

# **PRODUCCION OPTIMA DE EMBALSES DE PROPOSITO MULTIPLE. CASOS DE ESTUDIO: RIOGRANDE II Y URRA I**

**EDGAR A. CADAVID M., RICARDO A. SMITH Q. y DARIO VALENCIA R.**

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hídricos  
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

## **RESUMEN**

Dos embalses de propósito múltiple (Riogrande II y Urrá I) serán incorporados al sistema nacional interconectado de generación en los próximos años. El embalse Riogrande II tiene como objetivos generación de energía y abastecimiento de agua a la ciudad de Medellín. El embalse Urrá I tiene como objetivos generación de energía, irrigación y control de inundaciones aguas abajo del embalse. Como herramienta de análisis de la operación de estos dos embalses se desarrollaron las curvas de intercambio entre pares de objetivos. Debido a que cada logro de un objetivo tiene asociado un nivel de confiabilidad, las curvas anteriores asocian el valor de un objetivo con cierta confiabilidad con el valor del otro objetivo también con cierta confiabilidad. En realidad son curvas de intercambio probabilísticas. Para definir la curvas de intercambio con valores de confiabilidad asociados a cada par de valores de los objetivos considerados se utilizó el método de análisis multiobjetivo de las restricciones con un modelo de programación dinámica para definir la operación de los embalses. La confiabilidad fue estimada usando series generadas sintéticamente. En el caso de Riogrande II los resultados muestran que el objetivo generación de energía disminuye considerablemente con el incremento de los límites en la restricción de abastecimiento de agua y con el aumento de la confiabilidad. En el caso de Urrá I los resultados muestran que el objetivo de control de inundaciones prácticamente no afecta los niveles de logro o la confiabilidad del objetivo generación de energía, mientras que el objetivo de irrigación lo afecta levemente.

## **ABSTRACT**

As part of the Colombian interconnected hydrothermal generation system two multipurpose reservoirs (Riogrande II and Urrá I) will be incorporated into the system in the future years. Reservoir Riogrande II has as objectives energy generation and water supply to the city of Medellín and reservoir Urrá I has as objectives energy generation, irrigation and downstream flood control. As an operational decision making tool for these two reservoirs trade off curves between pair of objectives were developed. Because values of the different objectives have different reliability levels, trade off curves between objectives have to show the reliability values associated to each pair of objective values. These trade off curves then relate values of one objective with certain reliability with values of the other objective also with certain reliability. The developed trade off curves are really probabilistic trade off curves. To define trade off curves with reliability values associated to each pair of objective values, the multiobjective e-constrained procedure was used with a dynamic programming operational model for the reservoirs. Reliability was estimated using long term stocastically generated series of inflows into the reservoirs. Results show for Riogrande II that the energy generation objective decrease when the levels of the water supply constraint or the reliability levels are increased. For Urrá I results shows that the energy generation objective is not affected by the levels or the reliability of the flood control objective and is slightly affected by the levels or the reliability of the irrigation objective.

## **1. INTRODUCCION**

En el sistema interconectado de generación de energía eléctrica colombiano entrarán en servicio en los próximos años dos embalses de propósito múltiple (Riogrande II y Urrá I). Por primera vez el sistema de generación nacional tendrá que operar embalses en los cuales se deberá tener en cuenta propósitos adicionales al de generar energía eléctrica. En este trabajo se analiza el problema asociado con la determinación de la regla óptima de operación de embalses con múltiples propósitos.

La operación de los embalses se realiza con el fin de lograr determinados propósitos, tales como generación de energía, abastecimiento de agua o control de inundaciones; es por lo anterior que la definición de la regla óptima de

operación debe realizarse mediante la optimización de múltiples criterios que reflejen los propósitos que se persiguen con la operación.

La optimización de los criterios de operación puede conducir a situaciones conflictivas en donde al mejorarse el valor de un propósito se empeora otro de ellos. Para resolver el problema es necesario establecer un compromiso entre los propósitos en conflicto y determinar las condiciones para la operación del sistema, tal que con ella se alcance dicho compromiso. El compromiso a seleccionar dependerá de la estructura de preferencias del ente encargado de tomar las decisiones; si se conoce la estructura de preferencias del ente, la solución, regla óptima de operación, es única para ésta. En caso contrario, se deberá presentar soluciones que reflejen las

posibles estructuras de preferencias del ente decisor.

## 2. OPERACION OPTIMA DE EMBALSES DE PROPOSITO MULTIPLE

Durante los últimos años, uno de los más importantes avances hechos en el campo de los recursos hidráulicos ha sido el desarrollo y aplicación de técnicas de optimización para el planeamiento, diseño y manejo de sistemas complejos de recursos hidráulicos. El análisis de tales sistemas puede incluir diferentes objetivos y cientos de variables de decisión y restricciones, los cuales una vez definidos dan lugar a complejos problemas que pueden ser resueltos, la mayor parte de las veces, mediante el uso de las técnicas desarrolladas en los campos de investigación de operaciones.

La elección de las metodologías para la optimización de la operación de embalses con múltiples propósitos depende de las características del sistema considerado, de la disponibilidad de información y de los objetivos y restricciones específicas. En general, las metodologías existentes pueden clasificarse bajo dos enfoques básicos: optimización y simulación (Mobasher y Harboe, 1970).

En la operación de embalses se han usado diferentes técnicas de programación matemática a gran escala para resolver problemas de dimensionalidad, entre las que pueden mencionarse la descomposición en el tiempo y en el espacio, agregación y varias técnicas de aproximación sucesiva. La popularidad de tales metodologías se debe especialmente a la limitación de velocidad y capacidad de almacenamiento de los equipos de cómputo actuales. Los métodos de aproximaciones sucesivas de mayor uso en la operación de sistemas multiembalses-multipropósito, incluyen: programación dinámica diferencial y sus modificaciones (Heidari y otros, 1971; Trezos y Yeh, 1987), programación dinámica incremental (Fults, Hancock y Logan, 1976), aproximaciones sucesivas (Giles y Wunderlich, 1981) y programación dinámica gradiente (Foufoula - Georgiou y Kitanidis, 1988).

El problema de la convergencia en los métodos de aproximaciones sucesivas, ha sido considerado por diferentes autores (Yeh, 1985), los cuales muestran que la convergencia al óptimo global no puede ser probada y puede no ocurrir. Además, estos métodos no son directamente aplicables en el contexto estocástico, exceptuando la programación dinámica gradiente. Aparte de algunos métodos aproximados (Yakowitz ,1982), la programación dinámica discreta convencional sigue considerándose como el enfoque universal para resolver el problema de hallar la política óptima de operación de

sistemas de múltiples embalses bajo el contexto estocástico. Lo anterior limita la dimensionalidad del sistema que puede ser resuelto bajo el contexto estocástico.

El uso de la programación dinámica por parte de diferentes investigadores, para resolver el problema de diseño y operación óptima de un embalse con múltiples propósitos, ha sido extenso. En la mayoría de las investigaciones realizadas los diferentes propósitos del sistema han sido considerados como restricciones dentro de la formulación de la programación dinámica. Sin embargo, otros investigadores como Tauxe, Inman y Mades (1979); y Thompson, Alarcón y Marks (1982) han resaltado la característica principal que posee el problema de hallar la política óptima de operación de un embalse con múltiples propósitos, es decir el que éste constituye un problema de múltiples objetivos, al tener en cuenta dentro de la metodología propuesta con la técnica de programación dinámica la obtención de las tasas de intercambio entre los diferentes objetivos, llamadas comúnmente "trade-offs".

Una aproximación diferente para resolver la operación de múltiples embalses de múltiple propósito, resulta de la combinación de la programación dinámica y de la programación lineal (Mohammadi y Mariño, 1984).

