

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XI CONGRESO NACIONAL

"MODELO DE DECISIONES PARA LA ASIGNACION DE AGUA EN
LA 1^{ERA} SECCION DEL RIO MAIPO".

CARLOS POBLETE (*)

GERARDO AHUMADA (*)

RESUMEN

El presente trabajo aborda el problema del desabastecimiento eventual de agua, provocado por una merma en la disponibilidad hidrológica estacional en el río Maipo, como una situación de toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, desarrollando para ello un modelo decisional que incorpora las alternativas de decisión e incertidumbre más relevantes presentes en las principales necesidades de agua abastecidas desde el río Maipo, en el tramo correspondiente a su Primera Sección.

El modelo elaborado fue concebido para ser aplicado en años de escasez de agua, definidos como aquellos cuya probabilidad de excedencia hidrológica supere el 80%. La optimización efectuada por el modelo se basa en la selección de un conjunto de decisiones que maximizan los beneficios netos globales obtenibles por los usuarios de la cuenca.

(*) Ingeniero Civil IFARLE LTDA.

1. FORMULACION DEL MODELO DE DECISIONES.

El modelo de decisiones desarrollado, para aquellos usos de mayor importancia como riego y agua potable, puede ser representado esquemáticamente mediante un árbol decisional.

La figura 1 representa el árbol de decisiones para agua potable.

Un nudo de información hidrológica proporciona los pronósticos de deshielos para la temporada elaborados a partir de correlaciones aplicables a la cuenca en estudio. Entrega, además, los caudales mensuales representativos para cada estado hidrológico definido y la probabilidad condicionada de cada estado al pronóstico realizado.

Para la definición de los estados hidrológicos se puso especial importancia en la finalidad del trabajo. Por tal razón, se fijó el valor de caudal para una probabilidad de ocurrencia del 80% como el caudal bajo el cual sucede un año de características de disponibilidad escasa, en conformidad a las necesidades actuales de agua para los diferentes usos. Seguidamente, se subdividió este rango parcial en cuatro estados que representan un mayor o menor grado de intensidad en la baja disponibilidad de aguas. Los estados hidrológicos definidos son:

Año Seco Tipo 1 (θ_1) :	Volumen de deshielo con probabilidad de excedencia mayor a 95%.
Año Seco Tipo 2 (θ_2) :	Volumen de deshielo con probabilidad de excedencia entre 90% y 95%.
Año Seco Tipo 3 (θ_3) :	Volumen de deshielo con probabilidad de excedencia entre 85% y 90%.
Año Seco Tipo 4 (θ_4) :	Volumen de deshielo con probabilidad de excedencia entre 80% y 85%.
Año Normal-Húmedo (θ_5) :	Volumen de deshielo con probabilidad de excedencia menor a 80%.

FIG. 1
ARBOL DE DECISIONES PARA AGUA POTABLE

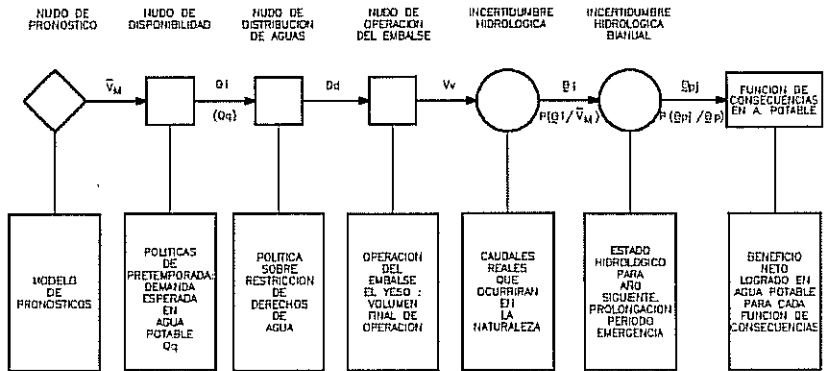
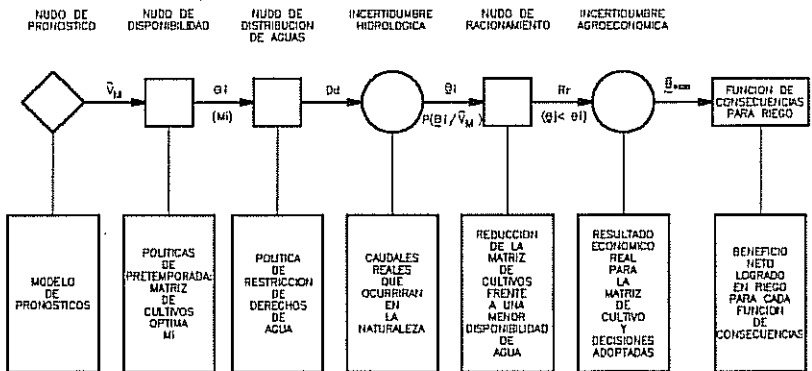


