ELEVACION (m)	CAPACIDAD ($10^6 m^3$)	ELEVACION (m)	CAPACIDAD ($10^6 m^3$)
196	12	226	289
198	15	228	330
200	20	230	369
202	24	232	407
204	33	234	458
206	45	236	524
208	58	238	600
210	72	240	700

5.- Gasto Efluente Inicial por el Aliviadero.

En el método de tránsito de avenidas por embalse es siempre necesario adoptar un gasto efluente inicial correspondiente al primer instante del tránsito. Se ha fijado un gasto efluente inicial de 30 m^3/seg.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

6.- Cota Estimada de la Cresta del Aliviadero.

Se ha estimado la capacidad del embalse para el propósito de riego, observando igualmente los derechos de agua, mediante un balance hidrológico donde se considera constante el área del espejo del agua. Esta capacidad ha sido supuesta como correspondiente al nivel de operación normal del embalse de propósitos múltiples.

El balance hidrológico es presentado en la Tabla 4.7. La columna (1) contiene los gastos mensuales del año 1952, que es el período más seco del registro hidrológico. La columna (2) contiene los datos mensuales de demanda bruta de riego y la columna (3)

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 4.7

BALANCE HIDROLOGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COTA DE LA CRESTA DEL ALIVIADERO

AREA MEDIA DEL ESPEJO DE AGUA = $5,2 \times 10^6 m^2$

UNIDADES = $10^6 m^3$

	1	2	3	4	5	6	7	8
MES	APORTES	DBR	DERECHOS	EVAP.	PREC.	VOL.NETO	EXC.DEM	EXC.APORTE
ENE.	24,56	55,20	29,96	0,82	0,10	-6,12	61,32	
FEB.	7,28	58,80	31,92	0,90	0,08	-25,46	84,26	
MAR.	5,80	76,83	41,70	1,02	0,12	-36,80	113,63	
ABR.	48,11	5,43	2,95	0,77	0,70	45,09		39,66
MAY.	87,11	0	2,92	0,67	1,17	84,69		84,69
JUN.	112,74	0	2,92	0,56	1,28	110,54		110,54
JUL.	129,81	0	2,92	0,56	1,28	127,61		127,61
AGO.	87,75	0	2,92	0,59	1,08	85,32		85,32
SEP.	56,88	0	2,92	0,67	0,94	54,23		54,23
OCT.	85,70	0	2,92	0,64	0,81	82,95		82,95
NOV.	46,08	0	2,92	0,64	0,49	43,01		43,01
DIC.	24,48	5,38	2,92	0,67	0,18	21,07		15,69
						TOTAL	259,21	643,70
						VOLUMEN MUERTO	11,90	
						CAPACIDAD	271,11	

ELEVACION CORRESPONDIENTE A $271,11 \times 10^6 m^3$ = 225 m.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

los valores mensuales calculados de derechos de agua.Las columnas (4) y (5) se obtienen multiplicando respectivamente, los datos de evaporación y precipitación de la Tabla 4.6 por el área media del embalse, de $5,2 \times 10^6$ m^2. El volumen neto, en la columna (6), es obtenido del balance entre las entradas y salidas de agua en el embalse, sin tomar en cuenta la demanda de riego.

VOL. NETO = APORTES - DERECHOS - EVAP. + PREC.

Si el volumen neto resulta negativo, significa que hay un déficit de agua además de la demanda bruta de riego. Este déficit sumado a la demanda bruta de riego, constituye el exceso de demanda. El exceso de demanda es la cantidad total de agua necesaria en un mes, que no puede ser garantizada por el río en su estado natural. Se tiene exceso de demanda para los meses de enero, febrero y marzo como indica la columna (7).

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Si el volumen neto es positivo y menor que la demanda bruta de riego, significa que una parte de la misma es satisfecha, pero aún en ese caso habrá exceso de demanda. Esta situación no ha ocurrido en el balance hecho.

Cuando el volumen neto es positivo y mayor que la demanda bruta de riego, significa que habrá una cantidad disponible de agua mayor que la cantidad necesaria para riego. Esta diferencia, o exceso de aporte aparece en la columna (8) y ha ocurrido desde el mes de abril hasta el mes de diciembre.

La sumatoria de los excesos de demanda mensuales encontrados es la capacidad requerida del embalse para fines de riego. En la Tabla 4.7, se observa que este volumen es de $259,21 \times 10^6 m^3$.

Como la sumatoria de los excesos de demanda es inferior a la sumatoria de los excesos de aporte, se supone que el embalse

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

puede garantizar las demandas de riego a lo largo de la vida ú - til de la obra.

Considerando el volumen muerto necesario, se llega a un volumen total de $271{,}11 \times 10^6 m^3$, que corresponde a la elevación 225 m, que es la cota adoptada para la cresta del aliviadero.

7.- Anchura del Aliviadero.

Según Aguirre (1974), los aliviaderos reproducen usualmente la superficie libre inferior de una vena de descarga de un vertedero de cresta aguda Se demuestra que la descarga por unidad de ancho, por tales vertederos es dada por,

$$q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \qquad (4.10)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

siendo,

$$C_d = f(h/w)$$

donde,

C_d = coeficiente que depende de la relación h/w.

h = lámina de agua sobre la cresta del vertedero.

w = altura de la cortina del vertedero, desde la base de la estructura hasta la cresta de la misma.

g = aceleración de la gravedad.

Se ha determinado experimentalmente que el coeficiente C_d varía con h/w según la siguiente relación,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$C_d = 0,611 + 0,08\ h/w$$

En el caso de aliviadero de presas, la lámina de agua, h, es despreciable con respecto a la altura de w, y la relación h/w tiende a cero,por lo tanto, el coeficiente C_d se aproxima a,

$$C_d = 0,611$$

Reemplazando este valor en la ecuación (4.10), y para $g = 9,81\ m/seg^2$., se tiene,

$$q = 1,80\ h^{3/2}$$

Luego, la descarga total es,

$$Q = 1,80.L.h^{3/2} \qquad (4.11)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

donde,

L = anchura del aliviadero.

La ecuación (4.11) ha sido utilizada para representar las descargas por el aliviadero de la presa, en el programa de computación desarrollado para el tránsito de avenidas por el embalse.

En el trabajo realizado por CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971), se determinó la capacidad del cauce del río Masparro en distintos tramos aguas abajo del sitio de presa. El tramo inmediatamente abajo del sitio de presa tiene capacidad para un gasto máximo instantáneo de 500 m^3/seg. Se tomó una anchura de 30 m. para el aliviadero y se ha transitado por el embalse la avenida anual de 500 años de tiempo de retorno.El hidrograma efluente resultante, ha indicado un gasto pico de 306,67 m^3/seg., dentro de las limitaciones del cauce.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Es importante observar que la disminución de la anchura del aliviadero, de acuerdo a la ecuación (4.11), implica una disminución del gasto efluente, pero requiere volúmenes mayores de almacenamiento. El aumento del ancho a su vez, permite menores volúmenes de almacenamiento, pero implica mayores riesgos de que sea sobrepasada la capacidad del cauce. La anchura de 30 m. ha sido mantenida por presentar un buen margen de seguridad con respecto a las limitaciones del cauce.

Programas de Computación.

1.- Ajuste de los Datos Máximos de Escorrentía a una Distribución Gumbel.

Este programa utiliza los subprogramas PGUMB, FGUMB y VGUMB desarrollados por Brunet-Moret (1969) y disponibles en la librería del Banco de Programas del CIDIAT. Las atribuciones de cada subprograma corresponden a las mismas funciones desempeñadas por los subprogramas PNORM, FNORM y VNORM, utilizados para el ajuste de los datos de volúmenes escurridos a una distribución log-normal. También para el caso del ajuste a la distribución Gumbel, se ha incluido instrucciones en el programa principal para la prueba de Smirnov-Kolmogorov.

En el Apéndice A, además de publicado el listado del programa, también se ha incluido, a título de ilustración, la hoja de resultados correspondiente al mes de enero. En la parte superior de la hoja aparecen los números de orden de los datos, los datos ordenados en forma creciente, las probabilidades teóricas, P_T , las probabilidades $1-P_T$ y las probabilidades empíricas P_E. En la hoja aparece también el mayor valor absoluto, DELTA MAXIMO, de las diferencias entre las probabilidades P_T y P_E. En seguida son impresos los parámetros de la distribución, calculados mediante

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

la subrutina PGUMB. En la parte inferior de la hoja aparecen indicados distintos tiempos de retorno y las probabilidades teóricas de no excedencia correspondientes,

$$T_R = \frac{1}{P(Q \geq Q_M)} = \frac{1}{1 - P(Q \leq Q_M)} = \frac{1}{1 - P_T}$$

Finalmente son tabulados los gastos correspondientes a los distintos tiempos de retorno. Esos gastos son calculados a partir de la probabilidad P_T, mediante la función VGUMB. Para el mes de enero el gasto de diseño, correspondiente a 500 años de tiempo, de retorno es de 385,48 m^3/seg.

Correspondiente a un nivel de significación del 5% y a 22 años de registro, se obtiene para el estadístico de Smirnov-Kolmogorov , por interpolación, el valor de 0,2820.(Yevjevich,1972). EL DELTA MAXIMO para el mes de enero, es de 0,1499, con lo que se acepta el ajuste al nivel del 5%. En la Tabla 4.8 son presentados esos resultados, así como los obtenidos para los demás meses y para la serie anual.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

2.- Obtención de los Hidrogramas Afluentes al Embalse.

Las entradas para este programa, conforme se observa en la Figura 4.3, son el gasto de diseño, el gasto base y el hidrograma unitario del río, en estudio.El primer paso del programa consiste en la determinación del pico del hidrograma unitario mediante comparación entre sus ordenadas. En seguida el gasto de diseño es dividido por el gasto pico del hidrograma unitario, obteniéndose entonces la precipitación efectiva. Luego, las ordenadas del hidrograma unitario son multiplicadas por la precipitación efectiva y sumadas al gasto base, obteniéndose finalmente el hidrograma de diseño a ser transitado por el embalse.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 4.8

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA DE AJUSTE DE LOS DATOS MAXIMOS DE ESCORRENTIA DEL RIO MASPARRO A UNA DISTRIBUCION GUMBEL.

Q500 = gasto correspondiente a un tiempo de retorno de 500 años (m^3/seg.)

DELTA MAXIMO = mayor valor absoluto de las diferencias entre la probabilidades empírica y teórica de no exceden cia.

	Q500	DELTA MAXIMO
ENERO	385,48	0,1499
FEBRERO	403,02	0,2745
MARZO	592,99	0,2647
ABRIL	1239,05	0,1424
MAYO	2882,17	0,1904
JUNIO	874,94	0,0718
JULIO	2520,77	0,1737
AGOSTO	1652,22	0,0645
SEPTIEMBRE	1944,73	0,1806
OCTUBRE	1878,30	0,1993
NOVIEMBRE	1058,40	0,1044
DICIEMBRE	632,99	0,1982
ANUAL	4882,70	0,1665

DELTA MAXIMO ADMISIBLE PARA 22 AÑOS DE REGISTRO Y UN NIVEL DE SIGNIFICACION DE 5% = 0,2820

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En el Apéndice A, además del listado del programa, se ha incluido las hojas de resultados relativos al mes de enero.

3.- Tránsito de las Avenidas de Diseño por el Embalse.

Este programa utiliza el Método de Iteración ilustrado por Linsley et al (1958), donde se consideran fijas las aberturas de las compuertas de la presa. El método consiste en aplicar la ecuación de continuidad para varios intervalos de tiempo consecutivos, durante el recorrido de una crecida por un sistema de almacenamiento. Este sistema puede ser un embalse ó un tramo de corriente cualquiera. La ecuación de continuidad establece que la diferencia entre los caudales de entrada y de salida en el sistema, en un determinado instante, es igual al cambio de almacenamiento ocurrido en este sistema, durante el intervalo considerado. Se utilizó la ecuación de continuidad en la siguiente forma,

$$I_1 + I_2 + \left(\frac{2S_1}{t} - O_1\right) = \frac{2S_2}{t} + O_2 \qquad (4.12)$$

La resolución de la ecuación (4.12) no es posible debido a la existencia de dos incógnitas, O_2 y S_2, por lo tanto, es necesario establecer una relación adicional entre almacenamiento y caudal para llegar a una solución.

En el caso de embalse, esta relación es fácilmente obtenida mediante la construcción de curvas que relacionan las variables O y S con el nivel del agua en el embalse. Una relación entre la elevación del nivel del agua en el embalse y el volumen almacenado se obtiene de un mapa topográfico. La ecuación (4.11) define la relación elevación-descarga.

Con los distintos pares de valores de volumen de almacenamiento, S, y de gasto efluente, O, se calcula el valor de la expresión, $\left(\frac{2S}{t} + O\right)$. Esos valores son ploteados contra los valores de O, resultando una curva tal como se ilustra en la Figura 4.7

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

juntamente con la curva elevación-capacidad.

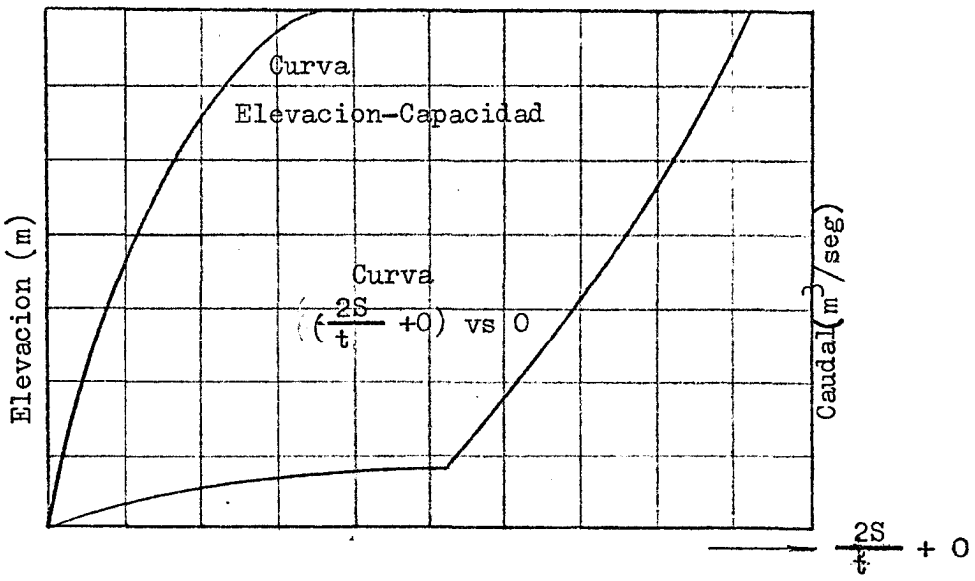


Figura 4.7 Curvas de Iteración para el Tránsito de Avenidas por Embalses.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Para la ejecución del tránsito se asume un gasto efluente inicial, con el gasto se entra en la Figura 4.7 obteniendo el valor correspondiente de $(\frac{2S_1}{t} + O_1)$, que es el miembro derecho de la ecuación (4.12). Restando dos veces de este valor, el gasto efluente inicial se obtiene el término $(\frac{2S_1}{t} - O_1)$. Sustituyendo este valor en la ecuación (4.12) se calcula el término $(\frac{2S_2}{t} + O_2)$ con el que se entra la Figura 4.7 obteniendo O_2. Este gasto corresponde a la segunda ordenada del hidrograma efluente.

Repitiendo este procedimiento hasta la última ordenada del hidrograma afluente, se obtiene todas las ordenadas del hidrograma efluente, el cual se ilustra en la Figura 4.8 junto con el hidrograma afluente. El área sombreada representa el volumen de el

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

macenamiento necesario para el control de la avenida.