En la operación de embalses, tal como se dijo anteriormente, es usual contemplar objetivos que tengan un carácter económico o social. Sin embargo, en el caso de embalses con múltiples propósitos puede considerarse que cada propósito corresponde a un objetivo. Por ejemplo, considere un embalse con dos propósitos: generación de energía y abastecimiento de agua; si hacemos coincidir los objetivos con los propósitos, éstos serían cuantificados en unidades de energía y unidades de agua entregada para abastecimiento. Es evidente entonces, que si las soluciones halladas al problema se grafican en un plano definido por dos ejes coordinados que representen los objetivos (propósitos), se obtendrá la curva de transformación entre esos objetivos.

Dos metodologías de análisis multiobjetivo que pueden ser usadas en la optimización de la operación de un embalse con múltiples propósitos son el método de las restricciones y las funciones de valor multiatributo. El método de las restricciones plantea la necesidad de convertir el problema de múltiples objetivos en un problema de un objetivo. Para este caso se puede tomar como objetivo a optimizar -objetivo primario- uno de los objetivos propuestos y colocar como restricciones los demás objetivos (objetivos secundarios) (Goicochea y otros,1981). En el caso del uso de la Función de Valor Multiatributo (FVM) como método de análisis multiobjetivo se sugiere el uso de la Programación Dinámica (PD) estocástica como técnica de

optimización. En este caso se trata de maximizar la suma de las utilidades agregadas en cada etapa.

### 3. CONFIABILIDAD ASOCIADA A LOS OBJETIVOS

Al considerar el caso particular del análisis de la operación de sistemas de recursos hidráulicos, es obvio que el decisor se enfrenta ante un problema afectado por factores que no pueden conocerse con seguridad. La incertidumbre surge debido a la naturaleza estocástica de procesos meteorológicos tales como la evaporación y precipitación; de manera similar, el crecimiento demográfico y las tasas futuras de consumo per cápita de agua y energía en las ciudades no se conocen con cierta seguridad de antemano. De igual manera, la imposibilidad de prever la falla en los equipos mecánicos, es también una fuente de incertidumbre.

La solución al problema de operación de embalses dentro de un contexto estocástico permite evaluar el riesgo asociado a las diferentes políticas de operación; así mismo, también brinda la posibilidad de estimar la confiabilidad asociada a cada objetivo que se persigue con la operación. La confiabilidad asociada a un objetivo indica la probabilidad de que el volumen de agua entregado desde el embalse para el cumplimiento de éste, sea mayor o igual a la meta propuesta de dicho objetivo.

En el caso de la generación de energía hidroeléctrica es usual asignar como característica de un aprovechamiento hidroeléctrico la confiabilidad asociada a la energía, que indicará la probabilidad de que el caudal a turbinar sea mayor o igual a la meta propuesta en el período más crítico, usualmente un mes de verano; es decir, aquel mes en el cual el embalse se encuentra el mayor número de veces en la imposibilidad de suministrar lo que de él se demanda (ocurre falla).

En forma similar puede definirse la confiabilidad asociada a otros propósitos del aprovechamiento, ya que los requerimientos de éstos están relacionados con el volumen de agua almacenado. Si se consideran diferentes metas o niveles de logro de un objetivo (propósito), puede obtenerse la confiabilidad asociada a cada nivel de logro del mismo.

Las curvas de transformación entre pares de objetivos cuando se introduce el concepto de confiabilidad asociado a éstos, da lugar a gráficos en donde el logro de cada objetivo tiene asociado un nivel de confiabilidad. La confiabilidad asociada a los objetivos (propósitos) puede ser calculada mediante el uso de la Programación

Dinámica Estocástica (Método de Monte Carlo), fijando el nivel de logro del objetivo secundario -objetivo considerado como restricción- y se optimiza el objetivo primario, utilizando varias situaciones hidrológicas posibles. Posteriormente, se calcula el número de situaciones en las cuales se cumplió el nivel de logro o meta propuesta del objetivo secundario, con lo cual puede estimarse la confiabilidad asociada al objetivo mediante la relación entre el número de situaciones en que no hubo falla (se cumplió la meta) y el total de las situaciones consideradas. El logro del objetivo primario (valor óptimo del objetivo) hallado para cada situación hidrológica considerada, permitirá definir la confiabilidad asociada a cada nivel de logro de éste.

### 4. OPERACION OPTIMA DEL EMBALSE RIOGRANDE II

Se describe a continuación el análisis de la operación óptima del embalse con múltiples propósitos Riogrande II. La información que se presenta a continuación acerca del aprovechamiento fue tomada de las referencias: EPM (1982, 1983, 1984, 1991). Adicionalmente, la información se complementó con datos entregados por la firma Integral Ltda., encargada del diseño de este proyecto. La Tabla 1 sintetiza las principales características del proyecto multipropósito Riogrande II.

Riogrande II es un proyecto que dada su localización cercana al Valle de Aburrá y la magnitud de su caudal, puede cumplir ventajosamente con los siguientes propósitos:

1. Suministro de agua potable para el área metropolitana del Valle de Aburrá.
2. Generación hidroeléctrica.
3. La desviación del río Grande al río Medellín a través de la central de La Tasajera se considera un beneficio importante para el propósito de saneamiento del río Medellín.
4. Desde el punto de vista de producción de energía, es muy importante la regulación del embalse del proyecto para el proyecto Porce II ubicado aguas abajo del proyecto Riogrande II.

Debido a que la operación de Riogrande II está sujeta a cumplir con la demanda para acueducto del Valle de Aburrá, la cual ya está fijada para el sistema y por lo tanto no necesita optimizarse, sólo se utilizó en este caso el

método de las restricciones para mostrar la influencia que tiene la demanda de acueducto sobre la producción energética del proyecto.

Para el análisis de la operación óptima de Riogrande II se consideraron los dos propósitos principales del aprovechamiento: generación de energía eléctrica y suministro de agua potable. Los otros dos propósitos no se consideraron debido a la poca evaluación que se ha hecho de ellos. La operación óptima buscará entonces maximizar la energía generada sujeta al cumplimiento de la demanda para acueducto y de las restricciones físicas del sistema.

TABLA 1. Características del Proyecto Riogrande II

| Característica                       | Valor               |                      |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|
| * Generación                         | Niquía              | Tasajera             |
| Capacidad Instalada (MW)             | 21                  | 300 MW               |
| Caudal de Diseño (m <sup>3</sup> /s) | 20                  | 40                   |
| Turbina Tipo                         | Pelton              | Pelton               |
| Salto Neto (m)                       | 393                 | 886                  |
| Eficiencia                           | 0,89                | 0,895                |
| Cota Generación (m.s.n.m)            | 1.853               | 1.337                |
| Energía Firme Anual (GWh)            | 156                 | 1.338                |
| Coefic. de Pérdidas K                | 0,3537              | $2,9345 \times 10^2$ |
| * Embalse y Presa                    |                     |                      |
| Altura Presa                         | 65 m                |                      |
| Volumen Máximo                       | 245 Hm <sup>3</sup> |                      |
| Cota Volumen Máximo                  | 2.271,72 m.s.n.m    |                      |
| Volumen Mínimo                       | 135 Hm <sup>3</sup> |                      |
| Cota Volumen Mínimo                  | 2.255,00 m.s.n.m    |                      |
| Volumen Util                         | 110 Hm <sup>3</sup> |                      |
| Cota Vertimiento                     | 2.270,00 m.s.n.m    |                      |

La función objetivo es representada como la suma de la energía generada en cada etapa (meses) del algoritmo de programación dinámica. Para tener presente que la energía generada en verano es más valiosa que la generada en invierno, se consideraron los factores de ponderación para la energía de verano e invierno utilizados por ISA.

En la actualidad las Empresas Públicas de Medellín, entidad dueña del proyecto, aún no ha realizado la proyección definitiva del suministro de agua potable que será exigida al embalse de Riogrande II para atender la demanda para acueducto, ya que su definición exige el estudio de múltiples aspectos. Ante la carencia de una información precisa acerca de la demanda de agua potable que se exigirá al embalse de Riogrande II, se utilizó la información consignada en los informes de factibilidad y diseño del proyecto (EPM, 1982 y 1984), con base en lo cual, y considerando la entrada en firme del proyecto para

el año de 1993, se diseñaron cuatro escenarios de demanda, los cuales se presentan en la Tabla 2.

