El procedimiento en este caso consiste en averiguar cuanto pierde la economía cuando una cierta cantidad de trabajo es empleada en un determinado proyecto. Si los trabajadores empleados por el proyecto permanecieran desocupados o subempleados de no existir el proyecto, entonces su costo de oportunidad sería cero o algo más de cero, respectivamente. En países en vías de desarrollo es común encontrar que existe un déficit de mano de obra calificada y un exceso de mano de obra no-calificada. Es de suponer entonces que la primera se encuentra relativamente

empleada y su precio de mercado refleja su costo de oportunidad, en cambio la segunda tiene un precio de mercado determinado por presiones y que no reflejan su costo de oportunidad. De acuerdo a Little y Mirrlees (1974), el precio corregido de la mano de obra no-calificada se determinará en ese caso de acuerdo a la expresión siguiente:

$$P_{mo} = C_m * m + C_s * (s-m) \quad (1)$$

Donde:

$m$  = representa el ingreso del trabajo en su anterior ocupación, medido a precios del mercado nacional.

$s$  = representa el nuevo ingreso del trabajador en el proyecto, medido a precios del mercado nacional.

$C_m$  y  $C_s$  = son coeficientes de corrección que permiten valorar  $m$  y  $s$  respectivamente, a precios de frontera. Cada uno de estos coeficientes es igual al cociente ponderado entre los precios de frontera y precios nacionales de los bienes y servicios que componen el o consumo de  $m$  y  $s$ .

Cuando se realice la valoración de los insumos y productos de un proyecto, es decir, de sus costos y beneficios, bajo objetivos diferentes al de lograr el máximo crecimiento económico nacional, entonces no es necesario usar precios corregidos. Por ejemplo, cuando se traten objetivos como los de redistribución de ingresos por regiones geográficas o por grupos sociales, entonces bastará usar precios de mercado para la valoración. La razón de esto estriba en que lo que representa un costo de oportunidad para el país, no lo es necesariamente para la región o grupo social. Las pérdidas o ganancias adicionales que ocurren al valorar a precios corregidos los insumos y productos de uno proyecto, se diluirán en todo el país, por lo que su efecto sobre la región o grupo social bajo análisis, puede considerarse insignificante.

Hay dos puntos más que deben tomarse en cuenta para la valoración de beneficios y costos. Estos son la inflación y la tasa de actualización. Cuando la evaluación efectuada sea de tipo financiero, entonces deberá utilizarse precios corrientes, es decir, precios que incluyen los efectos de la inflación, a fin de poder tener un cuadro correcto de la situación financiera real de un proyecto en cualquier año con respecto a los costos de insumos y productos. En cambio, si la evaluación es de tipo económico, bastará usar precios constantes, es decir, precios que no incluyen la inflación, debido a que es muy probable

que los aumentos en los precios de los insumos serán compensados con aumentos en los precios de los productos del proyecto, es decir que no se modificarán los precios relativos.

En cuanto a la tasa de actualización existen dos criterios predominantes para su selección: el criterio de la preferencia social en el tiempo y el criterio del costo de oportunidad (Squire y Van Tak, 1977). El primer criterio basa su posición en el argumento de que el consumo futuro debe ser valorado como cualquier otro bien o servicio, por el monto que los consumidores están dispuestos a pagar por él. El segundo criterio se basa en el argumento de que el sector público no debería implementar proyectos que rindan menos que las alternativas disponibles en el sector privado; este criterio parece ser el más aceptado por distintos economistas (Little y Mirrlees, 1974). De acuerdo al segundo criterio, la tasa de actualización será igual a la tasa interna de retorno del proyecto en el sector público.

La última etapa de la metodología consiste en la generación y evaluación de soluciones no-interiores. Para tal efecto, en este trabajo se apeló a las técnicas de programación matemática con objetivos múltiples. De acuerdo a la revisión efectuada sobre estas técnicas, es posible agruparlas en técnicas de generación y técnicas iterativas (Cohon, 1973; 1978). Las primeras permiten generar toda la gama posible de soluciones no-interiores, Las técnicas iterativas en cambio, permiten trabajar con un gran número de objetivos pero es necesario tener algún conocimiento sobre las preferencias del encargo de tomar decisiones, a fin de reducir el campo de búsqueda de soluciones no-inferiores. Luego de un cuidadoso estudio sobre las características de estas técnicas, se eligió para utilizarse en este trabajo a la técnica de valoración de las preferencias sobre las tasas de intercambio de valores de objetivos o *surrogate worth trade-off method* desarrollada por Haimes et al (1975).

