

OPTIMIZACION DE LA OFERTA ENERGETICA

Ricardo Smith
Oscar Mesa
Posgrado en Aprovechamiento
de Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín

1. PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA DE EXPANSION

Para el desarrollo de los recursos es común disponer de medidas no-estructurales tales como leyes, reglamentaciones para la conservación de los recursos naturales renovables, campañas educativas o políticas de precios, y de varias medidas estructurales tales como construcción de embalses, oleoductos, gasoductos, líneas de transmisión o plantas térmicas de generación de energía. Estas medidas suelen tener varias alternativas en cuanto a sus alcances, capacidades y en lo que concierne a los tiempos y los sitios en los que pueden ser implementadas. Fundamentalmente el propósito es el desarrollo económico, la eficiencia en los consumos, la satisfacción de diferentes tipos de demanda, el mejoramiento de las condiciones de vida de ciertos grupos sociales, la conservación del medio ambiente, etc.

Se puede decir que la selección de la secuencia óptima de expansión de la oferta energética para satisfacer una demanda creciente está sujeta a una gran variedad de restricciones físicas como de ingeniería. A continuación se hablará de algunas de ellas.

- Restricciones estructurales: reflejan la configuración física del sistema.
- Restricciones de recursos: límites de disponibilidad para la asignación que la sociedad puede o decide dedicar a estos fines.
- Restricciones de demanda: nivel mínimo aceptable de satisfacción de una demanda específica.
- Restricciones operativas: condiciones derivadas de la física o de compromisos adquiridos para otros fines.
- Otras restricciones: debido a la gran importancia que tienen las soluciones no-estructurales dentro del análisis de expansión, se podría considerar otro tipo de restricciones que reflejen los objetivos institucionales, regionales o nacionales.

Hasta el momento se ha considerado un sistema con carácter general; sin embargo, en el problema de expansión se pueden presentar varias complejidades, las cuales podrían ser:

- Secuenciamiento y selección: en el primer caso todos los proyectos tienen que construirse y en el segundo caso sólo algunos: es decir, hay un proceso previo de selección y luego se efectúa el secuenciamiento de los proyectos seleccionados.
- Definición de capacidad: en este caso, la capacidad del proyecto es otra decisión que se debe tomar, adicionalmente al secuenciamiento e itinerario; y en general, el secuenciamiento de los proyectos no es independiente de las decisiones de capacidad.

- Interdependencia: pueden existir muchos tipos de interdependencias en un problema de expansión (financieras, políticas, físicas/hidrológicas y operacionales). La más crítica de estas es tal vez la interdependencia operacional que ocurre cuando la operación conjunta de los proyectos representa una mayor disponibilidad que si se opera cada proyecto individualmente.
- Multidimensionalidad: existen varios tipos de demanda o se derivan varias formas de beneficio de un mismo proyecto (abastecimiento de agua potable y generación hidroeléctrica por ejemplo).
- Múltiples objetivos: los sistemas reales están caracterizados por múltiples objetivos, los cuales pueden estar en conflicto y/o competición, o ser complementarios.
- Incertidumbre: una característica predominante del proceso de planeamiento es la incertidumbre, la cual se genera del conocimiento imperfecto del planificador sobre futuros niveles de población, mezcla de la actividad económica, costos, disponibilidad de agua, comportamiento del sistema físico que se está estudiando, decisiones políticas relacionadas con la valoración del agua, subsidio, objetivos de desarrollo social y económico, etc. (Moody 1976)

2. ALGORITMOS DE OPTIMIZACION

Diferentes algoritmos de optimización se han propuesto para resolver el problema de expansión planteado en la sección anterior. El uso de cada uno de estos algoritmos tiene sus ventajas y desventajas, y cada uno de ellos tiene una manera distinta de considerar las restricciones y posibles complejidades que tenga el problema. A continuación se discute brevemente el uso de algunos algoritmos de optimización típicamente utilizados para resolver el problema de expansión, como son programación dinámica, programación entera mixta y algunos métodos heurísticos.

2.1. Programación Dinámica

El algoritmo de programación dinámica tradicional se basa en la optimalidad de los subitinerarios. Esta propiedad consiste en que si el itinerario óptimo S_N está compuesto de subsecuencias $S_m \in S_N$, $m \leq N$, éstas deben ser secuencias óptimas de proyectos que suplen una capacidad determinada. El algoritmo busca sobre todo el grupo de subsecuencias que sean óptimas para el nivel de capacidad alcanzado, realizando una búsqueda que considera todas las subsecuencias óptimas que contengan la expansión con un proyecto, luego con dos, y así sucesivamente. Morin y Esogbue (1973), demostraron que la programación dinámica no garantiza la solución óptima del problema de expansión en cualquier circunstancia y proponen el uso de la programación dinámica del estado embebido, que se describe en la próxima sección de este trabajo.

Otra alternativa posible es modificar el algoritmo de programación dinámica tradicional con el fin de eliminar situaciones en las cuales el algoritmo puede fallar (Haines, 1977). Esto se puede lograr colocando una limitación a las funciones de demanda discretas de la siguiente forma: el aumento máximo anual en la demanda debe ser menor que la capacidad de cualquier proyecto de los que se están considerando.

La programación dinámica del estado embebido considera un estado adicional en el proceso de solución. Este estado está representado por el grupo de proyectos que definen la capacidad acumulada, siendo éste un estado sobre el cual no se puede operar, y debido a esto el nombre de programación dinámica del estado embebido (Morin y Esogbue, 1971). Si se tienen varias permutaciones de itinerario con igual capacidad acumulada, esta variable de estado hace que estas secuencias sean consideradas como estados diferentes, garantizando así el óptimo.

La programación dinámica del estado embebido utiliza una ecuación general de recurrencia similar a la planteada en el caso general, sin embargo, varía en el sentido en que el procedimiento considera que para un nivel

de demanda dado, la secuencia óptima correspondiente puede ser tal que no incluya secuencias óptimas de niveles de demandas anteriores. De lo anterior se puede concluir que este algoritmo no se basa en la optimalidad de los subitinerarios, como sucede con la programación dinámica tradicional.

Fontane et al (1984) propusieron el uso de la programación dinámica del espacio objetivo para solucionar el problema de expansión. Este algoritmo es realmente una programación dinámica dual que disminuye considerablemente la dimensionalidad del problema.

Utilizando la programación dinámica en el espacio objetivo, el problema es propuesto en la dirección del objetivo. La variable de estado en este caso es el costo objetivo acumulado total de todas las etapas desde la primera hasta la considerada en ese momento. Las etapas representan los años del horizonte de planeamiento. En cada etapa se especifican varios niveles discretos de costo total y se determina una política de implementación única que satisfaga (de la forma más cercana posible) el costo objetivo especificado. La unicidad de la política escogida es un requerimiento clave para asegurar que la solución óptima global sea obtenida. La formulación del problema utilizando programación dinámica en el espacio objetivo puede reducir un problema de P.D. convencional de gran tamaño a uno simple unidimensional.

Inicialmente se debe suponer que se tiene un rango de niveles de fondos potenciales para los próximos años fiscales. Estos niveles pueden ir desde cero hasta un nivel de fondos sustancialmente alto.

Dado el estado del sistema en el tiempo presente, se pueden determinar los mejores proyectos que deben ser implementados para lograr cada uno de los niveles de fondos potenciales. El proceso continúa hacia el futuro, año a año. En el último año del horizonte de planeamiento, se conoce el costo total y los logros asociados. La selección debe considerar cuáles proyectos fueron ya construidos, cuáles logros pueden ser alcanzados y otros factores similares.

