

MODELACIÓN Y ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE UN SISTEMA DE RIEGO EN CHILE CENTRAL

José Manuel Molina, Luis Alberto Gurovich y Eduardo Varas

Resumen:

El presente artículo presenta una propuesta de modelación de los elementos y procesos involucrados en la oferta superficial y demanda hídrica de un sistema de riego de la zona central de Chile, como metodología para el estudio del balance hídrico predial en la planificación de los recursos hídricos disponibles. El estudio contempló una descripción y evaluación general del sistema mediante visitas de terreno y recolección de información, teniendo en cuenta aspectos de suelos, cultivos, aguas, clima e infraestructura hidráulica. Mediante el análisis con herramientas de modelación hidrológica, se llevó a cabo la estimación de la disponibilidad de agua en la zona de estudio, describiendo su variación espacial y temporal en las fuentes superficiales y usando además un modelo de distribución de probabilidades, para estimar valores de caudal asociados a la probabilidad de ocurrencia. Igualmente se desarrolló la modelación espacial y temporal de los requerimientos hídricos de los cultivos y del sistema de riego, los cuales son calculados para diferentes probabilidades de excedencia y basados en el modelo de Penman – Monteith, recientemente adoptado y recomendado por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia. También se desarrolló un modelo de simulación basado en balances hídricos, el cual permitió conocer la situación actual del sistema de riego y la seguridad de suministro, plantear situaciones futuras del sistema y proponer recomendaciones y alternativas de gestión para el aprovechamiento del recurso y optimización de la disponibilidad hídrica superficial.

Palabras clave: Modelación, probabilidad, oferta superficial, demanda de riego, sistema de riego, balance hídrico, simulación.

INTRODUCCIÓN

La competencia actual por los recursos hídricos en varias regiones de Chile, entre los sectores urbanos, generación eléctrica, industrial, ambiental y agrícola, se torna cada vez más conflictiva, siendo este último sector el que utiliza los mayores volúmenes de agua y generalmente con bajas eficiencias de uso, en la producción de bienes de un reducido valor comercial relativo, con impactos importantes de tipo ambiental, social y económico, especialmente en años de sequía (Gurovich, 1999).

En muchos casos se ha provocado un aumento significativo en la explotación de recursos subterráneos, al no disponerse de suficientes recursos hídricos superficiales para suplir la creciente demanda de riego en la zona central de Chile. En esta zona se

han llevado a cabo en las últimas dos décadas, estudios de investigación y consultoría que han incluido la modelación y la simulación de sistemas hidrogeológicos como parte de la evaluación y gestión de los recursos hídricos superficiales y subterráneos a nivel de cuencas y zonas amplias (CNR – CICA/BP/HTS, 1982; CNR/IPLA, 1984; Espinoza, 1989; DICTUC/PUC, 1999; DGA, 2000).

A pesar de la información generada y de los proyectos de gestión llevados a cabo, las asociaciones y usuarios del agua pretenden administrar un recurso del cual desconocen su situación de oferta y demanda (CEPAL, 1999). A nivel de los sistemas terciarios, o predios regados, existe un desconocimiento generalizado de las características y dinámica espaciales y temporales de los recursos hídricos de los cuales obtienen el agua de riego.

Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Casilla 306 Correo 22. Santiago, Chile. Teléf.: 56-2-6864341. Fax: 56-2-6865876. E-mail: jmmolina@puc.cl, lgurovic@puc.cl, evaras@ing.puc.cl.

Artículo recibido el 7 de junio de 2001, recibido en forma revisada el 12 de febrero de 2003 y aceptado para su publicación el 4 de abril de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Los estudios de los recursos hídricos en el ámbito local, en esquemas y sistemas de riego a pequeña escala, son un requerimiento prioritario para definir el estado actual del recurso y de la infraestructura de riego. Ello se requiere para conocer y evaluar las condiciones específicas del balance hídrico, y para plantear y desarrollar medidas integrales de gestión y optimización por parte de los grupos involucrados en el manejo del sistema, que son los usuarios del agua, la autoridad de riego y el gobierno.

En este artículo se presenta un modelo integral de la oferta hídrica superficial, de las necesidades de agua de los cultivos y de los requerimientos hídricos de los sistemas de riego, para representar y caracterizar las situaciones actual y futuras de riego, la magnitud, frecuencia y distribución de los déficit hídricos y su relación con la seguridad de suministro. El modelo desarrollado se aplicó a una evaluación y análisis de un sistema de riego de la zona central de Chile, que incluye áreas de cultivos de Vid regadas con técnicas convencionales superficiales y áreas regadas con métodos tecnificados presurizados. El modelo permitió conocer las condiciones de manejo de los sistemas de captación, conducción, control de flujo y aplicación del riego y de las características de la infraestructura hidráulica asociada.

Las herramientas y los análisis desarrollados para la definición de alternativas de aprovechamiento y estrategias de manejo del sistema de riego, para un uso eficiente del agua y para optimizar

la disponibilidad superficial, consideran ecuaciones de continuidad y balance de masas aplicados a los diferentes elementos constituyentes del sistema, en sus tópicos de oferta y demanda. También incluyen un modelo de distribución de probabilidades en el análisis de las variables aleatorias de clima y caudal, y el modelo de Penman – Monteith, recientemente adoptado y recomendado por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (Smith et al., 1998).

EL SISTEMA SANTA RITA

El sistema Santa Rita es un sistema de riego representativo de la zona central de Chile y se ubica entre las coordenadas $33^{\circ}41'9''$ a $33^{\circ}43'9''$ de latitud Sur, y $70^{\circ}37'30''$ a $70^{\circ}41'0''$ de longitud Oeste, a una altura media de 520 m.s.n.m. Este sistema corresponde a un sistema terciario de riego de 570,3 ha cultivadas con variedades de Vid blancas y tintas destinadas a la obtención de vinos. Las fuentes actuales de agua para riego son de origen superficial y subterráneo, y provienen de la cuenca del río Maipo y de la napa subterránea del acuífero Maipo – Mapocho, respectivamente. La zona de estudio tiene un clima mediterráneo semi-árido (Santibañez et al., 1990), con estación seca prolongada (7 a 8 meses secos). La mayor parte de las precipitaciones (80% del total anual) se producen entre los meses de otoño e invierno, de Mayo a Agosto, con un valor medio anual de 420 mm, para un valor de 50% de probabilidad de ocurrencia.