El uso de la técnica estocástica de Monte Carlo requiere la generación de series sintéticas de caudales, para lo cual se utilizó la información histórica registrada a lo largo de 24 años en la estación RG-8 de Empresas Públicas de Medellín. Se generaron 100 series sintéticas con duración de 50 años, usando el modelo de Thomas y Fiering para la generación anual y el modelo de desagregación de Valencia y Shaake para la desagregación en períodos mensuales (Valencia, 1982).

TABLA 2. Escenarios de demanda Riogrande II

| Escenario 1 |       |                             | Escenario 2 |       |                             |
|-------------|-------|-----------------------------|-------------|-------|-----------------------------|
| Período     | Años  | Demanda (m <sup>3</sup> /s) | Período     | Años  | Demanda (m <sup>3</sup> /s) |
| 1           | 1-8   | 6                           | 1           | 1-8   | 6                           |
| 2           | 9-17  | 9                           | 2           | 9-17  | 9                           |
| 3           | 18-50 | 18 *                        | 3           | 14-21 | 12                          |
|             |       |                             | 4           | 22-50 | 18                          |
| Escenario 3 |       |                             | Escenario 4 |       |                             |
| Período     | Años  | Demanda (m <sup>3</sup> /s) | Período     | Años  | Demanda (m <sup>3</sup> /s) |
| 1           | 1-8   | 6                           | 1           | 1-8   | 6                           |
| 2           | 9-13  | 9                           | 2           | 9-17  | 9                           |
| 3           | 14-50 | 12                          | 3           | 18-21 | 15                          |

\* Este valor corresponde a la demanda de la población de saturación, adicionando 1 m<sup>3</sup>/s para lavado de filtros.

La operación se hizo considerando como período anual el año hidrológico, el cual inicia en Diciembre y finaliza en Noviembre, para un período de verano que incluye 5 meses que se extiende de Diciembre hasta Abril, y para un período de invierno que contiene los restantes siete meses.

Como restricciones de en la operación se consideraron:

- Límites en el almacenamiento  
Almacenamiento máximo 245 Hm<sup>3</sup>  
Almacenamiento mínimo 135 Hm<sup>3</sup>
- Límite de descarga  
Descarga máxima 40 m<sup>3</sup>/s = 103,68 Hm<sup>3</sup>/mes

Los resultados obtenidos muestran el efecto que tiene la demanda de acueducto, considerada en cada uno de los cuatro escenarios, sobre la energía firme anual (figura 1), la energía firme de invierno (figura 2) y la de verano (figura 3), para el escenario 1. En ellas se presentan las

curvas que compara el objetivo energía firme con el de suministro de agua para el acueducto, cuando se consideran confiabilidades del 97%, 95%, 90%, 85%, 80% y 70% en la energía firme.

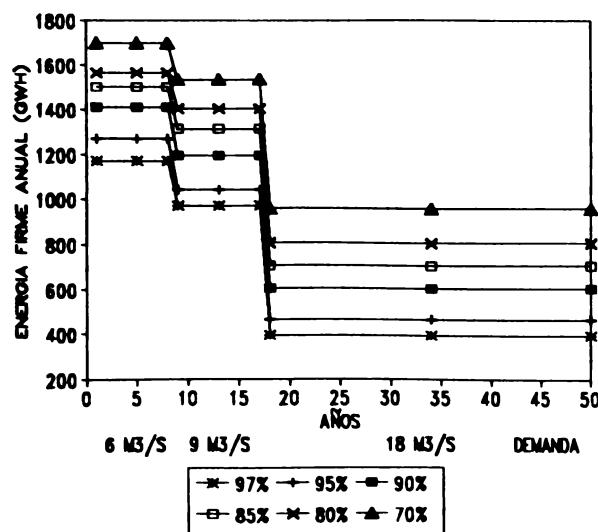


Figura 1. Energía Firme Anual para diferentes confiabilidades y el escenario 1 de demanda de agua en Riogrande II.

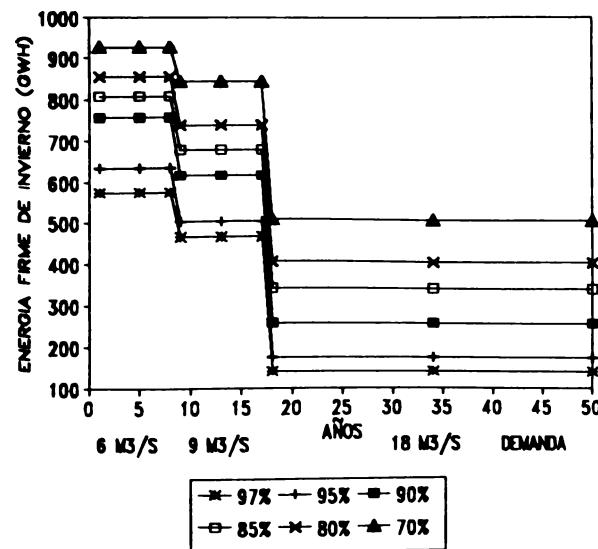


Figura 2. Energía Firme de Invierno para algunas confiabilidades y el escenario 1 de demanda de agua para Riogrande II.

Tal como se observa a lo largo de las figuras mencionadas, las curvas que comparan los dos objetivos son graficadas en forma de escalones, lo cual presenta con mayor claridad

el efecto que tiene la variación en la demanda del acueducto sobre la producción energética, es decir pueden leerse las tasas de intercambio entre objetivos con mayor facilidad. Además, la forma en escalones de las curvas obtenidas refleja la particularidad que tiene la operación de Riogrande II, pues el problema no es estacionario, ya que la demanda para acueducto aumenta durante el período de operación.

Al calcular la confiabilidad para cada tramo se encontró que prácticamente toda la gama de demandas consideradas en los escenarios (rango de caudal entre 6 y 18 m<sup>3</sup>/s) se cumplen con una confiabilidad del 100%. Por lo tanto puede decirse que en términos generales, el embalse no tiene problemas en el cumplimiento del suministro solicitado para el acueducto en sus diferentes etapas de construcción.

Los resultados encontrados permiten hacer las siguientes observaciones:

- Es notoria (y obvia) la caída en la producción energética por el aumento en la atención de la demanda para acueducto.

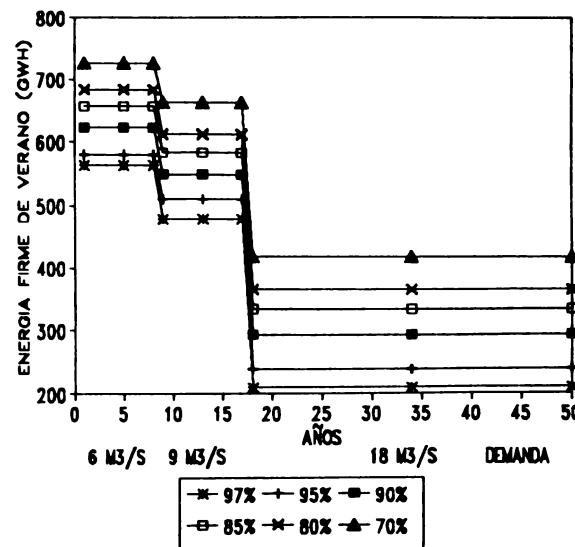


Figura 3. Energía Firme de Verano para algunas confiabilidades y el escenario 1 de demanda de agua para Riogrande II.

- También se observa en las gráficas que presentan los resultados de la operación, el aumento de la energía firme cuando disminuye la confiabilidad.
- En las gráficas se pueden leer con facilidad las tasas de

intercambio entre objetivos, pues al incrementarse el caudal demandado para acueducto, la energía firme disminuye. Lo anterior, permite evidenciar el sacrificio de un propósito al mejorar el otro.