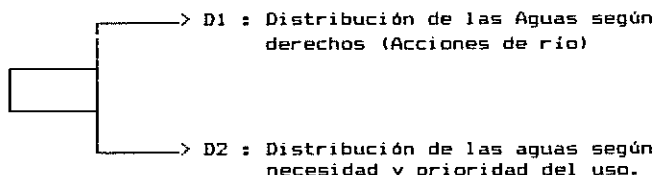
FIGURA 2
ARBOL DE DECISIONES PARA RIEGO



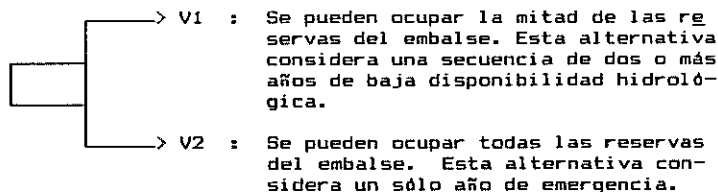
A partir del pronóstico elaborado para el volumen de deshielo disponible en la temporada (V_m), se deben adoptar las medidas que permitirán una posible reducción en la demanda esperada de agua potable (Q_q) :

AÑO HIDROLOGICO CON PROBABILIDAD EXCEDENCIA	DISMINUCION DE LA DEMANDA ESPERADA AGUA POTABLE
Menor que 80%	0%
80% - 90%	10%
Mayor que 90%	20%

La meta de demanda de agua potable adoptada podrá ser satisfecha de acuerdo a diferentes políticas de distribución de las aguas del río Maipo (D_d) :



Y de acuerdo a diferentes políticas de operación para el volumen final de temporada almacenado en el embalse El Yeso (V_v):



Las decisiones adoptadas finalmente en agua potable deberán evaluar las consecuencias de contar con un caudal dispuesto por la naturaleza distinto al pronosticado (θ_i) y seguidamente de un eventual prolongamiento del período de escasez de agua (θ_{pj}).

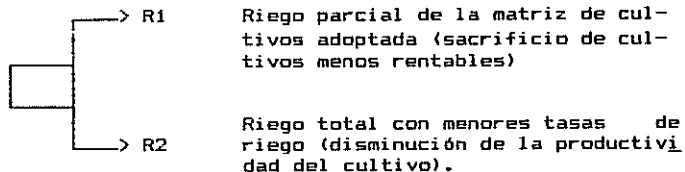
La figura 2 representa el árbol de decisiones para un uso del agua en riego.

De manera análoga, el pronóstico elaborado para el volumen de deshielo disponible en la temporada (V_m) determinará la adopción de una cierta matriz de cultivos recomendada (M_i).

La selección de la matriz de cultivos (M_i) se lleva a cabo mediante Optimización Lineal. De esta forma, cada alternativa de disponibilidad esperada θ_i tendrá asociada una matriz de cultivos óptima (M_i), que servirá de guía a los regantes para sus decisiones de siembra.

A lo anterior se incluye, además, una alternativa de distribución de cultivos denominada histórica (M_h) que, independiente de la disponibilidad esperada de agua, tiende a incorporar la inercia de los regantes para implementar nuevas decisiones de siembra, ya sea por una falta de experiencia o por una actitud de enfrentar un riesgo considerando sus propias decisiones. Para efectos de aplicación del modelo se empleó una matriz de cultivos histórica obtenida en base a la última temporada agrícola.

Seguidamente, la satisfacción de la demanda de agua para riego podrá ser satisfecha de acuerdo a las diferentes políticas de distribución de agua que se fijen (D_d). A continuación, debe considerarse la incertidumbre de caudales reales que ocurrirán durante la temporada (θ_i), donde puede tenerse el caso de caudales por sobre o por debajo de lo pronosticado. En esta última situación podrán adoptarse dos diferentes políticas de racionamiento de agua para el riego de los cultivos (R_r):



Finalmente, las decisiones adoptadas en riego deberán evaluar las consecuencias de obtener un resultado agroeconómico distinto al presupuestado (B_{riego}).