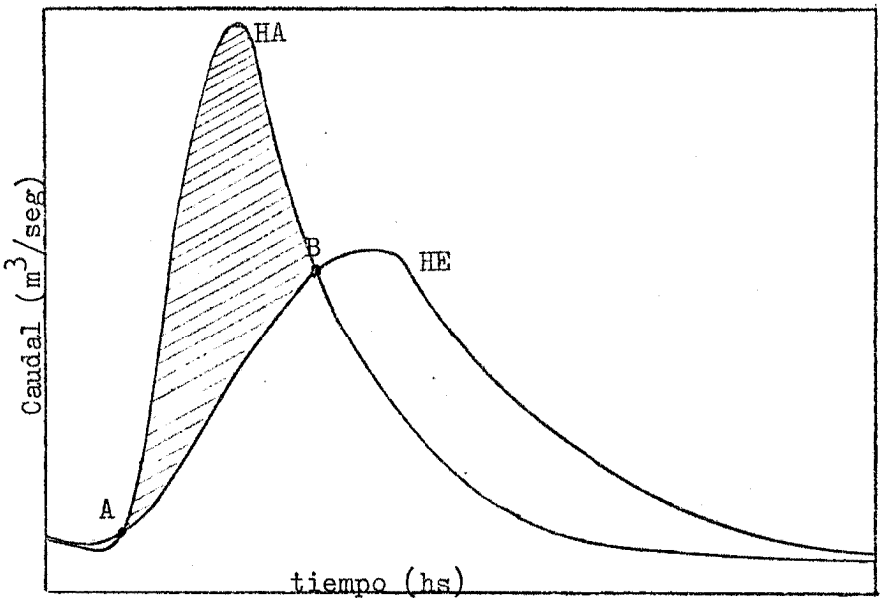


Figura 4.8 Hidrograma Afluente (HA) y Efluente (HE)

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

El listado del programa, consta del Apéndide A, así como la hoja de resultados correspondiente al mes de enero. En la Tabla 4.9 es presentado un resumen de los resultados obtenidos para los meses y para la serie anual. Esos resultados son el volumen de almacenamiento necesario y el gasto máximo del hidrograma efluente.

Capacidad del Cauce

Revelle et al (1969) proponen las restricciones (2.9) y (2.25) referentes a límites máximos mensuales, f_i, relativos a la cantidad de agua devuelta por el embalse al cauce del río. La finalidad de estas restricciones es impedir inundaciones y evitar la erosión del cauce del río.

En el tramo inmediatamente aguas abajo de la futura presa,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 4.9

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA DE TRANSITO DE AVENIDAS POR EL EMBALSE

V_j = volumen de almacenamiento necesario para el control de la avenida($10^6 m^3$) de 500 años de T.R.

Q_{MAX} = gasto maximo del hidrograma efluente (m^3/seg)

	V_j	Q_{MAX}
ENERO	4,173	35,71
FEBRERO	4,412	36,04
MARZO	7,046	39,68
ABRIL	16,321	52,53
MAYO	36,985	162,26
JUNIO	11,067	45,25
JULIO	32,523	137,65
AGOSTO	21,754	78,14
SEPTIEMBRE	25,405	98,26
OCTUBRE	24,579	93,71
NOVIEMBRE	13,709	48,91
DICIEMBRE	7,610	40,46
ANUAL	61,540	306,75

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

la capacidad del cauce es de 500 m^3/seg., valor determinado con base en gastos y velocidades instantáneas del flujo de agua. Para un cauce natural e irregular, sujeto a flujos no permanentes y de características aleatorias, la extensión de tales valores a la escala mensual de tiempo, carece de fundamento. En un intento de tomar en cuenta estas restricciones, se ha utilizado un programa de computación para correlacionar linealmente los datos de volúmenes escurridos mensualmente con los gastos máximos instantáneos correspondientes.El objetivo era obtener los volúmenes escurridos, f_i, correspondientes al gasto máximo instantáneo de 500 m^3/seg. Además de esos volúmenes, el programa calcula el coeficiente de correlación, r, y el estadístico, T, de Student. El estadístico de Student permite determinar, para un determinado nivel de significación, si la correlación es aceptable a este nivel, o sea, si el coeficiente de correlación calculado difiere significativamente de cero.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

El coeficiente de correlación es calculado por la fórmula,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} [(Xi-\bar{X})\ (Yi-\bar{Y})]}{n \cdot SX \cdot SY} \qquad (4.13)$$

donde,

r = coeficiente de correlación lineal

n = número común de observaciones entre las variables X y Y.

i = 1,..., n

Xi= datos de gastos máximos instantáneos

Yi= datos de volúmenes escurridos

$\bar{X}$ y $\bar{Y}$ = medias de los Xi y Yi, respectivamente

SX y SY = desviaciones típicas de los Xi y Yi, respectivamente.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

El estadístico T es estimado por la fórmula,

$$T = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \qquad (4.14)$$

y se distribuye según la distribución t de Student con dos grad de libertad.

En el Apéndice A aparecen el listado del programa y la hoj de resultados.Como se puede observar en esta hoja, las correla ciones hechas para los meses de enero, mayo, septiembre y octub no son aceptables.

Para el mes de febrero, que presenta el más alto coeficien de correlación, igual a 0,9744, el volumen escurrido, f_2, corre pondiente al gasto instantáneo de 500 m^3/s, es de 55,847 x 10^6 Reemplazando este valor por f_i en la restricción (2.9), se tien

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$x_t \leq 55{,}847 \times 10^6 m^3 \qquad (4.1$$

O sea, la cantidad total de agua cedida por el embalse en da mes de febrero tiene que ser inferior o igual a 55,847x10^6

Por otro lado, la restricción (2.8) establece, que esta ca tidad debe ser superior o igual a las necesidades de agua en es mes.Para el mes de febrero, se necesitan 55,20 x $10^6 m^3$ para rie y 29,96 x $10^6 m^3$ para los derechos de agua, o sea, un total de 85,16 x $10^6 m^3$. La restricción (2.8) se escribe,

$$x_t \geq 85{,}16 \times 10^6 m^3 \qquad (4.1$$

Evidentemente, las expresiones (4.15) y (4.16) son conflic tivas, lo que comprueba la falta de fundamento de las restricci nes (2.9) y(2.25) para caudales que no sean instantáneos.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En la hoja de resultados en el Apéndice A, se observa que la correlación hecha a nivel anual entre los gastos máximos instantáneos y los volúmenes escurridos, presenta un coeficiente de de correlación 0,0446. Por lo tanto, cuanto mayor es la escala de tiempo, mayor es el error en tomar en cuenta este tipo de restricción.

Por otro lado, uno puede estar seguro que la restricción sobre control de avenidas, relativa a los volúmenes v_i, de almacenamiento en el embalse, por si sola garantiza que el flujo efluente no va a ultrapasar los 500 m^3/seg. Esto se puede comprobar con el resultado de tránsito de la mayor avenida de diseño por el embalse, donde el gasto máximo del hidrograma efluente ha sido de 306,67 m^3/seg.

Con base en estas consideraciones, se ha abandonado definitivamente la restricción relativa a los volúmenes máximos f_i.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Resumen

En este capítulo han sido presentados los datos físicos e hidrológicos relativos a la región en estudio. También han sido demostrados los procedimientos utilizados para la obtención de las especificaciones de diseño y operación del Sistema, a nivel mensual y anual. De una manera general el estudio ha enfocado la búsqueda de las siguientes informaciones,

Necesidades de Agua

Demanda de riego.

Derechos de agua.

Volumen muerto del embalse.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Control de inundaciones

Volúmenes correspondientes al borde libre en el embalse.

Capacidad del cauce.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CAPITULO V

APLICACION DE LOS MODELOS DETERMINISTICO Y ESTOCASTICO DE PROGRAMACION LINEAL AL SISTEMA MASPARRO

Introducción

En la aplicación de estos modelos se ha considerado para el Sistema, una vida útil de 22 años, que es el número de años de registro disponible. Conforme se ha discutido en el Capítulo IV, el volumen muerto necesario en el embalse para este período de vida útil, es de $11{,}90 \times 10^6 m^3$.

En el caso del Sistema Masparro, las necesidades mensuales de agua, c_i, aguas abajo de la presa, constituyen la suma de las demandas brutas de riego con los derechos de agua en cada mes del año, los valores de c_i, así obtenidos, aparecen en la Tabla 5.1.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Para la aplicación de la restricción relativa al borde libre para el control de avenidas, se debe tener en cuenta la definición de los volúmenes mensuales v_i. Estos deben ser los volúmenes libres en el embalse al final del mes i para el control de inundaciones durante el mes i + 1. En la Tabla 4.9 aparecen los volúmenes mensuales v_j, necesarios para el control de avenidas en cada mes j.

De esta manera al utilizar la Tabla 4.9, se debe tener en cuenta que,

$$v_i = v_{j+1}$$

Por ejemplo, al aplicarse la restricción para el mes de enero, i = 1, el volumen libre v_i debe estar disponible al final de

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 5.1

SISTEMA MASPARRO

NECESIDADES MENSUALES DE AGUA, q_i ($10^6 m^3$.)

AREA BAJO RIEGO = 25.000 Ha

$$q_i = DBR_i + DER_i$$

DBR_i = demanda bruta de riego en el mes i ($10^6 m^3$.)

DER_i = derechos de agua en el mes i ($10^6 m^3$.)

MES	DBR_i	DER_i	q_i
ENERO	55,20	29,96	85,16
FEBRERO	58,80	31,92	90,72
MARZO	76,83	41,70	118,53
ABRIL	5,43	2,95	8,38
MAYO	0	2,92	2,92
JUNIO	0	2,92	2,92
JULIO	0	2,92	2,92
AGOSTO	0	2,92	2,92
SEPTIEMBRE	0	2,92	2,92
OCTUBRE	0	2,92	2,92
NOVIEMBRE	0	2,92	2,92
DICIEMBRE	5,38	2,92	8,30

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

este mes para el control de avenidas durante el mes de febrero, luego,para el i = 1, se debe tomar en la Tabla 4.9 el valor correspondiente a j = 2.

O sea,

$$v_1 = 4{,}412 \times 10^6 m^3$$

Aplicación del Modelo Determinístico

Las restricciones en el planteamiento determinístico incluyen el máximo o el mínimo volumen escurrido mensual observado en el período de registro. Esos valores, determinados a partir de la Tabla 4.2, aparecen en la Tabla 5.2.

Restricciones

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Las restricciones para este modelo son constituidas por las expresiones (2.14) hasta (2.18), inclusive. Reemplazando las variables conocidas por sus valores, en estas ecuaciones, se tiene, para la restricción (2.14),

$$c - b_i \geq v_i + \text{máx } r_{[i+12(k-1)]} \quad i = 1,\ldots 12$$

$$c - b_1 \geq 4{,}412 + 117{,}590$$

$$c - b_2 \geq 7{,}046 + 66{,}670$$

$$c - b_3 \geq 16{,}321 + 113{,}990$$

$$c - b_4 \geq 36{,}985 + 219{,}220$$

$$c - b_5 \geq 11{,}067 + 214{,}840$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 5.2

RIO MASPARRO EN PUENTE MASPARRO

MAXIMOS Y MINIMOS VOLUMENES ESCURRIDOS MENSUALES,

(máx $r_{[i+12(k-1)]}$) y (mín $r_{[i+12(k-1)]}$), EN $10^6 m^3$.

PERIODO 1952 - 1973 (k = 22 años)

MES	máx $r_{[i+12(k-1)]}$	mín $r_{[i+12(k-1)]}$
ENERO	117,590	8,464
FEBRERO	66,670	5,182
MARZO	113,990	5,800
ABRIL	219,220	18,351
MAYO	214,840	50,048
JUNIO	207,496	57,723
JULIO	231,777	79,522
AGOSTO	179,692	82,132
SEPTIEMBRE	148,297	56,880
OCTUBRE	173,353	52,532
NOVIEMBRE	122,446	29,905
DICIEMBRE	64,450	12,306

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$c - b_6 \geq 35,523 + 207,496$$

$$c - b_7 \geq 21,754 + 231,777$$

$$c - b_8 \geq 25,405 + 179,692$$

$$c - b_9 \geq 24,579 + 148,297$$

$$c - b_{10} \geq 13,709 + 173,353$$

$$c - b_{11} \geq 7,60 + 122,446$$

$$c - b_{12} \geq 4,173 + 64,450$$

El programa LPS/ 360 de la IBM(1969) no acepta explícitamente una expresión algebraica como en el caso de las expresiones arriba mostradas. Toda restricción, necesariamente, tiene que ser expresada en términos de una sola variable, la cual debe definir completamente la expresión.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La definición de una variable Zi, tal que,

$$Zi = c - b_i$$

permite escribir las expresiones de arriba, según la siguiente forma,

$$\begin{aligned} Z1 &\geq 122,002 \\ Z2 &\geq 73,716 \\ Z3 &\geq 130,311 \\ Z4 &\geq 256,205 \\ Z5 &\geq 225,907 \\ Z6 &\geq 240,019 \\ Z7 &\geq 253,531 \end{aligned} \qquad (5.1)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$Z8 \geq 205,097$$
$$Z9 \geq 172,876$$
$$Z10 \geq 187,062$$
$$Z11 \geq 130,056$$
$$Z12 \geq 68,623$$

Las restricciones arriba mostradas además de la definición de cada Zi, constituyen datos de entrada en el programa LPS/360.

Para la restricción (2.15), el término $a_m c$, es sustituido por el valor conocido del volumen muerto, de 11,90 x $10^6 m^3$. La restricción se queda entonces,

$$b_i \geq 11,90 - \text{mín } r_{[\,i+12(k-1)\,]} \qquad i = 1,\ldots,12$$

Luego, de acuerdo a la Tabla 5.2, y haciendo $b_i = Bi$,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$B1 \geq 3,436$$
$$B2 \geq 6,718$$
$$B3 \geq 6,100$$
$$B4 \geq -6,451$$
$$B5 \geq -38,148$$
$$B6 \geq -45,823$$
$$B7 \geq -67,622$$
$$B8 \geq -70,232$$
$$B9 \geq -44,980$$
$$B10 \geq -40,632$$
$$B11 \geq -18,005$$
$$B12 \geq -0,406$$

Estos son los datos de entrada para la restricción (2.15). Estas desigualdades establecen directamente un límite inferior para los parámetros de decisión, b_i.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La restricción (2.16),

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - \text{mín } r_{[i-1+12(k-1)]} \quad i = 2,..,12$$

toma la siguiente forma para el Sistema Masparro, de acuerdo a las Tablas 5.1 y 5.2,

$$b_1 - b_2 \geq 90,72 - 8,464$$

$$b_2 - b_3 \geq 118,53 - 5,182$$

$$b_3 - b_4 \geq 8,38 - 5,800$$

$$b_4 - b_5 \geq 2,92 - 18,351$$

$$b_5 - b_6 \geq 2,92 - 50,048$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$b_6 - b_7 \geq 2,92 - 57,723$$

$$b_7 - b_8 \geq 2,92 - 79,522$$

$$b_8 - b_9 \geq 2,92 - 82,132$$

$$b_9 - b_{10} \geq 2,92 - 56,880$$

$$b_{10} - b_{11} \geq 2,92 - 52,532$$

$$b_{11} - b_{12} \geq 8,30 - 29,905$$

La definición de una variable Yi, tal que,

$$Yi = b_i - b_{i+1},$$

permite escribir,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$
\begin{aligned}
Y1 &\geq 82,256 \\
Y2 &\geq 113,348 \\
Y3 &\geq 2,580 \\
Y4 &\geq -15,431 \\
Y5 &\geq -47,128 \\
Y6 &\geq -54,803 \\
Y7 &\geq -76,602 \\
Y8 &\geq -79,212 \\
Y9 &\geq -53,960 \\
Y10 &\geq -49,612 \\
Y11 &\geq -21,605
\end{aligned}
$$

Estas desigualdades, juntamente con la definición de cada Yi, constituyen los datos de entrada para la restricción (2.16).

La restricción (2.17),

$$b_{12} - b_1 \geq q_1 - \text{mín } r\,[12+12(k-1)] ,$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

se escribe de acuerdo a las Tablas 5.1 y 5.2, como

$$b_{12} - b_1 \geq 85,16 - 12,306$$

La definición de una variable Y12, tal que,

$$Y12 = b_{12} - b_1 ,$$

permite escribir,

$$Y12 \geq 72,854$$

Esta desigualdad, juntamente con la definición de Y12, constituyen los datos de entrada para la restricción (2.17).