La formulación general de esta técnica es la siguiente:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar} & Z_r(x) \\ \text{Sujeto a} & x \in F_d \\ & Z_q(x) \geq L_q \\ & Z_k(x) = L_k, \quad \forall k \neq q, r \\ & q = 1, 2, 3, \dots, p \end{array}$$

donde

- $p$  = representa el número de objetivos tratados  
 $x$  = es un vector formado por las variables del problema  
 $F_d$  = es el campo factible de variables, definido por las restricciones del problema  
 $Z_r$  = es la función objetivo  $r$ , escogida para ser maximizada

De acuerdo a esta formulación, se maximizará la función objetivo  $Z_r$ , para cada valor  $L_q$  de la función objetivo  $Z_q$  y para valores fijos de las demás funciones objetivo  $Z_k$ . De esta manera se obtendrá una curva de transformación para cada valor de objetivos  $r$  y  $q$ , en cada curva se identificará luego valores subóptimos  $X^*_q$  de acuerdo a las preferencias del encargado de tomar decisiones. Por último, la solución final se hallará de acuerdo a la siguiente formulación:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar} & Z_r \quad (x) \\ \text{Sujeto a} & X \in F_d \\ & Z_q(x) \geq Z^*_q; \quad q = 1, 2, 3, \dots, r-1, r+1, \dots, p \end{array}$$

La resolución de este problema será la solución del mejor compromiso.

## RESULTADOS

La metodología propuesta fue aplicada a una región de Venezuela, conformada por parte de los Estados Lara y Portuguesa, donde se viene efectuando un aprovechamiento de los recursos hidráulicos para el desarrollo de dicha región, con base a una planificación previamente desarrollada. Los estudios para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos realizados en la región de Barquisimeto, Estado Lara, han sido elaborados con la finalidad de resolver el problema de la escasez de agua, para abastecimiento de agua potable, y riego de las áreas agrícolas. De esta manera surge la idea del posible aprovechamiento de las aguas del río Yacambú, para ser utilizado en el valle agrícola de Quibor y en la ciudad de Barquisimeto, siendo este el punto de partida del proyecto Yacambú-Quibor, los objetivos relevantes del desarrollo considerados fueron la maximización del ingreso nacional, y la conservación del medio ambiente valorada económicamente y donde se emplazara el proyecto.

A continuación se identificaron las alternativas básicas de aprovechamiento de recursos hidráulicos en la región, las cuales se muestran esquemáticamente en la figura 2 y posteriormente se realiza una descripción de las mismas.

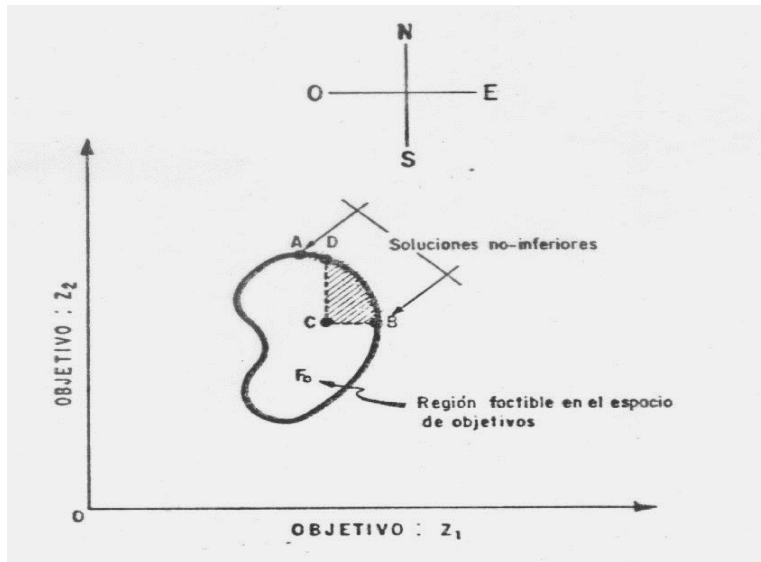


Figura 2. Ejemplo gráfico de soluciones no-inferiores.