2. RESOLUCION DEL MODELO.

2.1 Resolución del Modelo de Decisiones para Agua Potable.

2.1.1 Función de Consecuencias para Agua Potable.

La secuencia de decisiones y estados de incertidumbre seguida en el empleo del agua para uso doméstico conduce a la siguiente función de consecuencias:

$$g_{AP} (Q_Q, D_d, V_v, \theta_I/\theta_P, \theta_{BJ}/\theta_B)$$

Los valores de la función de consecuencias g_{AP} quedan determinados por los beneficios y costos asociados a cada alternativa de decisión e incertidumbre, y hacen variar por tanto el beneficio neto logrado para el uso agua potable.

2.1.2 Valores Esperados en las Decisiones de Agua Potable.

Los resultados económicos obtenidos en la función de consecuencias g_{AP} deben reemplazar de manera secuencial cada nudo de incertidumbre presente en este uso, por el valor esperado probabilísticamente de sus consecuencias.

En primer lugar, se resuelve el nudo de incertidumbre hidrológica bianual, donde el valor esperado de sus consecuencias se obtiene evaluando:

$$\sum_{\theta_{BJ} = \theta_{BJ}}^{\theta_{BJ} = \theta_{BJ}} g_{AP} (Q_Q, D_d, V_v, \theta_I/\theta_P, \theta_{BJ}/\theta_B) * P (\theta_{BJ}/\theta_B)$$

donde,

- $P(\theta_{22}/\theta_2)$: Probabilidad de tener al año siguiente un año de probabilidad de excedencia mayor a un 80%, dado que este año se pronosticó un caudal con probabilidad de excedencia mayor a un 80% .
- $P(\theta_{21}/\theta_2)$: Probabilidad de tener al año siguiente un año de probabilidad de excedencia menor a un 80%, dado que este año se pronosticó un caudal con probabilidad de excedencia mayor a un 80% .

A continuación, el nudo de incertidumbre hidrológica anual:

$$\sum_{\theta_i = \theta_1}^{\theta_i = \theta_5} \left(\sum_{\theta_{2j} = \theta_{21}}^{\theta_{2j} = \theta_{22}} g_{AP}(Q_d, D_d, V_v, \theta_i/\theta_p, \theta_{2j}/\theta_B) * P(\theta_{2j}/\theta_B) \right) * P(\theta_i/\theta_p)$$

donde,

- θ_i : Son los estados hidrológicos que escurrirán realmente durante la temporada ($i = 1, \dots, 5$).
- $P(\theta_i/\theta_p)$: Es la probabilidad condicionada del estado θ_i dado que se pronosticó un caudal correspondiente al estado θ_p , en río Maipo.

El valor esperado calculado en este nudo representa precisamente la evaluación de las consecuencias que se esperan ocurran para cada secuencia de decisiones seguida en agua potable, o sea:

$$VE_{AP}(Q_d, D_d, V_v) = \sum_{\theta_i = \theta_1}^{\theta_i = \theta_5} \left(\sum_{\theta_{2j} = \theta_{21}}^{\theta_{2j} = \theta_{22}} g_{AP} * P(\theta_{2j}/\theta_B) \right) * P(\theta_i/\theta_p)$$

2.2 Resolución del Modelo de Decisiones para Riego.

2.2.1 Función de Consecuencias para Riego.

La función de consecuencias correspondiente a las decisiones adoptadas en riego y resultante de los diversos estados de incertidumbre definidos en este uso se expresa como:

$$G_{\text{riego}} (M_i, D_d, \theta_i/\theta_p, R_r, B_{\text{riego}}/M_i^*)$$

La valoración de esta función de consecuencias se obtiene mediante el beneficio económico neto logrado con la distribución de cultivos (M_i^*) que se adopte finalmente para la temporada. La matriz de cultivos M_i^* es la distribución de cultivos resultante de una decisión de disponibilidad θ_i , adoptada a comienzos de temporada, y que eventualmente pudo haber sido reducida de acuerdo a una decisión R_1 o R_2 .

2.2.2 Valores Esperados de las Decisiones de Riego.

De manera análoga a la realizado en agua potable se determinan para riego los valores esperados de las consecuencias en cada nudo de incertidumbre.

