



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**CONTROL PREDICTIVO APLICADO AL NEXO
“AGUA-ENERGÍA-ALIMENTO” EN COMUNIDADES RURALES**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN ELÉCTRICA

TOMISLAV ANDRÉS ROJE GODOY

PROFESORA GUÍA:
DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

PROFESORES CO-GUÍA:
CARLOS MUÑOZ POBLETE
LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SANDRA CÉSPEDES UMAÑA
DANIEL SBARBARO HOFER

SANTIAGO, CHILE
2020

CONTROL PREDICTIVO APLICADO AL NEXO “AGUA-ENERGÍA-ALIMENTO” EN COMUNIDADES RURALES

Las estimaciones indican que para el año 2050 la población mundial llegará a 9,8 mil millones de seres humanos, es decir, un 30 % más que la población actual. Uno de los desafíos es generar las estrategias y técnicas para alimentar a tal cantidad de gente de forma sustentable, considerando que los recursos hídricos serán cada vez más escasos a causa del calentamiento global. Esta situación no es ajena a la realidad nacional: se esperan reducciones de hasta un 30 % en las precipitaciones en Chile en los próximos años.

Las zonas rurales son especialmente vulnerables a este nuevo escenario, principalmente por la baja tecnificación existente en sus procesos agrícolas y a que los cambios climáticos se han producido en un corto periodo de tiempo, mermando la efectividad de los procesos productivos tal como se han llevado a cabo históricamente.

Junto a la escasez de agua, una buena cantidad de comunidades rurales se enfrentan a la poca disponibilidad de energía eléctrica. Las micro-redes surgen como una solución a esta situación, y su introducción en la mejora del suministro eléctrico llama a integrar ambos conceptos de gestión de agua y energía.

Este trabajo presenta una formulación que permite la optimización del proceso agrícola en lo que se conoce como “*food-water-energy Nexus*” (nexo alimento-agua-energía). El rendimiento de los cultivos (en $[kg/ha]$) está ligado a la periodicidad y volumen de agua regada y la extracción de agua requiere de energía para ser bombeada desde los pozos, la que es provista por una micro-red en base a energías renovables. La propuesta consiste en un modelo jerárquico de optimización consistente en: el *Water Management System* (WMS) para el largo plazo, que determina los requerimientos de riego óptimos de los cultivos en base a estimaciones meteorológicas y a las características propias del cultivo; y el *Energy Management System* (EMS) para el corto plazo, que recibe las consignas de riego del WMS y las incorpora al proceso de optimización, junto a la disponibilidad energética de la micro-red.

Los resultados bajo distintos escenarios toman como caso de estudio la comunidad rural José Painecura Hueñalihuen (Región de La Araucanía), y consideran reducciones en las precipitaciones, variaciones en los parámetros del acuífero y cambios en los rendimientos mínimos esperados. Se prueban dos métodos para el cálculo de los volúmenes óptimos de riego: (i) despejando algebraicamente la irrigación a partir de las ecuaciones de evapotranspiración, y (ii) utilizando algoritmos genéticos en la resolución de la función objetivo del WMS.

Los resultados muestran que una baja en las precipitaciones tiene un impacto negativo en el rendimiento de los cultivos e incrementa los costos del EMS y WMS. Por su parte, un acuífero de mejor calidad posibilita la extracción de una mayor cantidad de agua sin comprometer la extracción desde otros puntos, aunque se asocia a mayores costos de operación del EMS por un mayor uso de las bombas de agua. Finalmente, al variar los rendimientos esperados por los agricultores, no se aprecian diferencias significativas con el caso base en el rendimiento final de los cultivos.

*A mis padres y a Valeria,
quienes me han acompañado
en este nuevo desafío.*

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi polola Valeria, quien me ha acompañado y entregado amor en estos últimos 3 años, siendo parte y protagonista de los últimos eventos importantes de mi vida. También al Dante, que con sus locuras y ocurrencias me ha sacado más que una risa, además de sacarme de mi contexto diario. A mis padres, Carmen y Tomislav, que siempre han estado presentes y atentos en saber mi progresión, no solo en la tesis sino que en todos los aspectos de la vida.

A la profesora Doris Sáez Hueichapan por su confianza, compromiso y perseverancia en que hiciera mis estudios de magíster, además de todo el apoyo personal, académico y laboral que me ha entregado a lo largo de los años.

A mis tatas y familia por la constante preocupación, y a mis suegros por hacerme parte de su familia.