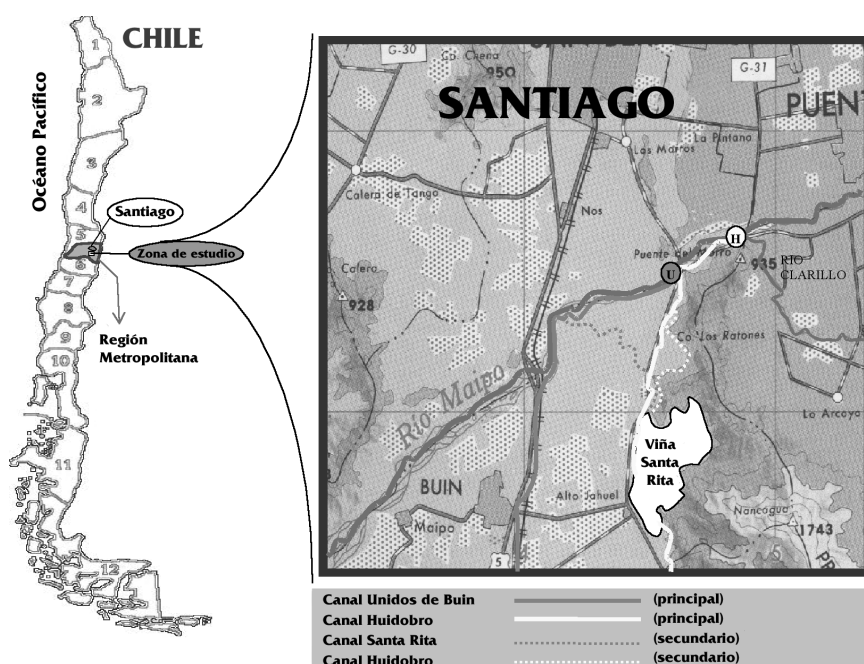


Figura 1. Localización general del sistema Santa Rita.

En este estudio, el análisis consideró los recursos hídricos superficiales, y por lo tanto se planteó un enfoque de sistema donde la fuente de agua para riego es en su totalidad de origen superficial. La fuente superficial abastece en la actualidad el riego de un 90% del área total cultivada y está compuesta por los canales principales Huidobro y Unidos de Buin. Las aguas de estos dos sistemas son captadas en la primera sección del río Maipo mediante dos bocatomas, tal como se esquematiza en los puntos H y U de la Figura 1. El sistema Huidobro recibe adicionalmente las aguas excedentes del río Clarillo. La primera sección del río Maipo tiene la propiedad de toda el agua del río, y distribuye sus derechos de aprovechamiento en 8133 acciones entre ocho grandes usuarios o sistemas principales.

El río Maipo es un río de montaña de alta pendiente con un caudal medio mensual de 100,7 m³/s para el período 1912 -1999, medido en la estación fluviométrica La Obra. Los meses de Diciembre y Enero son los meses de máximo aporte de la cuenca del río Maipo, constituidos principalmente por el derretimiento de la nieve de la parte alta de ésta. El agua derivada en cada una de las dos bocatomas sobre el río es conducida a partir de los canales principales Huidobro y Unidos de Buin, los cuales distribuyen su caudal mediante una red densa de canales secundarios con una repartición proporcional con marcos partidores fijos. La Junta de Vigilancia del río Maipo es la entidad encargada de manejar y medir los caudales de derivación para cada canal principal, según un esquema de reparto preestablecido por los derechos legales de cada canal y en base al caudal medido continuamente en la estación La Obra.

Los usuarios del agua en los sistemas terciarios no miden ni tienen registros de los caudales que efectivamente llegan al predio, y mucho menos los flujos que transportan sus canales internos. Solo tienen conocimiento sobre las acciones que poseen, lo cual no refleja la variación temporal de los caudales de que disponen. La conducción del agua hasta los puntos de aprovechamiento es de responsabilidad de los usuarios, representados en las respectivas asociaciones de usuarios del canal respectivo. Aunque en Chile se reconoce legalmente diferentes tipos de derechos de agua, según la prioridad de captación y distribución (permanente o eventual), en el río Maipo no se diferencian estos derechos, ya que la distribución del caudal disponible se efectúa de acuerdo a una proporción de las acciones totales y no según las necesidades (DICTUC/PUC, 1999). En la Figura 1 se presenta la localización de

los puntos de derivación y el recorrido de los canales secundarios Huidobro y Santa Rita. Estos dos últimos se derivan de los canales principales Huidobro y Unidos de Buin, respectivamente, y llegan hasta la entrada del sistema de riego terciario, en el extremo Nor-Occidente de la viña Santa Rita, donde se convierten en canales terciarios, y corresponden a los dos canales internos que alimentan los sistemas de aplicación del riego.

El sistema de conducción en toda la red es mediante canales en tierra sin revestimiento. Solo los tramos localizados en sitios con estructuras de repartición y control de flujo están revestidos en concreto. Los marcos partidores constituyen en su mayoría, la única infraestructura hidráulica disponible en la red de canales para repartir el caudal y distribuir el agua hasta llegar al predio.

El 100% del área cultivada en el sistema actual Santa Rita utiliza el riego como fuente complementaria para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos de Vid. Una superficie de 320,64 ha (56,2%) se encuentra en riego por surcos, y 249,66 ha (43,8%) en riego por goteo. Se ha considerado que en la época de dormancia de la Vid, el período sin riego en la zona de estudio va desde Abril 20 hasta inicios de Septiembre para las cepas tintas, y desde inicios de Abril hasta mediados de Agosto para las cepas blancas. Durante estos períodos, los requerimientos hídricos del cultivo son mínimos y no se realizan labores de riego en la zona central de Chile (Gurovich, 1991).

El área cultivada se compone de 47 sectores, cada uno de ellos con una o más variedades de Vid. Existen 11 variedades cultivadas de cepas tintas y 5 de cepas blancas en toda el área. Entre las cepas tintas se destacan Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc, Merlot y Carménère y entre las blancas se destacan Chardonnay, Sauvignon Blanc y Sauvignonasse.

En base a la información de suelos disponible, se zonificó la superficie cultivada en tres áreas definidas por su ubicación y tipo de suelo: Zonas A, B y C. Los suelos presentan entre 2 a 3 estratos en el primer metro del perfil, con una variabilidad de texturas que van de Franco a Franca Arcillosa en la superficie y Franca a Arcillosa en el segundo estrato. En algunos sectores se encuentra algo de pedregosidad superficial.

Se llevó a cabo una evaluación cualitativa del sistema de riego terciario, que se relaciona con los

componentes estructurales y de manejo. La red hidráulica se compone de canales de conducción de baja capacidad hidráulica, situación que se agrava por la falta de control en su operación. Se observó problemas de alta concentración de sedimentos en el agua de riego y falta de estructuras de sedimentación antes de los filtros del cabezal en el sistema de riego por goteo. Igualmente se notó deficiencias de diseño en los sistemas de entrega y aplicación del agua al suelo, ya que el sistema de riego por surcos no cuenta con diseños apropiados en relación a caudales de alimentación, longitud y pendiente de surcos.

En el manejo del riego, no existe un calendario de riego que especifique los tiempos y cantidades de reparto y aplicación del agua. Las decisiones sobre el “cuánto y cuándo regar” se realizan de forma subjetiva y sin una planificación basada en las relaciones suelo – agua – planta – atmósfera. En términos generales, se observó que el sistema de riego adolece de un esquema apropiado de manejo de las actividades de operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica existente.

MODELACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN FUENTES SUPERFICIALES

En este trabajo, el estudio y evaluación de la oferta hídrica se desarrolló considerando varias etapas y metodologías agrupadas en tres tópicos de estudio: análisis de antecedentes hidrológicos del río y de los canales principales; propuesta metodológica de la modelación superficial de la oferta hídrica; y análisis hidrológico del sistema terciario Santa Rita. En base a las recomendaciones encontradas en la literatura técnica (DGA, 2000; DICTUC/PUC, 1999; Shahin et al., 1993), se utilizó el modelo Lognormal de dos parámetros, para asociar valores de probabilidad de excedencia a diferentes valores de caudal medio mensual en las fuentes. La Ecuación (1) permite calcular valores de caudal asociados a diferentes probabilidades.

$$X_T = \mu + K_T * \sigma \quad (1)$$

El modelo Lognormal de dos parámetros distribuye una variable aleatoria (v.a.) X_T en función de los parámetros del modelo (Promedio μ y desviación estándar σ de la variable original), y un coeficiente de frecuencia K_T que es función de la probabilidad de excedencia (al cual se asocia un factor z de una distribución normal) y del coeficiente de

variación C_v de la variable original en la serie mensual respectiva (Shahin et al., 1993). El factor de frecuencia K_T de la Ecuación (1), se calcula con la siguiente expresión:

$$K_T = \frac{1}{C_v} \left(\exp \left[-\frac{1}{2} \text{Ln}(1 + C_v^2) + z_T \sqrt{\text{Ln}(1 + C_v^2)} \right] \right) \quad (2)$$

Los antecedentes hidrológicos consistieron en las series cronológicas de caudal medio mensual del río Maipo desde 1912 hasta 1999 registradas en la estación La Obra, y en las series de caudal registradas en las bocatomas de los canales principales desde 1990 hasta 1999. La disponibilidad hídrica superficial en los canales internos del sistema terciario Santa Rita se estimó a nivel espacial y temporal mediante la confección y uso de un modelo de oferta, el cual consideró los registros disponibles de caudal medio mensual en los canales principales, los derechos de aprovechamiento del agua de los canales internos sobre los sistemas principales, los antecedentes sobre el control de flujo en la red, las pérdidas de agua en la conducción y las recuperaciones en los canales de cota inferior.

El análisis se centró en el período de desarrollo de cultivos, desde finales de Agosto hasta mediados de Abril, discretizando los períodos de oferta a nivel decadal, por medio de una función de interpolación lineal sobre los datos de las series mensuales estimadas en los canales internos y considerando varias probabilidades de excedencia, en el rango de 1% hasta 95%.

La estimación de caudales probables en los canales internos con el modelo Lognormal consideró los resultados del análisis de correlación entre los hidrogramas anuales de caudal mensual de los canales principales y los respectivos hidrogramas del río. Estos resultados señalaron que es factible aplicar a los caudales en los canales principales el mismo modelo de distribución de probabilidad usado para el río, y por lo tanto, el modelo Lognormal también se aplicó a los flujos en los canales internos, ya que éstos son una proporción de los flujos presentes en los canales principales.

La modelación del esquema de oferta hídrica se abordó considerando los diferentes elementos dentro de la red de riego: nodos y tramos. Los nodos son los puntos donde se capta, divide o deriva el flujo, y los tramos son los diversos tipos de canales o porciones de éstos, ubicados entre dos nodos consecutivos. En estos tramos es donde ocurren las pérdidas y recuperaciones de agua. Tanto los nodos como

los tramos están relacionados entre sí a través de sus respectivas entradas y salidas de flujo. Los tramos considerados en este estudio son tres: el canal principal, el canal secundario y el canal interno o terciario. Los nodos corresponden a las bocatomas sobre el río Maipo y los marcos partidores y compuertas sobre los canales de la red. La Figura 2 esquematiza la modelación propuesta de la red de riego del sistema Santa Rita, incluyendo las variables generales del modelo de oferta hídrica superficial.

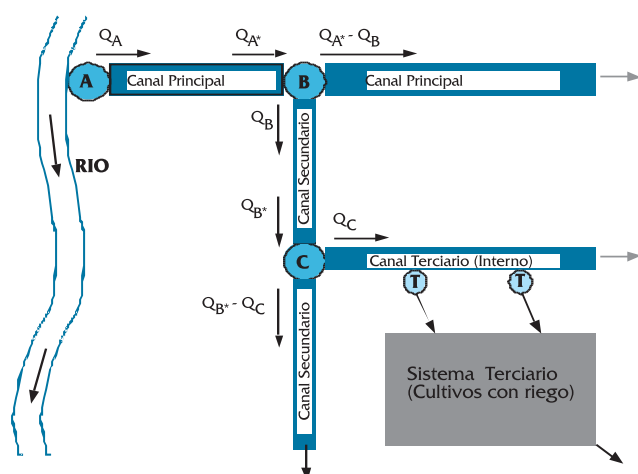


Figura 2. Modelación de la red de riego del sistema Santa Rita.

El planteamiento teórico que se adoptó para abordar las captaciones, extracciones, pérdidas y recuperaciones en los elementos de la red de riego, consistió en la aplicación de la ecuación de continuidad a los diversos nodos y tramos, desde las bocatomas de los canales principales sobre el río Maipo, hasta los canales internos del sistema terciario Santa Rita.

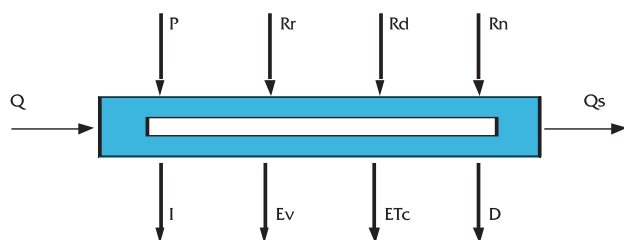


Figura 3. Modelación de un tramo.

donde Q_A corresponde al caudal del canal principal medido en la bocatoma, Q_B es el caudal del canal secundario medido en la derivación sobre el canal principal, Q_C es el caudal del canal terciario a la entrada del sistema terciario, Q_A^* es el caudal que llega al nodo B (derivación secundaria) considerando el efecto de las pérdidas y recuperaciones en el canal principal, y Q_B^* es el caudal que llega al nodo C (derivación terciaria) considerando el efec-

to de las pérdidas y recuperaciones en el canal secundario. Las pérdidas y recuperaciones en el canal terciario se aplican a las series de caudal obtenidas en el nodo C .

La Figura 3 esquematiza la modelación propuesta en el elemento tramo de la red de riego y la Ecuación (3) presenta el modelo de continuidad, donde la variable Q_e es el flujo superficial del canal al inicio del tramo, P es la precipitación sobre el tramo, R_r representa las recuperaciones de flujo por retornos de riego, R_d las recuperaciones por derrames desde fuentes sin regulación, R_n las recuperaciones por aportes provenientes de la napa freática, Q_s es el flujo superficial del canal al final del tramo, I las pérdidas por infiltración y percolación, Ev es la evaporación directa desde el tramo, ET_c es la evapotranspiración de la vegetación en las riberas del tramo, Δ las pérdidas por derrames en el tramo y $\Delta V/\Delta t$ representa la variación del almacenamiento del tramo en el intervalo de tiempo Δt .

$$\begin{aligned} Qe + P + Rr + Rd + Rn &= \\ = Qs + I + Ev + ETc + D \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

De igual forma, la modelación en el nodo se definió con:

$$Q_e = Q_s + Q_d \quad (4)$$

donde Qd es el caudal derivado desde el nodo hacia un tramo de canal, y Qe y Qs son los flujos de entrada y salida del nodo respectivamente. Las variables generales del modelo de oferta hídrica definidas en la Ecuación (3), se ven afectadas por otras variables específicas o parámetros que son particulares del elemento de la red en consideración, las cuales determinan la magnitud de las entradas y salidas de flujo. Estos parámetros se definieron como porcentajes de flujo por percolación, derrames y recuperaciones en los diversos tipos de canales.