- Comparando la producción energética que se alcanza en cada período de acuerdo con la demanda para acueducto, es notorio que aquella es independiente del tiempo en que entra la nueva etapa de acueducto y de la duración o longitud del período.
- La consideración de los factores de ponderación de energía para los períodos de verano e invierno en la función objetivo, se refleja en las energías firmes obtenidas para dichos períodos. Analizando el escenario 1 (Figuras 2 y 3), se observa cómo para el período comprendido entre el año 18 y el año 50 (último tramo), la energía firme de verano para las mayores confiabilidades, 97%, 95% y 90%, es superior que la de invierno para el mismo período.
- La decisión futura de incrementar el suministro de agua desde Riogrande II para el acueducto del Valle de Aburrá, afectaría la generación de energía del proyecto e implicaría la liberación parcial de la fuente La Fe o de algunas de las fuentes menores que abastecen de agua potable al Valle de Aburrá en la actualidad, con lo cual el agua substituida podría ser utilizada para el abastecimiento de agua potable a otras comunidades, la generación eléctrica u otro uso cualquiera. Lo anterior refleja el carácter multiobjetivo del problema.

## 5. OPERACION OPTIMA DEL EMBALSE MULTIPROPOSITO URRA I

Se presenta a continuación el análisis de la operación óptima del proyecto multipropósito Urrá I. La información consignada aquí del proyecto multipropósito Urrá I fue tomada básicamente de las referencias: ISA (1988, 1991) y CORELCA (1988); además, la Oficina de Planeación de ISA brindó la última información con la cual simula en la actualidad la operación del proyecto.

El proyecto hidroeléctrico de Urrá está localizado en el municipio de Tierralta, al sur del departamento de Córdoba y está diseñado para una capacidad de 340 MW en cuatro unidades de 85 MW cada una. La producción energética garantizada (energía firme) del proyecto dentro del Sistema Interconectado se estima en 1.050 GWh/año y una generación media de 1.500 GWh/año, con un embalse regulador de 1.194 Hm<sup>3</sup> de volumen útil, en un área máxima de 78 Km<sup>2</sup>.

La presa del proyecto Urrá I tiene una doble función que, además de su objetivo de generación eléctrica, cumple con la función de regular el río Sinú, una de las necesidades de la región desde hace muchos años. La Tabla 3 sintetiza las principales características del proyecto multipropósito Urrá I.

El hecho de considerar el proyecto Urrá I como multipropósito presenta implicaciones importantes: para el Sector Eléctrico representa energía adicional para atención de la demanda, presentándose pérdidas de generación por el control de crecientes; para el Sector Agropecuario, recuperación de tierras anegadas, mejoramiento en las actividades de riego y drenaje en época de estiaje, etc.; y para otros sectores de la economía, ofrece la oportunidad de incursionar en la agroindustria en una de las mejores tierras de Colombia.

TABLA 3. Características del Proyecto Urrá I

| Característica            | Valor                     |
|---------------------------|---------------------------|
| * Generación - Conducción |                           |
| Capacidad Instalada       | 340 MW                    |
| Caudal de Diseño          | 700 m <sup>3</sup> /s     |
| Número de Unidades        | 4                         |
| Número de Conducciones    | 4                         |
| Longitud Conducción       | 245 m                     |
| Diámetro conducción       | 6,5 m                     |
| Rugosidad de Manning      | 0,02                      |
| Eficiencia                | 0,873                     |
| Cota Generación           | 72,6 m.s.n.m              |
| Energía Firme Anual       | 986,8 GWh                 |
| Energía Firme Verano      | 325,7 GWh                 |
| Energía Firme Invierno    | 661,1 GWh                 |
| Coefic. de Pérdidas K     | 4,6615 x 10 <sup>-5</sup> |
| * Embalse                 |                           |
| Volumen Máximo            | 1.725,0 Hm <sup>3</sup>   |
| Cota Volumen Máximo       | 128,5 m.s.n.m             |
| Volumen Mínimo            | 531,0 Hm <sup>3</sup>     |
| Cota Volumen Mínimo       | 107,0 m.s.n.m             |
| Volumen Util              | 1.194,0 Hm <sup>3</sup>   |
| Cota Lecho Río            | 70,0 m.s.n.m              |
| * Restricciones           |                           |
| Caudal Requerido Riego    | 150 m <sup>3</sup> /s     |
| Caudal Máximo descarga    | 850 m <sup>3</sup> /s     |

#### - Efectos sobre el Sector Eléctrico

La producción energética garantizada del proyecto dentro del Sistema Interconectado se estima en 1.050 GWh/año (ISA, 1991). El operar el embalse del proyecto Urrá para controlar inundaciones, conduce a que se mantenga el volumen de agua embalsada en un nivel inferior al que podría mantenerse si operara exclusivamente para generación de energía eléctrica, lo cual lleva además a una pérdida de cabeza hidráulica, o equivalentemente a una pérdida de potencia confiable y por ende una pérdida de energía firme.

Según ISA (1991) se estima que la operación del embalse para el control de inundaciones produce una pérdida de energía firme anual de 0,3 % (3 GWh). Dicha pérdida se discrimina en una disminución del 2,1% en verano (6,5 GWh), que no se ve compensada con el incremento del 0,6% (3,5 GWh) en el invierno. La pérdida de energía secundaria se encuentra en el período de invierno, representando un total anual de 9,1% (50 GWh), y en cuanto a la energía media, ésta se ve disminuida en un 3,7% (53 GWh).

Otro efecto importante, tiene que ver con el hecho de operar el embalse con una curva de alerta para controlar crecientes en el período de invierno de tal forma que no se desembalse un caudal mayor a 850 m<sup>3</sup>/s (ISA, 1988), y mantener un caudal firme de 150 m<sup>3</sup>/s para riego, en el período de verano.

#### - Efectos sobre el Sector Agropecuario

En el estudio llevado a cabo por la firma Econometría Ltda (CORELCA, 1988), se establecen algunas conclusiones con relación a las perspectivas de uso múltiple del proyecto Urrá I para el Sector Agropecuario.

Dentro de esta evaluación se tuvo como objetivo específico el cálculo del efecto del componente agrícola dentro del proyecto de uso múltiple, planteándose cuatro escenarios de evaluación y considerando solamente las inversiones en las obras de adecuación para riego y drenaje.

Entre los principales resultados de la evaluación de los diferentes escenarios, cabe señalar que las áreas de beneficio directo del proyecto son 44.390 Ha. en los escenarios I y II y 74.909 Ha. en los escenarios III y IV. Los beneficios acumulados en 25 años, varían de \$18.837 millones de pesos constantes de Diciembre de 1987 a \$135.760 millones (US\$71,4 millones a US\$514,8 millones) según se pase del escenario I al IV. En valor

presente neto, estos beneficios netos serían de \$6.839 millones (US\$25,9 millones) para el escenario I o de \$ 29.028 millones (US\$110,1 millones) en el escenario IV.

Las inversiones del Estado y los propietarios en obras de drenaje representan (en valores constantes de 1987) \$10.830 millones (US\$41,1 millones) y añadiendo riego llegan a \$26.230 millones (US\$99,5 millones), cifra relativamente pequeña en relación a los beneficios esperados.

En cuanto a los requerimientos de agua para riego, se tiene que los 150 m<sup>3</sup>/s, que se tomaron como volumen mínimo en los meses de estiaje, son suficientes para regar las 55.000 Ha. propuestas en riego, y aún más, el volumen de agua disponible serviría para regar cerca de 100 mil hectáreas.

#### - Otros efectos

Adicionalmente se han identificado entre otros los siguientes efectos que no han sido tenidos en cuenta en los anteriores numerales y que serían consecuencia de la construcción del proyecto.

- \* Mejora en el drenaje natural de 16.000 hectáreas cerca de las márgenes del río.
- \* Regulación del crecimiento de la Ciénaga Grande de Lorica por mejoras en el drenaje del canal principal del Distrito de Riego Córdoba II.
- \* Recuperación de 10.000 hectáreas desecadas en la Ciénaga Grande de Lorica potencialmente disponibles para un programa de distribución social.
- \* El incremento de la producción agropecuaria en Córdoba lleva consigo a una serie de beneficios sociales adicionales, tales como mayor generación de empleo, más abundante oferta de alimentos, etc.
- \* Atracción y estímulos a la agroindustrialización del Valle del Sinú.
- \* Capacitación humana y fomento industrial.
- \* Introducción de nuevas técnicas de trabajo.
- \* Mejoramiento de vías de comunicación con centros económicos importantes.
- \* Motivación turística sobre la zona.