### Identificación, formulación y prediseño de las soluciones propuestas.

Estimadas las disponibilidades de los recursos hidráulicos y sus demandas, se prediseñaron un conjunto de soluciones agrupándolas en tres categorías; rehabilitación, desarrollo y complementarias. Los dos primeros grupos de medidas se explican a continuación.

**Medidas de rehabilitación:** orientadas a maximizar el aprovechamiento de los recursos hidráulicos sin mayores inversiones. A continuación se presenta este grupo de medidas.

**Operación de embalses existentes.** La medida consiste en la identificación de varias alternativas de operación de los embalses. En estas medidas se tiene:

**Operación del embalse Dos Cerritos, situación actual (EC).** Consiste en ampliar la capacidad de la estación de bombeo del embalse Dos Cerritos, Con

tres capacidades de operación: EC<sub>1</sub>, EC<sub>2</sub> y EC<sub>3</sub>, estas alternativas de operación implican entregas desde la presa hasta la planta de potabilización “Ciudad de Barquisimeto”, incrementando la capacidad actual de bombeo en 856 Hp y 4.826 Hp para los casos de menor y mayor capacidad.

**Operación del embalse Atarigua (EA).** Con una capacidad útil de 420 Hm<sup>3</sup> se plantea la construcción de 38 km de tubería desde el pie de la presa Atarigua, hasta el área de riego del valle de Quibor y 18 km adicionales desde ésta última zona hasta la planta de potabilización “Ciudad de Barquisimeto” y una estación de bombeo en el sitio de presa, con tres medidas alternativas: EA<sub>1</sub>, EA<sub>2</sub> y EA<sub>3</sub>.

**Reuso de aguas residuales y explotación del acuífero del Turbio (RPTA y RPTN).** Se dimensiona una planta de tratamiento de aguas residuales y la conducción desde la misma, hasta la zona de riego, adicionalmente incluye nuevos pozos para la explotación de agua subterránea en el acuífero del Turbio y la conducción desde el acuífero hasta la red de distribución de Barquisimeto, con 15 km. de tuberías de 914,4 y 1.066,8 mm de diámetro y una planta de bombeo de 15.646 y 14.990 Hp de capacidad.

**Desarrollo de aguas subterráneas en el valle de El Tocuyo (ECP).** Consiste en el prediseño de los pozos para la explotación del agua subterránea, la conducción que va desde los pozos hasta la zona de riego en el valle de El Tocuyo y la ampliación de la capacidad de bombeo en la estación al pie de la presa Dos Cerritos. Se identifican cinco posibles alternativas de operación : ECP<sub>1</sub>, ECP<sub>2</sub>, ECP<sub>3</sub>, ECP<sub>4</sub> y ECP<sub>5</sub>, la capacidad de bombeo se lleva de 11.800Hp hasta 13.509 y 25.913 Hp para los casos de menor y mayor capacidad respectivamente, incluye también la construcción de 17 pozos y 2 km de tubería de 685mm de diámetro.

**Mayor aprovechamiento de los acuíferos de El Manzano y Cabudare (XPM y XPC).** Se incrementa la capacidad de explotación de los acuíferos actualmente aprovechados y nuevos pozos en los acuíferos sin explotación. Para el acuífero de El Manzano se plantea la construcción de 19 pozos y 6,5 km de tuberías de diferentes tamaños de diámetro para conducir el caudal explotado.

**Mejorar la eficiencia en el sistema actual de conducción y distribución de agua (RAC y RB).** Consiste en la eliminación de tomas clandestinas en el sistema de aducción Alto Tocuyo (RAC), llevando las pérdidas de conducción

a un 10,39% de la producción de Dos Cerritos. Con la alternativa RB, se estima reducir la pérdida en la red a 35%, mediante la formulación de un conjunto de planes dirigidos a la investigación y verificación de la información básica, medición y cuantificación de las pérdidas, detección y reparación de fugas y otras averías.

**Medidas de desarrollo:** implican inversiones mayores, construcción de embalses, plantas de potabilización y tratamiento, aducciones y sistemas de riego. Están dirigidas a incrementar la oferta del recurso hidráulico en al área del proyecto Yacambú Quibor, usando fuentes locales o mediante el trasvase desde otras regiones. A continuación se presentan las mismas.

