

MODELACION Y EVALUACION DEL BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL DE UN SISTEMA DE RIEGO EN CHILE CENTRAL

JOSE MANUEL MOLINA(1), EDUARDO VARAS(2) Y LUIS GUROVICH(2).

(1)Depto. de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

Carrera 32 Chapinero, vía Candelaria, Palmira, Colombia.

e-mail: jmmolina@palmira.unal.edu.co , jmmolina@puc.cl

(2)Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile.

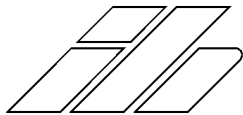
Casilla 306 Correo 22, Santiago, Chile. e-mail: evaras@ing.puc.cl

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de modelación y análisis probabilístico de la oferta superficial y demanda de agua en un sistema terciario de regadío de la zona central de Chile. 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. Se llevó a cabo la estimación de la disponibilidad hídrica superficial, describiendo su variación espacial y temporal. Se usó 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 FAO de Penman – Monteith. 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 del recurso.

ABSTRACT

This paper outlines a modelling proposal and the evaluation of the surface water availability and demand of a tertiary irrigation system of Chile's central zone. A description and general evaluation has been developed for the system by on-site visits and collection of information, taking into consideration soil properties of the cultivation areas, water, climate, and hydraulic infrastructure. Analysis with hydrologic modelling tools was used for estimating water availability for the study zone, centered on its time and spatial variation of the surface water resources. A probability distribution model was applied for estimating flow rate values associated to occurrence probabilities. Also, a time and spatial model for water requirements of the irrigation system has been developed, calculating different probabilities of exceedance based on the FAO Penman-Monteith equation. A simulation model based on water balance has been developed, to obtain better knowledge of the actual irrigation situation and water supply confidence of the system, evaluation of future situations of the system and proposal of recommendations and alternatives to promote efficient use of water resources and optimization of surface water availability.



MODELACION Y EVALUACION DEL BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL DE UN SISTEMA DE RIEGO EN CHILE CENTRAL

1 Introducción

En los últimos años, se ha incrementado notablemente en Chile la competencia por los recursos hídricos, entre los sectores urbano, generación eléctrica, industrial, ambiental y agrícola. Este último sector es el que utiliza los mayores volúmenes de agua y generalmente con bajas eficiencias de uso, agravando el conflicto entre usuarios del riego debido a la menor disponibilidad del recurso para la producción agrícola, con significativos impactos en épocas de sequía. En muchos casos se ha provocado un aumento significativo en la explotación de recursos subterráneos, al no disponerse de suficiente disponibilidad superficial 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.

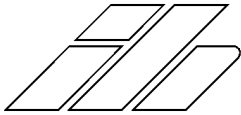
Los estudios de los recursos hídricos en esquemas y sistemas de riego a pequeña escala, son un requerimiento prioritario para definir el estado actual del recurso y de la infraestructura de riego. Ello se requiere para conocer y evaluar las condiciones específicas del balance hídrico, y para plantear 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 plantean los modelos de enfoque probabilístico, de la oferta hídrica superficial, de las necesidades de agua de los cultivos y de los requerimientos hídricos de los sistemas de riego. Lo anterior con el fin de 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.

2 El Sistema Santa Rita

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. Es un sistema terciario de riego cultivado 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.

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. Las fuentes superficiales abastecen en promedio 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 laterales. El sistema Huidobro recibe adicionalmente las aguas excedentes del río Clarillo.

Los canales secundarios Huidobro y Santa Rita 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. La repartición es de tipo proporcional.

El 100% del área cultivada en el sistema Santa Rita utiliza el riego como fuente complementaria para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos de Vid. Una superficie aproximada del 56% de dicha área se encuentra en riego por surcos, y el resto 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 este período no se acostumbra regar en la zona central de Chile.

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.

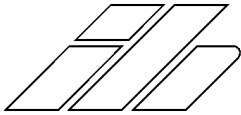
3 MODELACION DE LA OFERTA HIDRICA EN FUENTES SUPERFICIALES

Este estudio se llevó a cabo considerando varias etapas y metodologías agrupadas en tres tópicos de interés: análisis de antecedentes hidrológicos del río y de los canales principales; modelación superficial de la oferta hídrica; y análisis hidrológico del sistema terciario. En base a las recomendaciones encontradas en la literatura (DGA, 2000; DICTUC/PUC, 1999; Shahin et al., 1993), se utilizó el modelo Lognormal-2p, para asociar valores de probabilidad de excedencia a diferentes valores de caudal. La Ecuación (1) permite calcular valores de caudal asociados a diferentes probabilidades.

$$X_T = m + K_T * s \quad (1)$$

El modelo Lognormal de dos parámetros distribuye una variable aleatoria (v.a.) X_T en función de los parámetros del modelo (Promedio m y desviación estándar s 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 Cv 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:

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



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. El análisis se centró en el período de desarrollo de cultivos, 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, desde 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 bs 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.