2.2. Métodos Heurísticos

Los métodos heurísticos se pueden definir como los que pueden resolver eficientemente los problemas de decisión obteniendo una solución aceptable, entendiéndose por aceptable la determinación de una solución razonablemente cercana a la solución óptima. Se presentan a continuación algunos métodos heurísticos para resolver el problema de expansión.

Una regla de decisión heurística obvia sería ordenar los proyectos en una secuencia no decreciente de la relación de capacidad (Q_i) a costos (C_i). A continuación se considerarán varias reglas presentadas por V. Akileswaran y otros (1979).

- REGLA α_{ij} : en este caso, se escoge alguna demanda $j \in (1, 2, \dots, M)$ y se forma un itinerario de desarrollos basado en el orden no decreciente de las relaciones:

$$\alpha_i = C_i / Q_{ij} \quad \text{si } Q_{ij} > 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$\alpha_{ij} = L \text{ de otra forma}$$

donde L es un número suficientemente grande.

- Regla α_i : una variante de la regla anterior sería llevar a cabo un desarrollo basado en el orden no decreciente de

$$\alpha_i = \min(\alpha_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Estas dos reglas, están basadas en los costos promedios por unidad de capacidad, y algunas veces llamada propiedad de dominancia de itinerario.

Tson y otros (1973) propusieron una regla heurística más elaborada y que se presenta como muy competitiva con los algoritmos de optimización. Si una secuencia parcial S de proyectos, con una capacidad total que ha sido decidida, y existen dos proyectos i, j, candidatos para las próximas dos posiciones, donde C_i, Q_i, C_j, Q_j son los costos y las capacidades de los proyectos i y j respectivamente.

te, $t(q)$ es la función de demanda inversa o sea el tiempo cuando la demanda es q y r la tasa de descuento. El proyecto i no puede preceder al proyecto j si se cumple:

$$R_i(q) < R_j(q)$$

en donde para cualquier proyecto n , $R_n(q)$ se define como:

$$R_n(q) = C_n / \{1 - (1 + r)^{t(q) - t(q + Q_n)}\}$$

Se puede demostrar que $R_n(q)$ se puede interpretar como el costo mínimo descontado de satisfacer todas las demandas futuras con un número infinito de proyectos. Una propiedad útil de esta condición, es que el índice $R_n(q)$, depende solamente de la capacidad total de los proyectos considerados en la secuencia, del costo y capacidad de los proyectos bajo consideración, y no de otros proyectos candidatos.

Kim y Yeh (1986) propusieron el uso de un procedimiento heurístico basado en programación dinámica que garantiza la solución óptima al problema de expansión.

El proceso de solución heurístico comienza con una secuencia base, la cual es determinada en cada etapa del proceso de expansión. En la primera etapa se tiene una secuencia base nula. En esa etapa se considera cada vez uno de los proyectos candidatos como proyecto pivote o fijo y se usa la programación dinámica tradicional para resolver el problema de expansión. Luego se comparan los resultados de los diferentes pivotes, con el fin de determinar la de mínimo costo. Esta servirá como secuencia base para la próxima etapa. (Kim y Yeh, 1982).

Utilizando la secuencia base generada como una semilla, una nueva secuencia base es encontrada usando nuevamente la programación dinámica, pero considerando como fijo el proyecto pivote. Así, en cada etapa, la secuencia de menor costo es escogida como una secuencia base para la próxima etapa. El proceso de reemplazar un puesto pivote dentro de la secuencia base con el proyecto pivote

manteniendo la selección de proyectos previos intacto, es llamado un paso de generación de secuencia. En este proceso, una subfila de la secuencia base, compuesta de las selecciones realizadas en iteraciones previas es mantenida permitiendo a la programación dinámica determinar el resto de los proyectos de la secuencia. El paso de generación de secuencia termina cuando no hay más proyectos que considerar.

2.3. Programación Lineal Entera Mixta

El problema de expansión de sistemas de oferta energética puede ser planteado y resuelto dentro de una estructura de programación lineal entera mixta. En este caso la función objetivo buscará la maximización de los beneficios netos actualizados representados de manera lineal, considerando un conjunto de restricciones lineales. El uso de variables enteras permite superar el problema de no linealidad de la función objetivo y de cualquier otro aspecto, además de plantear de una manera muy adecuada dentro de programación lineal el aspecto de selección e itinerario de proyectos. Una ventaja en el uso de programación lineal entera mixta es que todas las restricciones y complejidades se pueden representar de manera explícita dentro del problema, y no como en programación dinámica en donde se manejan de manera implícita.

La aplicación directa de la PL entera mixta no permite considerar el caso de interdependencia de proyectos que es de gran importancia en el planeamiento de sistemas complejos. Sin embargo, cuando se usan soluciones a este problema que incluyen cortes de Benders se puede incluir la consideración de interdependencia operativa.

3. ANALISIS MULTIOBJETIVO

El planteamiento del problema de expansión con los algoritmos anteriores se realiza dentro de la estructura de optimización de un solo objetivo. Cuando existen varios objetivos estos se pueden plantear en términos económicos y aún resolver el problema de expan-

sión como un problema de optimización de un solo objetivo y usar los procedimientos anteriores. Sin embargo, pueden ocurrir situaciones en donde la transformación económica de los objetivos que se quieren considerar sea imperfecta o imposible. En este caso se debe recurrir a la solución del problema de expansión en un ambiente de consideración de múltiples objetivos.

El caso típico del problema de expansión con múltiples objetivos debe considerar explícitamente objetivos económicos, ambientales y sociales, los cuales deben ser definidos (su proceso de evaluación) de acuerdo con los intereses en cada problema particular. Dentro de la estructura de solución de análisis multiobjetivo debe articularse la estructura de preferencias del decisor para llegar a una escogencia final. En este caso el problema de múltiples objetivos puede ser planteado de varias maneras:

- Como un problema en donde se tienen planes de expansión alternativos cada uno de ellos evaluado con respecto a los diferentes objetivos (se tendría una matriz de alternativas-objetivos) y se trata de escoger el "mejor" plan de expansión a la luz de los diferentes objetivos y usando la estructura de preferencias del decisor.
- Representando cada objetivo por medio de funciones de utilidad, usando como función objetivo del problema de expansión "óptimo" aquel que maximiza la función de utilidad multiatributo actualizada. El problema conserva su dinámica temporal pero en lugar de trabajar con costos se trabaja con utilidades agregadas.
- Cada objetivo es actualizado individualmente después de lograr una representación adecuada del mismo (en términos económicos, utilidades u otro). Los objetivos actualizados son entonces agregados por medio de una función de utilidades multiatributo y la "mejor" alternativa será el plan de máxima utilidad agregada. Esta forma permitiría considerar tasas de actualización diferentes para cada objetivo.

Existen muchos métodos de análisis multiobjetivo que podrían utilizarse para resolver el problema de expansión de múltiples objetivos (Smith et al, 1993). En el primer caso casi que cualquier metodología es adecuada y en los dos últimos casos el planteamiento del problema está orientado al uso de funciones de utilidad multiatributo.

Otro uso práctico de los métodos de análisis multiobjetivo está orientado a la agregación de criterios que permiten evaluar un objetivo específico.

Por ejemplo, el objetivo social puede estar representado por un grupo de criterios que son evaluados individualmente. Los métodos de análisis multiobjetivo permitirían agregar esos criterios para evaluar el valor del objetivo.

4. CASO I: EXPANSION DEL SECTOR ELECTRICO COLOMBIANO

Los algoritmos de optimización discutidos anteriormente (sección 2) se utilizaron con el objetivo de definir la expansión futura del sistema de generación del Sector Eléctrico Colombiano. En la Tabla 1 del apéndice se presenta la información de los proyectos considerados y en la Tabla 2 del mismo apéndice las proyecciones de demanda de energía y potencia para el período 1998-2009, considerando una tasa de crecimiento del 4.7%. La tasa de descuento utilizada o, la misma de los estudios del Sector Eléctrico, la cual es 12%.