Para resolver el problema de operación de Urrá I, éste se planteó como un problema de optimización que pudiera ser resuelto mediante el uso de las dos metodologías de análisis multiobjetivo propuestas: el método de las restricciones usando la Programación Dinámica Estocástica Implícita (método de Monte Carlo); y la metodología que utiliza la Función de Valor Multiatributo (FVM). A continuación se describe la aplicación de ambas metodologías a la operación del proyecto Urrá I.

### 5.1. Uso del método de las restricciones

Como se señaló anteriormente, los propósitos del proyecto Urrá I son: la generación de energía, el riego y el control de inundaciones. Como función objetivo se definió la maximización de la energía generada por el proyecto; los otros dos objetivos relacionados con el riego y el control de inundaciones se consideraron como restricciones. La función objetivo fue representada como la suma de la energía generada en cada etapa (mes), afectándola por los factores de ponderación utilizados por ISA para la energía de verano e invierno.

Para la generación de las series sintéticas de caudales se utilizó la información histórica suministrada por Planeación de ISA, que es registrada por las estaciones El Limón y Angostura sobre el río Sinú, las cuales son manejadas por el HIMAT. Utilizando el modelo de Thomas y Fiering para la generación anual y desagregando los valores con el modelo de Valencia y Shaake (Valencia, 1982), se generaron 100 series sintéticas con duración de 50 años.

Se consideraron dos tipos de restricciones: el primero son las llamadas físicas y el segundo son las denominadas operacionales, que para este caso son las restricciones de riego y control de inundaciones.

#### Restricciones físicas

- Límites en el almacenamiento
 

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Almacenamiento máximo: | 1.725 Hm <sup>3</sup> |
| Almacenamiento mínimo: | 531 Hm <sup>3</sup>   |
- Límite en la descarga
 

|                  |                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------|
| Descarga máxima: | 700 m <sup>3</sup> /s = 1.814,4 Hm <sup>3</sup> |
|------------------|-------------------------------------------------|

#### Restricciones operacionales

- Riego: Corresponden al caudal mínimo requerido aguas abajo del proyecto para riego durante el período de verano. Se definieron tres caudales objetivo: 150 m<sup>3</sup>/s (caudal sugerido por ISA, 1991); 175 m<sup>3</sup>/s y 200 m<sup>3</sup>/s.
- Control de inundaciones: Estas restricciones indican el caudal máximo que puede ser desembalsado sin causar daños aguas abajo. Se establecieron dos caudales

máximos de descarga: 850 m<sup>3</sup>/s (caudal sugerido por ISA, 1988) y 950 m<sup>3</sup>/s.

En la operación de Urrá I se buscó analizar el efecto que tiene sobre la energía firme la operación con restricciones para riego e inundación, para lo cual se generaron soluciones no inferiores que permitieran construir la curva de transformación entre los objetivos considerados. Para cada escenario considerado (variación del caudal para riego o para inundación o combinaciones) se estableció la confiabilidad asociada a cada nivel de logro de los objetivos, es decir los caudales considerados en cada escenario. La Tabla 4 presenta la confiabilidad hallada para cada escenario.

Tal como se observa en la Tabla 4, las confiabilidades asociadas al riego y/o al control de inundaciones son bastante altas, prácticamente puede decirse que se alcanzan confiabilidades del 100%. Lo anterior significa que el proyecto puede incrementar fácilmente el suministro recomendado para riego (150 m<sup>3</sup>/s) hasta 200 m<sup>3</sup>/s o aún hasta un caudal mayor, garantizando el suministro con una alta confiabilidad. Con respecto al propósito del control de inundaciones se observa que puede operarse el embalse con la restricción de no descargar un caudal mayor al recomendado (850 m<sup>3</sup>/s) sin presentarse falla alguna. Así podría pensarse en establecer un caudal aún más restrictivo (caudal menor que 850 m<sup>3</sup>/s) con el objeto de aumentar el margen de seguridad en el control de inundaciones aguas abajo del embalse.

Inicialmente se operó el embalse considerando únicamente la maximización de la energía sin ninguna restricción de riego o inundación, con el objeto de poseer un punto de referencia para cuantificar el efecto que tienen las restricciones sobre la producción energética del proyecto. La Tabla 5 presenta la energía firme anual, de verano e invierno que se logra al operar el embalse sin ninguna restricción operacional.

El efecto sobre la energía firme al considerar las restricciones operacionales de riego e inundación, es presentado gráficamente con las curvas de transformación para los objetivos considerados. La Figura 4 presenta la curva de transformación para la energía firme anual y el riego (las de energía firme de invierno y de verano son similares); la Figura 5 relaciona los objetivos energía firme anual y control de inundaciones (las de energía firme de invierno y de verano son similares); y las Figura 6 y 7 presentan las curvas de transformación para los tres objetivos, energía firme anual riego-inundación. En estos gráficos aparece en el eje de las abscisas los niveles de logro del riego o del control de inundación (caudales objetivo considerados - Tabla 4), con su confiabilidad

asociada. Las curvas mostradas fueron construidas para confiabilidades en la energía firme del 97%, 95%, 90%, 80%, 70% y 60%.

**TABLA 4.** Confiabilidad de los escenarios de control de inundaciones y riego.

| Escenario             | Caudal objetivo<br>m <sup>3</sup> /s | Confiabilidad<br>% |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Riego                 | 150                                  | 99,9               |
|                       | 175                                  | 99,5               |
|                       | 200                                  | 98,5               |
| Inundación            | 850                                  | 100                |
|                       | 950                                  | 100                |
| Inundación y Riego    | Confiabilidad Riego                  |                    |
|                       | 850 m <sup>3</sup> /s                | 99,9               |
| 950 m <sup>3</sup> /s | 150                                  | 99,9               |
|                       | 200                                  | 98,5               |

**TABLA 5.** Energía firme de Urrá I para operación sin restricciones

| Período  | Energía Firme GWh |        |        |        |        |        |
|----------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 97%               | 95%    | 90%    | 80%    | 70%    | 60%    |
| Anual    | 1013,6            | 1053,7 | 1123,9 | 1214,8 | 1282,1 | 1340,1 |
| Verano   | 278,9             | 287,4  | 305,1  | 326,2  | 344,8  | 361,1  |
| Invierno | 693,3             | 725,0  | 780,4  | 859,7  | 915,7  | 965,9  |

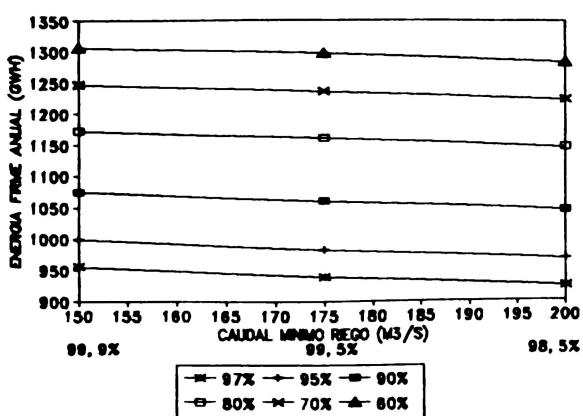


Figura 4. Curva de transformación entre la energía firme anual y el caudal mínimo de riego para Urrá I.

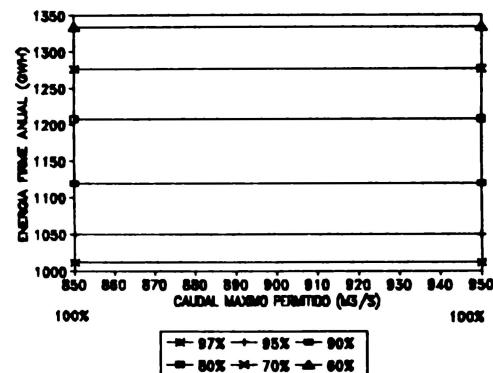


Figura 5. Curva de Transformación entre la energía firme anual y el caudal máximo permitido para control de inundaciones en Urrá I.