**Embalse Limoncito (EL).** Construcción de una presa de tierra zonificada de 62,50 m. de altura con una capacidad de almacenamiento de 37,5 Hm<sup>3</sup>, sobre el río Turbio y la construcción de una tubería que lleve el agua desde la zona del embalse hasta la planta de potabilización de El Manzano. El propósito es el abastecimiento del acueducto metropolitano de Barquisimeto. El embalse tiene un rendimiento de 2,68 m<sup>3</sup>/s al 95% de confiabilidad. La tubería de conducción es de 14,5 km de longitud y 1.219 mm de diámetro para la conducción de 1.840 l/s.

**Embalse Nuare-Charay (EN).** Consiste en una presa de 26 m de altura, con una capacidad de 46 Hm<sup>3</sup>. El embalse tiene un rendimiento de 1,1 m<sup>3</sup>/s para un 95% de confiabilidad. La tubería es de 762 mm de diámetro y 486 km de longitud. El propósito es abastecimiento del acueducto metropolitano de Barquisimeto.

**Ampliación de la presa del embalse Dos Cerritos (XEC1 y XEC2).** Incluye el incremento en las alturas de presa en 8,4 m. (XEC1) y 11,56 m.(XEC2) para un almacenamiento útil de 271 y 288 Hm<sup>3</sup> respectivamente, el aliviadero y la capacidad de conducción de la tubería que va desde la presa hasta la planta de potabilización “Ciudad de Barquisimeto”. La estación de bombeo se amplía para la conducción de los caudales. Para cada una de las alternativas se obtienen cinco posibles formas de operación : XEC1<sub>1</sub>, XEC1<sub>2</sub>, XEC1<sub>3</sub>, XEC1<sub>4</sub>, XEC1<sub>5</sub>, XEC2<sub>1</sub>, XEC2<sub>2</sub>, XEC2<sub>3</sub>, XEC2<sub>4</sub> y XEC2<sub>5</sub>. Con estas capacidades se obtienen rendimientos adicionales en el embalse de 570 y 990 l/s respectivamente, todas las alternativas de operación presentan caudales totales entregados para satisfacer a los usuarios urbano Barquisimeto y riego valle de Quibor, mayores a la capacidad actual del sistema de conducción, la



capacidad de bombeo se eleva a 12.000 Hp y 22.500 Hp para el menor y mayor de los casos respectivamente.

**Ampliación de la presa y desarrollo de agua subterránea en El Tocuyo (XECP1 y XECP2).** Implica el mismo prediseño de las alternativas anteriores, pero se incorpora la explotación del acuífero de El Tocuyo, mediante pozos, y la ampliación de la estación de bombeo para cada alternativa de operación del embalse, la ampliación de la tubería de conducción hasta la planta de potabilización “Ciudad de Barquisimeto”, se obtienen las medidas identificadas como: XECP1<sub>1</sub>, XECP1<sub>2</sub>, XECP1<sub>3</sub>, XECP1<sub>4</sub>, XECP1<sub>5</sub>, XECP2<sub>1</sub>, XECP2<sub>2</sub>, XECP2<sub>3</sub>, XECP2<sub>3</sub>, XECP2<sub>4</sub>, XECP2<sub>5</sub>. Para algunas alternativas de operación del embalse es necesario construir otra tubería paralela a la actual de 27,8 km de longitud, además del incremento de la capacidad de bombeo desde los 18.100 Hp hasta los 32.500Hp, en cuanto a tubería se requiere para el menor de los casos un diámetro de 762 mm y para el mayor 914,4 mm.