Los métodos usados en este trabajo para definir la expansión del Sector Eléctrico Colombiano son:

- (1) Programación Dinámica (PD) tradicional
- (2) PD del Estado Embebido (proyectos son etapas)
- (3) PD del Estado Embebido (las etapas son los períodos de tiempo)
- (4) Método Heurístico TMR

(5) PD Heurística

(6) Programación Lineal Entera Mixta

En la tabla 3 del apéndice se puede observar los resultados y los costos correspondientes obtenidos con los diferentes modelos. Se puede observar que los resultados obtenidos con los modelos 1, 2 y 5 son iguales, ya que los tres utilizan el mismo modelo de simulación y consideran que las etapas son los proyectos y no el tiempo. Adicionalmente presentan el menor costo de todos los métodos.

En un sistema como el colombiano, donde la demanda es siempre creciente y el aumento de la demanda en cada período de análisis es menor que la capacidad de los proyectos, se puede decir que la programación dinámica tradicional encuentra la solución óptima.

En el caso considerado, no se encontró ninguna ventaja del modelo 5 sobre los modelos 1 y 2, teniendo además el problema de un alto consumo de tiempo de cómputo. Sin embargo, es necesario resaltar que el modelo 5 a diferencia del modelo 1 se garantiza la solución óptima, la cual lo hace más confiable a pesar del mayor tiempo de cálculo. Si se compara con el modelo 2, se observa que este último es mucho más efectivo computacionalmente, a pesar de estar trabajando con una variable de estado adicional y que además éste también garantiza la solución óptima.

Se puede decir que la diferencia más importante entre los modelos 1 y 2 con el modelo 3 radica en la consideración de las etapas, ya que el modelo 3 considera que las etapas son el tiempo, por lo tanto, puede contabilizar los costos de operación y mantenimiento, pero pierde exactitud en la fecha de entrada de los proyectos; en cambio los modelos 1 y 2 consideran que los proyectos son las etapas, por consiguiente pueden tener más precisión en la fecha de entrada de los proyectos pero no pueden contabilizar los costos de operación y mantenimiento. Otra razón para que se presenten estas diferencias puede ser que el modelo 3 considera en forma explícita una restricción de potencia, y los otros modelos no la tienen en cuenta, sin embargo estos podrían mejorarse en este sentido.

Al comparar el modelo 4 con otros modelos más sofisticados (2 y 3), se puede decir que el modelo 4 obtiene unos buenos resultados, teniendo en cuenta que es un método heurístico que no realiza simulación. Esto hace que se vea como un modelo importante ya que es el más sencillo y el más rápido. Este modelo tiene además la ventaja de que no presenta el azote de la dimensionalidad típica de programación dinámica. El modelo 4 presenta problemas en cuanto a la consideración explícita de la fecha más temprana de entrada en operación de los proyectos y en cuanto al manejo de las plantas térmicas, sin embargo estos son problemas del modelo y no de la metodología, por lo tanto el modelo puede ser mejorado en este sentido.

El modelo 6, además de presentar los resultados más atípicos, es el que más tiempo toma y el más costoso. Se puede ver claramente como el problema de la interdependencia, que no es considerado en este caso, es de vital importancia en la solución del secuenciamiento de proyectos y tendría que ser considerado con base en cortes de Benders.

5. CASO II: EXPANSION MULTIOBJETIVO DEL SECTOR ELECTRICO COLOMBIANO

A través de los años se ha planteado el desarrollo del país sin evaluar las repercusiones ecológicas y sociales que tendrá sobre el medio físico y biológico cualquier actividad que suponga alteraciones importantes, como el deterioro de bosques, el uso inadecuado del suelo agrícola, la irrigación, la colonización, la construcción de presas, el uso de combustibles, el tratamiento de residuos, etc. Es así como actualmente se aprecia cada vez más una alta importancia a los factores ambientales y sociales en el evaluación de proyectos y los planes de desarrollo nacionales, elemento que es igualmente aplicable a la planeación del sector eléctrico.

Se presenta a continuación una metodología que permite la selección de planes de expansión de un conjunto de ellos considerando objetivos económicos, sociales y ambientales.

Antes de discutir la metodología propuesta se presenta la evaluación de cada uno de esos objetivos.

- **Evaluación del objetivo económico.** Tradicionalmente, la evaluación económica del plan de expansión en el sector eléctrico, se había efectuado a precios de mercado; sin embargo, estos no son los costos reales para la economía nacional, por lo cual, se ha decidido utilizar precios de eficiencia. La utilización de este criterio de eficiencia para la evaluación, se sustenta en la afirmación de que los precios de mercado, debido a las imperfecciones y rigideces que en un momento dado existen en sus mecanismos de determinación, no reflejan el valor real (beneficio o costo) que significan para la economía en su conjunto, ya sea por el uso de los factores o del producto final, y por lo tanto introduce un sistema distinto de valoración, los llamados en términos generales "Precios de Cuenta".

Para el sector eléctrico, con el fin de tomar en cuenta el valor económico de los recursos (bienes, servicios y factores de producción), que serían demandados por los diferentes proyectos de generación y transmisión, se realizó la valoración a precios de eficiencia económica, de cada una de las alternativas de expansión. Esta valoración, consistió en la asignación de precios, con base en la metodología LMST (Little, Mirrlees, Squire y Van der Tak) para el cálculo de precios de cuenta o razones de precios de cuenta -RPC- (Power, 1981), a los insumos en que fue posible desagregar cada rubro de inversión o de gasto, asociado con los costos de inversión (ISA, 1985) gastos de administración, mantenimiento y combustible (ISA, 1988 c).

En términos generales, el proceso seguido para llegar a la comparación económica de alternativas de expansión es el siguiente:

- A nivel de precios se estiman los costos de inversión, operación, administración, mantenimiento y de acciones socio-económicas de cada proyecto opcio-

nado a conformar secuencias, valorándolos a precios de eficiencia.

- A través de los análisis energéticos y de potencia se selecciona un conjunto de secuencias de proyectos que satisfagan las restricciones de suministro de la demanda con un 95% de confiabilidad, operación, disponibilidad de unidades y otras.

El conjunto de alternativas seleccionado (planes de expansión), usando el procedimiento anterior se presenta en la tabla 4.

- **Evaluación del objetivo social.** Ante la imposibilidad en la estimación de los precios sociales, se ha decidido realizar la evaluación social de las alternativas de expansión mediante la cuantificación de efectos que esta expansión traería al país. La idea es buscar una serie de indicadores que puedan brindar una estimación social a los responsables de tomar la decisión. Los indicadores escogidos se dividen en dos grupos: el primero, tiene que ver con los efectos de la distorsión del mercado distribuido en varios agentes de la economía; el segundo, con algunos indicadores macroeconómicos que pueden reflejar un desarrollo económico implicando ello, en última instancia, un beneficio para la sociedad.

Con la evaluación de los efectos distorsionantes del mercado se pretende indagar la cantidad de transferencias existentes entre los diferentes agentes involucrados (mano de obra discriminada en calificada, semicalificada y no calificada, empresas nacionales, empresas extranjeras y gobierno) en la realización de una alternativa. La forma de cálculo de estos indicadores se hará tomando la diferencia entre los valores presentes de costos a precios de mercado y eficiencia, para cada insumo o actividad relacionada con cada agente.

Con la evaluación de los indicadores macroeconómicos se intenta medir las consecuencias que la alternativa de expansión trae sobre el empleo, las divisas y el valor agregado. Para la estimación de estos índi-

ces se tomarán relaciones del valor presente de cada ítem involucrado con respecto al valor presente de costo total.