Para la restricción (2.18),

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$a_o c - b_1 \geq q_1,$$

de acuerdo a la Tabla 5.1 se tiene,

$$a_o c - b_1 \geq 85{,}160 \qquad (5.2)$$

El término a_o, que representa la fracción de la capacidad del embalse, con la cual se va a dar inicio a su operación, tiene una gran influencia sobre los resultados del modelo. Se le ha asignado a a_o el valor inicial de 0,2, aunque no es usual empezar la operación de un embalse con un almacenamiento tan reducido. Sin embargo el uso de tal valor permite ilustrar la sensibilidad del modelo a este parámetro.

Volviendo a la expresión (5.2), es necesario definir una variable para el lado izquierdo de esta desigualdad.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Sea la variable W, tal que,

$$W = 0{,}2c - b_1, \qquad (5.3)$$

se puede escribir entonces,

$$W \geq 85{,}160 \qquad (5.4)$$

Las expresiones (5.3) y (5.4) son los datos de entrada para la restricción (2.18).

La flexibilidad del procedimiento "LPPARAMETRIC" del programa LPS/360, permite que se cambie el valor de uno o varios parámetros del modelo, de manera que el problema es resuelto varias veces en la misma corrida. Aplicando este procedimiento se han determinado los efectos de cambios en el parámetro a_o sobre la capacidad del embalse, como se indica a continuación:

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

a_o	Capacidad óptima del embalse ($10^6 m^3$).
0,2	1434,320
0,4	717,160
0,6	478,107
0,8	390,403
1,0	390,403

Sin embargo, el inicio de la operación para valores de a_o iguales a 0,2 y 0,4, se obtienen capacidades que sobrepasan la limitación topográfica del embalse, que es de 700 x $10^6 m^3$. Esta situación puede evitarse introduciendo la siguiente restricción adicional,

$$c \leq 700{,}000$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En este caso, como ya son conocidos los resultados al dejarse libre la capacidad en los datos de entrada, se puede afirmar de antemano, que la capacidad óptima sería igual al límite fijado, de 700 x $10^6 m^3$. Sin embargo, los parámetros óptimos, b_i, son distintos para cada caso.

Evidentemente, la fijación de un límite superior de 700 x $10^6 m^3$., en los datos de entrada, no afectaría en nada los resultados para,

$$a_o = 0{,}6$$

$$a_o = 0{,}8$$

$$a_o = 1{,}0$$

Es interesante observar que los resultados son los mismos para los casos en que empieza la operación del embalse a 0,8 de la

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

capacidad o con el embalse lleno. Esto se debe a que, para el caso en que se empieza la operación con el embalse lleno, se tiene,

$$a_o = 1,0$$

Para este valor, la restricción (5.2) se queda,

$$c - b_1 \geq 85,160 \qquad (5.5)$$

Sin embargo, el lado izquierdo de la inecuación (5.5) es idéntico al lado izquierdo de la restricción (5.1), teniéndose en cuenta que,

$$Z1 = c - b_1$$

Luego, la restricción (5.5) es pasiva, debido a que,

$$85,160 < 122,002$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

A título de ilustración, aparece en el Apéndide B, la hoja de resultados para el caso de empezarse la operación con el embalse lleno, ó a 0,8 de la capacidad, dando los siguientes valores para los parámetros de decisión:

B1 = 201,704	B = 8,980
B2 = 119,448	B8 = 85,582
B3 = 6,100	B9 = 164,794
B4 = -6,451	B10= 203,341
B5 = -38,148	B11= 252,953
B6 = -45,823	B12= 274,558

Por lo tanto, la política de operación sería,

$x_1 = s_{12} - 201,704$	$x_7 = s_6 - 8,980$
$x_2 = s_1 - 119,448$	$x_8 = s_7 - 85,582$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$x_3 = s_2 - 6{,}100 \qquad x_9 = s_8 - 164{,}794$$

$$x_4 = s_3 + 6{,}451 \qquad x_{10} = s_9 - 203{,}341$$

$$x_5 = s_4 + 38{,}148 \qquad x_{11} = s_{10} - 252{,}953$$

$$x_6 = s_5 + 45{,}823 \qquad x_{12} = s_{11} - 274{,}558$$

donde,

x_i = cantidad total de agua cedida por el embalse en el mes i,

s_i = almacenamiento en el embalse al final del mes i.

Aplicación del Modelo Estocástico

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Las restricciones en el planteamiento estocástico incluyen volúmenes escurridos que son percentiles de una distribución probabilística. Esos percentiles corresponden a probabilidades fijadas según el criterio del proyectista. Se ha adoptado para todas las restricciones un nivel de 90% de confiabilidad de que las mismas se cumplan, calculando los valores correspondientes en base a una distribución log-normal mediante el procedimiento presentado en el Capítulo anterior. En la Tabla 5.3 aparecen los resultados para todos los meses. Esos resultados son las pruebas de ajuste y los percentiles r_i^{90} y r_i^{10}.

Restricciones

El primer conjunto de restricciones en este modelo es definido por la expresión,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 5.3

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA DE AJUSTE DE LOS DATOS DE VOLUMENES ESCURRIDOS MENSUALES DEL RIO MASPARRO A UNA DISTRIBUCION LOGNORMAL

DELTA MAXIMO = mayor valor absoluto de las diferencias entre las probabilidades empírica y teórica de no excedencia

r_i^{90} y r_i^{10} = percentiles correspondientes a las probabilidades de 90% y 10% ($10^6 m^3$.)

	DELTA MAXIMO	r_i^{90}	r_i^{10}
ENERO	0,1076	44,647	8,724
FEBRERO	0,1649	28,582	5,129
MARZO	0,0723	35,867	5,470
ABRIL	0,0739	114,401	29,614
MAYO	0,0966	183,613	64,182
JUNIO	0,1419	197,658	83,939
JULIO	0,0795	181,823	90,151
AGOSTO	0,0956	155,906	89,446
SEPTIEMBRE	0,0737	139,602	75,925
OCTUBRE	0,0812	139,470	66,505
NOVIEMBRE	0,0997	101,785	36,145
DICIEMBRE	0,1294	54,099	18,059

DELTA MAXIMO ADMISIBLE PARA 22 AÑOS DE REGISTRO Y UN NIVEL DE SIGNIFICACION DE 5% = 0,2820

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$c - b_i \geq v_i + r_i^{.90} \qquad i = 1,\ldots,12$$

Reemplazando las variables del lado derecho por sus valores, de las Tablas 5.1 y 5.3, se tiene,

$$\begin{aligned}
c - b_1 &\geq 4,412 + 44,647 \\
c - b_2 &\geq 7,046 + 28,582 \\
c - b_3 &\geq 16,321 + 35,867 \\
c - b_4 &\geq 36,985 + 114,401 \\
c - b_5 &\geq 11,067 + 183,613 \\
c - b_6 &\geq 32,523 + 197,658 \\
c - b_7 &\geq 21,754 + 181,823 \\
c - b_8 &\geq 25,405 + 155,906 \\
c - b_9 &\geq 24,579 + 139,602 \\
c - b_{10} &\geq 13,709 + 139,470 \\
c - b_{11} &\geq 7,610 + 101,785 \\
c - b_{12} &\geq 4,173 + 54,099
\end{aligned}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La definición de una variable Zi, tal que,

$$Zi = c - b_i$$

permite escribir,

$$\begin{aligned}
Z1 &\geq 49,059 \\
Z2 &\geq 35,628 \\
Z3 &\geq 52,188 \\
Z4 &\geq 151,386
\end{aligned} \qquad (5.6)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$Z5 \geq 194,680$

$Z6 \geq 230,181$

$Z7 \geq 203,577$

$Z8 > 181,311$

$Z9 \geq 164,181$

$Z10 \geq 153,179$

$Z11 \geq 109,395$

$Z12 \geq 58,272$

Las restricciones arriba escritas y las ecuaciones de definición de Zi, constituyen los datos de entrada para el primer grupo de restricciones del modelo.

El segundo grupo de restricciones en este modelo es definido por la expresión,

$$b_i \geq a_m c - r_i^{10} \qquad i = 1,\ldots,12$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Haciendo Bi = b_i, sustituyendo $a_m c$ por su valor, de 11,90 x $10^6 m^3$., r_i^{10} por los valores de la Tabla 5.3, y efectuando, se tiene,

$B1 \geq 3,176$

$B2 \geq 6,771$

$B3 \geq 6,430$

$B4 \geq -17,714$

$B5 \geq -52,282$

$B6 \geq -72,039$

$B7 \geq -78,251$

$B8 \geq -77,546$

$B9 \geq -64,025$

$B10 \geq -54,605$

$B11 \geq -24,245$

$B12 \geq -6,159$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Estas desigualdades son los datos de entrada en el programa para el segundo grupo de restricciones.

El tercer grupo de restricciones en este modelo es dado por,

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - r_{i-1}^{10} \qquad i = 2,\ldots,12$$

De acuerdo a las Tablas 5.1 y 5.3, se tiene,

$$\begin{aligned}
b_1 - b_2 &\geq 90,72 - 8,724 \\
b_2 - b_3 &\geq 118,53 - 5,129 \\
b_3 - b_4 &\geq 8,38 - 5,470 \\
b_4 - b_5 &\geq 2,92 - 29,614 \\
b_5 - b_6 &\geq 2,92 - 64,182 \\
b_6 - b_7 &\geq 2,92 - 83,939 \\
b_7 - b_8 &\geq 2,92 - 90,151 \\
b_8 - b_9 &\geq 2,92 - 89,446 \\
b_9 - b10 &\geq 2,92 - 75,925 \\
b_{10} - b_{11} &\geq 2,92 - 66,505 \\
b_{11} - b_{12} &\geq 8,30 - 36,145 \\
b_{12} - b_1 &\geq 85,16 - 18,059
\end{aligned}$$

La definición de una variable Yi, tal que,

$$Yi = b_i - b_{i+1} ,$$

permite escribir,

$$\begin{aligned}
Y1 &\geq 81,996 \\
Y2 &\geq 113,401
\end{aligned}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$
\begin{aligned}
Y3 &\geq 2,910 \\
Y4 &\geq -26,694 \\
Y5 &\geq -61,262 \\
Y6 &\geq -81,019 \\
Y7 &\geq -87,231 \\
Y8 &\geq -86,526 \\
Y9 &\geq -73,005 \\
Y10 &\geq -63,585 \\
Y11 &\geq -27,845 \\
Y12 &\geq 67,101
\end{aligned}
$$

Estas desigualdades, conjuntamente con las ecuaciones de definición de cada Yi, constituyen los datos de entrada para el tercer grupo de restricciones.

La última restricción del modelo es definida por,

$$a_o c - b_1 \geq q_1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

También se define una variable W, tal que,

$$W = a_o c - b_1$$

De acuerdo con la Tabla 5.1, se tiene

$$W \geq 85,160 \qquad (5.7)$$

Así como en la solución del modelo determinístico, se ha utilizado el procedimiento "LPPARAMETRIC" del programa LPS/360, obteniendo los siguientes valores del análisis de sensibilidad del modelo:

a_o	Capacidad óptima del embalse ($10^6 m^3$).
0,0	478,312

Licencia Creative Commons:
Atribución.- No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

0,8	358,734
1,0	350,478

En este caso las soluciones para a_o igual a 0,8 y 1,0, son distintas, porque la restricción (5.7), para cuando a_o es igual a 1,0, no es pasiva con respecto a la restricción (5.6).

Los parámetros óptimos de decisión, para el caso de empezarse la operación con el embalse lleno, son los siguientes, en $10^6 m^3$.,

$$
\begin{aligned}
B1 &= 201,827 \\
B2 &= 119,831 \\
B3 &= 6,430 \\
B4 &= -17,714 \\
B5 &= -52,282 \\
B6 &= -72,039 \\
B7 &= 8,980 \\
B8 &= 96,211 \\
B9 &= 104,493 \\
B10 &= 177,498 \\
B11 &= 241,083 \\
B12 &= 268,928
\end{aligned}
$$

Luego, la política de operación sería la siguiente,

$$
\begin{aligned}
x_1 &= s_{12} - 201,827 & x_7 &= s_6 - 8,980 \\
x_2 &= s_1 - 119,831 & x_8 &= s_7 - 96,211 \\
x_3 &= s_2 - 6,430 & x_9 &= s_8 - 104,493 \\
x_4 &= s_3 + 17,714 & x_{10} &= s_9 - 177,498 \\
x_5 &= s_4 + 52,282 & x_{11} &= s_{10} - 241,083 \\
x_6 &= s_5 + 72,029 & x_{12} &= s_{11} - 268,928
\end{aligned}
$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Donde,

x_i = cantidad total de agua cedida por el embalse en el mes i,

s_i = almacenamiento en el embalse al final del mes i.

A título de ilustración se ha incluido en el Apéndice B la hoja de resultados para el caso de empezarse la operación con el embalse lleno.

Las capacidades resultantes en el modelo estocástico son menores que aquellas del modelo determinístico. Esto se debe a que en el modelo estocástico se ha adoptado un riesgo de 0,10 de que no se cumplan las restricciones del modelo. En el modelo determinístico, hay un riesgo implícito que es función del número de años de registro, y que es de 0,09 de acuerdo a lo expuesto en el Capítulo II.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Puesto que el riesgo de 10% utilizado en el modelo estocástico es mayor que en el determinístico, es natural que los resultados sean menores para el modelo estocático. La pequeña diferencia entre los riesgos para los dos tipos de modelo, también explica por qué los resultados de esos modelos han sido tan cercanos.

Resumen

Se ha aplicado al Sistema Masparro, los modelos determinístico y estocástico de programación lineal desarrollados por Revelle et al (1969). Las expresiones matemáticas que gobiernan los modelos adaptados son las siguientes,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Modelo Determinístico

Función Objetiva : Min c

Restricciones:

$$q_i = DBR_i + DER_i$$

$$c - b_i \geq v_i + \text{máx } r \quad [i+12(k-1)]$$

$$b_i \geq s_{mín} - \text{mín } r \quad [i+12(k-1)]$$

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - \text{mín } r \quad [i-1+12(k-1)]$$

$$b_{12} - b_1 \geq q_1 - \text{mín } r \quad [12+12(k-1)]$$

$$a_o c - b_1 \geq q_1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Modelo Estocástico

Función Objetiva : Min c

Restricciones :

$$q_i = DBR_i + DER_i$$

$$c - b_i \geq v_i + r_i^{90}$$

$$b_i \geq s_{mín} - r_i^{10}$$

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - r_{i-1}^{10}$$

$$b_{12} - b_1 \geq q_1 - r_{12}^{10}$$

$$a_o c - b_1 \geq q_1$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CAPITULO VI

APLICACION DEL MODELO ESTOCASTICO DE PROGRAMACION SEPARABLE AL SISTEMA MASPARRO

Introducción

En la aplicación de ese modelo, presentado como modelo de Eisel (1972), se ha utilizado una vida útil de 22 años con el fin de realizar comparaciones entre sus resultados y los del modelo de Revelle et al (1969). Sin embargo, una aplicación directa del modelo de Eisel (1972), limitaría esa comparación debido a los diferentes criterios de decisión y a las diferentes formas de planteo.

El modelo, tal como es presentado en su forma original, no considera los derechos de agua, ni el control de avenidas. En la presente adaptación al Sistema Masparro han sido hechas alteraciones para la consideración de esos propósitos. Esto posibilitará una confrontación más adecuada entre los modelos de Revelle et al (1969) y de Eisel (1972).