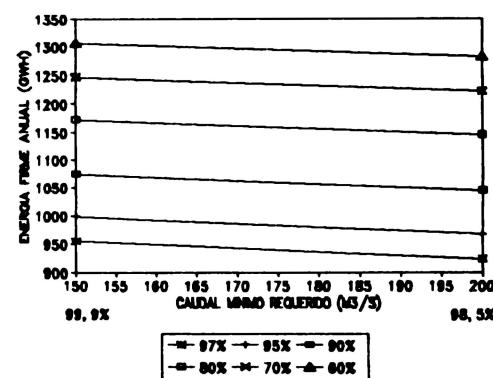


Figura 6. Curva de Transformación entre la energía firme anual y el caudal mínimo de riego con un caudal máximo de desembalse de 850m³/s para Urrá I.

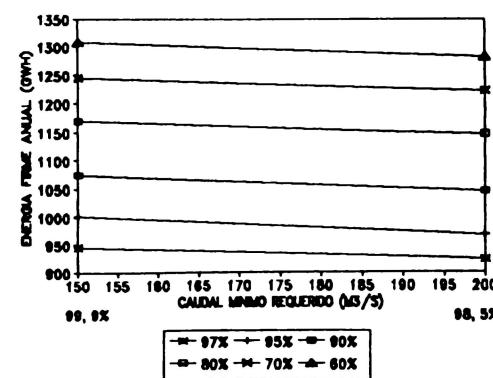


Figura 7. Curva de Transformación entre la energía firme anual y el caudal mínimo de riego con un caudal máximo de desembalse de 950m³/s para Urrá I.

Con respecto al procedimiento utilizado para la obtención de las curvas de transformación y los resultados logrados, se hacen las siguientes observaciones:

- Con el método de las restricciones sólo se generaron algunos elementos del conjunto de soluciones no inferiores.
- Como se esperaba, la energía firme del proyecto para una confiabilidad dada disminuye muy poco (al no ser usos excluyentes) con el incremento del nivel de exigencia de la restricción de riego.
- El pequeño efecto que muestra la energía firme ante la variación en la demanda de agua para riego (ver Figura 4), unido a las altas confiabilidades en el suministro de agua para el riego, permite pensar en que un aumento del caudal recomendado para riego ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) no afectaría en mayor medida la producción energética de Urrá I.
- Los resultados relacionados con el control de inundaciones desplegados en las Figura 5, muestran claramente el efecto prácticamente nulo que tiene la variación de esta restricción para caudales entre  $850$  y  $950 \text{ m}^3/\text{s}$ , sobre la producción energética y sobre el riego.
- Al calcular el efecto que tiene sobre la producción energética - energía firme anual - el operar Urrá I considerando el riego y/o el control de inundaciones se confirma la estimación hecha por ISA (1991) relacionada con el efecto que tiene sobre la producción energética la operación de Urrá I considerando el control de crecientes; esta empresa estimó una pérdida de energía firme anual del  $0,3\%$ , y resultados similares se obtuvieron en este estudio.
- La operación óptima de Urrá I como problema de análisis multiobjetivo que es, no tiene solución única, pues la solución está constituida por el conjunto de soluciones no inferiores. Para la selección de una alternativa de operación del proyecto por parte del ente decisor, en la cual se fije el logro de cada objetivo, se necesita un proceso adicional que considere la estructura de preferencias del decisor.

## 5.2 Uso de las funciones de valor

Para resolver el problema de operación de Urrá I, éste se planteó como un problema de optimización que pudiera ser resuelto mediante el uso de la Programación Dinámica Estocástica (método de Monte Carlo). Para llevar a cabo tal propósito se utilizaron la mayor parte de los elementos y características definidas para la aplicación del método de las restricciones. Ahora para utilizar las funciones de valor, las restricciones físicas del sistema, como los límites de almacenamiento y de descarga, se mantendrán iguales;

mientras que las restricciones operacionales (iego y control de inundaciones) serán manejadas a partir de la definición de las funciones de valor asociadas a estos propósitos del sistema.

Para la definición de la función de valor correspondiente al objetivo (propósito) de generación de energía, se contemplaron los siguientes elementos:

- El objetivo se considera muy importante para el decisor
- La cuantificación de la energía generada por el proyecto está dada en términos de la energía firme anual
- La energía generada en verano es más valiosa que la de invierno.

Lo anterior permitió definir dos funciones de valor, una para la energía de verano y otra para la de invierno. La energía de verano se representó por una curva de valor cóncava hacia abajo, que responde a la importancia de generar la mayor cantidad de energía en este período. La ecuación correspondiente a esta función está dada por la expresión:

$$u_{v1} = a(1 - e^{bz_v})$$

donde  $z_{v1}$  es la energía generada durante el período  $v$  de verano (meses diciembre hasta abril),  $u_{v1}$  es el valor obtenido para una generación  $z_{v1}$ , y  $a$ ,  $b$  son los parámetros de la ecuación.

Para la estimación de los parámetros  $a$  y  $b$  se tomó la energía firme anual ( $986,8 \text{ GWh}$ ; con promedio mensual de  $82,2 \text{ GWh/mes}$ ) como referencia, asociando un valor de  $0,85$  a la obtención de esta energía. Además, se asocia el mayor valor (uno), al doble de la generación de energía firme promedio mensual ( $166 \text{ GWh/mes}$ ) o a una generación mayor. Luego, los puntos que permiten definir la curva de valor están dados por:

$$\begin{aligned} u_{v1}(z_{v1}) &= 0 && \text{para } z_{v1} = 0 \\ u_{v1}(z_{v1}) &= 0,85 && \text{para } z_{v1} = 82,2 \text{ GWh/mes} \\ &&& \quad (\text{para } 986,8 \text{ GWh energía firme anual}) \\ u_{v1}(z_{v1}) &= 1 && \text{para } z_{v1} \geq 166 \text{ GWh/mes} \end{aligned}$$

Lo cual permitió definir los parámetros para la energía de verano como  $a = 1,032$  y  $b = 3,469$ .

El criterio relacionado con la energía de invierno se representó mediante una curva en forma de hidrógrafa, con la cual se buscó dar el máximo valor a una generación igual a la energía firme y para las mayores o menores a ésta asignar un valor menor. El uso de una curva de valor

de esta forma podría justificarse por la colocación de la energía generada en el mercado. La ecuación que corresponde a la curva utilizada es de la forma:

$$u_{11}(z_{11}) = a(z_{11})^5 + b(z_{11})^4 + c(z_{11})^3 + d(z_{11})^2 + ez_{11}$$

con parámetros a, b, c , d y e estimados a partir de los siguientes puntos:

$$\begin{aligned} u_{11}(z_{11}) &= 0 \quad \text{para } z_{11} = 0 \text{ GWh} \\ u_{11}(z_{11}) &= 0,01 \quad \text{para } z_{11} = 16,65 \text{ GWh} \\ u_{11}(z_{11}) &= 1 \quad \text{para } z_{11} = 83 \text{ GWh} \\ u_{11}(z_{11}) &= 0,55 \quad \text{para } z_{11} = 133 \text{ GWh} \\ u_{11}(z_{11}) &= 0,4 \quad \text{para } z_{11} \geq 166 \text{ GWh} \end{aligned}$$

La curva de valor obtenida en este caso tiene parámetros  $a=-19,580$ ,  $b=67,998$ ,  $c=-80,230$ ,  $d=34,862$  y  $e=2,649$ .