**Embalse Yacambú (EY).** El embalse sobre el río Yacambú, en el sitio Cañón de Angostura, formado por una presa de 162 m de altura y un túnel de transvase de 24,5 km de longitud, de 4,5 m. de diámetro y una capacidad de transporte de 26 m<sup>3</sup>/s, es la obra fundamental en la que se basa el proyecto Yacambú Quibor. El propósito del embalse es el suministro de agua para riego en el valle de Quibor y abastecimiento al acueducto metropolitano de Barquisimeto. Se cuenta con un volumen útil de 379 Hm<sup>3</sup> y el aporte de 12,27 m<sup>3</sup>/s del caudal medio del río Yacambú, según registros históricos ,se obtiene una disponibilidad de 10,46 m<sup>3</sup>/s, a transvasar por el túnel, hasta el área del proyecto. Se desarrollan seis alternativas de operación del embalse, para las posibles combinaciones de uso del agua entre el usuario riego valle de Quíbor y urbano Barquisimeto. Con suministros que varían desde los 0,00 m<sup>3</sup>/s para consumo humano hasta los 10,38 m<sup>3</sup>/s y un aporte para el riego de 0,00 a 24.300 hectáreas en el valle de Quibor.

**Embalse Dos Bocas (EB).** Comprende la construcción de una presa de tierra zonificada de 136,5 m de altura, ubicada en el sitio denominado Dos Bocas y la construcción de un sistema de conducción hasta el embalse Yacambú. Se obtienen seis alternativas de operación simbolizadas como EB<sub>1</sub>, EB<sub>2</sub>, EB<sub>3</sub>, EB<sub>4</sub>, EB<sub>5</sub> y EB<sub>6</sub> con tres tuberías que van desde los 1.219,2 hasta los 1.524 mm de diámetros y longitudes de 22 km hasta el túnel de trasvase y 27, 8 km adicionales hasta la planta de potabilización de El Tostao.

**Sistema de riego valle de Quibor (SQ).** Consiste en el prediseño de canales y tuberías de tipo primario y secundario y la determinación del número de canales terciarios en cada una de las zonas de riego. Las dimensiones finales de cada tubería depende de la alternativa que se adopte para la secuencia de desarrollo de las distintas zonas de riego en el valle de Quibor, para un total de área a regar de 24.500 hectáreas.

**Ampliación de la planta de potabilización “Ciudad de Barquisimeto” (XTQ).** La planta de potabilización puede recibir, proveniente del embalse Atarigua y Dos Cerritos, caudales máximos de 0,48 m<sup>3</sup>/s y 5,03 m<sup>3</sup>/s respectivamente si se consideran esas alternativas de operación de embalse, lo que implica elevar la capacidad de la planta de 4,5 m<sup>3</sup>/s hasta 5,50 m<sup>3</sup>/s como máximo.

**Aducción planta ciudad de Barquisimeto El Tostao (BQ).** Actualmente la tubería tiene capacidad para transportar por gravedad 3,78 m<sup>3</sup>/s y una capacidad potencial de 6 m<sup>3</sup>/s. Para caudales mayores hay que incrementar la capacidad de conducción mediante la colocación de estaciones de bombeo entre 1.651,17 Hp y 4.823,79 Hp.

**Ampliación de la planta de tratamiento en El Manzano (KXTM).** La planta de tratamiento en El Manzano va a recibir los caudales adicionales provenientes de los embalses Limoncito y Nuare-Charay que en conjunto suman 2,77 m<sup>3</sup>/s. Se propone una ampliación de la planta de 2 m<sup>3</sup>/s

**Aducción planta El Manzano- Barquisimeto (AMB).** Actualmente la tubería tiene una capacidad de conducción de 1,60 m<sup>3</sup>/s, para la conducción de caudales mayores se propone la construcción de nuevas tuberías paralelas a la actual, se tienen dos alternativas AMB1 de 42 mm de diámetro y un transporte máximo de 3,20 m<sup>3</sup>/s y AMB2 de 48 mm de diámetro y 6,37 mm de diámetro.

**Aducciones para el abastecimiento a poblados menores (PM1 y PM2).** Para el conjunto de poblados menores en la alternativa PM1 son abastecidos desde la planta de potabilización “Ciudad de Barquisimeto”. EL centro poblado PM2 se abastecerá desde la red de distribución de Barquisimeto, Se propone aprovechar la tubería de conducción actual derivando de ella los ramales necesarios para las poblaciones ubicadas en las cercanías. Se necesita una estación de bombeo con una capacidad instalada de 223,24 Hp.

**Formulación matemática del modelo.** La utilización de la técnica denominada *valoración de las preferencias sobre las tasas de intercambio entre objetivos*. (Haimes et al, 1975). Para la utilización de esta técnica se preparó un modelo matemático de programación lineal entera-mixta que fue resuelto mediante el algoritmo *Branch an Bound*.