El objetivo social es evaluado mediante la agregación de los indicadores anteriores usando una función de utilidad multiatributo. Con este objetivo se debe desarrollar una función de utilidades para cada indicador (atributo), y luego se agregan esas funciones individuales para definir la función de utilidades multiatributo.

- **Evaluación del objetivo ambiental.** La oficina ambiental de ISA desarrolló una metodología, basada en el método de promedios ponderados (Goicochea y otros, 1982), para calificar ambientalmente los proyectos de generaciones del sector eléctrico colombiano. El objetivo de esta calificación es comparar ambientalmente y en forma separada los proyectos hidráulicos y térmicos más opcionados para ser incluidos en planes de expansión, y recomendar la selección de los menos deletéreos desde este punto de vista.

Los efectos ambientales evaluados consideran importantes variables según la zonas geográficas, los usos actuales y futuros de los recursos afectados, la posibilidad o no de mitigación y control, la permanencia espacio-temporal y muchas otras. Sin embargo, en el estadio de este trabajo no se han establecido los elementos de juicio, para ponderar, en cada caso específico, la importancia o peso relativo que se debe dar a cada indicador ambiental en la evaluación. Por esta razón se asume igual peso para todos los indicadores y con base en ellos se procede a la calificación (ISA, 1988b).

En la evaluación a nivel de alternativas de planes de expansión, utilizando la calificación presentada, se tendrán en cuenta dos supuestos primordiales:

- Los efectos ambientales utilizados para la calificación y por ende ella misma, se consideran constantes a través del período de planeación, lo mismo que el

medio ambiente en el que fueron evaluados.

- La evaluación se realiza haciendo uso de la regla de Hotelling (ENE, 1982, pag. 159) la cual dice que "el valor intrínseco económico de los recursos naturales crece en el tiempo al valor de la tasa social de descuento". Esta regla determina la trayectoria pero no en el nivel del recurso, que en última instancia es lo necesario, dado que se tiene una calificación ambiental y no una valoración.

Así, la evaluación se realiza para cada alternativa calculando el valor presente de la calificación ambiental de cada proyecto que conforma la secuencia analizada a la tasa de descuento de cero. Esto debido a que si el valor del recurso crece a la tasa de descuento y luego se desea es el valor presente del mismo, se anularían las tasas, quedando sólo la sumatoria de la calificación.

- **Aplicación de análisis multiobjetivo.** La aplicación de análisis multiobjetivo en este trabajo consiste en escoger el o los planes de expansión más adecuados, una vez se han definido todos los planes alternativos y se han evaluado con respecto a cada objetivo.

Tal vez uno de los métodos más conocidos y más eficientes para el anterior propósito es el ELECTRE, técnica que se utiliza en este trabajo para la evaluación integral de alternativas de expansión. Ella fue seleccionada por su operatividad con los modelos existentes, porque permite trabajar con criterios diferentes, y establece un ordenamiento completo de las alternativas factibles.

Para la evaluación de las alternativas de expansión se ha planteado la consideración de que se deben elegir aquellas alternativas que aporten mayor beneficio a la comunidad reflejando lo anterior mediante el cumplimiento de tres objetivos esenciales, mínimo costo de inversión y operación satisfaciendo una demanda de

energía con alto grado de confiabilidad, máximo bienestar dado por la maximización de una función de utilidad multiatributo en el objetivo social y minimización de la calificación ambiental de las alternativas. En la tabla 5 se presenta la evaluación de los tres objetivos anteriores para cada alternativa.

Para el objetivo económico puede observarse que aunque con variaciones importantes en fechas de entrada, las secuencias con menores costos tiende a concentrarse en torno a las térmicas de 300 MW (Amagá y Tibitá). Esta similitud entre las alternativas, tendrá dos efectos importantes a nivel de estructura de costos y su valoración económica. Primero, serán mínimas las diferencias en la participación de los distintos insumos en la estructura de costos de cada alternativa; y segundo, en la valoración no se presenta, en rasgos generales, grandes diferencias entre alternativas, las presentadas se deben fundamentalmente en la presencia o no de las térmicas. Sin embargo, las que entre el ramillete de alternativas presentan mejores oportunidades a nivel económico son la 1, 3, 8, 13 y 14.

Con respecto al objetivo social se obtienen en general buenos resultados para todas las alternativas, encontrándose valores para la FUM entre 0.8 y 1.0 que es bastante aceptable. En casi todas las combinaciones se distinguieron las alternativas 13 y 14.

Dentro de la evaluación ambiental podemos observar que las alternativas con proyectos térmicos e hidroeléctricos de poca capacidad se ven favorecidos en el ámbito ambiental. Las alternativas 13 y 14 presentan las mejores opciones desde este punto de vista.

A nivel general se puede observar en la tabla 5 que existen tres alternativas claramente dominadas por las otras, ellas son las alternativas 2, 4 y 5, por tanto es posible eliminarlas del análisis y continuar sólo con las once restantes.

En la aplicación del ELECTRE se hace necesario definir las ponderaciones relativas asignadas a cada objetivo, y los niveles mínimos de acuerdo y máximo de desacuerdo que permiten definir los índices de concordancia y discordancia y encontrar las relaciones de mejor rango entre las alternativas (Goicochea y otros, 1982).

En este sentido se realizó un análisis de sensibilidad sobre la estructura de preferencias del decisor. Después de realizado ese análisis se concluyó que la alternativa que mejor ordenamiento presenta para todas las combinaciones (juegos, pesos y actitudes en la evaluación del objetivo social) es la alternativa 14, seguida en casi todos los casos por las alternativas 13 y 8. La secuencia 14 tiene la peculiaridad de tener una combinación de proyectos hidroeléctricos con una térmica de 300 MW que le brinda al sistema, desde el punto de vista técnico una mayor seguridad para satisfacer la demanda de potencia pico, y desde los puntos de vista social y ambiental, menores efectos negativos.

En el plan de expansión analizado se presenta como una de las alternativas más atractivas para el sector eléctrico en particular, la denominada 14, que tiene la característica de no incluir al proyecto hidroeléctrico Urrá 1. Ahora bien, es sabido que el Valle del Sinú se encuentra sometido a continuos desbordamientos del río del mismo nombre, que alimenta al proyecto citado, con las consecuentes pérdidas que se derivan de la ocurrencia de tales fenómenos en un área con un importante aprovechamiento agrícola y ganadero. El último de estos desbordamientos, ocurrido en agosto de 1988, tuvo consecuencias desastrosas, lo que ha llevado al gobierno, y particularmente al sector eléctrico, a considerar este proyecto dentro del contexto de aprovechamiento múltiple que permita mitigar las consecuencias de inundaciones.

Así dentro de los análisis se hace necesario tener en cuenta el hecho de la necesidad

de construir el proyecto Urrá I, por los beneficios intersectoriales que trae su incorporación en el plan. Estimativos de estos beneficios, indican que la construcción del proyecto significa un ahorro alrededor de 46 millones de dólares, cuyo efecto al incluirlo en las evaluaciones presentadas en el objetivo económico, cambiarían la decisión hacia alternativas que incluyen el proyecto Urrá I, además de presentarse con ello un efecto eminentemente social de favorecer la región.

Se concluye entonces que si se incluye el efecto del proyecto Urrá I, el conjunto de alternativas se reduce a las secuencias 13, 8, 1, 6 y 9.

6. CASO III: EXPANSION DE LA ELECTRIFICACION RURAL

La planificación de la zona del Oriente Antioqueño corre a cargo de la Corporación Autónoma Regional Río Negro - Nare "CORNARE", la cual fue creada por la ley 60 de 1983 como establecimiento público descentralizado del orden nacional, adscrito al Departamento Nacional de Planeación.