A mis amigos de la U y del colegio; si bien últimamente nos vemos unos más que otros, siempre están presentes: Patricio, Felipe, Raúl, Antonio, Víctor, Caro, Cata, Leonel, Jáuregui, Seba, Lucho, Llama, Basi, Ían, Nadia, Víctor, Viera, Alex, Jorge, Tele, Félix, Rebo y otros que se me pueden haber quedado por ahí.

Tampoco olvidar a los chicos del laboratorio CA2 en su formación 2018-2019: Daniel, Óscar, Cristian, don Luis y Diego, con quienes compartimos arduas jornadas de trabajo ;). A los de los laboratorios de abajo, en especial a Matías U., Erwin y Alex (desertor de CA2), con quien hicimos buenas migas.

A la profesora Linda Daniele y al profesor Carlos Muñoz, por sus importantes aportes para el desarrollo de esta tesis.

Finalmente, agradecer a los proyectos que han apoyado con recursos de distinta índole al desarrollo de esta tesis: The Complex Engineering Systems Institute, CONICYT PIA/-BASAL AFB180003; the Solar Energy Research Centre SERC-Chile, CONICYT/FONDAP Project under Grant No. 15110019; y FONDECYT Grant No. 1170683 “Robust Distributed Predictive Control Strategies for the Coordination of Hybrid AC and DC Microgrids”.

A todos ellos, y a quienes puede haber olvidado, pero que de una u otra forma me han entregado buenos deseos y han estado pendientes de mis avances, gracias.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Hipótesis	3
2. Estado del arte	4
2.1. Micro-redes	4
2.2. Sistema de riego	5
2.3. Gestión de riego y energía	8
2.4. Discusión	8
3. Modelación del sistema hidrogeológico propuesto	9
3.1. Dinámica de pozos y estanques	10
3.1.1. Recarga del acuífero	11
3.2. Demanda de riego	12
3.2.1. Programación del riego	16
3.3. Arquitectura de la micro-red	17
3.3.1. Arreglo fotovoltaico	17
3.3.2. Banco de baterías	18
3.3.3. Inversor	19
3.3.4. Cargas	19
3.4. Energy Management System (EMS)	19
3.5. Water Management System (WMS)	20
3.5.1. Optimización con algoritmos genéticos	22
3.6. Solución propuesta	22
3.7. Estimación de datos	23
4. Resultados	25
4.1. Caso de estudio	25
4.2. Datos	26
4.2.1. Estimación de datos en el largo plazo (WMS)	28
4.2.2. Estimación parámetros en el corto plazo (EMS)	32
4.3. Características del sistema	34
4.3.1. Parámetros de cultivos	34
4.3.2. Caracterización de los agricultores	35

4.3.3.	Parámetros hidrogeológicos	37
4.3.4.	Parámetros de la optimización	37
4.4.	Escenarios	37
4.5.	Resultados por escenarios	40
4.5.1.	Escenario base - Algoritmos genéticos	40
4.5.2.	Escenario base - Solución algebraica	45
4.5.3.	Escasez hídrica	50
4.5.4.	Variación en parámetros del acuífero	53
4.5.5.	Variación en rendimiento mínimo	59
4.5.6.	Resumen de resultados	62
5.	Conclusiones	65
5.1.	Trabajo futuro	66
	Bibliografía	67
A.	Antecedentes hidrogeológicos	73
A.1.	Acuíferos	73
A.1.1.	Acuífero confinado	75
A.1.2.	Acuífero no confinado	75
A.2.	Bombeo variable	76
A.3.	Sistema de múltiples pozos	77
B.	Algoritmos genéticos	79
B.1.	Codificación	79
B.1.1.	Binario	79
B.1.2.	Punto flotante	79
B.2.	Funciones	80
B.2.1.	Creación	80
B.2.2.	Selección	80
B.2.3.	Crossover	81
B.2.4.	Mutación	81
C.	Resultados completos	82
D.	Resultados con acumulación en acuífero	88