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.

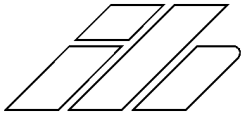
La Ecuación (3) presenta el modelo de continuidad en el elemento *tramo*, donde la variable Q_e es el flujo superficial del canal al inicio del tramo, P es la precipitación sobre el tramo, R_r representa las recuperaciones de flujo por retornos de riego, R_d las recuperaciones por derrames desde fuentes 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, E_v es la evaporación directa desde el tramo, E_{Tc} es la evapotranspiración de la vegetación en las riberas del tramo, D las pérdidas por derrames en el tramo y DV/Dt representa la variación del almacenamiento del tramo en el intervalo de tiempo Dt .

$$Q_e + P + R_r + R_d + R_n = Q_s + I + E_v + E_{Tc} + D \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3)$$

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

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

donde Q_d es el caudal derivado desde el nodo hacia un tramo de canal, y Q_e y Q_s 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.

4 MODELACION DE LOS REQUERIMIENTOS HIDRICOS

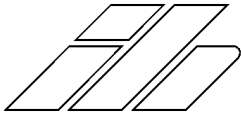
Se consideraron los siguientes tópicos: análisis de antecedentes climatológicos; estimación y análisis de la evapotranspiración del cultivo de referencia; modelación de los requerimientos hídricos del sistema; y análisis de los resultados de la modelación.

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 ET_o (Smith et al., 1998).

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

En la Ecuación (5), ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia [ET_o , mm d⁻¹], R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo [R_n , MJ m⁻² d⁻¹], G es el flujo del calor del suelo [G , MJ m⁻² d⁻¹], T es la temperatura promedio del aire [T , °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], D es la pendiente de la curva de presión de vapor [D , kPa °C⁻¹], g es la constante sicrométrica [g , 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 ET_o . Mediante la aplicación del software Cropwat-4W (Clarke et al., 1998; Smith, 1993), se calcularon los valores medios de ET_o a nivel mensual y para cada año, en el período 1985 – 1999. Valores probables mensuales de ET_o 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.



Las distintas superficies en la zona de riego, para las cuales se requieren diferentes cantidades de agua, hizo necesario una propuesta de modelación del sistema terciario caracterizado por: los requerimientos hídricos del cultivo, y los requerimientos hídricos de los sistemas de riego. Se estableció una subdivisión espacial del área en zonas relativamente homogéneas, de forma que cada una de ellas representó un *elemento* del sistema de riego donde ocurre el proceso evapotranspirativo. Cada *elemento* o *zona homogénea* está entonces representado por su ubicación y tipo de suelo, variedad de Vid y sistema de riego. La Figura 1 esquematiza la superficie modelada del elemento *ijk*, y las variables involucradas,

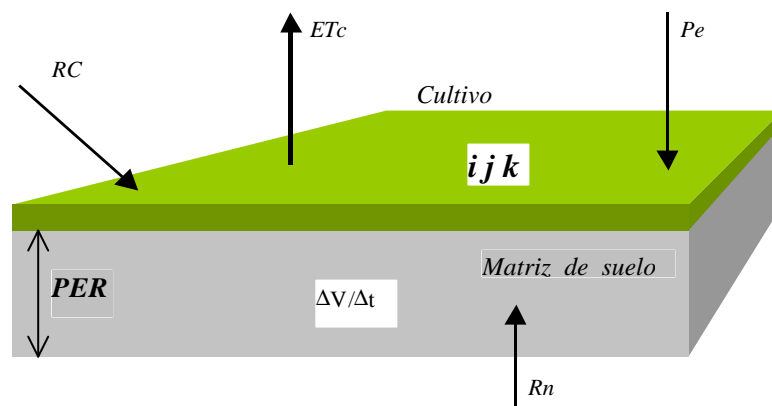


Figura 1. Modelo de una zona homogénea (elemento *ijk*).