El principal componente del patrimonio de la Corporación corresponde a los recursos establecidos en el artículo 11 de la Ley 60 de 1983, los cuales provienen de las transferencias hechas a CORNARE de las partidas previstas en el artículo 12 de la Ley 56 de 1981, por parte de las entidades propietarias de plantas generadoras de energía ubicadas en el área de su jurisdicción; en este caso, Empresas Públicas de Medellín e Interconexión Eléctrica S.A. Dichas partidas equivalen al 4% de las ventas brutas de energía en bloque. Otros recursos financieros provienen de las regalías pagadas por las empresas que realizan el aprovechamiento de los recursos renovables y no renovables en la región.

La destinación de tales recursos se aplicará en primer término, y en forma preferencial, a los objetivos estipulados en el mencionado artículo 12, como son:

- Reforestación y protección de los recursos naturales en la respectiva hoya hidrográfica, y más específicamente en las zonas directamente afectadas por las obras hidroeléctricas.
- Programas de electrificación rural, con prioridad en las zonas determinadas en el objetivo anterior.

En el presente trabajo, la atención se centra principalmente en las inversiones identificadas por la Corporación en el Sector Electrificación Rural, en cumplimiento de las aplicaciones estipuladas en la mencionada ley 56. Los recursos económicos de que se dispone para atender los requerimientos de inversión en programas de electrificación rural, si bien son significativos, resultan insuficientes para la implementación de todos los proyectos, razón por la cual es necesario optimizar la asignación de este recurso escaso, con el fin de obtener el mayor "beneficio" posible.

Con el propósito de conocer el estado de la dotación del servicio de energía eléctrica en los municipios y veredas de la región, y para determinar las necesidades de inversión que se requerían para una cobertura adecuada en la prestación del servicio, CORNARE contrató con varias firmas consultoras los estudios necesarios para formular los planes de inversión correspondientes de acuerdo con las proyecciones presupuestales de la Corporación.

Como resultado de estos estudios se identificaron un total de 956 proyectos con los cuales se esperaba satisfacer los requerimientos del servicio, a nivel rural, en el momento de realizar los estudios. Cada proyecto contiene información referente a su ubicación (señalada por el nombre de la vereda y municipio al que corresponde), número de viviendas que se ven favorecidas por la implementación del proyecto, y costo del mismo.

La información disponible representa el nivel de inversiones necesario para satisfacer completamente las demandas del servicio en el momento del estudio, sin considerar cuál sería la variación de tales demandas con el de-

sarrollo demográfico (que es dinámico en la escala espacio-temporal) propio de cada municipio. El supuesto básico es que una vez construida la infraestructura necesaria para los proyectos identificados, el sistema sería capaz de soportar los requerimientos de carga que le significarían la adición de nuevos usuarios, a medida que estos se presentaran.

En concordancia con los proyecciones presupuestales y tratando de actualizar constantemente los proyectos a ser considerados se decidió realizar el proceso de planificación o expansión para un período de 5 años (1990-1994) de la región de CORNARE. En este caso se trata de definir cuáles proyectos deben desarrollarse considerando la canasta de proyectos disponibles (956), limitaciones presupuestales y otros objetivos.

En el problema de interés, se pueden distinguir cuatro objetivos que se desea satisfacer con la implementación de programas de inversión social. Estos objetivos son: eficiencia económica en la asignación de recursos; equidad en las coberturas municipales; tratamiento preferencial a los municipios prioritarios; y asegurar presencia política en todos los municipios de la zona.

Con el objetivo de eficiencia económica se persigue el maximizar la relación beneficio-costos asociada con cada grupo de proyectos, en donde los beneficios vendrían representados por la cantidad de nuevos usuarios que se atienden con cada grupo particular de proyectos. Es un objetivo regional, pues lo que se desea es conseguir el máximo incremento posible en los niveles de cobertura regional (máximo número de nuevas viviendas atendidas), que pueda obtenerse con los recursos financieros previstos para cada año considerado.

Con el objetivo de equidad se desea conseguir un nivel mínimo de cobertura en todos los municipios de la región, de manera que se disminuyan las diferencias existentes actualmente en cuanto a coberturas municipales, las cuales varían entre un 8.1% (Alejandría) y 93.2% (La Ceja). Se busca ser más equitativo en cuanto a la asignación de recursos por municipio, para que en un momento dado todos

los municipios del área se encuentren nivelados por encima de cierto nivel mínimo deseado, y posible, de cobertura.

Este objetivo surge porque la consideración única del objetivo de eficiencia, puede agrandar aún más las diferencias en coberturas municipales. En efecto, se dirigirían las inversiones hacia los proyectos más económicos, que generalmente se encuentran en los municipios mejor electrificados, abandonando los municipios peor dotados de servicio, ya que la infraestructura que se necesita aumenta el costo de los proyectos en estos últimos municipios. Obviamente, al tratar de satisfacer este objetivo deberá sacrificarse parte de lo logrado en el objetivo de eficiencia.

La ley 56 de 1981 estipula, en su artículo 12, que los recursos financieros de que se disponga deben dirigirse de manera prioritaria, y en forma preferencial, hacia aquellos municipios que se ven directamente afectados por la construcción de los embalses. Para satisfacer esta restricción legal, el decisor podría fijarse metas mínimas deseadas en estos municipios, e inclusive podría desear llegar a un cubrimiento del 100% en todos ellos al final del horizonte de planificación.

Finalmente con el objetivo de presencia política en la zona se persigue representar el deseo del decisor de mantener una presencia activa en todos los municipios que conforman el área bajo estudio, mediante la construcción de al menos un proyecto por municipio, y por año de inversiones.

Este objetivo se hace necesario debido a que la representación del problema tal como ha sido considerada hasta ahora, con los objetivos de eficiencia, equidad y prioridad, no asegura que los recursos presupuestales se dirijan hacia todos los municipios de la zona. Con él se busca lograr incrementos permanentes en las coberturas de todos y cada uno de los municipios.

Como criterio evaluador para medir los "beneficios" resultantes de la realización de los proyectos, se propone una Función Objetivo representada por la Maximización del Número de Viviendas Atendidas. Es decir, se pro-

pone llevar el servicio al mayor número de personas, en la forma más barata posible, cumpliendo con restricciones físicas, presupuestales, y otras.

La función objetivo podría, entonces, expresarse como:

$$\text{Max} \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^{956} I_{k,t} * \text{NUVIV}_k$$

Donde $I_{k,t}$ es una variable binaria (cero o uno) que indica la decisión de implementar o no el proyecto k , al inicio del período t , NUVIV_k es el número de viviendas que se benefician con el proyecto k y T es la longitud del horizonte de planeamiento.

La función objetivo así planteada no incluye ninguna consideración de equidad regional (que en el presente estudio representa un objetivo social), pues la herramienta de optimización escogería aquellos proyectos más "económicos", independientemente del municipio donde estén ubicados. Si se tiene en cuenta que los proyectos más económicos generalmente se localizan en los municipios que cuentan con la infraestructura apropiada, y que estos a su vez son los que presentan una mayor cobertura, es claro que la optimización daría como resultado la orientación de las inversiones hacia las zonas mejor electrificadas, en detrimento de las zonas más "abandonadas", lo cual es contradictorio con el objetivo de equidad regional que se persigue.

Lo anterior lleva a buscar la forma de incluir el objetivo social dentro de la formulación del problema, lo cual se puede conseguir imponiendo coberturas deseadas en los municipios, como restricciones.