Una vez estimadas las series de disponibilidad hídrica en los canales internos y llevado a cabo el análisis estadístico y probabilístico respectivo, se pudo establecer la variación y aporte de caudales probables de cada canal en la temporada de cultivos. La información obtenida con este procedimiento resultó importante para poder analizar el comportamiento del balance hídrico en los diferentes escenarios considerados en la simulación, especialmente en los eventos de oferta hídrica de alta probabilidad de excedencia, que caracterizan a los años hidrológicos secos.

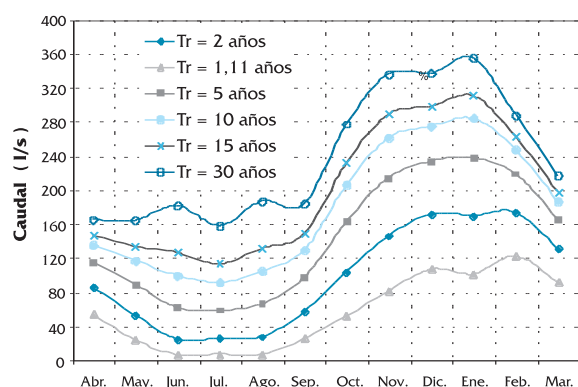


Figura 4. Hidrograma probabilístico de caudal medio mensual en el canal interno Huidobro.

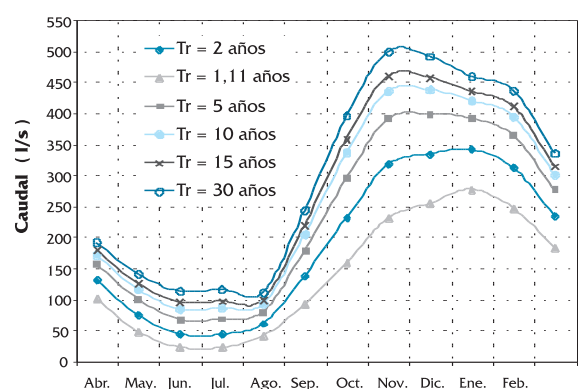


Figura 5. Hidrograma probabilístico de caudal medio mensual en el canal interno Santa Rita.

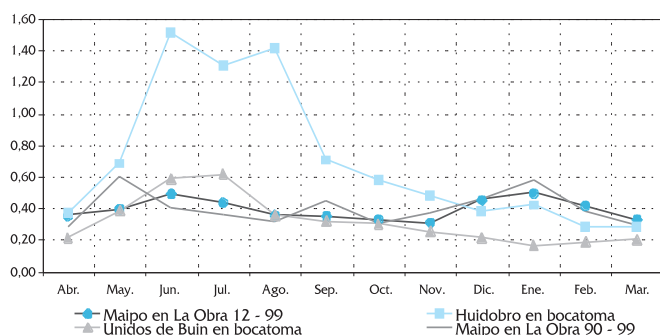


Figura 6. Coeficientes de variación C_v de las series mensuales en el río y canales principales.

La variación estacional del caudal probable medio mensual en los dos canales internos, presentó ciertas diferencias en la forma de las curvas de los hidrogramas (Figuras 4 y 5), a pesar de que los canales matrices de los que ellos se derivan captan su caudal bajo el mismo esquema de reparto y sus bocatomas se encuentran relativamente cerca la una de la otra. Las curvas del coeficiente de variación mensual C_v en el río entre los dos períodos analizados, 1912-1999 y 1990-1999, resultaron ser bastante similares en magnitud y simetría (Figura 6).

En el canal Unidos de Buin, la curva de C_v presentó cierta proporcionalidad en magnitud y simetría con respecto a las del río, excepto entre Noviembre - Febrero en que la variación es levemente opuesta a las observadas en el río. Sin embargo, para el caso del canal Huidobro, el período Mayo - Noviembre presentó siempre valores de C_v mucho mayores que los del río (Figura 6), lo que implica muy probablemente una fuerte influencia de las captaciones que recibe del río Clarillo.

MODELACIÓN DE LA DEMANDA O REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

En el estudio y evaluación de los requerimientos hídricos se consideraron los siguientes tópicos: análisis de antecedentes climatológicos; estimación y análisis de la evapotranspiración del cultivo de referencia; modelación de los requerimientos hídricos del sistema; y análisis de los resultados de la modelación.

FAO ha recomendado en la última década el uso del modelo de Penman-Monteith como el método estándar para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{To} (Smith et al., 1998). La evapotranspiración de referencia se define actualmente como la tasa de evapotranspiración de un cultivo de referencia hipotético con una altura de cultivo asumida de 12 cm, un valor fijo de resistencia de superficie del cultivo de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23, muy parecida a la evapotranspiración de una superficie extensa de Grama verde de altura uniforme, de crecimiento activo, que cubre completamente la superficie y con una disponibilidad hídrica adecuada. Con esta definición, y utilizando datos climáticos promedios diarios o mensuales, la expresión de Penman-Monteith se simplifica así (Smith et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (5)$$

En esta expresión, E_{To} es la evapotranspiración del cultivo de referencia [E_{To} , mm d^{-1}], R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo [R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$], G es el flujo del calor del suelo [G , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$], T es la temperatura promedio del aire [T , $^{\circ}\text{C}$], U_2 es la velocidad del viento medida a 2 m de altura [U_2 , m s^{-1}], e_s es la presión de vapor de saturación [e_s , kPa], e_a es la presión de vapor actual [e_a , kPa], Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [Δ , $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], γ es la constante

sicrométrica [γ , kPa °C⁻¹] y el número 900 es un factor de conversión. En términos generales, el método de Penman-Monteith involucra el conocimiento de los datos promedio diarios o mensuales de temperaturas máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar o horas de sol del período de estudio.

Los antecedentes climatológicos disponibles consistieron en las series mensuales registradas en la estación Pirque para el período 1985 – 1999, para las variables de temperaturas media, máxima y mínima, humedad relativa, recorrido del viento, horas de sol diarias, evaporación total y precipitación total. La metodología de Penman-Monteith (Smith et al., 1992; Allen et al. 1994; Smith et al., 1998), se usó en este trabajo para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia ETo. Mediante la aplicación del software Cropwat-4W (Clarke et al., 1998; Smith, 1993), se calcularon los valores medios de ETo a nivel mensual y para cada año, en el período 1985 – 1999. Valores probables mensuales de ETo fueron estimados con el modelo LogNormal definido por la Ecuación (1) y la discretización decadal se realizó con una herramienta de ajuste polinómico del software Cropwat-4W. En la modelación espacial y temporal de los requerimientos hídricos de la vid y del sistema de riego terciario Santa Rita, se incluyó información de campo y antecedentes sobre las áreas de cultivos, suelos, aspectos agronómicos y sistemas de riego; la evaluación de la demanda hídrica se realizó a nivel decadal y considerando diferentes probabilidades de excedencia.