En primer lugar se reemplaza el nudo de incertidumbre agro-económica por su valor esperado:

$$VE_{\text{Agroeconómico}} = \sum_{k=1}^3 G_{\text{riego}} (M_i, D_d, \theta_i/\theta_p, R_r, B_{\text{riego}_k}/M_i^*) \quad , k=1,2,3$$

donde,

- B_{riego_1} = Beneficio máximo para la matriz de cultivos M_i^* .
- B_{riego_2} = Beneficio medio para la matriz de cultivo M_i^* .
- B_{riego_3} = Beneficio mínimo para la matriz de cultivos M_i^* .

A continuación se selecciona la decisión de racionamiento óptima definida por el máximo valor esperado en cada alternativa de racionamiento:

$$VE_{\text{Agroeconómico óptimo}} = \sum_{k=1}^3 G_{\text{riego}} (M_i, D_d, \theta_i/\theta_p, R_r^*, B_{\text{riego}_k}/M_i^*) \quad , k=1,2,3.$$

donde, $R_r^* = \text{Máx. } (R_1 , R_2)$

Luego, se reemplaza el nudo de incertidumbre hidrológica por el valor esperado de los estados factibles de ocurrir:

$$VE_{riego}(M_i, D_d, R_r^*) = \sum_{\theta_i = \theta_1}^{\theta_i = \theta_2} VE_{AGROECONOMICO OPTIMO}(M_i, \theta_i / \theta_p) * P(\theta_i / \theta_p)$$

El valor esperado calculado en este nudo representa la evaluación de las consecuencias que se esperan ocurran para cada alternativa de disponibilidad adoptada a comienzos de temporada.

2.3 Resolución General del Modelo de Decisiones.

La elección de una decisión óptima puede obedecer en última instancia a diferentes criterios de selección, conforme a los objetivos que se plantee el operador responsable de la toma de decisiones.

Para fines de este estudio interesa aquella alternativa o conjunto de alternativas que conducen a una optimización global de los recursos de la cuenca, independiente de que éstas no representen la mejor decisión para cada uso en particular. Este conjunto de decisiones globales está representado por:

$$\vec{G} = \vec{VE}_{AP} + \vec{VE}_{riego}$$

donde,

\vec{G} = Beneficios netos globales del sistema.

\vec{VE}_{AP} = Beneficios netos obtenidos en Agua Potable y que incluyen los de Generación Hidroeléctrica. Los resultados económicos obtenidos en la producción de hidroelectricidad son consecuencias de la disponibilidad de agua estacional y de los decisiones adoptadas en otros usos. Su evaluación realizada en conjunto con la simulación del embalse el Yeso hace conveniente agregar sus resultados a los obtenidos para agua potable.

\vec{VE}_{riego} = Beneficios netos obtenidos para riego.

La operación general del modelo de decisiones proporciona los valores de las funciones de consecuencias esperados, para cada alternativa de distribución de aguas.

En los resultados obtenidos para una alternativa de distribución según las acciones correspondientes a cada usuario del agua (D1), la selección óptima de las decisiones tomadas para agua potable es independiente de las seguidas por los regantes y, por lo tanto, el óptimo global del sistema es equivalente a la suma de los óptimos parciales obtenidos en las decisiones tomadas para cada uso en particular. O sea,

$$G_{\text{óptimo}}(D_1) = \text{MÁX.}\{ \bar{V}E_{AP}(Q_q, D_1, V_v) \} + \text{MÁX.}\{ \bar{V}E_{riego}(M_1, D_1, R_r^*) \}$$

En cambio, en los resultados obtenidos para la alternativa de distribución que no considera el marco accionario de los usuarios (D2), la selección óptima de las decisiones seguidas en riego dependen directamente de las decisiones que se tomen para el agua potable debido al mayor o menor volumen de agua disponible por los regantes, y a las posibilidades de contar con los recursos regulados por el embalse El Yeso, que son variables para las distintas decisiones adoptadas en agua potable.

Luego, el óptimo global del sistema es equivalente al máximo valor que resulta de las combinaciones posibles entre las decisiones de ambos usos:

$$G_{\text{óptimo}}(D_2) = \text{MÁX.}\{ \bar{V}E_{AP}(Q_q, D_2, V_v) + \bar{V}E_{riego}(M_1, D_2, R_r^*) \}$$

Finalmente, la toma de decisiones operada por el modelo se reduce a una selección óptima de los valores de \bar{G} resultantes en cada alternativa de distribución, obtenida de:

$$G_{\text{óptimo}} = \text{MÁX.}\{ G_{\text{óptimo}}(D_d) \}_{d=1,2}$$

3. APLICACION DEL MODELO.

El modelo de decisiones formulado fue aplicado para cinco situaciones de disponibilidad correspondientes a cada uno de los estados hidrológicos definidos en este trabajo.