Las restricciones asociadas con esta función objetivo y que terminan de definir el problema de optimización son las siguientes:

- Restricciones estructurales. Este tipo de restricciones tiene que ver con la configuración física del sistema y, básicamente, se refiere a las restricciones de no duplicidad

y a las restricciones de contingencia. La representación matemática de estas restricciones es bastante fácil en este modelo.

- Restricciones presupuestales consisten en un límite anual en la disponibilidad de fondos para la construcción de nuevos proyectos. Para la aplicación del modelo matemático propuesto, tanto los costos de los proyectos, que están en pesos de diciembre de 1986, como las proyecciones presupuestales, que están en pesos corrientes de cada año, fueron llevados a pesos de enero de 1990, utilizando para ello una tasa de actualización del 26%. Este valor de la tasa de actualización se escogió de acuerdo con información suministrada por funcionarios de la Oficina de Proyectos Prioritarios de CORNARE; representa adecuadamente la variación que han tenido los costos de los proyectos de electrificación durante el período 1986-1989.

- Restricciones de equidad en la cobertura. Tal como se anotó anteriormente, el decisor puede estar interesado en obtener ciertas coberturas mínimas en determinados municipios; esta situación, que se relaciona con un objetivo social de equidad en la realización de inversiones, puede ser fácilmente tenida en cuenta mediante su inclusión en el problema de optimización bajo la forma de restricciones adicionales al problema.

La cobertura se define como la relación entre el número de viviendas que cuentan con el servicio, dividido por el número total de viviendas en el municipio. La contribución que cada proyecto hace al aumento de la cobertura en el municipio respectivo puede definirse como:

$$\text{CONTRI}_{k,T} = i_{k,T} * \text{CARENO} * (\text{NUVIV}_k / \text{NUVIVI})$$

donde $\text{CONTRI}_{k,T}$ es la contribución del proyecto k al incremento en la cobertura del servicio en el municipio i , en el período t , CARENO es el porcentaje de no cubrimiento del servicio en el municipio i , al inicio del período de planificación, NUVIV_k es el número

de viviendas del municipio i que se benefician con la implementación del proyecto k y NUVIVI es el número de viviendas del municipio i que carecen del servicio de energía (es igual a la sumatoria de los NUVIV $_k$ de los proyectos que pertenecen a ese municipio).

Teniendo en cuenta lo anterior, las restricciones de cobertura para cada municipio $i = 1, \dots, 26$, pueden escribirse de la siguiente manera:

$$COBERO_{i,t-1} + \sum_{k \in i} I_{k,t} * CONTRI_k \geq COBDES_{i,t}$$

Donde $COBERO_{i,t-1}$ es la cobertura del servicio en el municipio i , al inicio del período t , $COBDES_{i,t}$ es la cobertura deseada para el municipio i , al final del período t y la sumatoria se toma sólo sobre aquellos proyectos que pertenecen al municipio i .

- Restricciones de municipios prioritarios. Tal como se mencionó en el acápite anterior, la ley estipula que la Corporación dirija sus inversiones de manera prioritaria hacia aquellos municipios que se ven directamente afectados por la construcción de los embalses. Para cumplir con esta obligación legal, el decisor podría estar interesado en que cada año se satisficiera una parte proporcional de la cobertura faltante en estos municipios, de manera que al finalizar el período de planificación considerado, se llegara a un cubrimiento del 100% en la prestación del servicio en estos municipios.
- Restricciones de presencia política. Dentro de esta categoría cae el tipo de restricciones que obliga al decisor a hacer presencia en todos los municipios, mediante la realización de inversiones. Estas restricciones surgen porque la formulación del problema, tal como se ha planteado hasta el momento, no necesariamente obliga a implementar proyectos en todos los municipios considerados, y el decisor puede estar interesado en que se construya al menos un proyecto en cada municipio. La repre-

sentación matemática de este tipo de restricciones es la siguiente:

$$\sum_{k \in i} I_{k,t} \geq 1$$

El problema anterior corresponde a un problema de expansión formulado dentro de una estructura de programación lineal entera mixta con múltiples objetivos. La forma de solucionar este problema consiste en cambiar los límites alcanzables en los objetivos considerados como restricciones (equidad, prioridad y presencia política). Cada solución obtenida para diferentes límites considerados en los objetivos incluidos como restricciones genera un punto que se encuentra sobre la llamada superficie de transformación (en realidad, una hipersuperficie en un espacio de cuatro dimensiones, cada una de las cuales corresponde a un objetivo), soluciones factibles no dominadas. El decisor puede iniciar la exploración de esta curva para que, de acuerdo con su estructura de preferencias y con las tasa de intercambio entre objetivos, escoja para su implementación aquel programa de inversiones que le brinde mayor utilidad. En todos los casos, ese programa maximiza la eficiencia con sujeción al cumplimiento de metas en los restantes objetivos.

La información que suministra la superficie de soluciones no dominadas, o superficie de transformación, permitirá un gran nivel de interacción con las personas que tienen a su cargo las decisiones políticas, pues podrá ponerse de presente el comportamiento de alternativas dominantes en términos de los diversos objetivos, señalando lo que se gana o pierde en cada uno de estos objetivos al pasar de una alternativa a otra, y así sucesivamente.

En las figuras anexas se muestran las curvas de transformación eficiencia-equidad y eficiencia-prioridad para un año, obtenidas al solucionar el problema de expansión de manera repetida considerando diferentes logros en los objetivos incluidos como restricciones.

En las curvas de transformación generales para los pares de objetivos Eficiencia-Equidad y Eficiencia-Prioridad, obtenidas para un año, los puntos que conforman dichas curvas representan soluciones no dominadas, y cada una de tales soluciones representa un plan alternativo de inversiones para el año considerado. Las soluciones no-inferiores halladas permiten conocer cuánto debe sacrificarse de un objetivo para ganar algo en otro. Por ejemplo, al analizar los puntos de la curva de transformación entre los objetivos de Eficiencia y Equidad, se observa que para lograr un nivel mínimo del 40% en la cobertura en cada uno de los municipios de la región, el decisor debería sacrificar tan sólo 129 viviendas, del total que podrían implementarse si no se tuviera en cuenta ninguna consideración de equidad; y se aprecia también que con los fondos previstos para ese año no puede lograrse un nivel mínimo de cobertura del 50%. De igual manera, al analizar la curva de transformación entre los objetivos de Eficiencia y Prioridad, se aprecia que el decisor debería sacrificar un total de 783 viviendas, para lograr que los municipios prioritarios obtengan una cobertura superior o igual al 95%. Es claro que los sacrificios en uno y otro caso son bien distintos.

Obsérvese que los puntos que permitieron construir cada curva de transformación son óptimos en el sentido de Pareto: no se puede ir de un punto a otro sin desmejorar uno de los objetivos.

Para finalizar esta presentación de resultados, es necesario hacer un comentario acerca de las curvas de transformación que se presentan en las figuras 1 y 2 como líneas continuas. Esta representación no corresponde estrictamente a la realidad, pues debido al carácter discreto de los proyectos de inversión, la curva de transformación no está definida como una línea continua, sino que presenta una forma escalonada; lo que se ha hecho en este trabajo es encontrar algunos de los puntos que demarcan las discontinuidades en esa superficie. Por la misma razón, la región factible no está constituida por infinitas combinaciones de alternativas, y en este caso particular es más conveniente hablar de una

"nube de puntos" que conforman el espacio de soluciones factibles.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con las metodologías revisadas y las aplicaciones mostradas se pueden hacer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Al analizar los modelos presentados se puede ver que no se puede dar un orden general, ya que la elección de un modelo depende de las características propias del sistema a considerar, de la información que se tenga, de los objetivos, de las restricciones y del grado de detalle que se quiera.
- Se puede observar la importancia que reviste en el proceso de selección la consideración de la interdependencia entre proyectos. En los estudios de expansión se pueden hacer simplificaciones con el fin de solucionar más fácilmente el problema, pero si se quieren obtener resultados confiables, se debe considerar un modelo de simulación que realice la operación conjunta de los proyectos.
- El planeamiento, tanto de la expansión como de la operación, de un sistema de suministro de electricidad requiere la consideración de supuestos acerca de las condiciones futuras que posiblemente se presentarán. Dichos supuestos determinan en gran medida las decisiones que se adopten y por tanto es necesario un cuidadoso tratamiento y análisis de los mismos.
- La programación matemática muestra su utilidad como una herramienta eficaz de ayuda para las funciones de los planificadores, pues ella permite evaluar explícitamente los proyectos, mostrando la contribución que cada programa alternativo de inversiones hace a los objetivos y metas para los cuales se planifica.