El modelo de optimización preparado en este caso, establece un conjunto de relaciones expresadas en ecuaciones, que describen y representan el sistema real y esta caracterizado por establecer dos funciones objetivos y una serie de restricciones, que permiten la búsqueda de los valores de las variables que optimicen las funciones objetivos definidas. Se utiliza la programación lineal entera mixta, con base a los tres sistemas diferentes de medidas de aprovechamiento de los recursos hidráulicos de acuerdo, a los escenarios o políticas sectoriales supuestas para el futuro y a los objetivos económicos y ambientales. En su formulación se han empleado variables enteras para representar las inversiones factibles de ser construidas y para la operación de algunas de las alternativas se han empleado variables reales.

Los sistemas considerados son: fuentes locales, optimiza el uso del agua con fuentes propias al área de estudio y comprende las superficiales y subterráneas actualmente en uso y aquellas con posibilidades de aprovechamiento; fuentes locales más Yacambú, considera el sistema de fuentes locales y la alternativa de importación de agua proveniente río Yacambú; fuentes locales, Yacambú más Dos Bocas, incorpora además de las alternativas anteriores, el aprovechamiento de la obra del embalse Dos Bocas.

Funciones Objetivo: con dos funciones; el aumento del ingreso nacional producido por la región, objetivo económico, representada a través de la ecuación (2):

$$Z_e = B_e - CI_e - CO_e - Cm_e \quad (2)$$

Donde:

$B_e$ : son los beneficios obtenidos en los períodos, actualizados al inicio de cada periodo.

$CI_e$ : son los costos de inversión que se producirían, actualizados al inicio de cada período.

$CO_e$ : son los costos de operación que se originan, actualizados al inicio de cada período.

$CM_e$ : son los costos de mantenimiento que se originan, actualizados al inicio de cada período.

El segundo objetivo referido a la preservación del ambiente, se han valorando económicamente los efectos y medidas ambientales, lo cual constituye el objetivo ambiental y representado a través de la ecuación (3):

$$Z_a = B_a - C_a \quad (3)$$

Donde:

$B_a$ : son los beneficios ambientales producidos durante los períodos, actualizados al inicio de cada período.

$C_a$ : representa los costos ambientales producidos durante todos los períodos, actualizados al inicio de cada período del horizonte de planificación.

Restricciones: Se desarrollan todo un conjunto de restricciones, agrupándolas de acuerdo a las alternativas o medidas involucradas (21 grupos de alternativas).

Cada uno de los objetivos planteados en la primera etapa, fueron representados mediante expresiones matemáticas denominadas funciones objetivo. Las alternativas básicas establecidas en la segunda etapa conforman las variables de estas funciones objetivos y los coeficientes de estas variables son los beneficios y costos establecidos para cada objetivo. La valoración de estos coeficientes de tipo físico, técnico, legal u otros, conforman la región factible  $F_d$  para el espacio de las variables.

De acuerdo a la técnica utilizada, para cada par de funciones objetivos se generó una curva de transformación. A continuación se identificó una solución no-inferior preferida para cada curva de transformación, se supone, que las preferencias del ente encargado de las decisiones estaban dadas por la función de indiferencia siguiente:

$$U = Z_e * Z_a \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

$U$  = representa el nivel de satisfacción que logra el encargado de las decisiones por cada combinación de valores de las dos funciones objetivos utilizados en la generación de la curva de transformación.

$Z_e$  y  $Z_a$  = son las dos funciones objetivos utilizadas en la generación de cada curva de transformación.

En la figura 3, se muestra el procedimiento descrito, para el caso de la curva de transformación entre la función objetivo  $Z_e$  de maximización del ingreso nacional y la función objetivo  $Z_a$  de conservación del ambiente en el proyecto Yacambu -Quibor.

Para generar la curva de transformación de la figura 3, se realizó la siguiente operación:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar} & Z_e \\ \text{Sujeto a} & Z_a \geq L_2 \\ & (x) \in Fd \\ & Z_p \geq 0 \end{array}$$

Donde  $L_2$  es el nivel impuesto a la función objetivo  $Z_a$  en cada optimización y  $Z_p$  representa a las demás funciones objetivos existentes. Primero se optimizaron separadamente las funciones objetivo  $Z_e$  y  $Z_a$  obteniéndose las soluciones no-inferiores A y D respectivamente. Luego se optimizó  $Z_e$  para dos valores intermedios de  $L_2$ , obteniéndose las soluciones inferiores B y C.