Se ha mantenido en este modelo la misma probabilidad de 0,90 fijada en el capítulo anterior, para que se cumplan las restricciones probabilísticas. El modelo utiliza la distribución normal tipificada. Los percentiles de esa distribución, correspondientes a las probabilidades,

$$\alpha = \alpha_T = \alpha_S = 0,90$$

y

$$(1-\alpha) = (1-\alpha_T) = (1-\alpha_S) = 0,10$$

son respectivamente,

$$F^{-1}(\alpha) = 1,282$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$F^{-1}(1-\alpha) = -1,282$$

Esos valores son obtenidos por interpolación en la Tabla 2.1.

Datos Económicos

Las principales fuentes de información para la obtención de los costos y beneficios del proyecto, han sido los trabajos de Flores (1974), CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971) y OTEHA (1970). Todos esos costos y beneficios han sido corregidos para el año 1975, con base a las tasas aproximadas de inflación verificadas en los últimos años en Venezuela. La información sobre la tasa de inflación que se presenta a continuación, ha sido obtenida en conversación personal con el profesor San Martín (1975),

Período	Tasa
1971 - 1972	3 %
1972 - 1973	3 %
1973 - 1974	7 %
1974 - 1975	12 %

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Dada la actual situación de Venezuela en el escenario económico internacional, se ha adoptado la tasa de interés del 8% según recomendación del Prof. San Martín (1975).

Costos del Proyecto

Para la función objetiva se necesita el valor actual de la suma de los costos de construcción, operación y mantenimiento por unidad de volumen de las obras del Sistema.

Este costo, C, ha sido obtenido mediante la siguiente descomposición,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$C = C1 + C2 + C3$$

Donde,

C1 = costo de construcción del embalse,
C2 = costo de construcción de los canales principales y de la estructura de toma,
C3 = costo de operación y mantenimiento.

Costo de la Presa, C1.

Los costos del embalse Masparro han sido estimados para tres diferentes capacidades, en el informe de CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971), incluyendo los costos de la estructura de toma junto a la presa.

En el presente trabajo se ha considerado para la toma, el mismo tipo de solución propuesta por OTEHA (1970), para el embalse Boconó. Esta solución consiste en la construcción de la estructura de captación en la margen del río, aguas abajo de la presa. Por lo tanto se ha deducido de las estimaciones de CIDIAT - ULA y CORPOANDES (1971), los costos de la estructura de toma junto a la presa. Los resultados así obtenidos, y corregidos para el año 1975, son los siguientes,

Elevación	Capacidad	Costo Total	Costo Unitario
(m)	($10^6 m^3$)	(10^6 Bs)	(Bs/m^3)
217	145	30,32	0,2091
221	202	36,49	0,1806
224	248	41,69	0,1681

El costo C1 ha sido obtenido mediante el promedio ponderado entre los tres costos unitarios, con respecto a las distintas capacidades,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$C1 = \frac{(145 \times 0,2091)+(202 \times 0,1806) + (248 \times 0,1681)}{145 + 202 + 248}$$

$$C1 = 0,1823 \text{ Bs/m}^3$$

Costo de los Canales y Estructuras de Toma, C2

No se dispone en ningún estudio anterior, de un esquema de distribución de agua para el área a ser regada por el embalse Masparro.

Tal como hizo Flores (1974), se ha utilizado los datos de OTEHA (1970), en el estudio elaborado para el embalse Boconó. Esta aproximación es justificable teniéndose en cuenta la proximidad entre los embalses Boconó y Masparro, y considerando las mismas características topográficas que dominan la región. Los costos estimados por OTEHA (1970), expresados en millones de Bolívares, son los siguientes,

Toma	4,050
Canal de conducción	1,650
Canales principales	31,260
	36,960
Imprevistos (10%)	3,696
Total	40,656

Este total, corregido para el año 1975, es de $51,690 \times 10^6$ Bs

Con base en el Croquis N° 1 publicado por OTEHA (1970) y en la curva de elevación-capacidad del embalse Boconó, se obtiene una capacidad de $1.650 \times 10^6 m^3$. Luego, el costo de las obras por unidad de volumen, es de,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$C2 = \frac{51,690 \times 10^6}{1.650 \times 10^6} = 0,0313 \text{ Bs/m}^3$$

Costos de Operación y Mantenimiento, C3.

El costo anual de operación y mantenimiento de las obras según Flores (1974) es de 100 Bs. por Ha. El área a ser regada por el embalse Boconó es de 18.115 Ha. Por lo tanto el costo anual por unidad de volumen, C3a, es de,

$$C3a = \frac{100 \text{ Bs/Ha} \times 18.115 \text{ Ha.}}{1.650 \times 10^6 \text{m}^3} = 0,0011 \text{ Bs/m}^3$$

Estos costos deben ser pagados durante toda la vida útil de la obra, exceptuándose el último año del proyecto. Para la tasa de interés del 8% y para 21 anualidades, el factor de valor actual es de 10,017. El valor actual del costo de operación y mantenimiento, por unidad de volumen, C3, es,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$C3 = 0,0011 \times 10,017 = 0,0110 \text{ Bs/m}^3$$

De acuerdo a la ecuación (6.1), el costo C (valor actual de la suma de los costos de construcción, operación y mantenimiento, por unidad de volumen) de las obras del Sistema es,

$$C = 0,1823 + 0,0313 + 0,0110 = 0,2246 \text{ Bs/m}^3$$

Este valor será el parámetro de la variable de decisión K, de la función objetiva del modelo.

Beneficios del Proyecto

El estudio de los beneficios atribuibles a la primera etapa del Módulo 1, situado en la zona Boconó-Masparro, fue hecho por CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971), para un área de 5850 Ha, obtenien

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

do un beneficio anual de $6,317 \times 10^6$ Bs. Este valor corregido para 1975, equivale a $8,030 \times 10^6$ Bs/año.

De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo IV, la demanda bruta de riego anual para esta zona es de 8.065 m^3/Ha. Para regar las 5.850 Ha. de la primera etapa del Módulo 1 se necesitan,

$$5.850 \times 8.065 = 47,180 \times 10^6 m^3/año$$

Por lo tanto el beneficio anual por unidad de volumen de agua cedida para riego, Ba, es de,

$$Ba = \frac{8,030 \times 10^6}{47,180 \times 10^6} = 0,17 \text{ Bs}/m^3$$

La actualización de Ba para el inicio del primer año de la vida útil del proyecto a la tasa del 8% resulta en el beneficio, B, deseado,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$B = 0,17 \times 10,201 = 1,7342 \text{ Bs}/m^3$$

Donde, 10,201 es el factor de valor actual para 22 anualidades y para la tasa del 8% al año. El beneficio de 1,7342 Bs/m^3 será el parámetro de la variable de decisión T, de la función objetiva del modelo.

Función Objetiva

La función objetiva para este modelo, presentada en el Capítulo III, es dada por,

$$BEN = Max\ [BT - CK]$$

Eisel (1972) no considera la dilución del caudal de retorno del sistema de riego ni las normas adoptadas en el presente tra

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

bajo, de preservación de la vida acuática. La cantidad anual de agua, en m^3/Ha, necesaria para alcanzar estos objetivos, conforme se ha discutido en el Capítulo IV, es de,

$$1.214 + 1.294 + 1.690 + 119 + 8 \times 118 = 5.261 \ m^3/Ha.$$

Los valores al lado izquierdo de la expresión arriba, corresponden a los derechos mensuales de agua.

Sin embargo, en este modelo el área bajo riego no es conocida de antemano. Esta área es función del volumen óptimo, T, a ser cedido anualmente para riego, de manera de maximizar los beneficios netos. En el volumen T se ha incluído una cierta fracción relativa a los derechos de agua.

Como los beneficios de preservación del medio ambiente no son tangibles, esta fracción va a reducir los beneficios directos del Sistema en la siguiente proporción,

$$\frac{DBR}{DBR + DER}$$

donde,

DBR = demanda bruta de riego,
DER = derechos de agua.

Esta proporción es constante para la región en estudio, independientemente del área a ser regada,

$$\frac{DBR}{DBR + DER} = \frac{8065}{8065 + 5261} = 0,61$$

O sea, sólo 61% del volumen T, cedido por el embalse para que se cumplan los objetivos del proyecto, produce beneficios tangi -

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

bles. La función objetiva queda,

$$BEN = Max\ [0{,}61\ BT - CK]$$

Reemplazando B y C por sus valores,

$$BEN = Max\ [0.61 \times 1.7342\ T - 0.2246\ K]$$

Luego,

$$BEN = Max\ [1{,}0579\ T - 0{,}2246\ K] \qquad (6.2$$

La ecuación (6.2) es dato de entrada en el programa MPS/360.

Restricciones

Obtención del Volumen T

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La expresión final de esta restricción es dada por la inecuación (3.8).

La distribución de los volúmenes escurridos anuales, que aparece en la Tabla 4.4, tiene por media y desviación típica, los siguientes valores,

$$E(q) = 938{,}554 \times 10^6 m^3$$

$$[V(q)]^{1/2} = 137{,}299 \times 10^6 m^3$$

Reemplazando los valores conocidos en la inecuación (3.8) se tiene,

$$T+0{,}90(-1{,}282)(137{,}299) \leq 938{,}554+1{,}05(-1{,}282)(137{,}299)$$

Simplificando,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$T - 158{,}416\ a \leqslant 753{,}736 \qquad (6.3)$$

La restricción (6.3) es dato de entrada en el programa MPS/360.

Seguridad del Embalse

Esta restricción, en su forma original es expresada por,

$$P\ [s_{i+1} \leqslant K] \geqslant \alpha_s$$

Es posible tomar en cuenta el control de avenidas introduciendo en esta restricción el volumen V, resultante del análisis de frecuencia y del tránsito hechos a nivel anual. La restricción se escribe ahora como,

$$P\ [\ s_{i+1} \leqslant (K - V)] \geqslant 0{,}90 \qquad (6.4)$$

O sea, la probabilidad de que el agua almacenada en el embalse no ocupe el borde libre para el control de avenidas, debe ser superior o igual a 0,90.

El desarrollo de la expresión (6.4) no presenta dificultades debido a que V es un valor conocido. Este desarrollo ha sido realizado de forma idéntica y según las mismas consideraciones y simplificaciones hechas en el Capítulo III para la restricción original. La restricción (6.4), desarrollada hasta el punto correspondiente a la expresión (3.13), se escribe,

$$T-1{,}9aK+1{,}8K+1{,}9aV-1{,}8V+0{,}90a[V(q)]^{1/2}\ F^{-1}(\alpha_s) \geqslant$$
$$\geqslant E(q)+1{,}05\ [V(q)]^{1/2} F^{-1}(\alpha_s) \qquad (6.5)$$

El valor del volumen V, correspondiente al borde libre, según la Tabla 4.9, es de $61{,}540 \times 10^6 m^3$. Reemplazando los valores conoci-

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

dos en la restricción (6.5), se tiene,

$$T-1,9aK+1,8K+1,9a(61,540)-1,8(61,540) +$$

$$+ 0,90a(137,299)(1,282) \geq$$

$$\geq 938,554+1,05(137,299)(1,282)$$

Simplificando esta expresión se llega a,

$$T-1,9aK+1,8K+275,341\ a \geq 1234,144 \qquad (6.8$$

La aplicación del artificio de Hadley (1964), para la separación de producto -1,9aK, exige la definición de dos funciones, y G, tales que,

$$F = \frac{1}{2}(-a+K) \qquad (6.$$

$$G = \frac{1}{2}(a+K) \qquad (6.$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La definición de esas dos funciones permite escribir la expresión (6.6) en la siguiente forma,

$$T+1,8K-1,9G^2+1,9F^2+275,341\ a \geq 1234,144 \qquad (6.$$

Puesto que la expresión (6.9) es no lineal, convexa y separable, es posible el empleo del Método Delta, para la aplicación programa MPS/360 de la IBM (1968).

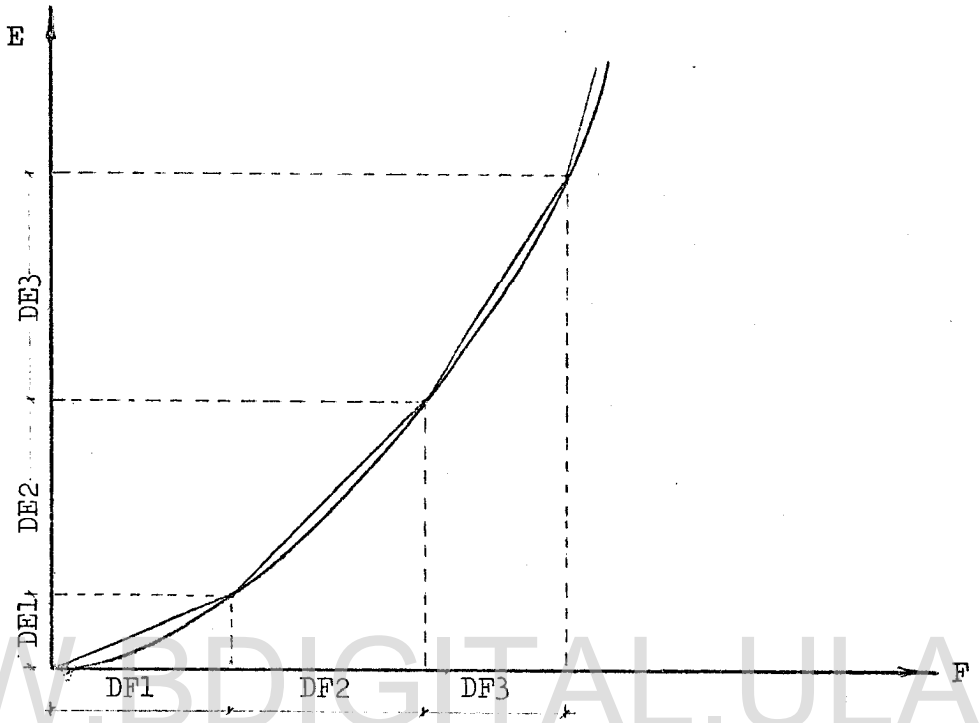
El Método Delta es aplicado para la descomposición de curva en una serie de segmentos de rectas. Sean las funciones E y H, tales que,

$$E = 1,9\ F^2 \qquad (6.$$

$$H = -1,9\ G^2 \qquad (6.$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La curva definida por la ecuación (6.10) tiene la forma ilustrada por la curva de la Figura 6.1, la cual puede ser aproximadamente reemplazada por los segmentos de recta ilustrados.



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Fig. 6.1. Ilustración del Método Delta.

Para la aplicación del método se define un conjunto de variables especiales, F_i,

$$F1, F2, \ldots, FN$$

donde,

N = número de segmentos de recta utilizados para reemplazar la curva en un determinado rango de interés.

La variable especial F 1 define el intervalo DF1 en el eje F

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La variable F2 define el segundo intervalo, DF2, y la variable FN define el último intervalo, DFN.

Las variables especiales pueden variar entre los límites 0 y 1,

$$0 \leqslant F_i \leqslant 1,$$

pero la variable F_{i+1} sólo asume valores significativos si todas las i variables anteriores están en sus límites superiores. Por ejemplo, si la función separable F asume un valor cualquiera en el primer intervalo, DF1, la única variable especial a ser considerada es la primera,

$$0 \leqslant F\ 1 \leqslant 1,$$

las demás son automáticamente consideradas en sus límites inferiores,

$$F\ 2 = F\ 3 = \ldots = FN = 0$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Luego, cualquier valor de F en el primer intervalo, sería dado por,

$$F = F\ 1 \ .\ DF1$$

Si la variable F asume un valor dentro del segundo intervalo se tiene,

$$F\ 1 = 1$$

$$0 \leqslant F\ 2 \leqslant 1$$

$$F\ 3 = F\ 4 = \ldots = F\ N = 0$$

El valor de F sería dado por,

$$F = F\ 1.DF1 + F\ 2DF\ 2$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Si la variable F asume un valor en un intervalo i cualquiera, este valor es dado por la siguiente ecuación general,

$$F = F1.DF1 + F2.DF2 + \ldots + FN.DFN \qquad (6.12)$$

Donde,

$$0 \leqslant F_i \leqslant 1, \text{ para } F_{i-1} = 1$$

y

$$F_i = 0, \text{ para } 0 \leqslant F_{i-1} \leqslant 1$$

Como se observa en la Figura 6.1, a cada intervalo DF_i corresponde un intervalo DE_i para la función E, cuyo valor está dado por,

$$E = DE1.F1 + DE2.F2 + DE3.F3 + \ldots + DEN.FN$$

Por ejemplo, si la variable E asume un valor en el tercer intervalo se tiene,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$E = DE1.F1 + DE2.F2 + DE3.F3$$

donde,

$$F1 = F2 = 1$$
$$0 \leqslant F3 \leqslant 1$$

Para la aplicación del método, es necesario separar la curva en segmentos y definir los intervalos DF y DE como datos de entrada en el programa. Además, es necesario fijar como dato de entrada para todas las variables especiales, el límite superior igual a la unidad,

$$F1 \leqslant 1,\ F2 \leqslant 1, \ldots,\ FN \leqslant 1$$

Esta restricción no es obligatoria para el último intervalo.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tampoco es necesario fijar los límites inferiores nulos de las variables especiales, debido a que son automáticamente fijados por el programa.