La existencia de distintas superficies en el sistema de riego, para las cuales se requieren diferentes cantidades de agua, hizo necesario una propuesta de modelación del sistema de riego terciario caracterizado por: los requerimientos hídricos de los cultivos, y los requerimientos hídricos de los sistemas de riego. Se estableció una subdivisión espacial del sistema de riego terciario en zonas relativamente homogéneas, de tal forma de que cada una de ellas representó un elemento del sistema de riego donde ocurre el proceso evapotranspirativo. Cada elemento del sistema está entonces representado por su ubicación y tipo de suelo, variedad de Vid y sistema de riego. Cada una de estas zonas o elementos genera una determinada variación temporal del requerimiento hídrico, lo que permitió obtener una integración de todos los requerimientos en el área de estudio.

Figura 7 esquematiza la superficie modelada del elemento $i j k$, y las variables involucradas,

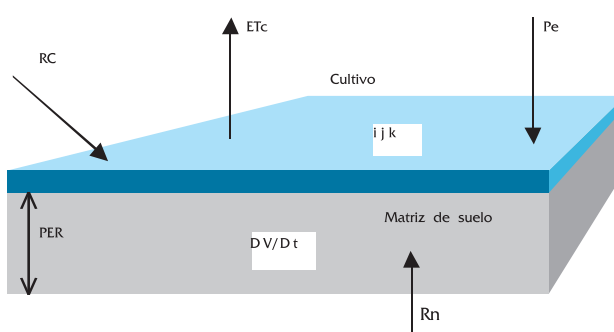


Figura 7. Modelación de una zona homogénea (elemento $i j k$) del sistema de riego terciario Santa Rita.

donde i representa la zona determinada por la ubicación y tipo de suelo, j representa la zona determinada por el sistema de riego, k representa la zona determinada por la variedad de Vid, ET_c es la evapotranspiración real del cultivo en el elemento ijk , Pe es la precipitación efectiva en el elemento ijk , RC es el requerimiento hídrico del cultivo en el elemento ijk , PER es la profundidad efectiva radical de la zona i , Rn son los aportes de la napa freática a la zona radical del elemento ijk y $\Delta V / \Delta t$ representa la variación del almacenamiento de agua para un intervalo de tiempo Δt en la zona de raíces con una profundidad PER , considerando los aportes de la precipitación efectiva Pe .

La ecuación de continuidad aplicada al elemento ijk de la Figura 7 es:

$$Pe + Rn + RC = ET_c \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6)$$

La lluvia efectiva Pe en la Ecuación (6) se definió como la porción efectiva de la precipitación total P en un período dado, la cual es usada directa y/o indirectamente en la producción de cultivos y en el sitio donde precipitó, pero sin actividades que involucren extracciones desde fuentes superficiales o subterráneas (Dastane, 1978). Definiendo K_c como el coeficiente de evapotranspiración del cultivo, el valor de ET_c (mm/d) se estima según la Ecuación (7) (Doorenbos y Pruitt, 1975; Smith et al., 1998). La variación temporal de K_c en función del desarrollo vegetativo del cultivo, ha sido propuesta por FAO (Doorenbos y Pruitt, 1975).

$$ET_c = K_c ET_o \quad (7)$$

El modelo de FAO de la Ecuación (7) fue aplicado en la obtención de una función espacial, temporal y probabilística para calcular la evapotranspiración del cultivo en el elemento ijk de la Figura 7.

Tabla 1. Requerimientos de riego totales en el sistema Santa Rita (l/s), para diferentes probabilidades de excedencia o períodos de retorno.

Fecha	Caudales Requeridos (l/s)							
	P _{exc} =50% Tr=2años	P _{exc} =20% Tr=5años	P _{exc} =10% Tr=10años	P _{exc} =7% Tr=15años	1 P _{exc} =5% Tr=20años	P _{exc} =3% Tr=30años	P _{exc} =2% Tr=50años	P _{exc} =1% Tr=100años
17/ago-26/ago	11,1	12,1	12,7	13,0	13,2	13,4	13,7	14,1
27/ago-5/sep	13,5	14,6	15,3	15,6	15,8	16,1	16,5	16,9
6/sep-15/sep	76,8	83,0	86,6	88,3	89,5	91,1	93,0	95,3
16/sep-25/sep	89,8	96,8	100,7	102,7	104,0	105,8	107,9	110,5
26/sep-5/oct	105,4	113,3	117,7	119,9	121,4	123,3	125,8	128,6
6/oct-15/oct	125,9	134,8	139,9	142,4	144,1	146,4	149,1	152,4
16/oct-25/oct	160,0	171,0	177,1	180,2	182,3	185,1	188,4	192,4
26/oct-4/nov	216,7	231,0	238,9	243,0	245,6	249,3	253,6	258,8
5/nov-14/nov	287,0	305,2	315,2	320,5	323,9	328,5	334,0	340,6
15/nov-24/nov	356,2	378,0	389,8	396,0	400,0	405,6	412,1	420,0
25/nov-4/dic	421,3	446,1	459,3	466,4	470,9	477,2	484,6	493,4
5/dic-14/dic	461,6	487,5	501,3	508,7	513,5	520,1	527,7	537,0
15/dic-24/dic	473,4	498,9	512,2	519,4	524,0	530,6	537,9	546,9
25/dic-3/ene	478,7	503,3	516,1	523,1	527,7	533,9	540,9	549,7
4/ene-13/ene	468,5	492,4	504,9	511,6	516,1	522,0	528,8	537,3
14/ene-23/ene	452,5	475,4	487,4	493,8	498,0	503,7	510,1	518,2
24/ene-2/feb	431,9	453,5	464,7	470,7	474,7	480,1	486,2	493,9
3/feb-12/feb	406,7	426,9	437,5	443,0	446,7	451,8	457,4	464,5
13/feb-22/feb	378,0	396,6	406,2	411,3	414,6	419,3	424,5	431,0
23/feb-4/mar	345,0	361,6	370,4	375,0	378,0	382,2	386,9	392,7
5/mar-14/mar	307,6	322,2	330,0	333,9	336,6	340,4	344,5	349,6
15/mar-24/mar	264,5	277,0	283,6	287,0	289,2	292,4	295,9	300,3
25/mar-3/abr	206,4	216,0	221,1	223,7	225,5	228,0	230,7	234,0
4/abr-13/abr	139,4	145,9	149,3	151,0	152,2	153,9	155,7	157,9
14/abr-20/abr	80,7	84,4	86,4	87,3	88,0	89,0	90,1	91,3
Q promedio	272,6	287,5	295,5	299,6	302,4	306,2	310,5	315,8
Q máximo	478,7	503,3	516,1	523,1	527,7	533,9	540,9	549,7
Q mínimo	11,1	12,1	12,7	13,0	13,2	13,4	13,7	14,1

El requerimiento hídrico del cultivo de Vid RC de la Ecuación (6) [mm/(10 días)], con P_{exc} de probabilidad de excedencia y d como el número de orden de la década (10 días), con d entre 1 y 22,7 décadas, se presenta en la Ecuación (8), donde Kc_d es el coeficiente de evapotranspiración de la Vid en la década d ; ET_d se expresa en mm/década.