Para la definición de la curva de valor correspondiente al propósito de suministro de agua para riego (objetivo 2), éste se consideró como un objetivo indiferente, es decir que el valor asignado es proporcional al logro del objetivo. Lo anterior puede representarse por una curva de valor que corresponda a la ecuación:

$$u_{12}(z_{12}) = z_{12}, \quad 0 \leq u_{12} \leq 1$$

donde  $z_{12}$  es la cantidad de agua entregada para riego durante el período t de verano (meses de diciembre hasta abril),  $u_{12}$  es el valor asignado por un suministro de agua para riego de  $z_{12}$ . Dado que del riego sólo tiene sentido hablar durante los períodos de verano, para los períodos de invierno se asignó un valor nulo a este objetivo.

En la definición de la curva de valor para el tercer propósito de Urrá I - control de inundaciones - se consideró que éste era de gran importancia alcanzarlo, por lo cual se le asoció una curva de valor cóncava hacia abajo. La curva de valor asociada a este objetivo corresponde a una ecuación similar a la definida para la energía de verano, a saber:

$$u_{13}(z_{13}) = a(1 - e^{-bz_{13}})$$

donde  $z_{13}$  es el caudal descargado aguas abajo durante el mes de invierno t;  $u_{13}$  es el valor otorgado a una descarga  $z_{13}$ , los parámetros a y b se estimaron en 1,198 y 1,801 respectivamente. Para los meses de verano no se asignó ningún valor a este propósito.

La función de retorno de cada etapa (mes) para la

aplicación de la Programación Dinámica Estocástica, se consideró igual a la agregación de las funciones de valor de los tres objetivos, considerando como regla de agregación la aditiva (Goicoechea y otros, 1982). La agregación de las funciones de valor individuales es la llamada Función de Valor Multiatributo (FVM), a saber:

$$U_t(\underline{Z}_t) = \sum_{i=1}^3 k_i u_{ti}(z_{ti})$$

donde  $U_t(\underline{Z}_t)$  representa la FVM obtenida en el mes t;  $\underline{Z}_t$  es el vector asociado al logro de cada objetivo en el período t, es decir  $z_{11}$  de energía,  $z_{12}$  como caudal para riego y  $z_{13}$  como caudal descargado para control de inundaciones.  $u_{ti}(z_{ti})$  son las funciones de valor de cada objetivo;  $k_i$  son constantes de escala positivas. Para estimar el parámetro  $k_i$ , el decisor debe definir los pesos  $w_i$  para cada objetivo de acuerdo con la importancia de éstos; luego a cada objetivo le corresponde la constante de escala:

$$k_i = w_i / \sum_{i=1}^3 w_i$$

donde  $w_i$  es el peso asignado al objetivo i.

La Tabla 6 presenta las constantes de escala  $k_i$  halladas para seis juegos de pesos; con estos seis juegos se quiso cubrir la estructura de preferencias, tratando de realizar un análisis de sensibilidad, de tal forma que el decisor comprenda las consecuencias que tiene el variar su estructura de preferencias (variación de los pesos).

Tal como se observa en la tabla 6, para el juego 1 todos los criterios se consideraron igualmente importantes; en el Juego 2 la energía es el criterio (objetivo) con mayor importancia; para el juego 3 se considera el riego como el objetivo más importante durante el período de verano, mientras en el invierno la energía es igualmente importante al control de inundaciones. El juego de pesos 4 presenta en el período de verano la misma importancia de los objetivos energía y riego, pero en el invierno es el control de crecientes más importante que la generación de energía. Los juegos 5 y 6 dan mayor importancia al cumplimiento de los objetivos riego y control de inundaciones. Resulta entonces claro que para el período de verano sólo se consideran los objetivos relacionados con la energía y el riego, mientras que para invierno únicamente se considera el control de inundaciones en conjunto con la generación de energía.

**TABLA 6.** Juego de pesos -constantes de escala  $k_i$ - de los propósitos energía, riego e inundaciones

| Juego de pesos | Pesos          |                | Pesos                     |          |
|----------------|----------------|----------------|---------------------------|----------|
|                | Energía Verano | Riego Invierno | C. de inundaciones Verano | Invierno |
| 1              | 0,50           | 0,50           | 0,50                      | 0,50     |
| 2              | 0,67           | 0,67           | 0,33                      | 0,33     |
| 3              | 0,33           | 0,50           | 0,67                      | 0,50     |
| 4              | 0,50           | 0,33           | 0,50                      | 0,67     |
| 5              | 0,30           | 0,20           | 0,70                      | 0,80     |
| 6              | 0,40           | 0,40           | 0,60                      | 0,60     |

Con la definición de la función de retorno de cada etapa (mes) puede establecerse la función objetivo. Para este caso se buscó maximizar la suma de las funciones de retorno (FVM) obtenidas a lo largo del horizonte de operación, el cual se consideró de 50 años (600 períodos mensuales). Luego el problema de operación puede plantearse como:

$$\text{Max } \sum_{t=1}^{600} U_t(Z_t)$$

donde  $U_t(Z_t)$  representa el retorno de la etapa  $t$ .

Sería altamente recomendable pensar en introducir un factor de descuento en la función objetivo, buscando con ello tener en cuenta el factor tiempo; sin embargo, para los fines demostrativos que se persiguen con la aplicación de esta metodología, no se consideró importante la inclusión de la tasa de descuento.

Para observar el efecto que tiene la variación en la estructura de preferencias del decisor (Tabla 6), se utilizó como parámetro de comparación la energía total generada a lo largo del horizonte de operación, a nivel anual, de verano y de invierno. La Tabla 7 muestra las energías obtenidas al operar el embalse con el modelo de Programación Dinámica utilizando una de las series sintéticas de caudales generadas para la aplicación del método de las restricciones.

Tal como puede observarse en la Tabla 7, prácticamente es nulo el efecto de la variación de la estructura de preferencias (pesos) sobre la generación de energía, pues la diferencia entre las energías generadas para los seis juegos de pesos, utilizando la misma serie sintética de caudales, es mínima- no alcanza el 1%. Así, para la generación total anual se obtuvo el máximo valor de energía para el juego de pesos 3 (53.058,8 GWh), y el mínimo de generación para el juego de pesos 2 (52.870,6 GWh), que equivale a una variación porcentual

sólo del 0,36 %.

Aun cuando el efecto sobre la energía firme no se miró en esta aplicación, los resultados obtenidos están acordes con los provenientes de la aplicación del método de las restricciones, a través del cual se pudo observar la poca influencia que tiene sobre la producción energética el considerar en la operación los propósitos de riego y control de inundaciones utilizando los valores sugeridos por la literatura (150 m<sup>3</sup>/s para riego y 850 m<sup>3</sup>/s para control de inundaciones). Por lo tanto, en el caso de aumentar la exigencia de las restricciones de riego y control de inundaciones (aumento de caudal para riego y disminución del desembalsamiento máximo para control de inundaciones), puede esperarse una efecto más notorio sobre la producción energética de Urrá, al variar el tamaño de los objetivos. Es importante resaltar nuevamente que la poca variabilidad de la energía ante cambios en los restantes propósitos, se debe en gran medida a que los propósitos de riego y control de inundaciones que en esta aplicación no son usos excluyentes con la energía, ya que sus requerimientos tienen que ver con el volumen de agua que se descarga aguas abajo del embalse, el cual en general puede ser turbinado previamente.

**TABLA 7.** Energía anual de verano y de invierno para cada juego de pesos

| Juego de pesos | Anual    | Energía en GWh de Verano | Energía en GWh de Invierno |
|----------------|----------|--------------------------|----------------------------|
| 1              | 53.028,2 | 20.839,5                 | 32.188,7                   |
| 2              | 52.870,6 | 20.824,9                 | 32.045,6                   |
| 3              | 53.058,8 | 20.850,3                 | 32.208,6                   |
| 4              | 53.057,0 | 20.884,7                 | 32.172,4                   |
| 5              | 52.971,1 | 20.892,4                 | 32.078,7                   |
| 6              | 53.044,6 | 20.830,9                 | 32.213,7                   |

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La fijación del suministro de agua que se exigirá a Riogrande II para el abastecimiento futuro de agua potable al Valle de Aburrá, en una futura etapa de la planta de tratamiento, debe enfrentarse con el uso de técnicas de análisis multiobjetivo que permitan considerar de manera explícita las implicaciones sociales y económicas que tiene una decisión de tal índole.
- Para fines más generales, sería más indicado construir las curvas de comparación entre la energía firme y el suministro de agua para acueducto, vistas en la

aplicación de Riogrande II, en forma continua. Para ello, será del caso no considerar las etapas del acueducto sino una variación del agua para acueducto de metro cúbico en metro cúbico. En el caso de este proyecto la aplicación tiene mucho sentido, puesto que el agua de Riogrande II puede utilizarse para sustituir el agua de las diferentes fuentes que en la actualidad suministran el agua al Valle de Aburrá (La Fé-Ayurá).