Según el mismo razonamiento desarrollado para linealizar la ecuación (6.10), la ecuación siguiente (6.11) es sustituida por las dos ecuaciones dadas a continuación,

$$G = G1.DG1 + G2.DG2 + \ldots + GN.DGN$$
$$H = -G1.DH1 - G2.DH2 - \ldots - GN.DHN \qquad (6.13)$$

donde,

$$0 \leq G_i \leq 1 \quad \text{para} \quad G_{i-1} = 1$$

y

$$G_i = 0 \quad \text{para} \quad 0 \leq G_{i-1} \leq 1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Para la resolución del modelo, se ha dividido la curva definida por cada una de las ecuaciones (6.10) y (6.11), en 18 segmentos de recta. La separación de estas funciones permite escribir la restricción (6.9) de la siguiente manera,

$$T + 1{,}8K - G1.DH1 - \ldots - G18.DH18 + F1.DE1 + \ldots$$
$$\ldots + F18.DE18 + 275{,}341\,a \geq 1234{,}144 \qquad (6.14$$

Las expresiones (6.7), (6.8), (6.12), (6.13) y (6.14), y los límites para las variables especiales, son los datos de entrada en el programa MPS/360, para la restricción relativa a la seguridad del embalse.

Limitación Agrológica

Es necesario introducir un límite superior para que el volu

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

men óptimo T, no sea superior a la suma de la demanda de las 25.000 Ha. y del volumen necesario para diluir el flujo de retorno de esta área. La demanda bruta de riego anual es de 8065 m^3/Ha y el volumen correspondiente, para los derechos de agua, es de 5261 m^3/Ha. El valor de T tendrá el siguiente límite superior,

$$T \leq 25.000\ (8065+5261)$$

O sea,

$$T \leq 333{,}150 \times 10^6 m^3$$

Restricción Adicional

De acuerdo a las consideraciones hechas en el Capítulo III, las restricciones referentes a la obtención del volumen T, y a la seguridad del embalse, sólo son válidas para el parámetro a, situado en el rango,

$$0{,}6 \leq a \leq 0{,}9$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Esos límites son datos de entrada en el programa de optimización.

Este modelo puede ser resuelto por el programa LPS/360, fijando un valor inicial para el parámetro a, y utilizando el procedimiento "LPPARAMETRIC" para hacer cambios sucesivos en este parámetro, dentro del rango admisible. El procedimiento requiere un mayor tiempo de procesamiento, pero elimina la incompatibilidad de la restricción (6.6) con la programación lineal.

Resultados

Las hojas de resultados del programa MPS/360 constan del Apéndice C. Este programa también imprime los datos del modelo. A tí

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

tulo de ilustración, las hojas de datos también son reproducidas en el Apéndice C.

Como se observa en el apéndice C, el beneficio neto máximo obtenido es de 266,882 x 10^6Bs. La capacidad óptima del embalse es de 380,932 x $10^6 m^3$ y el parámetro a, óptimo, es igual a 0,80.

El volumen T, óptimo, resultó igual a 333,150 x $10^6 m^3$, que es el límite superior prefijado para la variable T. Esto comprueba la factibilidad económica del desarrollo de toda el área.

Es interesante observar que el resultado óptimo obtenido para la capacidad del embalse, obtenido en la aplicación del modelo estocástico de Revelle et al (1969) al Sistema Masparro, donde se obtuvo una capacidad de 350,478 x $10^6 m^3$. La diferencia entre los resultados de los dos modelos es del 8,7%.

WWW.BDIGITAL.UA.VE

El desarrollo del modelo de Eisel (1972) a nivel multi-estacional, por ejemplo mensual, según el propio autor, implicaría grandes complejidades matemáticas.

El modelo de Revelle et al (1969), a pesar de su simplicidad permite enfocar el problema de demanda de agua a nivel mensual. Este enfoque multi-estacional toma en cuenta los meses de escasez y de abundancia de agua y resulta en una política de operación más deseable desde un punto de vista práctico.

Resumen

En este Capítulo se ha aplicado al Sistema Masparro el modelo estocástico de programación separable presentado por Eisel (1972). Se ha estimado los costos y beneficios unitarios atribuibles al sistema de abastecimiento de agua. Las expresiones matemáticas que gobiernan el modelo adaptado son las siguientes,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Función Objetiva :

$$BEN = Max\ [1,0579T-0,2246K]$$

Restricciones:

$$T - 158,416\ a \leqslant 753,736$$

$$T + 1,8K - 1,9G^2 + 1,9F^2 + 275,341\ a \geqslant 1234,144$$

$$F = \frac{1}{2}\ (-a+K)$$

$$G = \frac{1}{2}\ (a + K)$$

$$T \leqslant 333,150$$

$$0,6 \leqslant a \leqslant 0,9$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

to.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Como se observará más adelante, las características del acuífero permiten la explotación del mismo por nueve años consecutivos. Esto es válido en el caso de que se utilice únicamente el agua subterránea para satisfacer la demanda de riego en esos primeros nueve años.

Como el embalse requiere tres años para ser construido, existen siete alternativas en cuanto al comienzo de la obra. O sea, es posible retardar la construcción del embalse hasta el inicio del séptimo año de la vida útil del proyecto.

En este Capítulo se estudia cada una de esas alternativas con sus respectivas políticas de operación, lo que ha sido realizado mediante la adaptación de las restricciones del modelo a cada una de esas situaciones.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La sección del modelo referente al agua superficial se basa en el modelo determinístico de Revelle et al (1969). El horizonte de planificación se apoya en los 20 años de datos de escorrentía correspondientes al período 1954-1973.

Como se ha discutido en el Capítulo II, a pesar de las ventajas del planteamiento estocástico, ambos modelos presentados son estructuralmente idénticos. La adopción del enfoque determinístico es justificable, por ser una forma coherente de conciliar las informaciones disponibles sobre fuentes de agua. Es decir, el conocimiento que se tiene sobre el acuífero, no permite que se extraigan conclusiones sobre el agua subterránea con el enfoque estocástico.

Desarrollo del Sistema

La política de desarrollo del sistema de riego hasta el final del quinto año del proyecto, es ilustrada en la Tabla 7.1,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

que constituye una referencia importante para la comprensión de las restricciones del modelo.

La columna (1) indica el año de la vida útil del proyecto.

La columna (2) indica los números de orden de los meses en la vida útil del proyecto.

La columna (3) indica los meses del año.

La columna (4) identifica el número de hectáreas productivas en cada año de la vida útil del proyecto.

La columna (5) corresponde a la demanda bruta del riego en cada mes, en $10^6 m^3$. Estos valores son obtenidos multiplicando los datos de demanda bruta de riego, en m^3/Ha, por el área correspondiente de la columna (4). Los datos mensuales de demanda bruta de riego, en m^3/Ha, han sido presentados en el Capítulo IV.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La columna (6) se refiere al caso particular de la construcción del embalse empezando al inicio del primer año del proyecto. Los valores de esta columna, que representan los derechos mensuales de agua en $10^6 m^3$, son función del área indicada en la columna (4) y de los derechos mensuales de agua, en m^3/Ha, que han sido discutidos en el Capítulo IV.

La columna (7) indica la suma de las columnas (5) y (6), o sea, la suma de las demandas y los derechos de agua en cada mes.

A partir del inicio del quinto año del proyecto, el Sistema está totalmente desarrollado. Por lo tanto, a partir de ese punto, los valores de la columnas (5), (6) y (7), se repiten para cada mes del año, hasta el final de la vida útil del proyecto.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 7.1. (continuación)

(1) k	(2) t	(3) i	(4) Ha	(5) DBR	(6) DER	(7) DBR + DER
	30	6		0	0	0
	31	7		0	0	0
	32	8		0	0	0
	33	9		0	0	0
	34	10		0	0	0
	35	11		0	0	0
	36	12		3,23	0	3,23
4	37	1	20.000	44,16	24,29	68,45
	38	2		47,04	25,87	72,91
	39	3		61,46	33,80	95,26
	40	4		4,34	2,39	6,73
	41	5		0	2,37	2,37
	42	6		0	2,37	2,37
	43	7		0	2,37	2,37
	44	8		0	2,37	2,37
	45	9		0	2,37	2,37
	46	10		0	2,37	2,37
	47	11		0	2,37	2,37
	48	12		4,30	2,37	6,67
5	49	1	25.000	55,20	29,96	85,16
	50	2		58,80	31,92	90,72
	51	3		76,83	41,70	118,53
	52	4		5,43	2,95	8,38
	53	5		0	2,92	2,92
	54	6		0	2,92	2,92
	55	7		0	2,92	2,92
	56	8		0	2,92	2,92
	57	9		0	2,92	2,92
	58	10		0	2,92	2,92
	59	11		0	2,92	2,92
	60	12		5,38	2,92	8,30

WWW.BDIGITAL.UCA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Agua Subterránea

Se ha utilizado en el presente trabajo las informaciones del estudio de Flores (1974), que se refiere a un área de 50.000 Ha. comprendida entre los ríos Boconó y Masparro.

Capacidad y Recarga del Acuífero

Las reservas totales del acuífero, en las 50.000 Ha. estudiadas, suman 1703,90 x $10^6 m^3$. La mayor parte de esta área, que presenta buenas condiciones acuíferas y características granulométricas apropiadas, se ubica en una región potencialmente regable por los ríos Boconó y Masparro. En base a las características aproximadamente homogéneas del acuífero en esta región, se puede suponer que las 25.000 Ha. del Sistema Masparro, dispongan de la mitad de las reservas totales del área estudiada. O sea,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$\frac{25.000}{50.000} \times 1703,90 \times 10^6 m^3. = 851,950 \times 10^6 m^3.$$

La recarga natural del acuífero es de 73,71 x $10^6 m^3$./año.

Producción del Acuífero

Flores (1974), ha identificado la fracción del área estudiada que presenta buenas condiciones acuíferas. Esta fracción, que comprende un área de 29.000 Ha. ha sido dividida en tres zonas de distintas características granulométricas,que tienen las siguientes superficies,

zona A	12.100 Ha.
zona B	4.900 Ha.
zona C	12.000 Ha.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La producción por pozo en cada una de estas zonas, es la siguiente,

zona	A	540	$m^3/h.$
zona	B	306	$m^3/h.$
zona	C	238	m^3/h

Para la suposición de homogeneidad del acuífero adoptada en el modelo, la producción por pozo, q, ha sido calculada como el promedio ponderado de las producciones de las zonas A, B y C. Este promedio ha sido calculado con respecto a las superficies de estas zonas,

$$q = \frac{540 \times 12.100 + 306 \times 4.900 + 238 \times 12.000}{12.100 + 4.900 + 12.000}$$

luego,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$q = 375{,}50\ m^3/h$$

Tomando en cuenta las diferentes demandas de agua en los meses de riego, Flores (1974), ha establecido distintas cargas diarias de bombeo por pozo, de acuerdo a cada mes de riego. Estas cargas, idénticas para las zonas A, B y C, son las siguientes,

enero	16	hs./día
febrero	16	hs./día
marzo	21	hs./día
abril	8	hs./día
diciembre	8	hs./día

De acuerdo a esta política cada pozo funcionará en un total de 2.083 horas por año. Luego la producción anual de cada pozo, PA, es de,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$PA = 375,50 \times 2.083 = 0,782 \times 10^6 m^3$$

Balance de las Reservas del Acuífero

El balance de las reservas del acuífero es presentado en la Tabla 7.2. Este balance es hecho para el caso de riego exclusivamente por agua subterránea, para determinar el número de alternativas posibles para el inicio de la construcción del embalse.

La columna (1) indica el año k de la vida útil de proyecto

La columna (2) indica el almacenamiento en el acuífero al inicio del año k.

La columna (3) indica la demanda bruta de riego en el año k. Esta demanda deberá ser satisfecha exclusivamente por el bombeo del agua subterránea. La obtención de estas demandas anuales es lograda mediante la suma de las demandas mensuales para el año k, que aparecen en la Tabla 7.1.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La columna (4) indica la recarga natural del acuífero durante el año k.

La columna (5) indica el almacenamiento en el acuífero al final del año k.

Como se puede observar en la Tabla 7.2, al final del noveno año, el almacenamiento en el acuífero es de $70,49 \times 10^6 m^3$. Considerando la recarga durante el décimo año, sería posible bombear en este año un total de $144,20 \times 10^6 m^3$. Este volumen es inferior a la demanda de $210,64 \times 10^6 m^3$., a ser satisfecha durante el décimo año. Luego, es necesario que se disponga del embalse por lo menos al inicio del décimo año. Para que esto ocurra, se debe empezar la construcción del mismo por lo menos al inicio del séptimo año, conforme ilustra la figura 7.1.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 7.2.

SISTEMA MASPARRO

BALANCE DE LAS RESERVAS DEL ACUIFERO

k = año de la vida útil del proyecto
SS_i = almacenamiento en el acuífero al inicio del año k, en $10^6 m^3$
DBR = demanda bruta de riego en el año k, en 10^6 m^3
RA = recarga natural del acuífero, en 10^6 m^3
SS_f = almacenamiento en el acuífero al final del año k, en 10^6 m^3

$$SS_f = SS_i - DBR + RA$$

(1) k	(2) SS_i	(3) DBR	(4) RA	(5) SS_f
1	851,95	40,34	40,34	851,95
2	851,95	80,65	73,71	845,01
3	845,01	120,99	73,71	797,73
4	797,73	161,30	73,71	710,14
5	710,14	201,64	73,71	582,21
6	582,21	201,64	73,71	454,28
7	454,28	201,64	73,71	326,35
8	326,35	201,64	73,71	198,42
9	198,42	201,64	73,71	70,49
10	70,49	201,64	73,71	-

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

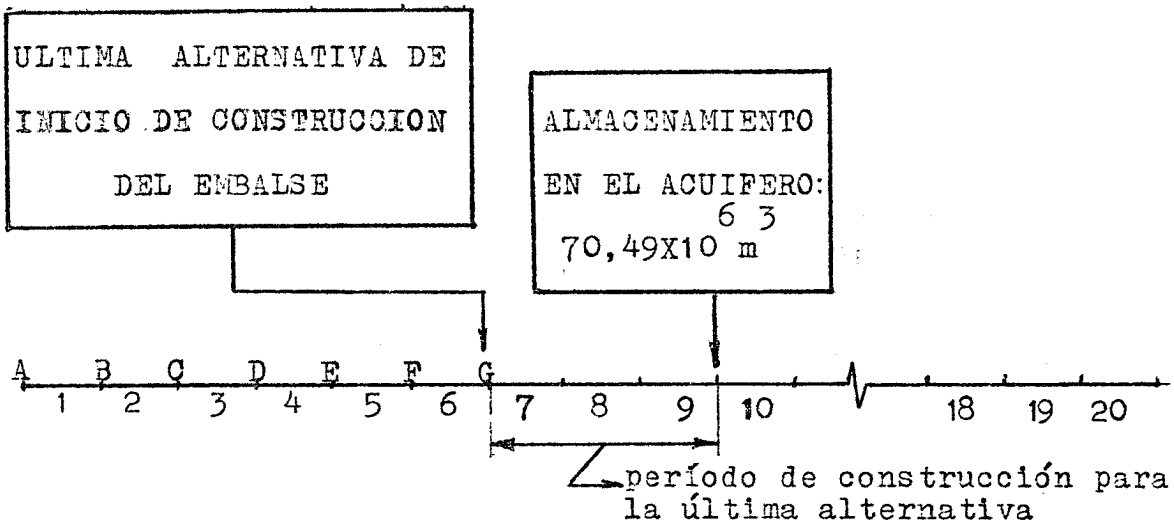


Figura 7.1. Esquema Indicativo de las Distintas Alternativas para el Inicio de la Construcción del Embalse.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Los puntos A, B, C, D, E, F y G, ilustrados en la Figura 7.1, indican las siete alternativas posibles para èl inicio de la construcción del embalse.