$$RC_d^{P_{exc}} = ET_d^{P_{exc}} = Kc_d * ET_d^{P_{exc}} \quad (8)$$

El requerimiento hídrico del cultivo de la Ecuación (8) se afectó por la relación entre el área específica de una zona homogénea, A_{ijk} en hectáreas, y el área total cultivada en la zona de estudio, $A_T = 570,3$ ha. De esta forma, la tasa parcial de riego al campo TAR [$l.s^{-1}.ha^{-1}$], para una década d y probabilidad específica P_{exc} , se expresó como:

$$TAR_d^{P_{exc}} = 1,1574 * \frac{RC_d^{P_{exc}} * A_{ijk}}{Ea_{ij} * A_T} \quad (9)$$

donde Ea_{ij} es la eficiencia de aplicación seleccionada o determinada experimentalmente en un sistema de riego y en un determinado suelo, expresándola en porcentaje. El coeficiente 1,1574 es un factor de conversión de $mm.década^{-1}$ a $l.s^{-1}.ha^{-1}$. Los requerimientos de riego en una zona homogénea $RR_d^{P_{exc}} [l.s^{-1}]$, se calcularon considerando la tasa parcial de riego al campo $TAR_d^{P_{exc}}$ de la Ecuación (9) y el área específica A_{ijk} del elemento considerado. La integración total de los requerimientos parciales $RR_d^{P_{exc}}$ de cada uno de los elementos, constituye el requerimiento de riego total, $RRT_d^{P_{exc}} [l.s^{-1}]$, para una década d y probabilidad específica P_{exc} :

$$RRT_d^{P_{exc}} = \sum_i \sum_j \sum_k RR_d^{P_{exc}} \quad (10)$$

Los parámetros involucrados en el modelo de demanda hídrica fueron los coeficientes de evapotranspiración del cultivo Kc propuestos por FAO y

las eficiencias de aplicación del agua E_a de los sistemas de surcos y goteo. Los resultados del análisis probabilístico de ET_o señalaron que la variación de ET_o de un año a otro es relativamente baja. A modo de ejemplo, para un mes de alta evapotranspiración como Diciembre, en donde es ampliamente utilizado el riego en la zona central de Chile, se obtuvo diferencias sobre la tasa promedio de ET_o de un 11,4%, considerando un evento correspondiente a un período de retorno de 20 años (ET_o^5). En la Tabla 1 se presenta el resumen de los requerimientos probables de riego total en el sistema actual, una vez integrados los requerimientos de los sistemas de surcos y goteo. Es importante destacar que los resultados de caudal presentados en esta tabla, corresponden a flujos continuos durante el período decadal respectivo. En estos resultados se observa que las diferencias de requerimientos de riego entre un año y otro no son muy significativas, y la magnitud de variación presenta un rango limitado.

Fernández (1991), definió para la zona central de Chile el carácter periódico de las series de demanda hídrica, considerándolas constantes de un año a otro, y variables para las diferentes cuencas de la zona. Teniendo en cuenta la poca variación de magnitud de los requerimientos de riego entre eventos con diferentes probabilidades de excedencia, se consideró en el presente estudio que los requerimientos de los cultivos para cada una de las décadas del período permanecen prácticamente constantes entre un año a otro, adoptándose como evento representativo de los requerimientos del sistema el correspondiente a una probabilidad de excedencia del 50%.

La consideración anterior se adoptó para el análisis del balance hídrico en los diferentes escenarios evaluados en la simulación. Para el diseño de infraestructura de riego se recomienda considerar la variación probabilística de la demanda y los períodos con una menor probabilidad de excedencia, de tal forma que la infraestructura de riego tenga la suficiente capacidad de operación, para el caso de presentarse en el sistema un evento crítico de alta demanda atmosférica.

SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO Y RESULTADOS

Los resultados del balance hídrico se obtuvieron por medio de un modelo de simulación, que predice el balance hídrico resultante de variaciones en eventos y/o acciones relacionados con el manejo

y características del sistema de riego. La metodología del modelo de simulación consistió en la aplicación de un balance de masas entre la disponibilidad superficial de agua y la demanda de riego en la zona de estudio. En un enfoque determinístico, las respuestas del modelo propuesto se obtuvieron a partir de varias simulaciones con variaciones en los valores de los parámetros de la oferta y demanda hídrica, tales como las eficiencias de aplicación (E_a) en los sistemas de riego por surcos y goteo, el coeficiente de evapotranspiración de la Vid (K_c) en la fase de desarrollo, el porcentaje de pérdidas de flujo por percolación en canales principales (P_{cm}), la tasa de pérdidas de flujo por percolación en canales secundarios e internos (TP_{ci}) y el porcentaje de pérdidas de flujo por derrames (P_d). Las áreas de las zonas homogéneas A_{ijk} , se definieron como las variables de entrada del modelo. En el enfoque determinístico se consideró la situación de un año promedio con probabilidad de excedencia del 50%, tanto en la oferta como la demanda hídrica.

En un enfoque probabilístico, los parámetros considerados incluyen los del modelo de probabilidad LogNormal que se utilizó para ajustar los datos de las series de clima y caudal. El análisis de frecuencia definido con el enfoque probabilístico, permitió establecer las seguridades de riego del sistema Santa Rita. Para la evaluación del balance hídrico con el enfoque probabilístico, se consideró el evento representativo de requerimientos con probabilidad del 50% (P_{50}), pero incluyendo diferentes años hidrológicos de la oferta, con especial énfasis en aquellos años que caracterizan los períodos de escasez. Desde el punto de vista de la oferta hídrica, la seguridad de riego se analizó para probabilidades de excedencia altas, iguales a 80, 90 y 95%.

Los parámetros determinísticos considerados en el enfoque probabilístico correspondieron a los definidos en la situación actual de riego, la cual fue asociada al actual patrón de cultivos, a las características de la infraestructura de la red y sistemas de riego y al régimen actual de distribución de aguas. Los resultados de la situación actual se consideran como el comportamiento del sistema actual, frente a los recursos hídricos superficiales del registro histórico.

Según la Figura 8, para el evento promedio del balance hídrico en la situación actual, se obtiene un nivel de seguridad de la disponibilidad superficial del 100% durante toda la temporada de riego, para suplir directamente los requerimientos hídricos del sistema. Otros resultados, en los que se

analizaron los eventos de oferta de menor probabilidad de excedencia, que presentaron grandes incrementos en la magnitud del caudal por encima de la P50, mostraron que los recursos hídricos de las fuentes superficiales son igualmente suficientes para satisfacer directamente los requerimientos actuales, con superávit de agua bastante significativos a lo largo de la temporada.

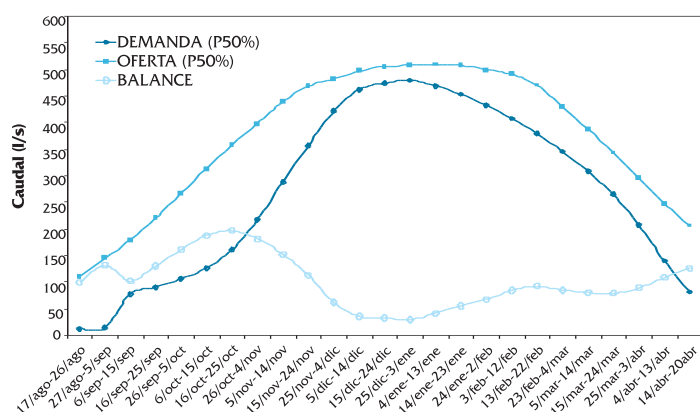


Figura 8. Balance hídrico promedio de la situación actual de riego en el sistema Santa Rita.