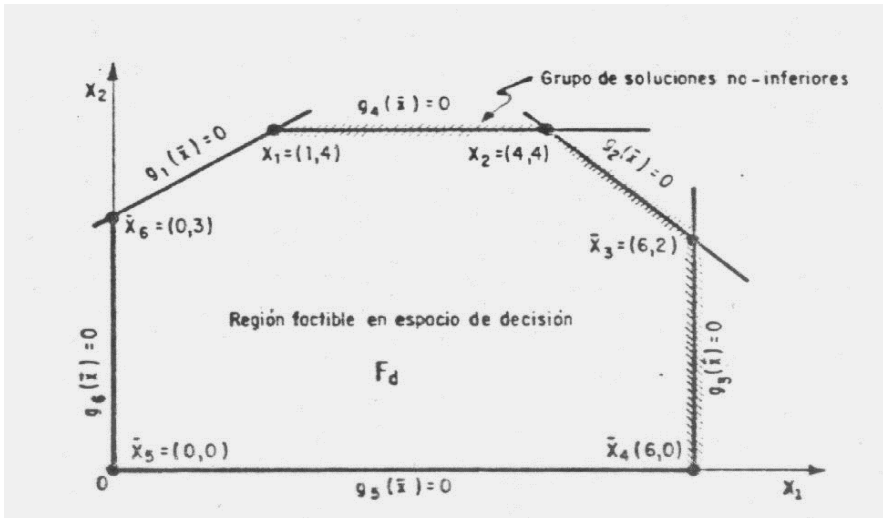


Figura 3. Región factible y soluciones no-inferiores en el espacio de decisión  $F_d$

A continuación se buscó la solución preferida para esta curva de transformación entre  $Z_e$  y  $Z_a$ . Esta solución es el punto M que representa la tangencia entre la curva de transformación generada y la curva de indiferencia más alta que puede alcanzarse. El punto M permitió determinar entonces el valor  $Z^*_a$ , que en este caso fue igual a  $887 * 10^6$  bolívares.

De igual manera se generaron sendas curvas de transformación entre  $Z_e$  y cada una de las demás funciones objetivo existentes, identificándose en cada caso una solución preferida y un correspondiente valor  $Z^*_p$ .

Por último se realizó la optimización final siguiente:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Maximizar} & Z_e \\
 \text{Sujeto} & Z_a \geq Z^*_2 \\
 & Z_p \geq Z^*_p \\
 & (x) \in F_d
 \end{array}$$

La solución hallada en este caso correspondió a la solución del mejor compromiso. De acuerdo a Haimes et al (1975) el procedimiento para hallar una solución final debe repetirse tantas veces como funciones objetivo existan, donde en cada vez un objetivo diferente es escogido para ser maximizado. Este chequeo sirve para verificar la consistencia de las preferencias del encargado de

tomar las decisiones, pues las soluciones finales halladas en cada caso deben ser iguales o similares. En este trabajo no fue necesario dicho análisis de consistencia en vista de que las preferencias ya estaban firmemente articuladas por la función de indiferencia expresada en (4).

El modelo matemático se resolvió utilizando los algoritmos matemáticos desarrollados por Land y Powell (1973), para los tres modelos formulados.

*Modelo I, sistema con fuentes locales:* el modelo matemático para este sistema y de acuerdo a los cinco períodos en que se dividió el horizonte de planificación - de cinco años cada uno - originó 651 variables y 552 restricciones, del total de variables 276 son enteras y las restantes son reales. Las alternativas de rehabilitación son seleccionadas en el primer y segundo período, para incorporar en el tercer período los embalses Limoncito y Nuare Charay junto con la ampliación de las plantas de tratamiento en el cuarto y último período se incorpora la expansión del embalse Dos Cerritos y el embalse Atarigua, el escenario donde se obtuvo mayor rentabilidad económica fue el número dos, con un área total de riego de 3.095 hectáreas y un valor estimado en 653,01 millones de dólares, en este caso no se obtienen beneficios de tipo ambiental, de tal manera que el óptimo, al estimarlo con las curvas de indiferencia es cero.