Costos del Agua Subterránea

Flores (1974) ha estudiado la composición de costos por pozo para la zonas A, B y C. Los costos fijos o de construcción incluyen la perforación, el equipo de bombeo y la instalación de los pozos. La instalación incluye el engravado y el suministro y colocación de las tuberías y de la rejilla. Los costos variables incluyen el consumo de energía eléctrica y el mantenimiento y reparación de los equipos.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Costos Fijos.

Los costos fijos por pozo, para las tres zonas, son los siguientes,

zona	A	107.130 Bs.
zona	B	87.920 Bs.
zona	C	75.680 Bs.

El costo denominado CSF es el promedio ponderado de los costos para las zonas A, B y C,

$$CSF = \frac{107.130 \times 12.100 + 87.920 \times 4.900 + 75.680 \times 12.000}{29.000}$$

luego,

$$CSF = 90.870 \text{ Bs/pozo}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La corrección de este costo para el año 1975, resulta,

$$CSF = 101.775 \text{ Bs/pozo}$$

Costos Variables.

Los costos variables por pozo, para las tres zonas, son los siguientes,

zona	A	20.110 Bs./año
zona	B	7.515 Bs./año
zona	C	5.340 Bs./año

El costo anual denominado CSV, es el promedio ponderado de los costos variables para las zonas A, B y C,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$CSV = \frac{20.110 \times 12.100 + 7.515 \times 4.900 + 5.340 \times 12.000}{29.000}$$

luego,

$$CSV = 11.870 \text{ Bs./pozo/año}$$

Este costo corregido para el año 1975 es,

$$CSV = 13.295 \text{ Bs./pozo/año.}$$

Agua Superficial

Las alternativas de iniciar la construcción del embalse en distintos años, resultan en distintas vidas útiles para el embalse.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

El modelo determinístico de Revelle et al (1969) supone siempre el período de registro igual al número de años de la vida útil del embalse. De esta manera, para cada alternativa de inicio de construcción del embalse, es necesario verificar en el registro la ocurrencia de cambios en los mayores y menores gastos observados. Estos gastos, que han sido denominados respectivamente como,

$$\text{máx } r_{[i+12(k-1)]} \text{ y mín } r_{[i+12(k-1)]},$$

son utilizados en las restricciones del modelo determinístico de Revelle et al (1969).

Como se ha discutido en el Capítulo IV, el volumen muerto del embalse es función de la vida útil de la obra, lo cual también debe ser tomado en cuenta para las diferentes alternativas

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

de inicio de construcción del embalse.

Evidentemente, el embalse tendrá la mayor vida útil para la alternativa de empezarse su construcción al inicio del primer año. Esta vida útil es de 17 años. El período de registro considerado es aquel correspondiente a los años comprendidos entre 1957 y 1973, cuyos volúmenes escurridos en $10^6 m^3$ son presentados en la Tabla 4.2. Para la alternativa de empezar la construcción al inicio del segundo año, la vida útil es de 16 años y el período de registro considerado es 1958-1973.

Con base en ese razonamiento se ha preparado la Tabla 7.3 donde aparecen, para cada alternativa, los valores del mayor y menor gasto observado en el período de registro correspondiente. En esta tabla también consta el volumen muerto necesario para el embalse para cada alternativa.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En este modelo se ha considerado, para todas las alternativas, el inicio de la operación con el embalse lleno. En otros términos, para todas las alternativas, la variable a_o es igual a la unidad.

Costos del Agua Superficial

La obtención y la composición de esos costos ha sido presentada en el Capítulo anterior. El costo total del agua superficial, por unidad de volumen almacenado en el embalse, se trató como el valor actual de la suma de los costos C1, C2 y C3a, donde,

C1 = costo de construcción de la presa,
C2 = costo de construcción de los canales principales y de la estructura de toma,
C3a= costo anual de operación y manteniemiento de estas obras.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 7.3.

RIO MASPARRO EN PUENTE MASPARRO - SISTEMA MASPARRO. MAXIMOS Y MINIMOS VOLUMENES ESCURRIDOS MENSUALES, (máx $r_{[i+12(k-1)]}$) y (min $r_{[i+12(k-1)]}$), PERIODOS DE REGISTRO Y VIDAS UTILES CORRESPONDIENTES A CADA ALTERNATIVA DE INICIO DE CONSTRUCCION DEL EMBALSE, VOLUMEN MUERTO (S_{min}) NECESARIO PARA EL CONTROL DE SEDIMENTACION.

UNIDADES: 10^6 m^3

1) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL PRIMER AÑO DEL PROYECTO.
VIDA UTIL = 17 años, PERIODO - 1957-1973, S_{min} = 9,180

MES	max $r_{[i+12(k-1)]}$	min $r_{[i+12(k-1)]}$
Enero	117,590	8,464
Febrero	66,670	5,182
Marzo	113,990	5,819
Abril	219,220	18,351
Mayo	214,840	50,048
Junio	207,496	57,723
Julio	231,777	79,522
Agosto	179,692	91,656
Septiembre	148,297	71,640
Octubre	173,353	52,532
Noviembre	122,446	29,905
Diciembre	64,450	12,306

2) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL SEGUNDO AÑO DEL PROYECTO
VIDA UTIL = 16 años, PERIODO - 1958-1973, S_{min} = 8,640
No hay cambios para los máximos y mínimos volúmenes escurridos mensuales.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 7.3. (continuación)

3) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL TERCER AÑO DEL PROYECTO.
VIDA UTIL = 15 años, PERIODO - 1959-1973, S_{min} = 8,100
No hay cambios para los máximos y mínimos volúmenes escurridos mensuales.

4) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL CUARTO AÑO DEL PROYECTO.
VIDA UTIL = 14 años, PERIODO - 1960-1973, S_{min} = 7,560
No hay cambios para los mínimos volúmenes escurridos mensuales.
Cambio para máx $r_{[i+12(k-1)]}$:

MES	máx $r_{[i+12(k-1)]}$
Septiembre	139,983

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

5) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL QUINTO AÑO DEL PROYECTO.
VIDA UTIL = 13 años, PERIODO - 1961-1973, S_{min} = 7,020
No hay cambios para los mínimos volúmenes escurridos mensuales.
Cambio para máx $r_{[i+12(k-1)]}$:

MES	máx $r_{[i+12(k-1)]}$
Julio	190,123

6) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL SEXTO AÑO DEL PROYECTO.
VIDA UTIL = 12 años, PERIODO - 1962-1973, S_{min} = 6,480
No hay cambios para los máximos volúmenes escurridos mensuales.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 7.3. (continuación)

Cambio para mín r $\left[i+12(k-1)\right]$

MES	mín r $\left[i+12(k-1)\right]$
Mayo	59,837

7) INICIO DE CONSTRUCCION EN EL SEPTIMO AÑO DEL PROYECTO.
VIDA UTIL = 11 años, PERIODO - 1963-1973, S_{min} = 5,940

Cambios para máx r $\left[i+12(k-1)\right]$ y min r $\left[i+12(k-1)\right]$

MES	máx r $\left[i+12(k-1)\right]$	min r $\left[i+12(k-1)\right]$
Mayo	-	60,645
Septiembre	130,359	-
Diciembre	-	20,179

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Los valores obtenidos para estos costos fueron los siguientes,

$C1 = 0,1823 \ Bs./m^3.$

$C2 = 0,0313 \ Bs./m^3.$ (7.1)

$C3a = 0.0011 \ Bs./m^3/año$ (7.2)

En la adaptación del modelo de Eisel (1972) al Sistema Masparro, el valor actualizado de la suma de esos costos multiplicado por la capacidad del embalse, representaba el costo total del agua superficial. En el presente Capítulo, el costo del agua superficial es tratado como una función lineal de la capacidad del embalse. En vez de promediarse los tres costos estimados por CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971) para la obtención del costo C1, se ha ajustado a esos puntos, por el método de los mínimos cuadrados, una recta cuya ecuación es:

$$C1 = 0,11C + 14,35 \quad (7.3)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

donde,

C = capacidad del embalse

Las unidades para esta ecuación son millones de Bolívares y millones de metros cúbicos.

Como el tiempo de construcción del embalse Masparro es de tres años, el valor C1 debe ser pagado a los contratistas de la obra, durante este período. Según el ejemplo de Kuiper (1969), el valor C1 deberá ser pagado en los siguientes porcentajes anuales;

1° año	0,30 C1
2° año	0,45 C1
3° año	0,25 C1

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Luego, la actualización del costo C1 para el primer año de la vida útil del proyecto está dada por,

$$VAC1 = (0,30\ C1)f_k + (0,45\ c1)f_{k+1} + (0,25\ C1)f_{k+2} \qquad (7.4)$$

donde,

VAC1 = valor actualizado del costo C1 para el inicio del primer año de la vida útil del proyecto.

f_k, f_{k+1}, f_{k+2} = factores de valor presente para la tasa del 8% al año, que dependen del año de inicio de la construcción del embalse.

Reemplazando C1 en la ecuación (7.4), por su equivalente de la ecuación (7.3), se tiene,

$$VAC1 = (0,0330C + 4,3050)\ f_k + (0,0495C + 6,4575)\ f_{k+1} + (0,0275C + 3,5875)\ f_{k+2} \qquad (7.5)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La construcción de los canales y de la estructura de toma, debe ser simultánea a la construcción del embalse. Considerando tres pagos iguales durante la ejecución de estas obras, la actualización del costo C2 puede ser obtenida por,

$$VAC2 = (0,33C2)\ f_k + (0,33C2)\ f_{k+1} + (0,34C2)\ f_{k+2} \qquad (7.6)$$

donde,

VAC2 = valor actualizado del costo C2 para el inicio del primer año de la vida útil del proyecto.

Reemplazando C2 en la ecuación (7.6), por su equivalente de la ecuación (7.1) se tiene,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$VAC2 = (0,0104C)\ f_k + (0,0104C)\ f_{k+1} + (0,0104C)\ f_{k+2} \qquad (7.7)$$

Los costos de operación y mantenimiento son anuales, y su actualización para el primer año del proyecto es obtenida por,

$$VAC3 = f_{k+2}\ (C3a)\ \bar{f}_{20-(k+1)} \qquad (7.8)$$

Donde,

VAC3 = valor actual de los costos anuales de operación y mantenimiento de las obras, al inicio del primer año de la vida útil delproyecto.

$\bar{f}_{20-(k+1)}$ = factor de valor presente para la tasa del 8% y para 20-(k+1) anualidades.

Reemplazando C3a en la ecuación (7.8), por su equivalente de la ecuación (7.2), se tiene,

$$VAC3 = f_{k+2}(0,0011C)\ \bar{f}_{20-(k+1)} \qquad (7.9)$$

Luego, el costo total del agua superficial, actualizado para el inicio del primer año de la vida útil del Sistema, COSTSUP, es,

$$COSTSUP = VAC1 + VAC2 + VAC3 \qquad (7.10)$$

Reemplazando VAC1, VAC2 y VAC3 en la ecuación (7.10), por sus equivalentes de la ecuaciones (7.5), (7.7) y (7.9), se tiene,

$$COSTSUP = (0,0330C + 4,3050)\ f_k + (0,0495C + 6.4575) f_{k+1} +$$
$$+(0,0275C + 3,5875)\ f_{k+2} + (0,0104C)\ f_k +$$
$$+(0,0104C)\ f_{k+1} + (0,0104C)\ f_{k+2} +$$
$$+ f_{k+2}\ (0,0011C)\ \bar{f}_{20-(k+1)}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Simplificando esta expresión, se tiene,

$$COSTSUP = f_k\ (0,0434C + 4,3050) + f_{k+1}\ (0,0599C + 6,4575) +$$

$$+ f_{k+2}\ (0,0379C + 3,5875) + f_{k+2}\ (0,0011C)\ \bar{f}_{20-(k} \qquad (7.11$$

Se ha desarrollado un programa de computación para expresar la ecuación (7.11) en función de la capacidad del embalse para cada alternativa de inicio de construcción del mismo. Las ecuaciones resultantes aparecen en la hoja de resultados del programa, que constituye la Tabla 7.4.

Terminología Utilizada

El subíndice k, indica el año de la vida útil de proyecto,

$$k = 1,\ldots, 20$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

El subíndice t, indica los números de orden de los meses en la vida útil del proyecto,

$$t = 1,\ldots, 240$$

El subíndice i, indica los meses del año,

$$i = 1,\ldots,12$$

La relación de variables que aparecen en las ecuaciones e inecuaciones del modelo es la siguiente,

COSTO = valor actualizado del costo total del proyecto, variable de decisión.

COSTSUP = valor actualizado del costo total del agua superficial en el proyecto, variable de decisión.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COSTSUB = valor actualizado del costo total del agua subterránea en el proyecto, variable de decisión.

CSF = costo total de instalación de un pozo.

CSV = costo anual de operación y mantenimiento de un pozo.

C = capacidad del embalse, variable de decisión.

X_t = volumen total de agua cedido por el embalse, durante el mes t, a ser determinado.

S_t = almacenamiento en el embalse al final del mes t, a ser determinado.

R_t = volumen aportado al embalse durante el mes t, de la vida útil del proyecto.

$\text{máx } r_{[i+12(k-1)]}$ = mayor volumen escurrido mensual observado en el período de registro correspondiente a la vida útil del embalse.

$\text{mín } r_{[i+12(k-1)]}$ = menor volumen escurrido mensual observado en el período de registro correspondiente a la vida útil del embalse.

B_i = parámetro de decisión relativo al mes i, variable de decisión.

V_i = volumen correspondiente al borde libre en el embalse al final del mes i, para el control de inundaciones en el mes(i+1).

DRB_t = demanda bruta de riego en el mes t.

DBR_i = demanda bruta de riego en el mes i, después de totalmente implantadas las 25.000 Ha.

DER_t = derechos de agua en el mes t.

DER_i = derechos de agua en el mes i, después de totalmente implantadas las 25.000 Ha.

DBR_k = demanda bruta de riego en el año k.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

T A B L A 7.4.

ECUACIONES DEL COSTO ACTUALIZADO DEL AGUA SUPERFICIAL EN FUNCION DE LA CAPACIDAD DEL EMBALSE (EMBALSE+ESTRUCTURA DE TOMA + CANALES PRINCIPALES + OPERACION Y MANTENIMIENTO)

CONSTRUCCION EMPEZANDO AL INICIO DEL AÑO	ECUACION(MILLONES DE BS Y MILLONES DE M3)
1	0.140C + 13.360
2	0.130C + 12.370
3	0.120C + 11.453
4	0.111C + 10.605
5	0.102C + 9.820
6	0.094C + 9.093
7	0.087C + 8.419

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DER_k = derechos de agua en el año k.

$S_{mín}$ = volumen muerto en el embalse para el control de sedimentación.

XSk = volumen total bombeado del acuífero en el año k, a ser determinado.

SS_k = almacenamiento en el acuífero al final del año k, a ser determinado.

RA = recarga natural anual del acuífero.

xs_t = volumen total bombeado del acuífero en el mes t, a ser determinado.