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 *ijk*, Pe es la precipitación efectiva (según Dastane, 1978) en *ijk*, RC es el requerimiento hídrico del cultivo en *ijk*, PER es la profundidad efectiva radical de la zona *i*, R_n son los aportes de la napa freática a la zona radical en *ijk* y DV/Dt representa la variación del almacenamiento de agua para un intervalo de tiempo Dt en la zona de raíces con una profundidad PER , considerando los aportes de la precipitación efectiva Pe .

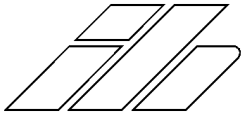
La ecuación de continuidad aplicada al elemento *ijk* de la Figura 1 es:

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

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 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 ; ETo se expresa en mm/década.

$$RC_d^{P_{exc}(ijk)} = ETc_d^{P_{exc}(ijk)} = Kc_{d(k)} * ETo_d^{P_{exc}} \quad (8)$$

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:

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

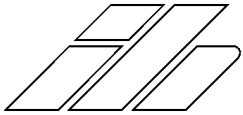
donde $Ea_{(ij)}$ es la eficiencia de aplicación seleccionada o determinada en un sistema de riego y en un determinado suelo, expresándola en porcentaje. El coeficiente 1,1574 es un factor de conversión de $mm.década^{-1}$ a $l.s^{-1}.ha^{-1}$. Los requerimientos de riego en una zona homogénea $RR_d^{P_{exc}(ijk)}$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

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

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 Ea de los sistemas de surcos y goteo.

Los resultados del análisis probabilístico de ETo señalaron que la variación de ETo de un año a otro es relativamente baja. Lo anterior se corrobora en el estudio de Fernández (1991), quien 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%. Esta consideración 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.



5 SIMULACION DEL BALANCE HIDRICO 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 un enfoque determinístico, las respuestas del modelo propuesto se obtuvieron a partir de varias simulaciones con variaciones en los valores de los parámetros actuales de la oferta y demanda hídrica, tales como las eficiencias de aplicación del riego (E_a), el coeficiente de evapotranspiración de la Vid (K_c) en la tercera 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.

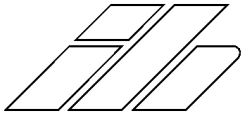
En un enfoque probabilístico, los parámetros considerados incluyen los del modelo de probabilidad LogNormal que se utilizó para ajustar los datos de las series de clima y caudal. El análisis de frecuencia definido con el enfoque probabilístico, permitió establecer las seguridades de riego del sistema Santa Rita. Para la evaluación del balance hídrico con el enfoque probabilístico, se consideró el evento representativo de requerimientos con probabilidad del 50% (P50), pero incluyendo diferentes años hidrológicos de la oferta, con especial énfasis en aquellos años que caracterizan los períodos de escasez, como en el caso de las probabilidades de 80, 90 y 95%.

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 de la simulación, en los que se analizaron los eventos de oferta de menor probabilidad de excedencia, mostraron que los recursos hídricos superficiales son igualmente suficientes para satisfacer directamente los requerimientos actuales.

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.

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 2 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.

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 3).

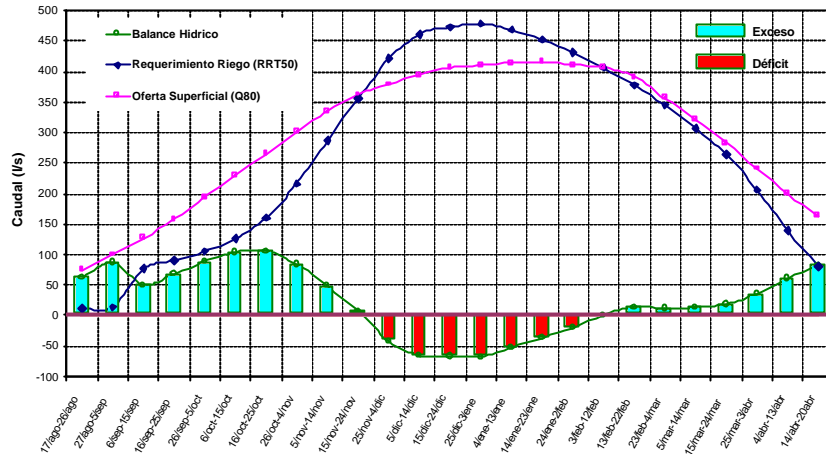


Figura 2. Balance hídrico de la situación actual en el sistema Santa Rita para un año seco P_{exc} 80%.

En términos generales, los años secos presentan períodos decadales de déficit significativos 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.