*Modelo II, sistemas con fuentes locales más Yacambú:* en este sistema se obtiene un modelo compuesto por un total de 752 variables y 603 restricciones, del total de variables 304 son enteras y el resto son reales, el mejor escenario que se obtiene económicamente y ambientalmente es el número dos con un valor total de 1.124,80 millones de dólares y 12.428,57 dólares respectivamente, las alternativas a incorporar son las de rehabilitación en el primer período, para el segundo se incorpora la construcción del embalse Yacambú, Limoncito y el Túnel de Transvase, para el cuatro el embalse Nuare Charay y para el cinco el embalse Atarigua, con lo que se incorporan al riego 14.477 hectáreas, el óptimo resultante de la curva de transformación hallada indica que el objetivo económico posee un valor de 455,61 millones de dólares sin incluir el beneficio por la venta del agua para el objetivo económico y 12.428,57 dólares para el beneficio ambiental.

*Modelo III, sistema con fuentes locales más Yacambú y Dos Bocas:* el sistema en este caso queda definido para un total de 816 variables y 652 restricciones, del total de variables 328 son enteras y el resto son reales. El escenario dos se corresponde con el mas conveniente a ser desarrollado con un valor total de 1.055,05 millones de dólares para el valor económico y 5.428,57 dólares como

valor ambiental, el óptimo hallado con la curva de transformación es de 385,85 millones de dólares para el valor económico y de 5.428,57 dólares para el valor ambiental. Las alternativas seleccionadas son las de rehabilitación en el primer período, en el segundo período se selecciona el embalse Yacambú, Limoncito y Dos Bocas, el Túnel de Transvase con lo que se logran incorporar un total de 22.608 hectáreas, para el período cuatro se incorpora el embalse Nuare Charay y en el cinco la expansión 1 del embalse Dos Cerritos.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las soluciones no-inferiores que conforman cada curva de transferencia generada, representan una diferente combinación de tamaños y fechas de ejecución de las alternativas básicas planteadas en la segunda etapa de la metodología. Cada solución no-inferior implica una utilización del modelo matemático de optimización planteado.

Las soluciones no-inferiores halladas permiten conocer cuanto debe sacrificarse de un objetivo para ganar algo en otro. Por lo tanto, mediante el modelo se ha seleccionado la alternativa de abastecimiento menos costosa. Entonces, los valores hallados de  $Z_1$  están midiendo las ventajas comparativas de las diferentes alternativas, antes que los valores absolutos de sus beneficios.

Finalmente, puede concluirse que la metodología propuesta presenta las siguientes ventajas:

- Es posible aplicarla en problemas donde se efectúe una evaluación bajo diversos objetivos en forma simultánea.
- Es posible incorporar los conceptos de la llama de evaluación económica social de proyectos, por el análisis de los objetivos relacionados con el crecimiento económico nacional.
- Por último, permite conocer la contribución de cada solución a cada objetivo del análisis y además muestra explícitamente las tasas de intercambio entre cada par de objetivos.



## REFERENCIAS

1. Cohon, J. y D. Marks. 1973. Multiobjetive screening models and water resource investment. *Water Resources Research*. Vol. 9-4. 826-836 p.
2. Cohon, J. 1978. *Mutiobjetive programming and planning*. Academic Press, New York. 415 p.
3. Dasgupta, P. A. Sen y S. Marglin. 1972. *Pautas para la evaluación de proyectos*. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, New York. 415 p.
4. Haimes, Y., H. Freedman y W. Hall. 1975. *Multiobjetive optimization in water resources systems*. Elsevier company, New York. 200 p.
5. Little, I. Y J. Mirrlees. 1974. *Project appraisal and planning for developing countries*. Heineman Educational Books. London.
6. Major, D. 1977. *Multiple water resources planning*. American Geophysical Union Water Resources Monograph N° 4. Washington, D.C. 81 p.
7. Rivas, F. 1996. *Análisis multiobjetivo económico-ambiental en el proyecto Yacambú Quíbor (Tesis mimeografiada)* CIDIAT. Mérida Venezuela. 437p
8. Squire, L. y H. Van Der Tak. 1977. *Análisis económico de proyectos*. Editorial Tecnos, Madrid. 169 p.