Las unidades de las variables citadas son millones de Bolívarea o millones de metros cúbicos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Función Objetiva

La función objetiva, en su forma más simple está dada por,

$$COSTO = \text{Min } [COSTSUP + COSTSUB]$$

donde,

$COSTSUP = a\,C + b$ (los valores de a y b varían para cada alternativa, ver Tabla 7.4).

$$COSTSUB = \frac{1}{PA} \{CSF [XS1 + f_1 (XS2-XS1) + f_2 (XS3-XS2) + f_3 (XS4-XS3) + f_4 (XS5-XS4)] + CSV [XS1f_1 + XS2f_2 + XS3f_3 + XS4f_4 + XS5f_5 + XS6f_6 + XS7f_7 + XS8f_8 + XS9f_9 + XS10f_{10} + XS11f_{11} + XS12f_{12} +$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

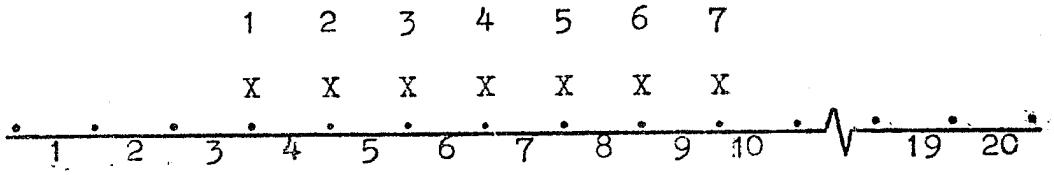
$$+ XS13f_{13} + XS14f_{14} + XS15f_{15} + XS16f_{16} + XS17f_{17} +$$

$$+ XS18f_{18} + XS19f19 + XS20f_{20}]\} \qquad (7.12)$$

Siendo,

$f_k = f_1, \ldots, f_{20}$, los factores de valor presente para la tasa del 8% al año.

La expresión (7.12) puede ser fácilmente interpretada con el auxilio de las Figuras 7.2 y 7.3,



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Figura 7.2. Esquema Ilustrativo del Inicio de la Operación del Embalse para las Distintas Alternativas.

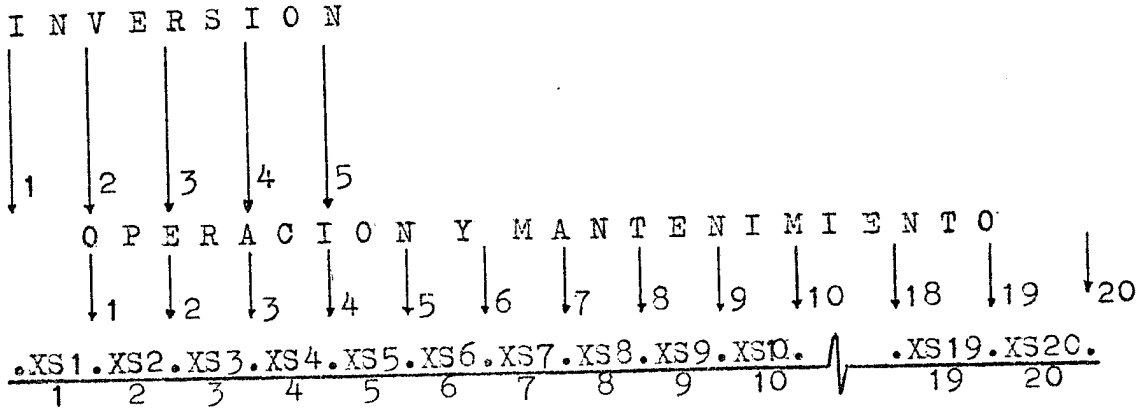


Figura 7.3. Esquema Ilustrativo del Programa de Inversiones y Gastos de Operación y Mantenimiento para el Agua Subterránea.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En la Figura 7.2, los indicadores "X", indican el inicio de operación para las diversas alternativas. Los números sobre indicados identifican el año en cuyo inicio ha sido empezada la construcción del embalse.

En la Figura 7.3 ilustra el programa de inversiones y gastos de operación y mantenimiento para el agua subterránea. Los números indicados identifican el año a que se refiere la inversión, ó el gasto con operación y mantenimiento. También se indican los volúmenes XSk bombeados en cada año.

El primer miembro entre corchetes de la ecuación (7.12), multiplicado por CSF y dividido por PA, corresponde al costo fijo total y actualizado del agua subterránea en el proyecto. Es decir, es la inversión total para la instalación de pozos en el proyecto.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Sea el volumen XS1, bombeado en el primer año del proyecto. Este volumen, dividido por la producción anual por pozo PA, resulta en el número de pozos n_1, perforados durante el primer año del proyecto,

$$n_1 = \frac{XS1}{PA}$$

Este número de pozos, multiplicado por el costo fijo por pozo CSF, resulta en el costo de instalación de pozos en el primer año. Esta inversión se hace al inicio del primer año, conforme ilustra la Figura 7.3. Luego, para el primer año, el costo de inversión no es multiplicado por ningún factor de actualización.

En el segundo año se va a construir un número de pozos n_2, igual a,

$$n_2 = \frac{XS2 - XS1}{PA}$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

El costo de esos nuevos pozos está dado por,

$$n_2 \cdot CSF = \left(\frac{XS2 - XS1}{PA} \right) CSF \qquad (7.13)$$

Esta inversión es hecha al inicio del segundo año, conforme ilustra la Figura 7.3. La expresión (7.13) tiene que ser multiplicada por el factor de actualización f_1, correspondiente a un año de interés.

Este esquema se repite hasta el quinto año. Al final de este año, ya están desarrolladas las 25.000 Ha. del proyecto y no se admite la perforación de más pozos.

Sea la alternativa de la construcción del embalse al inicio del primer año. Según la Figura 7.2, el embalse estará listo al inicio del cuarto año. En este caso, los valores de,

$$XS4 - XS3 \qquad (7.14)$$

y

$$XS5 - XS4 \qquad (7.15)$$

resultarán nulos en la optimización. Esto significa que no es económico continuar la perforación de pozos después de construido el embalse.

Lo mismo va a ocurrir para, XS5 - XS4 en la alternativa de empezarse la construcción del embalse al inicio del segundo año. Para los demás casos, los valores de las expresiones (7.14) y (7.15) resultarán positivos, debido a que el embalse no estará listo antes de fin del quinto año.

El segundo miembro entre corchetes de la expresión (7.12), multiplicado por CSV y dividido por PA, corresponde al costo variable total y actualizado del agua subterránea, en el proyecto. Al contrario de las inversiones para perforación, estos costos son pagados al final de cada año, como se observa en la Figura 7

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Sea el volumen XS1, bombeado en el primer año del proyecto. Este volumen, dividido por la producción anual por pozo PA, resulta en el número de pozos utilizados en el primer año, para sacarse XS1 del acuífero. Este número de pozos, multiplicado por el costo variable por pozo CSV, resulta en el gasto total en operación y mantenimiento para el primer año. Este gasto debe ser hecho al final del primer año. Luego es necesario multiplicarlo por el factor de actualización f_1, correspondiente a un año de interés.

El mismo esquema se aplica para los demás años.

Para la aplicación del programa LPS/360, se definen las variables DELTA 1, DELTA 2, DELTA 3 y DELTA 4, donde,

$$\text{DELTA 1} = \text{XS2} - \text{XS1}$$
$$\text{DELTA 2} = \text{XS3} - \text{XS2}$$
$$\text{DELTA 3} = \text{XS4} - \text{XS3}$$
$$\text{DELTA 4} = \text{XS5} - \text{XS4}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Sustituyendo las variables DELTA, PA, CSF, CSV, y f_k por sus valores, la ecuación (7.12) resulta,

$$\begin{aligned}\text{COSTSUB} = {} & 0{,}1301\text{XS1} + 0{,}1205\ \text{DELTA 1} + 0{,}1116\ \text{DELTA 2} + \\ & + 0{,}1033\ \text{DELTA 3} + 0{,}0957\ \text{DELTA 4} + 0{,}0157\text{XS1} + \\ & + 0{,}0146\text{XS2} + 0{,}0135\text{XS3} + 0{,}0125\text{XS4} + 0{,}0116\text{XS5} + \\ & + 0{,}0107\text{XS6} + 0{,}0099\text{XS7} + 0{,}0092\text{XS8} + 0{,}0085\text{XS9} + \\ & + 0{,}0079\text{XS10} + 0{,}0073\text{XS11} + 0{,}0068\text{XS12} + 0{,}0063\text{XS13} + \\ & + 0{,}0058\text{XS14} + 0{,}0054\text{XS15} + 0{,}0050\text{XS16} + 0{,}0046\text{XS17} + \\ & + 0{,}0043\text{XS18} + 0{,}0039\text{XS19} + 0{,}0036\text{XS20} \qquad (7.16)\end{aligned}$$

La ecuación (7.16) no cambia para las diversas alternativas de inicio de construcción del embalse.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricciones

Como se ha mencionado en el Capítulo II, la relación entre los subíndices t e i, está dada por,

$$t = [i + 12\ (k-1)]$$

Para el agua superficial son válidas las siguientes ecuaciones, discutidas en el Capítulo II,

$$X_t = B_{i-1} - B_i + R_{t-1} \qquad (7.17)$$

$$S_t = B_i + R_t \qquad (7.18)$$

A continuación se desarrollan las expresiones que gobiernan el modelo para cada alternativa de inicio de la construcción del embalse.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Construcción del Embalse empezando al Inicio del Primer Año

Restricción 1

El bombeo en los tres primeros años debe satisfacer las demandas brutas de riego durante esos años.

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,2,3 \qquad (7.19)$$

Restricción 2

El almacenamiento en el acuífero al final de un determinado año es igual al almacenamiento al final del año anterior, menos el bombeo en el año considerado, y más la recarga del acuífero,

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + RA \ ; K = 2,\ldots\ 20 \qquad (7.20)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La ecuación (7.18) es la expresión de la continuidad en el acuífero.

Para el primer año, la demanda de riego es inferior a la recarga. Luego, al final de este año, el almacenamiento en el acuífero permanece constante,

$$SS_1 = 851,95 \qquad (7.21)$$

Restricción 3

El volumen total bombeado en un año es igual a la suma de los bombeos mensuales. Estos bombeos se refieren a los meses de enero, febrero, marzo, abril y diciembre.

$$XSk = \sum_{i=1}^{4} xs\,[i+12(k-1)] + xs\,[12+12(k-1)] \; ; k = \ldots,20 \qquad (7.22)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 4

Después de concluido el embalse, el volumen total de agua cedido por él en cada mes, debe ser por lo menos igual a los derechos de agua. De acuerdo a la Figura 7.2, para esta alternativa el embalse estará listo al inicio del cuarto año. Según la Tabla 7.1, durante el cuarto año existen 20.000 Ha. productivas. Luego, para el cuarto año, esta restricción se escribe,

$$X_t \geq DER_t \qquad t = 37,\ldots,48$$

Reemplazando X_t por su equivalente de la ecuación (7.17), se tiene,

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_t - R_{t-1} \qquad t = 38,\ldots,48 \quad i = 2,\ldots12 \qquad (7.23)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$C - B_1 \geq DER_{37} \qquad (7.24)$$

La expresión (7.24) se refiere al primer mes de operación del embalse. Trátase del mismo caso de la restricción (2.18). En el Capítulo II se ha explicado por qué no tiene sentido escribir los parámetros de decisión, ni los aportes antes del inicio de la operación del embalse.

A partir del inicio del quinto año, las 25.000 Ha. ya están definitivamente bajo riego. Esta restricción entonces se generaliza como,

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_i - \text{mín } R_{[i-1+12(K-1)]} \qquad \begin{matrix} k = 5,\ldots,20 \\ i = 2,\ldots,12 \end{matrix} \qquad (7.25$$

$$B_{12} - B_1 \geq DER_1 - \text{mín } R_{[12+12\ (k-1)]} \qquad k = 5,\ldots,20 \qquad (7.25$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Las expresiones (7.23) y (7.25) establecen dos límites inferiores distintos para la expresión,

$$B_{i-1} - B_i \qquad i = 2,\ldots,12$$

Luego, de las 22 restricciones implícitas en las expresiones (7.23) y (7.25), solamente 11 son activas.

Restricción 5

Después de concluido el embalse, la demanda de riego es satisfecha por las dos fuentes de agua.

Sea la cantidad total de agua cedida por el embalse en un mes de riego, descontados los derechos de agua. Esa cantidad, sumada a la cantidad bombeada en el mes considerado, debe satisfacer la demanda de riego en ese mes.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La Figura 7.4 ilustra la contribución del agua superficial para regar el área esquematizada,

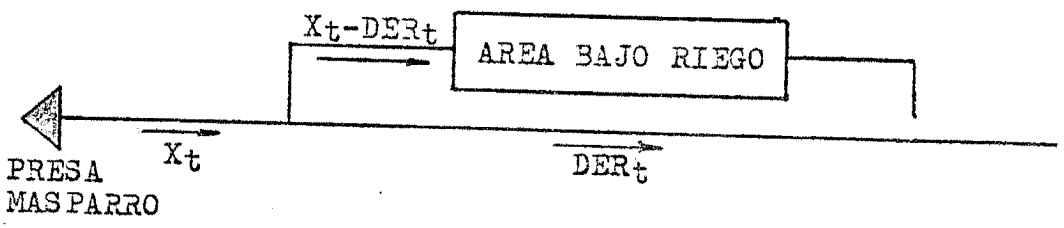


Figura 7.4. Esquema Ilustrativo para la restricción 5.

Para el cuarto año del proyecto, esta restricción se escribe,

$$X_t - DER_t + xs_t \geq DBR_t \qquad t = 37,38,39,40,48$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Reemplazando X_t por su equivalente de la ecuación (7.17),se tiene,

$$B_{i-1} - B_i + xs_t \geq DBR_t + DER_t - R_{t-1} \qquad t = 37,38,39,40,48 \qquad (7.27)$$

y

$$C - B_1 + xs_{37} \geq DBR_{37} + DER_{37} \qquad (7.28)$$

Al inicio del quinto año, las 25.000 Ha. del proyecto ya es - tán definitivamente bajo riego. La restricción se escribe enton - ces,

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$i = 2,3,4,12$$
$$k = 5,\ldots,20 \qquad (7.29)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

y también,

$$B_{12} - B_1 + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[12+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} k = 5,\ldots,20 \\ i = 1 \end{matrix} \qquad (7.30)$$

Restricción 6

El bombeo en los meses de riego debe ser inferior o igual a las demandas de riego mensuales. Para el cuarto año del proyecto esta restricción se escribe,

$$xs_t \leq DBR_t \qquad t = 37,38,39,40,48 \qquad (7.31)$$

A partir del inicio del quinto año, la restricción se escribe

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,4,12 \\ k = 5,\ldots,20 \end{matrix} \qquad (7.32)$$

Restricción 7

Después de concluido el embalse, el volumen vacío disponible al final del mes t, debe ser superior o igual al volumen V_i previsto para contener las probables crecidas en el próximo mes.

$$c - S_t \geq V_i$$

Reemplazando S_t por su equivalente de la ecuación (7.18),

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots,12 \\ t = 4,\ldots,20 \end{matrix} \qquad (7.33)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 8

El almacenamiento en el embalse al final del mes t, debe ser superior al volumen muerto del embalse,

$$S_t \geq Smín$$

Reemplazando S_t por su equivalente de la ecuación (7.18),

$$B_i \geq Smín - mín\ R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots,12 \qquad k = 4,\ldots\ 20 \qquad (7.34)$$

Restricción 9

La suma de los bombeos anuales hasta el final del año k, no puede ultrapasar la cantidad de agua presente en el acuífero durante los k primeros años del proyecto,

$$\sum_{j=4}^{k} XSj \leq SS_3 + (k-3)\ RA \qquad k = 4,\ldots,20 \qquad (7.35)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Por ejemplo, hasta el final del quinto año se debe tener,

$$XS1 + XS2 + XS3 + XS4 + XS5 \leq 851{,}95 + 5\ RA$$

donde,

851,95 = almacenamiento en el acuífero al inicio del primer año.