- La técnica de las restricciones resulta bastante adecuada para el análisis de proyectos alternativos de inversión, bajo la óptica de objetivos múltiples conflictivos. Este técnica permite generar toda una gama de cursos de acción alternativos, considerando diversas expectativas en cuanto a los niveles esperados de logros en cada uno de los objetivos considerados; sin embargo, presenta dificultades computacionales cuando el número de objetivos tratados es muy grande.
 - En un contexto más general, la metodología puede ser aplicada para el planeamiento de inversiones en programas y proyectos de infraestructura social y productiva, tales como abastecimiento de agua, disposición y manejo de aguas residuales, programas de salud, educación y recreación, construcción de vías de acceso, diversificación y comercialización de cultivos, entre otros.
 - Valencia (1973) en uno de sus escritos comenta: "...la metodología de los múltiples objetivos exige un proceso claro y una planeación seria que identifique los objetivos, señale los criterios de ponderación y establezca las normas contables. Así mismo, se hace muy necesario definir los mecanismos de interacción entre lo "político" y lo "técnico" que como se ha visto, aparecen siempre en estas cuestiones. Comentario que es válido en nuestro caso y conlleva a investigar la manera o mecanismo que permita incorporar el ingrediente político en los análisis.
 - Los aspectos de incertidumbre exigen un tratamiento cuidadoso y completo sobre el rango de variación de las llamadas variables exógenas. Una equivocación, por ejemplo, en la proyección de variables exógenas como la demanda, el financiamiento externo y los costos de inversión y operación de los proyectos, pueden conducir a situaciones extremas de pérdidas (especialmente económicas) en países que comprometen una buena parte de sus recursos en la expansión de sus sistemas eléctricos.
 - En el caso de aplicación II de expansión multiobjetivo del sector eléctrico es indiscutible que la evaluación integral de alternativas, considerando los objetivos planteados, trae en sus resultados diferencias apreciables con respecto a la consideración de un solo objetivo. Concretamente, comparando los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos en el plan de expansión vigente para el año 1989, no se presentan mayores diferencias a nivel de recomendación, pero si se plantean bondades concretas de este plan alternativo con respecto a los otros analizados. Además, se reafirma que el plan aprobado, trae muchas ventajas inherentes que con esta evaluación se confirman.
 - En el caso de aplicación II de expansión multiobjetivo del sector eléctrico se ha logrado con el análisis multiobjetivo incorporar simultáneamente los diversos objetivos identificados, donde las preferencias se establecen con el uso de pesos que se podrían determinar a través de discusiones entre los grupos involucrados en el problema de planeamiento de la expansión. Para este análisis se utiliza la técnica ELECTRE II que permite la incorporación de objetivos de valoración cualitativa y cuantitativa, con diferentes unidades de medición.
- La mayor limitación presentada en el análisis multiobjetivo está en la determinación de los pesos dados a los objetivos identificados. Generalmente es difícil determinar un conjunto de pesos que represente las verdaderas preferencias de los grupos involucrados, siendo recomendable, como lo fue en el caso de este trabajo, la elaboración de un análisis de sensibilidad detallado.
- Los resultados que se obtienen de las evaluaciones ilustradas, no deben tomarse como definitivos para la toma de decisiones, pues, pueden sufrir cambios si se aplicara la metodología con valores más precisos, dado que los rangos de variación con los que las alternativas satisfacen cada objetivo son pequeños.

- La principal tarea a desarrollar debe estar encaminada hacia el mejoramiento de información del sector. Se destaca la necesidad de conocer más profundamente los impactos socio-económicos de los distintos proyectos de generación y transmisión.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de COLCIENCIAS para la realización de las investigaciones cuyos resultados se presentan en este trabajo.

9. BIBLIOGRAFIA

- ALLETT E.J. Environmental Impact Assessment and Decision Analysis, (mimeo) 30p.
- BECKER L., W.G. Yeh W. Optimal timing, sequencing and sizing of multiplier reservoir surface water supply facilities. *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 1 (Feb, 1974). p.57-62.
- BELL D., KEENEY R. AND RAIFFA H. *Conflicting Objectives in Decisions: International Series on Applied Systems Analysis*. New York, 1977.
- CANO GU LTDA. Plan de electrificación global del área de CORNARE: Zona IV. Medellín, 1986.
- CEDE. Evaluación Social de Treinta Proyectos Industriales en Colombia, Bogotá, 1975. Universidad de los Andes, Facultad de Economía. CEDE. Documento 020.
- CHANG, S.Y., BRILL, Jr. E. HOPKINS, L. Use of mathematical models to generate alternative solutions to water resources planning problems. *Water Resources Research* 18(1), 58-64, 1982.
- CODESARROLLO. Bases del plan maestro de desarrollo para el área de CORNARE. Medellín, 1985.
- COHON H., CHURCH R. AND SHEIR D. Generating Multiobjective Trade Offs: An Algorithm for Bicriterion Problems. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5 (Oct. 1978). p. 1001-1009.
- COHON J. AND MARKS D. A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques. *Water Resources Research*. Vol. 11, No. 2 (Abr. 1975). p. 208-219.
- COHON J. AND MARKS D. Multiobjective Screening Models and Water Resources Investment. *Water Resources Research*. Vol. 9, No. 4 (Ago. 1973).p. 826-836.
- CORNARE Síntesis estadística del área de CORNARE. Oficina de Planeación. El Santuario, Antioquia, 1987a.
- CORNARE Enfoque para la gestión del desarrollo regional. Oficina de Planeación. El Santuario. Antioquia, 1986.
- CORNARE El intercambio de servicios: alternativa para la gestión de proyectos concertados. Oficina de Planeación. El Santuario. Antioquia, 1987a.
- CORNARE Estrategia institucional y plan de acción en el corto plazo. Oficina de Planeación. El Santuario. Antioquia, 1987a.
- CORNARE. Compendio de normas legales y disposiciones básicas. Oficina de Planeación. El Santuario. Antioquia, 1985.
- DASGUPTA P., SEN A., Y MARGLIN S. Pautas para la Evaluación de Proyectos. ONUDI, 1972. Una versión más actualizada se encuentra en Hansen J.R. Guía práctica para la evaluación de proyectos. ONUDI, 1978.
- DAVID L. AND DUCKSTEIN L. Multi-criterion Ranking of Alternative Long-Range Water Resources Systems. *Water Resources Bulletin*. Vol. 12, No. 4 (Ago, 1976). p. 731-754.