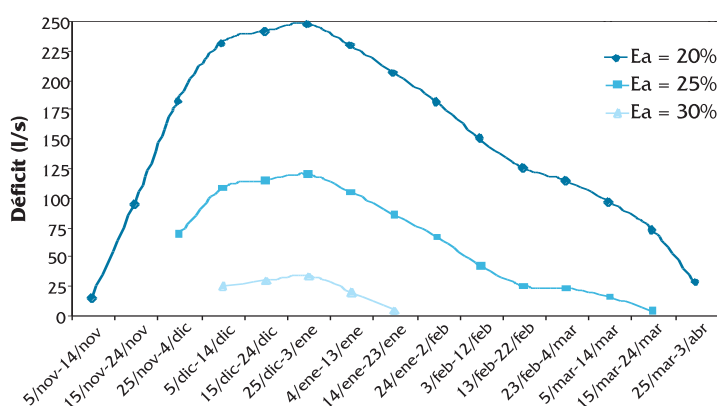


Figura 9. Déficit hídrico considerando diferentes valores de E_a en riego por surcos.

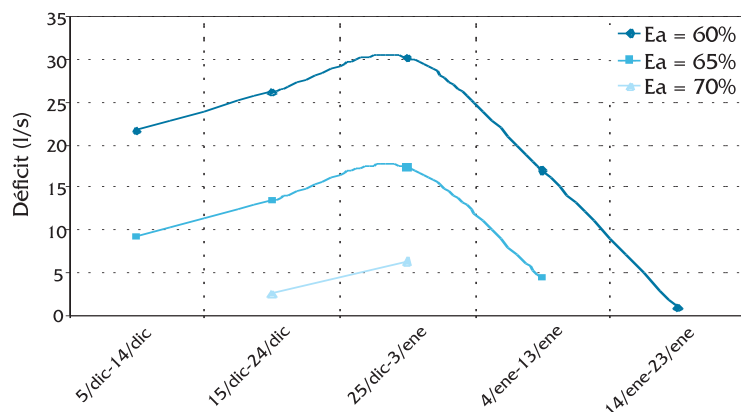


Figura 10. Déficit hídrico considerando diferentes valores de E_a en riego por goteo.

Los resultados del balance hídrico en el enfoque determinístico, mostraron que los parámetros de mayor sensibilidad en la magnitud y distribución de los déficit hídricos son: la eficiencia de aplicación en riego por surcos y el coeficiente de evapotranspiración de la Vid en la tercera fase de desarrollo. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 9 los resultados del balance deficitario, en los cuales los valores de E_a en riego por surcos inferiores a un 33% en cada una de las zonas homogéneas del sistema de riego actual, afectarían negativamente la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales, ocasionando niveles de déficit hídrico significativos. La sensibilidad del déficit a las variaciones de E_a en el sistema de riego por goteo (Figura 10), resultó mucho menor que la estimada para las variaciones de E_a en el sistema de riego por surcos.

El excesivo escurrimiento superficial observado al final del surco durante el evento de riego en el sistema Santa Rita, es ocasionado por el uso de caudales demasiados grandes que aceleran el avance del agua en el surco y/o por tiempos de duración del riego exagerados. Esta situación disminuye considerablemente la eficiencia de aplicación en este sistema de riego, y es una de las circunstancias que podrían mejorarse notablemente para enfrentar una posible situación de déficit de agua (Gurovich, 1999). Los mayores valores de déficit en todas las simulaciones del enfoque determinístico se presentaron siempre entre la última semana de Diciembre y la primera de Enero.

Los resultados del enfoque probabilístico, mostraron que los balances hídricos a lo largo de la temporada del cultivo, entre el evento representativo de requerimientos de riego RRT^{50} y los eventos hidrológicos para años secos Q_{80} , Q_{90} y Q_{95} , presentaron diferentes niveles de déficit en magnitud y distribución. En la Figura 11 se presenta la ubicación, distribución y magnitud de los excesos y déficit para un año hidrológico de 80% de probabilidad de excedencia. El déficit del recurso se mantiene desde finales de Noviembre hasta inicios de Febrero, con un máximo faltante de 67 l/s durante todo el mes de Diciembre. El volumen de déficit acumulado o severidad durante el período de duración de esta sequía es de 305.788 m³ aproximadamente. Si se tiene en cuenta el volumen de excesos del período que antecede a esta sequía desde el inicio de la temporada, se tendría suficiente capacidad para suplir tal escasez, si el sistema Santa Rita tuviera alguna obra hidráulica de almacenamiento, con una capacidad del orden de 0,35 Hm³, si se considera un factor de seguridad del 15% sobre el volumen de déficit acumulado.

MODELACIÓN Y ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE UN SISTEMA DE RIEGO EN CHILE CENTRAL

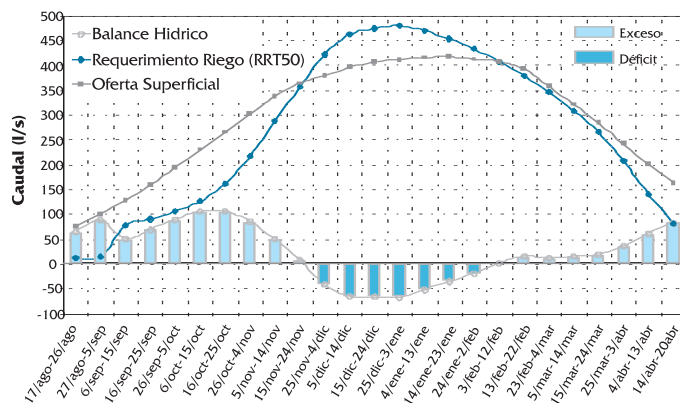


Figura 11. Balance hídrico de la situación actual en el sistema Santa Rita para un año seco P_{exc} 80%.

Un cambio de las actuales áreas con riego por surcos a riego por goteo, especialmente en la zona B, donde se presentan las mayores demandas actuales del sistema, permitiría reducir drásticamente los requerimientos del sistema y optimizar la disponibilidad del recurso, de tal forma que no se tendría déficit en años secos para la situación futura (Figura 12). En esta situación, se alcanzaría una seguridad de suministro del 100% satisfaciendo directamente las demandas desde los canales internos, sin necesidad de regulación y embalse.

En términos generales, los años secos presentan períodos decadales de déficit importantes durante la temporada de cultivo, distribuidos con un mayor impacto entre los meses de Diciembre y Enero. Los volúmenes sobrantes, que potencialmente se podrían almacenar en los primeros meses de la temporada, e inclusive en meses invernales antes de ésta, serían suficientes para abastecer los requerimientos hídricos del sistema en el período en el cual los caudales son insuficientes para satisfacer directamente la demanda.

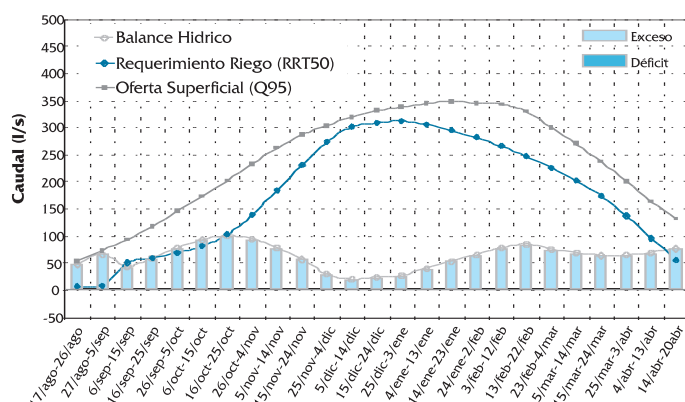


Figura 12. Balance hídrico de una situación futura de riego en el sistema Santa Rita para un año muy seco con probabilidad de excedencia 95%, cambiando las 234,21 ha actuales en riego por surcos de la zona B a riego por goteo.