Como XS1 es igual a la demanda de riego en el primer año, e inferior a la recarga anual, el almacenamiento en el acuífero permanece constante al final del primer año. Luego,

$$XS2 + XS3 + XS4 + XS5 \leq 851{,}95 + 4\ RA$$

De acuerdo a la restricción (7.19), XS2 y XS3 son conocidos.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Pasando XS2 para el lado derecho de la expresión, se obtiene,

$$XS3 + XS4 + XS5 < (851{,}95 - XS2 + RA) + 3\ RA$$

De acuerdo a la restricción (7.20), el miembro entre paréntesis es igual a SS_2, o sea,

$$XS3 + XS4 + XS5 \leqslant SS_2 + RA + 2\ RA$$

Pasando XS3 para el lado derecho de la expresión, se tiene,

$$XS4 + XS5 \leqslant (SS_2 - XS3 + RA) + RA$$

De acuerdo a la restricción (7.20), es lo mismo escribir,

$$XS4 + XS5 \leqslant SS_3 + 2\ RA$$

o sea,

$$\sum_{j=4}^{k} XSj \leqslant SS_3 + (k-3)\ RA \qquad k = 5$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Existen restricciones que establecen límites inferiores lógicos a variables que representan ciertos eventos del Sistema, tales como,

$$xs_t \geqslant 0$$

$$SS_t \geqslant 0$$

Estas restricciones no necesitan ser especificadas para la aplicación del programa LPS/360, que fija automáticamente el límite inferior cero a toda variable cuyo límite inferior no es definido en los datos del modelo.

Los conjuntos de restricciones, explícita o implícitamente

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

definidos por las expresiones (7.19) a (7.35), definen las limitaciones físicas y operacionales del Sistema. Estas expresiones y la función objetiva, constituyen los datos de entrada para el programa LPS/360.

Mediante razonamientos similares se puede establecer, para las demás alternativas, las restricciones que se presentan a continuación.

Construcción del Embalse Empezando al Inicio del Segundo Año

Restricción 1

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,\ldots, 4$$

Restricción 2

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + RA \qquad k = 2,\ldots, 20$$

$$SS_1 = 851{,}95$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 3

$$XSk = \sum_{i=1}^{4} xs_{[i+12(k-1)]} + xs_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 1,\ldots, 20$$

Restricción 4

$$C - B_1 \geq Der_{49}$$

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_1 \min R_{[i-1+12(k-1)]} \qquad i = 2,\ldots,12 \qquad k = 5,\ldots,20$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$B_{12}-B_1 \geq DER_1 - \min R_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 5,\ldots,20$$

Restricción 5

$$C - B_1 + xs_{49} \geq DBR_{49} + DER_{49}$$

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$i = 2,3,4,12$$
$$k = 5,\ldots, 20$$

$$B_{12} - B_1 + xs_{[1+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[12+12(k-1)]}$$

$$k = 5,\ldots, 20$$
$$i = 1$$

Restricción 6

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad i = 1,2,3,4,12 \quad k = 5,\ldots, 20$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 7

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots, 12 \quad k = 5,\ldots, 20$$

Restricción 8

$$B_i \geq S_{\text{mín}} - \text{mín } R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots, 12 \quad k = 5,\ldots, 20$$

Restricción 9

$$\sum_{j=5}^{k} XSj \leq SS_4 + (k-4)\ R\ A \qquad k = 5,\ldots, 20 \qquad (6.36)$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Construcción del Embalse empezando al Inicio del Tercer Año

Restricción 1

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,\ldots, 5$$

Restricción 2

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + R\ A \qquad k = 2,\ldots, 20$$

$$SS_1 = 851{,}95$$

Restricción 3

$$XSk = \sum_{i=1}^{4} xs_{[i+12(k-1)]} + xs_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 1,\ldots, 20$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 4

$$C - B_1 \geq DER_{61}$$

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_i - \text{mín } R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 2,\ldots, 12;\ k = 6,\ldots, 20$$

$$B_{12} - B_1 \geq DER_1 - \text{mín } R_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 6,\ldots, 20$$

Restricción 5

$$C - B_1 + xs_{61} \geq DBR_{61} + DER_{61}$$

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$i = 2,3,4,12 \qquad k = 6,\ldots, 20$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$B_{12} - B_1 + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{|12+12(k-1)|}$$

$k = 6,\ldots, 20$
$i = 1$

Restricción 6

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad i = 1,2,3,4,12 \quad k = 6,\ldots, 20$$

Restricción 7

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots, 12 \quad k = 6,\ldots, 20$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 8

$$B_i \geqslant Smín - mín\ R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots, 12 \quad k = 6,\ldots, 20$$

Restricción 9

$$\sum_{j=6}^{k} XSj \leq SS_5 + (k-5)\ R\ A \qquad k = 6,\ldots,20$$

Construcción del Embalse empezando al Inicio del Cuarto Año

Restricción 1

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,\ldots, 6$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 2

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + R\,A \qquad k = 2,\ldots,20$$

$$SS_1 = 851{,}95$$

Restricción 3

$$XSk = \sum_{i=1}^{4} xs_{[i+12(k-1)]} + xs_{[12+12(k-1)]} \quad k = 1,\ldots,20$$

Restricción 4

$$C - B_1 \geq DER_{73}$$

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_i - \text{mín } R_{[i+12(k-1)]} \quad \begin{matrix} i = 2,\ldots,12 \\ k = 7,\ldots,20 \end{matrix}$$

$$B_{12} - B_1 \geq DER_1 - \text{mín } R_{[12+12(k-1)]} \quad k = 7,\ldots,20$$

Restricción 5

$$C - B_1 + xs_{73} \geq DBR_{73} + DER_{73}$$

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$\begin{matrix} i = 2,3,4,12 \\ k = 7,\ldots,20 \end{matrix}$$

$$B_{12} - B_1 + xs_{[1+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[12+12(k-1)]}$$

$$\begin{matrix} k = 7,\ldots,20 \\ i = 1 \end{matrix}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 6

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,4,12 \\ k = 7,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Restricción 7

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots, 12 \\ k = 7,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Restricción 8

$$B_i \geq Smín - \text{mín } R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots, 12 \\ k = 7,\ldots, 20 \end{matrix}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 9

$$\sum_{j=7}^{k} XSj \leq SS_6 + (k-6)\ R\ A \qquad k = 7,\ldots, 20$$

Construcción del Embalse empezando al Inicio del Quinto Año

Restricción 1

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,\ldots, 7$$

Restricción 2

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + R\ A \qquad k = 2,\ldots, 20$$

$$SS_1 = 851,95$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 3

$$XS_k = \sum_{i=1}^{4} xs_{[i+12(k-1)]} + xs_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 1,\ldots, 20$$

Restricción 4

$$C - B_1 \geq DER_{85}$$

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_i - \text{mín } R_{[i-1+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 2,\ldots, 12 \\ k = 8,\ldots, 20 \end{matrix}$$

$$B_{12} - B_1 \geq DER_1 - \text{mín } R_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 8,\ldots, 20$$

Restricción 5

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$C - B_1 + xs_{85} \geq DBR_{85} + DER_{85}$$

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$\begin{matrix} i = 2,3,4,12 \\ k = 8,\ldots, 20 \end{matrix}$$

$$B_{12} - B_1 + xs_{[1+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[12+12(k-1)]}$$

$$\begin{matrix} k = 8,\ldots, 20 \\ i = 1 \end{matrix}$$

Restricción 6

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,4,12 \\ k = 8,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 7

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots, 12 \\ k = 8,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Restricción 8

$$B_i \geq \text{Smín} - \text{mín } R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots, 12 \\ k = 8,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Restricción 9

$$\sum_{j=8}^{k} XS_j \leq SS_7 + (k-7)\ R\ A \qquad k = 8,\ldots, 20$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Construcción del Embalse empezando al Inicio del Sexto Año

Restricción 1

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,\ldots, 8$$

Restricción 2

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + R\ A \qquad k = 2,\ldots, 20$$

$$SS_1 = 851{,}95$$

Restricción 3

$$XSk = \sum_{i=1}^{4} xs_{[i+12(k-1)]} + xs_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 1,\ldots, 20$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 4

$$C - B_1 \geq DER_{97}$$

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_i - \text{mín } R_{[i-1+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 2,\ldots, 12 \\ k = 9,\ldots, 20 \end{matrix}$$

$$B_{12} - B_1 \geq DER_1 - \text{mín } R_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 9,\ldots, 20$$

Restricción 5

$$C - B_1 + xs_{97} \geq DBR_{97} + DER_{97}$$

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$\begin{matrix} i = 2,3,4,12 \\ k = 9,\ldots, 20 \end{matrix}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$B_{12} - B_1 + xs_{[1+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[12+12(k-1)]}$$

$$\begin{matrix} k = 9,\ldots, 20 \\ i = 1 \end{matrix}$$

Restricción 6

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,4,12 \\ k = 9,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Restricción 7

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots, 12 \\ k = 9,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 8

$$B_i \geq S_{mín} - mín\ R_{[i+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots, 12 \\ k = 9,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Restricción 9

$$\sum_{j=9}^{k} XSj \leq SS_8 + (k-8)\ R\ A \qquad k = 9,\ldots, 20$$

Construcción del Embalse empezando al Inicio del Séptimo Año

Restricción 1

$$XSk = DBR_k \qquad k = 1,\ldots, 9$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 2

$$SS_k = SS_{k-1} - XSk + R\ A \qquad k = 2,\ldots, 20$$

$$SS_1 = 851{,}95$$

Restricción 3

$$XSk = \sum_{i=1}^{4} xs_{[i+12(k-1)]} + xs_{[12+12(k-1)]} \qquad k = 1,\ldots, 20$$

Restricción 4

$$C - B_1 \geq DER_{109}$$

$$B_{i-1} - B_i \geq DER_i - mín\ R_{[i+1+12(k-1)]} \qquad \begin{matrix} i = 2,\ldots, 12 \\ k = 10,\ldots, 20 \end{matrix}$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$B_{12} - B_1 \geq DER_1 - \text{mín } R_{[12+12(k-1)]} \quad k = 10,\ldots, 20$$

Restricción 5

$$C - B_1 + xs_{109} \geq DBR_{109} + DER_{109}$$

$$B_{i-1} - B_i + xs_{[i+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[i-1+12(k-1)]}$$

$$i = 2,3,4,12$$
$$k = 10,\ldots, 20$$

$$B_{12} - B_1 + xs_{[1+12(k-1)]} \geq DBR_i + DER_i - R_{[12+12(k-1)]}$$

$$k = 10,\ldots, 20$$
$$i = 1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Restricción 6

$$xs_{[i+12(k-1)]} \leq DBR_i \qquad i = 1,2,3,4,12 \quad k = 10,\ldots, 20$$

Restricción 7

$$C - B_i \geq V_i + \text{máx } R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots, 12 \quad k = 10,\ldots, 20$$

Restricción 8

$$B_i \geq S_{mín} - \text{mín } R_{[i+12(k-1)]} \qquad i = 1,\ldots, 12 \quad k = 10,\ldots, 20$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 9

$$\sum_{j=10}^{k} XSj \leq SS_9 + (k-9)\ R\ A \qquad k = 10,\ldots,20$$

Variables de Definición

Conforme se ha mencionado en el Capítulo V, para la utilización del programa LPS/360 de la IBM (1969), toda expresión algebraica tiene que ser completamente definida por una variable. A esta variable entonces es asignada la igualdad o desigualdad correspondiente a la expresión algebraica sustituida, de acuerdo a cada restricción. La definición de variables auxiliares es necesaria para las siguientes restricciones,

Restricción 2

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Se ha definido las variables, desde W2 hasta W20, tales que,

$W2 = SS_2 - SS_1 + XS2$, luego, $W2 = 73{,}71$

. . . . . .

. . . . . .

. . . . . .

$W20 = SS_{20} - SS_{19} + XS_{20}$, luego, $W_{20} = 73{,}71$

La finalidad de esta restricción es únicamente la de obtener por medio de la computadora, el almacenamiento en el acuífero al final de cada año. Se debe tener el valor de SS_1 definido como dato de entrada. De acuerdo a la Tabla 7.2 se tiene,

$$SS_1 = 851{,}95$$

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Restricción 3

Para la utilización del programa LPS/360 se ha cambiado la simbología adoptada para los bombeos mensuales. Para el mes de enero esos bombeos son identificados por EK,

$$Ek = xs_{[1+12(k-1)]} \qquad k = m,\ldots, 20$$

Donde,

m = año en que el bombeo en el mes pasa a ser variable de decisión. Este valor depende de la alternativa en consideración. Evidentemente no es necesario definir Ek antes del embalse estar concluido, por que se sabe de antemano que este valor es igual a la demanda mensual de riego en el mes.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Para los meses de febrero, marzo, abril y diciembre, se tiene,

$$Fk = xs_{[2+12(k-1)]} \qquad k = m,\ldots, 20$$

$$Mk = xs_{[3+12(k-1)]} \qquad k = m,\ldots, 20$$

$$Ak = xs_{[4+12(k-1)]} \qquad k = m,\ldots, 20$$

$$Dk = xs_{[12+12(k-1)]} \qquad k = m,\ldots, 20$$

Luego, la Restricción 3 se escribe,

$$XSk = Ek + Fk + Mk + Ak + Dk \qquad k = m,\ldots, 20$$

Para cada alternativa, los valores conocidos desde XS1 hasta XS_{m-1}, tienen que ser declarados en los datos de entradas.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Esos valores son iguales a las demandas brutas de riego anuales.

Restricción 4

Se ha definido una variable Yi, tal que,

$$B_1 - B_2 = Y1$$
$$B_2 - B_3 = Y2$$
$$B3 - B_4 = Y3$$
$$B_4 - B_5 = Y4$$
$$B_5 - B_6 = Y5$$
$$B_6 - B_7 = Y6$$
$$B_7 - B_8 = Y7$$
$$B_8 - B_9 = Y8$$
$$B_9 - B_{10} = Y9$$
$$B_{10} - B_{11} = Y10$$
$$B_{11} - B_{12} = Y11$$
$$B_{12} - B11 = Y12$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Después de introducidas las 12 ecuaciones arriba como datos de entrada, se asigna a Yi los límites inferiores correspondientes

Restricción 7

Es necesario presentar las variables de definición para esta restricción antes de la Restricción 5. Se ha definido una variable Zi tal que,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$Zi = C - B_i \qquad i = 1,\ldots,12$$

Después de introducidas las 12 ecuaciones implícitas arriba como datos de entrada, se asigna a los Zi los límites inferiores correspondientes.

Restricción 5

Para este caso no es posible generalizar la presentación de las variables de definición utilizadas para definir las 85 restricciones referentes a la alternativa de empezar la construcción del embalse en el primer año.

Para las demás alternativas, es suficiente retirar las tarjetas referentes a los bombeos mensuales conocidos y cambiar las tarjetas correspondientes al primer mes de operación del embalse, tal como se explica adelante.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Las expresiones que traducen la Restricción 5 son definidas por las variables T1 hasta T85,

$$-B_1 + E4 \geq DBR_{37} + DER_{37}, \quad Z1 + E4 = T1, \quad T1 \geq 68{,}450$$
$$-B_2 + F4 \geq DBR_{38} + DER_{38} - R_{37}, \quad Y1 + F4 = T2, \quad T2 \geq 63{,}233$$
$$-B_3 + M4 \geq DBR_{39} + DER_{39} - R_{38}, \quad Y2 + M4 = T3, \quad T3 \geq 74{,}584$$
$$-B_4 + A4 \geq DBR_{40} + DER_{40} - R_{39}, \quad Y3 + A4 = T4, \quad T4 \geq -3{,}508$$
$$-B_{12} + D4 \geq DBR_{48} + DER_{48} - R_{47}, \quad Y11 + D4 = T5, \quad T5 \geq -40{,}899$$

A partir de este punto, las 25.000 Ha. ya están definitivamente bajo riego,

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)