Índice de Tablas

4.1.	Errores RMSE de modelos de Media Móvil utilizados en el WMS a un paso y 28 pasos.	31
4.2.	Características de modelos ARIMA.	34
4.3.	Parámetros de los cultivos considerados en la simulación.	35
4.4.	Características de los cultivos de los agricultores.	36
4.5.	Parámetros hidrogeológicos.	37
4.6.	Parámetros de la optimización WMS-EMS.	37
4.7.	Escenarios planteados.	39
4.8.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 0 (GA).	45
4.9.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario base - Algebraica.	47
4.10.	Uso de agua escenarios 1 y 2.	53
4.11.	Uso de agua escenarios 3 y 4.	56
4.12.	Uso de agua escenarios 5 y 6.	60
4.13.	Resultados por escenario con GA en optimización del WMS.	62
4.14.	Resultados por escenario con resultado algebraico del WMS.	63
C.1.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 1 - GA.	82
C.2.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 1 - Algebraica.	83
C.3.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 2 - GA.	83
C.4.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 2 - Algebraica.	84
C.5.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 3 - GA.	84
C.6.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 3 - Algebraica.	85
C.7.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 4 - GA.	85
C.8.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 4 - Algebraica.	86
C.9.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 5 - GA.	86
C.10.	Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 6 - GA.	87
D.1.	Uso de agua y rendimiento relativo con acumulación en acuífero, escenario 0 - método algebraico.	88

Índice de Ilustraciones

3.1.	Sistema hidrogeológico simplificado en acuífero confinado.	9
3.2.	Requerimientos de riego para un agricultor.	10
3.3.	Balance de agua en la zona de la raíz [32].	15
3.4.	Micro-red considerada.	17
3.5.	Representación de un cromosoma.	22
3.6.	Diagrama de la solución propuesta.	23
4.1.	Ejemplo de datos meteorológicos registrados durante dos semanas.	26
4.2.	Precipitaciones registradas entre el 5 de julio y 31 de diciembre de 2015.	27
4.3.	Ejemplo de consumos generados para dos semanas.	28
4.4.	Precipitaciones estimadas con media móvil a un paso.	29
4.5.	Temperaturas mínimas y máximas estimadas con media móvil a un paso.	29
4.6.	Radiación solar estimada con media móvil a un paso.	30
4.7.	Velocidad del viento estimada con media móvil a un paso.	30
4.8.	Volumen máximo de agua extraíble del acuífero.	31
4.9.	Predicción a 1 y 24 pasos del consumo.	32
4.10.	Predicción a 1 y 144 pasos de la radiación solar.	33
4.11.	Predicción a 1 y 144 de la temperatura.	33
4.12.	Variación de la recarga esperada según la reducción en las precipitaciones.	38
4.13.	Descenso en la cota hidráulica para los escenarios E0, E3 y E4.	39
4.14.	Rendimientos relativos de los cultivos, escenario base (GA).	40
4.15.	Detalle de la operación del EMS, escenario base (GA).	42
4.16.	Operación del EMS, escenario base (GA).	43
4.17.	Acercamiento al bombeo y riego, escenario base (GA).	44
4.18.	Acercamiento a la coordinación de las bombas, escenario base (GA).	44
4.19.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario base (Algebraica).	46
4.20.	Operación del EMS, escenario base (Algebraico).	49
4.21.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 1 - GA (izq), Algebraico (der).	51
4.22.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 2 - GA (izq), Algebraico (der).	52
4.23.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 3 - GA (izq), Algebraico (der).	54
4.24.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 4 - GA (izq), Algebraico (der).	55
4.25.	Riego para agricultor N°6, escenario 3 (arriba) y 4 (abajo) - GA.	57
4.26.	Riegos ideales y reales escenarios 3 y 4 - Algebraico.	58

4.27.	Riego para agricultor N°3, escenario 3 (arriba) y 4 (abajo) - Algebraico.	59
4.28.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 5 (izq) y 6 (der).	61
A.1.	Tipos de acuíferos [63].	74
A.2.	Solución de Neuman acotada por la de Theis [70].	76
A.3.	Bombeo variable desde el pozo.	77
B.1.	Algoritmo <i>Stochastic Universal Sampling</i>	80
D.1.	Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica con acumulación en acuífero, escenario 0.	89

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Las estimaciones indican que para el año 2050 la población en el mundo aumentará en un 30 %, llegando a los 9,8 mil millones de habitantes [1]. Asociado al crecimiento de la población, está la necesidad de alimentar a los 2,3 mil millones de personas adicionales a la situación actual. De esta forma, para el año 2050 se espera que la demanda por alimento y agua aumente en un 50 %, junto a una demanda de energía que se verá duplicada [2]. Esto ha motivado que en los últimos años haya surgido la temática conocida como el “Nexo agua-energía-alimentación” (*Water-food-energy Nexus - WFE*), que busca comprender cómo estos tres conceptos están relacionados, con el fin de gestionar dichos recursos [3].