De esta manera, se calcularon las probabilidades condicionadas $P(\theta_i/\theta_p)$ de los diversos estados hidrológicos definidos, suponiendo que el pronóstico resultante haya sido el propio caudal representativo de cada estado .

Probabilidad condicionada del estado hidrológico real de acuerdo a cada estado pronosticado $P(\theta_i/\theta_p)$ (%)

ESTADO	Q representativo (millones m ³)	CAUDAL PRONOSTICADO (millones m ³)				
		Vp=2791	Vp=1829	Vp=1660	Vp=1456	Vp=1151
Normal-Húmedo	2.791	97,6	42,5	27,5	13,9	4,0
Seco tipo 4	1.829	0,8	15,4	14,2	10,2	3,9
Seco tipo 3	1.660	0,2	16,0	17,5	15,6	8,2
Seco tipo 2	1.456	0,0	14,6	19,7	22,5	17,5
Seco tipo 1	1.151	1,4	11,5	21,1	37,7	66,5
		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

4. RESULTADOS DEL MODELO.

Los valores finales proporcionados por el modelo, valores óptimos para cada alternativa de distribución de aguas (D1 y D2), señalan la importancia cada vez más creciente de una política de distribución de aguas sin restricción Legal de derechos de agua, a medida que la disponibilidad de agua pronosticada para una temporada se hace más escasa.

ESTADO PRONOSTICADO	CAUDAL REPRESENTATIVO	BENEFICIO TOTAL (mill. \$) (DECISION OPTIMA D1)	BENEFICIO TOTAL (mill. \$) (DECISION OPTIMA D2)
Seco Tipo 1	$V_p = 1151$ (mill. m ³)	18.478	26.446
Seco Tipo 2	$V_p = 1660$ (mill. m ³)	20.419	26.759
Seco Tipo 3	$V_p = 1829$ (mill. m ³)	22.118	27.048
Seco Tipo 4	$V_p = 1456$ (mill. m ³)	23.335	27.235
Normal Húmedo	$V_p = 2791$ (mill. m ³)	27.386	27.573

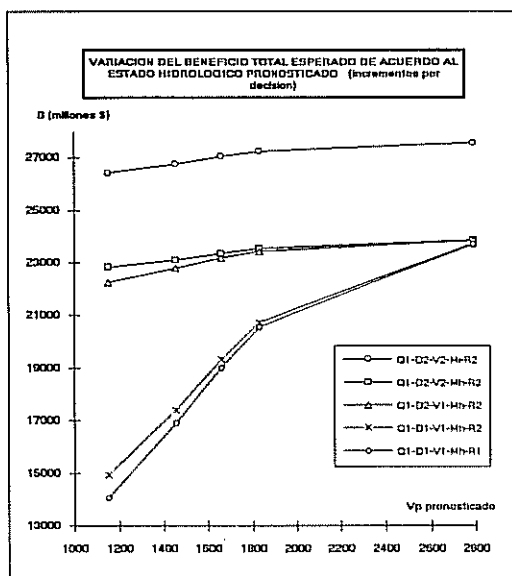
La simple comparación entre ambos valores puede significar que en años de sequía extrema (año Seco Tipo 1) exista una diferencia de un 40% a 45% entre los beneficios totales obtenibles en ambas decisiones, mientras que para una situación de disponibilidad normal (año Normal - Húmedo) esta diferencia es prácticamente inapreciable.

Además, es interesante evaluar en términos económicos la contribución en los beneficios totales de cada una de las variables de decisión con que opera el modelo de optimización.

El análisis comparativo de estas variables muestra una situación creciente de pérdida del beneficio total, a medida que el pronóstico de disponibilidad de agua para una temporada disminuye.

Considerando una situación de partida que sea representativa de una situación real, donde no se incluya ninguna alternativa de optimización (Q1, D1, V1, Mh, R1), la contribución de cada variable a un aumento del beneficio global podrá alcanzar en años de sequía extrema (Seco tipo 1), los siguientes aportes porcentuales:

INCREMENTO EN EL BENEFICIO TOTAL	DECISION
4%	Decisión de usar completamente las reservas del embalse El Yeso (V2).
6%	Decisión de racionar la tasa de riego por cultivo (R2).
26%	Adopción de una matriz óptima de cultivos (Mi*).
52%	Decisión de distribución de aguas sin acciones (D2).