CONCLUSIONES

La modelación de los componentes y procesos involucrados en un sistema de riego constituye una valiosa herramienta en los estudios de ingeniería, tanto para el análisis y evaluación de sus recursos hídricos superficiales, como en la formulación de alternativas técnicas de aprovechamiento y optimización del recurso e infraestructura hidráulica.

La mayor disponibilidad de los caudales probables para cualquier año hidrológico en el río Maipo se presenta siempre entre Diciembre y Enero, siendo éste último el mes en que los mayores cambios de caudal se pueden esperar entre un año y otro con respecto a su promedio. Para los canales del sistema Santa Rita, los mayores caudales probables para el canal interno Huidobro se presentan en Febrero para años secos y en Enero para años húmedos, mientras en el canal interno Santa Rita los mayores caudales probables se presentan en Enero para años secos y entre Noviembre y Diciembre para años húmedos. El canal interno Santa Rita reviste mayor importancia en la seguridad de suministro, ya que aporta más de las dos terceras partes de la oferta total en años secos y es más seguro contar con su disponibilidad hídrica que en la del canal Huidobro.

En años secos se observan niveles significativos de déficit hídrico en el sistema Santa Rita, dada la insuficiencia de flujos en los canales internos para abastecer directamente la demanda hídrica. El mes de Diciembre es el más afectado por las sequías hidrológicas. Sin embargo, en la misma temporada de cultivos y antes del período de sequía, existen recursos superficiales potencialmente almacenables que garantizarían el abastecimiento del déficit. En el evento promedio del balance hídrico y para años húmedos, se presenta una seguridad de riego del 100% durante toda la temporada de cultivos para satisfacer sus requerimientos hídricos directamente desde las fuentes superficiales. Los parámetros del modelo de simulación que mayor sensibilidad presentaron en los resultados del déficit fueron la eficiencia de aplicación en riego por surcos (E_a), y el coeficiente de evapotranspiración de la vid en la tercera etapa de desarrollo (K_c).

LISTA DE SÍMBOLOS

X_T	Variable aleatoria.
μ	Promedio.
σ	Desviación estándar.

K_T	Coeficiente de frecuencia de una distribución de probabilidad.
C_v	Coeficiente de variación.
T_r	Período de retorno.
P_{exc}	Probabilidad de excedencia.
Q_e	Flujo superficial de entrada a un elemento de la red de riego.
P	Precipitación.
R_r	Recuperaciones por retornos de riego.
R_d	Recuperaciones por derrames desde fuentes sin regulación.
R_n	Recuperaciones por aportes provenientes de la napa freática.
Q_s	Flujo superficial de salida de un elemento de la red de riego.
I	Pérdidas por infiltración y percolación.
E_v	Evaporación.
ET_c	Evapotranspiración de un cultivo o cobertura vegetal.
D	Pérdidas por derrames en el tramo.
$\Delta V/\Delta t$	Variación del almacenamiento de agua en el intervalo de tiempo Δt .
Q_d	Flujo derivado desde un nodo.
ET_o	Evapotranspiración del cultivo de referencia.
R_n	Radiación neta en la superficie del cultivo.
G	Flujo del calor del suelo.
T	Temperatura promedio del aire.
U_2	Velocidad del viento medida a 2m de altura.
e_s	Presión de vapor de saturación del aire.
e_a	Presión de vapor actual del aire.
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor del aire.
γ	Constante Psicrométrica.
(i, j, k)	Elemento modelado de evapotranspiración: Zona homogénea.
i	Zona determinada por la ubicación y tipo de suelo.
j	Zona determinada por el sistema de riego.
k	Zona determinada por la cepa de vid.
P_e	Precipitación efectiva.
RC	Requerimiento hídrico del cultivo.
PER	Profundidad efectiva radical del cultivo.
d	Número de orden de la década dentro del período vegetativo del cultivo de Vid.
K_c	Coeficiente de evapotranspiración del cultivo.
TAR	Tasa de riego.
E_a	Eficiencia de aplicación del riego.
A_{ijk}	Area específica de una zona homogénea.
A_T	Area total cultivada en la zona de estudio.
RR	Requerimiento de riego en una zona homogénea.
RRT	Requerimiento de riego del área total cultivada.

Este trabajo fue financiado con fondos del Gobierno Japonés y el Banco Mundial, a través de una beca en el área Ambiental.

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Smith M., Perrier A., y Pereira L.S. (1994) An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. ICID Bulletin. 43(2): 35-92.
- CEPAL (1999) El Código de Aguas de Chile: Entre la Ideología y la Realidad (LC/R. 1897/Rev.1). Santiago de Chile, 30 de Octubre.
- Clarke D., Smith M. y El-Ashari K. (1998) CropWat for Windows versión 4.2: User Guide (se encuentra disponible en <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/wcrop.htm>).
- CNR – IPLA (1984) Proyecto Maipo: Estudio Hidrológico e Hidrogeológico. Santiago, Chile.
- CNR – CICA/BP/HTS (1982) Estudio Integral de Riego de los Valles Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca. Santiago, Chile.
- Dastane, N. G. (1978) Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. Estudio FAO Riego y Drenaje No 25. FAO, Roma - Italia.
- DGA (2000) Modelo de Simulación Hidrológico Operacional: Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho. Estudio realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. para el M.O.P. Santiago, Chile.
- DICTUC/PUC (1999) Estudio Hidrológico de Fuentes Superficiales y Subterráneas de Aguas Cordillera. Informe final presentado a la empresa Aguas Cordillera S.A. Santiago, Chile.
- Doorenbos J. y Pruitt W.O (1975) Crop Water Requirements. Estudio FAO Riego y Drenaje No 24. FAO, Roma - Italia.
- Espinoza, C. A. (1989) Modelo Integrado de Simulación para los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos de una Cuenca Agrícola. Tesis en Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Fernández, B. (1991) Sequías en la Zona Central de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Gurovich, L. (1991) Manual de Riego Programado de los Frutales: Evaluación y Operación Programada del Riego en Plantaciones Frutales. Edición CORFO. Santiago, Chile.
- Gurovich, L. (1999) Riego Superficial Tecnificado. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Santibañez, F., Uribe, J. (1990) Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Santiago, Chile.
- Shahin, M., Oorschot H.J.L. van y Lange S.J. (1993) Statistical Analysis in Water Resources Engineering. A. A. Balkema, Rotterdam - The Netherlands.

- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Perrier, A., Pereira, L., y Segeren, A. (1992) Report of the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. UN-FAO, Roma, Italia, 54 p.
- Smith, M. (1993) CROPWAT, Programa de Ordenador para Planificar el Riego. Estudio FAO Riego y Drenaje No 46. FAO, Roma - Italia.
- Smith, M., Allen, R. G., Pereira, L., y Raes, D. (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56. FAO, Roma - Italia.