- DNP, MINMINAS. Estudio Nacional de Energía. República de Colombia. Mejía, Millán y Perry Ltda. Jun, 1982.
- DRUCKER P. La Gran Ruptura. Perspectivas Socioeconómicas para el Mundo del Futuro. Traducción de Ruben Pimientel, México, 1970.
- ECHEVERRY, R. Macrozonificación del área jurisdiccional de CORNARE Y Planteamiento sobre Estrategias. Medellín, 1986.
- Energy Department Paper No. 25. Economic Benefits of Power Supply. Washington D.C., 1983.
- ESTEVAN M.T. Evaluación del Impacto Ambiental. Madrid, 1984.
- FONTANE E. Evaluación social de proyectos. Ed. Universidad Católica. Instituto de Economía Pontificie Universidad Católica de Chile, Chile, 1984.
- FONTANE, D., LOFTIS L., LABADIE J. Y MERRIT D. Implementation strategies for salinity control projects in the Colorado River Basin. ICS Technical Report 85001, San Francisco, 1984.
- FREEMAN A. AND HAVEMAN R. Benefit-Cost. Analysis and Multiple Objectives: Current Issues in Water Resources Planning. Water Resources Research. Vol. 16, No. 6 (Dic. 1970). p. 1533-1539.
- FRENCH S. Multi-Attribute Theory. University of Manchester. Jun, 1986. (mimeo). 32 p.
- GABBANI D. and MAGAZINE M. An interactive heuristic approach for multi-criterion integer programming problems. Working paper 148, Department of managements sciences. University of Waterloo Ontario, 1981.
- GOICOCHEA, A. HANSEN D. AND DUCKSTEIN L. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley, New York, 1982.
- GOICOCHEA, A. KROUSE M. AND ANTLE L. An Approach to risk and uncertainty in benefit-cost analysis of water resources projects. Water Resources Research, Vol. 18 No. 4 (Ago. 1982). p. 791-799.
- GOICOCHEA, A. DUCKSTEIN L. AND FOGEL. Multiple objectives under uncertainty: an illustrative application of PRO-TRADE. Water Resources Research. Vol. 15, No. 2 (Sep 1979). p. 203-210.
- GOICOCHEA, A. HANSEN, A. AND DUCKSTEIN, L. Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications. Wiley, New York, 1982.
- GOODMAN A. Principles of Water Resources Planning. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, 1984.
- HAÏMES Y. Hierarchical analysis of water resources systems. Mc Graw-Hill, 1977, USA.
- INTEGRAL. Plan de electrificación global del área de CORNARE: Zona I. Medellín, 1986.
- ISA, Departamento de Estudios Económicos y Financieros. Índice de costos de construcción de centrales hidroeléctricas. Medellín, 1985.
- ISA, Oficina Ambiental, Departamento de Planeación y Desarrollo Ecológico. Proyecto de externalidades. Calificación ambiental de los proyectos del plan de expansión. Informe final. Etapa I. Medellín, 1988b.
- ISA, Oficina de Planeación. Unidad Planeamiento de la Expansión. Sistema Eléctrico Colombiano. Análisis de la expansión generación-transmisión. Período 1994-2000. Revisión, Medellín, 1988c.
- ISA. Evaluación de los impactos socioeconómicos de los proyectos hidroeléctricos considerados en el Plan de Expansión del Sistema Eléctrico Colombiano. Período 1994-2000. Informe final. Medellín, 1988a.

- ISA. Plan de expansión. Normalización de la información básica en relación con proyectos hidroeléctricos, términos y de transmisión. Medellín, 1987.
- KEENEY R. AND WOOD E. An illustrative example of the use of multiattribute, utility theory for water resources planning. *Water Resources Research*. Vol. 13, No. 4(Ago, 1977). p. 705-712.
- KIM S. Y YEH W. A heuristic solution procedure for expansion sequencing problems. *Water Resources Research*. Vol. 22, No. 8 (Agu, 1986).
- LITTLE I. Y MIRRLEES J. Estudio social del costo-beneficio en la industria de países en desarrollo. Manual de evaluación de proyectos. Centro de Estudios Monetarios Latinoamericanos. México, 1973.
- MAJOR, D. Benefit-cost ratios for projects in multiple objectives investments programs. *Water Resources Research*, 5(6), 1174-1178, 1969.
- MANJARRES, J.F. Aproximación al planeamiento regional utilizando programación entera mixta. Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional, Medellín, 1989.
- MEJIA VILLEGAS LTDA. Plan de electrificación global del área de CORNARE: Zona II. Medellín, 1986.
- MEJIA F. Y RODA P. Evaluación económica de proyectos industriales y razones de precio de cuenta para la industria colombiana. Informe final (3 vol), CEDE, Bogotá, 1987. Volumen I.
- MERRILL H., SHWEPPE F. AND WHITE D. Energy strategy planning for electric utilities. Part I, SMARTER Methodology. *IEEE Trans. PAS*, Vol. PAS-101, No. 2 (Febr., 1982).
- MOODY D.W. Application of multi-regional planning models to the scheduling of large-scale water resource systems development. *Journal of Hydrology*. Vol. 28, (1976) p. 101-125.
- MORIN T. Y ESOGBUE A.M. Some efficient D.P. algorithms for the optimal sequencing and scheduling of mater supply projects. *Water Resources Research* Vol. 7, No. 3 (1971) p. 479-484.
- MUNSINGHE M. A new aproach to power system planning. *IEEE. PAS* Vol. 99 No. 3 (May/Jun 1980).
- MUNSINGHE M. The economic of power system reliability and planning. Theory and case study. A World Bank Research Publication. Washington, D.C. 1979.
- NICHOLLS C. Analisis económico, social y ambiental de los planes de expansión en el sector eléctrico colombiano. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, 1989. Tesis (Magister Scientiae).
- ONUDI. Guía para la evaluación práctica de proyectos. El análisis de costos-beneficios sociales en los países en desarrollo. New York. 1978.
- ONUDI. Guidelenes for project evaluation. Traducción al español: pautas para la evaluación de proyectos. 1972.
- POWERS, T. (Ed). El calculo de los precios de cuenta en la evaluación de proyectos. Estudios de casos con base en el método Little, Mirrlees, Squire y Van der Tak. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D.C., 1981.
- RAO, S.S. Optimization: Theory and applications. Wiley Eastern, India. Segunda Edición, 1985.
- ROBLES V., J. Análisis multiobjetivo en la Planificación de Recursos Hidráulicos y su aplicación en una región de Venezuela. CI-DIAT, Mérida (Venezuela), 1980.

- ROY B. A conceptual frame work for a prescriptive theory of "decision-aid", in multiple criteria decision making. Edited by M.K. Starr and M. Zeleny. North Holland, New York, 1977. pp 179-210.
- SEDIC LTDA. Plan de electrificación global del área de CORNARE: Zona III. Medellín, 1986.
- SMITH, R. El uso de la programación dinámica en la planificación de sistemas de recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, 1983.
- SMITH, R. Técnicas de optimización y su aplicación a los sistemas de recursos hidráulicos. Curso sobre sistemas de recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín. 1989.
- SQUIRE L, Y VAN DER TAK H. Análisis económico de proyectos. Banco Mundial, 1975.
- TSOU A. MITTEN A. Y RUSSELL S.O. Search technique for project sequencing. Journal of the Hydraulics division. vol. 99, No. NHY5 (May, 1973).
- VALENCIA D. Optimización y simulación de sistemas de recursos hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, 1973.
- VILLEGAS A. Estudio de las técnicas de análisis del problema de expansión. Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Tesis de Maestría. Medellín, 1991.
- WHITE D. References on applications of mathematical programming based multiple objective methods and references from international abstracts in operations research on applications of mathematical programming based multiple objective. University of Manchester, Abr., 1986.
- WHITE D. A selection of multi-objective interactive programming methods. Department of Decision Theory. University of Manchester. (mimeo) pp 99-126.
- WHITE D. Multi-objective interactive programming, J.O.R.S. 1980.
- WHITE D. Introduction to multiple objective methods. University of Manchester (mimeo), 10 p.