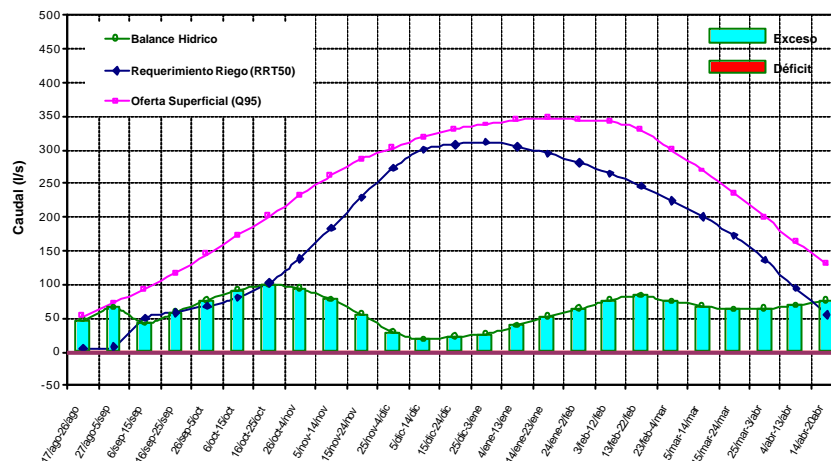
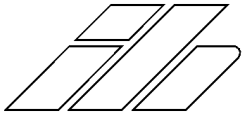


Figura 3. Balance hídrico de una situación futura de riego en el sistema Santa Rita para un año muy seco con probabilidad de excedencia 95%, cambiando las 234,21 ha actuales en riego por surcos de la zona B a riego por goteo.



6 CONCLUSIONES

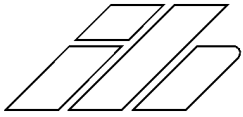
La modelación de los componentes y procesos involucrados en un sistema de riego constituye una valiosa herramienta en los estudios de ingeniería, tanto para el análisis y evaluación de sus recursos hídricos superficiales, como en la formulación de alternativas técnicas de aprovechamiento y optimización 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. 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 el evento promedio del balance hídrico y para años húmedos, se presenta una seguridad de riego del 100% durante toda la temporada de cultivos, mientras en años secos, se observan niveles significativos de déficit hídrico. El mes de Diciembre es el más afectado por las sequías hidrológicas. 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).

7 REFERENCIAS

- Allen, R.G., Smith M., Perrier A., y Pereira L.S. An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43(2): 35-92, 1994.
- CEPAL. El Código de Aguas de Chile: Entre la Ideología y la Realidad (LC/R. 1897/Rev.1). Santiago de Chile, 30 de Octubre, 1999.
- Clarke D., Smith M. y El-Ashari K. CropWat for Windows versión 4.2: User Guide (disponible en <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/wcrop.htm>). 1998.
- CNR – IPLA. Proyecto Maipo: Estudio Hidrológico e Hidrogeológico. Informe de Consultoría. Santiago, Chile, 1984.
- CNR – CICA/BP/HTS. Estudio Integral de Riego de los Valles Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca. Santiago, Chile. 1982.
- Dastane, N. G. Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. Estudio FAO Riego y Drenaje No 25. FAO, Roma - Italia. 1978.
- DGA. Modelo de Simulación Hidrológico Operacional: Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho. Informe de Consultoría, Estudio realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. para el M.O.P. Santiago, Chile. 2000.
- DICTUC/PUC. Estudio Hidrológico de Fuentes Superficiales y Subterráneas de Aguas Cordillera. Informe de Consultoría, presentado a la empresa Aguas Cordillera S.A. Santiago, Chile. 1999.



- Doorenbos J. y Pruitt W.O. Crop Water Requirements. Estudio FAO Riego y Drenaje No 24. FAO, Roma - Italia. 1975.
- Espinoza, C. A. Modelo Integrado de Simulación para los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos de una Cuenca Agrícola. Tesis (Ingeniería Civil), Universidad de Chile. Santiago, Chile. 1989.
- Fernández, B. Sequías en la Zona Central de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 1991.
- Shahin, M., Oorschot H.J.L. van y Lange S.J. Statistical Analysis in Water Resources Engineering. A. A. Balkema, Rotterdam - The Netherlands. 1993.
- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Perrier, A., Pereira, L., y Segeren, A. Report of the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. UN-FAO, Roma, Italia, 54 p. 1992.
- Smith, M. CROPWAT, Programa de Ordenador para Planificar el Riego. Estudio FAO Riego y Drenaje No 46. FAO, Roma - Italia. 1993.
- Smith, M., Allen, R. G., Pereira, L., y Raes, D. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56. FAO, Roma - Italia. 1998.