Otro resultado interesante, es que frente a una situación pronosticada como de baja disponibilidad hidrológica las medidas anticipadas que deben tomarse, tanto en riego como en agua potable, no son imperativamente aquellas que constituyen una reducción preventiva de la demanda esperada en cada uso.

Por una parte, el elevado porcentaje de gastos fijos involucrados en la producción de agua potable se expresa en una relación de gran elasticidad entre el volumen de agua ofrecido y las utilidades percibidas por la empresa responsable del servicio. Por tal razón, siempre convendrá mantener la satisfacción del consumo de agua potable en su mayor nivel de demanda. Por otro lado, es aconsejable adoptar una matriz de cultivos donde la superficie sembrada represente el total del área disponible para cultivos estacionales, ya sea con la matriz recomendada por el modelo de optimización lineal (Ml) o con la llamada matriz histórica (Mh) que es la acostumbrada por los regantes.

En ambos casos, es más conveniente económicamente hacer uso de las restantes alternativas de decisión como aumentar los costos en elevación de agua subterránea y mayor uso de las reservas del embalse El Yeso, en el caso del agua potable, o disponer de una política de racionamiento y uso del embalse para regulación de las necesidades de riego.

5. APLICABILIDAD DEL MODELO.

Actualmente, la aplicación de un modelo de este tipo está concebido sólo para años de sequía extrema (año Seco Tipo 1), sin embargo, los resultados señalados recomiendan extender su utilización a periodos menos críticos, cuya disponibilidad estacional sea mayor que una probabilidad de excedencia 80% (para años Secos Tipo 2, 3 y 4). Este último aspecto, requeriría para su implementación, una mutua colaboración entre los usuarios que conforman la Primera Sección del Río Maipo, ya que una de las variables más significativas en términos económicos lo constituye la distribución de las aguas de acuerdo a las necesidades de los usos establecidos en el Área.

La validez del modelo se traduce en una herramienta de análisis capaz de proporcionar información suficiente para ayudar en la toma de decisiones. En este sentido puede ser útil a un organismo superior, como podría ser la Junta de Vigilancia res-

pectiva o en caso de sequía extrema un organismo de carácter gubernamental.

6. CONFIABILIDAD DEL MODELO.

La confiabilidad del modelo de optimización de decisiones depende directamente de la cuantificación que se haga de sus estados de incertidumbre. Por este motivo, suele suceder con frecuencia que la evaluación del riesgo realizada mediante algún procedimiento particular constituya un punto de discusión permanente entre diversos operadores.

Previendo tal situación, la operación del modelo permite reactualizar la información base que alimenta sus partes componentes. Esta cualidad del modelo permite que algunos de sus módulos esenciales, como el pronóstico esperado durante la temporada y las probabilidades condicionadas de los estados que podrían ocurrir realmente en el transcurso de ella, sean independientes del modelo general y pueden ser proporcionados alternativamente a los adoptados en este trabajo, por cualquier método que se ajuste a los criterios de cada operador.

BIBLIOGRAFIA

1. Decision Analysis. Introductory Lectures on Choices under Uncertainty. Haward Raiffa, 1968.
2. Modelo de decisiones para la asignación regional del agua de riego en una cuenca, Luis Arrau, 1977.
3. Modelo de Pronósticos de caudales de Deshielo en la cuenca del río Elqui. Gerardo Ahumada, 1977.
4. Uso óptimo del agua:
 - 1: Uso óptimo del agua en ambiente de escasez e incertidumbre.
 - 2: Toma de Decisiones en Base a técnicas alternativas para la optimización de los ingresos y minimización de los riesgos.Arenas J., Pistono J., Acevedo E., 1984.

BENEFICIO TOTAL ESPERADO POR ESTADO PRONOSTICADO Y TIPO DE DECISION

ESTADO	Q1-D2-V2-Mh-R2	Q1-D2-V2-Mh-R2	Q1-D2-V1-Mh-R2	Q1-D1-V1-Mh-R2	Q1-D1-V1-Mh-R1
1151	26449	22833	22264	14919	14055
1456	26769	23116	22792	17402	16893
1880	27048	23374	23194	19310	19014
1829	27236	23546	23447	20737	20670
2791	27573	23866	23864	23738	23721