- Aunque la bondad de la metodología propuesta relacionada con el uso de las funciones de valor no fue evaluada plenamente en este trabajo, las características que posee al combinar una técnica de optimización con un método de análisis multiobjetivo que articula la estructura de preferencias del decisor, hacen de la metodología una buena alternativa para enfrentar el problema de operar óptimamente un embalse multipropósito. Incluso es factible extender la aplicabilidad de la metodología a sistemas de embalses con múltiples propósitos, donde la mayor dificultad radicaría en la dimensionalidad del problema, lo cual ya ha sido ampliamente trabajado por diferentes autores para las técnicas de optimización consideradas, Programación Dinámica y Programación Lineal.
- La validez de los resultados que se obtienen al aplicar herramientas de análisis multiobjetivo a la operación de embalses multipropósito, depende fundamentalmente de tres aspectos: la cuantificación precisa de los objetivos a ser considerados y el rango de variación de los mismos; la representación de la estructura de preferencias del decisor y su articulación en el proceso de optimización; y en último lugar, la habilidad de quién aplica la técnica para considerar dentro del análisis los criterios más relevantes del problema.
- Para aplicar la función de valor multiatributo, se requiere conocer cada función individual por atributo (propósito), lo cual implica que el decisor exprese sus preferencias por los efectos económicos, sociales, ambientales, políticos, etc. de cada propósito. Como se consideró que esta tarea iba más allá de los alcances de esta investigación, se realizó un ejercicio de sensibilidad con algunas suposiciones. Sin embargo, es del caso continuar esta dirección del trabajo.
- La aplicación de la metodología de análisis multi-objetivo (método de las restricciones) a los aprovechamientos múltiples: Riogrande II, un problema de operación no estacionario dada la variación en la demanda requerida para acueducto durante el horizonte de operación, y Urrá I, un problema estacionario, donde sus diferentes restricciones permanecen fijas a lo largo

del horizonte de operación; permitió mostrar la aplicabilidad de este método para resolver problemas de operación de embalses con múltiples propósitos y su potencialidad para generar curvas de comparación entre pares de objetivos (propósitos), que conforman las llamadas curvas de transformación.

- La incertidumbre en los problemas de operación se abordó a través de la estimación de la confiabilidad asociada con los objetivos (propósitos), con lo cual se mostró que la comparación entre objetivos (curva de transformación) debe brindar una información completa al decisor, ya que no es lo mismo seleccionar una alternativa que brinde un nivel de logro de los propósitos con una confiabilidad del 70%, contra una alternativa en la cual el logro de los propósitos sea un poco menor, pero garantizándose con una confiabilidad del 95%.
- La teoría de análisis multiobjetivo (curvas de transformación, regiones factibles, tasas de intercambio) se aplica a los dos casos considerados en esta tesis - Riogrande II y Urrá I - pero ahora con la inclusión de las confiabilidades asociadas a los diferentes propósitos (objetivos) de cada aprovechamiento. Así puede verse en las numerosas gráficas de resultados.
- Se recomienda la exploración de nuevas herramientas que permitan considerar dentro del análisis de la operación de un proyecto hidroeléctrico, la ocurrencia de hidrologías críticas causadas por el fenómeno El Niño y sus efectos sobre la generación de energía, con lo cual podría analizarse y preverse situaciones críticas en la generación de energía hidroeléctrica, en un país como el nuestro donde el componente hidráulico es mayoritario en el sistema de generación eléctrica.

## REFERENCIAS

- CORELCA. Perspectivas de Uso Múltiple del Proyecto Urrá I, Informe Final. Barranquilla, Colombia, Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica, 1988. 91 p.
- EPM. Aprovechamiento Múltiple del Riogrande, Estudio de Factibilidad, Informe Final. Medellín, Colombia, INTEGRAL LTDA. y Empresas Públicas de Medellín, Vol. I, II y III. Julio, 1982.
- EPM. Aprovechamiento Múltiple del Río Grande, Solicitud de Crédito al BID-BIRF. Medellín, Colombia, Dirección de Planeación, Empresas Públicas de Medellín, 1983.

- EPM. Informe de Avance de Obras, Documento No. 3-689. Medellín, Colombia, Dirección de Planeación, Unidad Planeación Generación, Empresas Públicas de Medellín. Mayo, 1991.
- EPM. Proyecto de Aprovechamiento Múltiple del Riogrande. Medellín, Colombia, Revista Empresas Públicas de Medellín, Vol. 6, No. 1-2, pp 1-173. Enero-Junio, 1984.
- Foufoula-Georgiou, E. y P. Kitanidis, Gradient Dynamic Programming for Stochastic Optimal Control of Multidimensional Water Resources Systems. *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 8, pp 1345-1359. 1988.
- Fults, D. M., L. F. Hancock, y G. R. Logan, A Practical Monthly Optimum Operations Model. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 102, No. WR1, pp 63-77. 1976.
- Giles, J. E., y W. Wunderlich, Weekly Multipurpose Planning Model for TVA Reservoir System. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 107, No. WR2, pp 495-511. Oct, 1981.
- Goicoechea, A., D. R. Y. Hansen, L. Duckstein, Multi objective Decision Analysis with Engineering and Business Applications. New York, John Wiley, 1982. 519 p.
- Heidari, M., V. T. Chow, P. V. Kokotovic, y D. D. Meredith, Discrete Differential Dynamic Programming Approach to Water Resources Systems Optimization. *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 2, pp 273-282, 1971.
- ISA. Análisis Económico del Proyecto Multipropósito Urrá I, Versión 1.0. Medellín, Oficina de Planeación, Interconexión Eléctrica S.A., 1991. 28 p.
- ISA. Proyecto de Urrá I, Impacto del Proyecto Urrá I sobre el Control de las Inundaciones en el Valle del Río Sinú. Interconexión Eléctrica S. A. y Mejía Ortiz y Cia., 1988. 168 p.
- Loucks, D. P. y P. J. Dorfman, An Evaluation of Some Linear Decision Rules in Chance - Constrained Models for Reservoir Planning and Operation. *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 6, pp 777-782. Dec., 1975.
- Mariño, M. A. y B. Mohammadi, Multipurpose Reservoir Operation Monthly Model for a Single Reservoir. *Journal of Hydrology*, Vol. 69, No. 1/4, pp 1-14. Feb, 1984.
- Mohammadi, B. y M. A. Mariño, Multipurpose Reservoir Operation Monthly Model for a Single Reservoir. *Journal of Hydrology*, Vol. 69, No. 1/4, pp 1-14. Feb, 1984.
- Tauxe, G. W., R. R. Inman, y D. M. Mades, Multiobjective Dynamic Programming with Application to a Reservoir. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp 1403-1408. Dec, 1979.
- Trezos, T. y W. W-G.Yeh, Use of Stochastic Dynamic Programming for Reservoir Management. *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 6, pp 983-996. Jun, 1987.
- Valencia, D., Optimización y Simulación en Sistemas de Recursos Hídricos. Mérida, Venezuela, CIDIAT, Serie Planificación de Recursos, PR-14, 1982. 193 p.
- Yakowitz, S. Dynamic Programming Applications in Water Resources. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp 673-696. Aug, 1982.
- Yeh, W., Reservoir Management and Operations Models: A State of the Art Review. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp 1797-1818. Dec, 1985.