Esta temática está en línea con los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de Naciones Unidas (ONU) [4], lo que confirma su relevancia a nivel mundial. En particular, se desarrollan los puntos: 2 - *Hambre Cero*; 7 - *Energía Asequible y no Contaminante*; 11 - *Ciudades y Comunidades Sostenibles*; y 12 - *Producción y Consumo Responsable*.

En el caso de Chile, en las zonas rurales existe gran dependencia de la agricultura como actividad de subsistencia. Históricamente, en la zona sur de Chile (desde Temuco al sur) no se ha requerido realizar riego artificial debido a que las precipitaciones tienen una buena distribución a lo largo del año [5]. Sin embargo, esta situación se ha visto afectada en los últimos años por los efectos del cambio climático y las recientes sequías: el período 2010-2018 ha sido el más seco del que se tenga registro, con déficit de lluvias entre un 20 y 40 % [6], y se conoce como la “Megasequía”. Recientemente se han decretado cuatro regiones del país (Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O’Higgins) como “zonas de emergencia agrícola”. De acuerdo a [7], se esperan reducciones de hasta un 30 % en las precipitaciones en el valle central chileno para el año 2050, lo que estará acompañado de alzas en las temperaturas de hasta 3°C [8]. Se espera que la situación de los últimos años no mejore y siga afectando las actividades agropecuarias en las zonas rurales del país.

En la mayoría de los casos, no existe una gestión del agua propiamente tal o ésta es precaria, haciendo que la extracción de agua desde un pozo o noria afecte el nivel de agua de los pozos vecinos y más aún, genere un agotamiento apresurado del recurso, arriesgando el suministro futuro. Si a lo anterior le sumamos el que algunas zonas no cuentan con una conexión a la red eléctrica o esta es una red débil, con intermitencia en el suministro y diversos

problemas técnicos, la calidad de vida de las comunidades y sus opciones de desarrollo se ven limitadas enormemente.

Las micro-redes utilizan los recursos energéticos propios de la zona en que se ubican y entregan suministro eléctrico a su zona local, pudiendo operar tanto en modo conectado como aislado. Esto les ha permitido ser una alternativa para suministrar electricidad a las comunidades rurales, en especial aquellas aisladas [9].

El suministro eléctrico tiene diversos usos, y en comunidades rurales con importante actividad agrícola, cobra una especial relevancia para el uso de bombas de agua desde pozos para el riego de los cultivos. Las bombas pueden constituir un importante consumo eléctrico en una comunidad, en especial si todas operan en el mismo momento. El incorporar un medio de almacenamiento de agua, como pueden ser estanques en altura, permite que los bombeos puedan ser desplazados en el tiempo, con lo que el uso de las bombas puede también ser gestionado y desplazado en el tiempo.

Lo anterior posibilita la incorporación de estrategias de gestión de agua a la gestión energética de la micro-red de forma tal que ésta pueda gestionar el uso de las bombas y riego para suministrar el agua necesaria para el desarrollo de las actividades agrícolas de forma sustentable en el tiempo, sujeto a restricciones sobre los recursos hídricos y energéticos disponibles.

La diferencia en las escalas de tiempo en las que se ocurren los procesos hídricos frente a los consumos eléctricos residenciales y la disponibilidad energética, junto a la relevancia que tiene la sustentabilidad a nivel mundial, hacen de este un problema para el cual se pueden realizar diversos aportes que contribuyan a optimizar el uso de los recursos, asegurando la sustentabilidad del recurso hídrico con fines agrícolas.

En este trabajo, se toma el caso de la comunidad José Paineicura Hueñalihuen, ubicada en la comuna de Carahue, Región de la Araucanía. Esta comunidad, si bien se encuentra conectada a la red de distribución eléctrica, cuenta con diversos problemas en su suministro: de acuerdo a los datos de Energía Abierta [10], el año 2018 Carahue tuvo un índice SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*, que indica el tiempo medio de interrupciones por usuario en el suministro eléctrico) de 69,51 horas de interrupción del servicio por familia, muy por sobre el promedio regional (17,21 horas en la Araucanía) y nacional (12,17 horas). Se visualiza una micro-red para solucionar el problema de calidad de suministro existente. A su vez, el 45% de los trabajadores de la comuna se desempeña en el área de agricultura y pesca [11], y el cultivo principal de exportación es la papa.

La propuesta busca integrar la gestión de la energía con la gestión del agua para el riego, optimizando el uso de energía y agua con el fin de maximizar los beneficios que los cultivos proveen a los agricultores, ante situaciones de escasez de agua.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar una metodología para la integración del sistema de gestión de la energía típico de una micro-red basada en energías renovables a un sistema de gestión de agua, considerando requisitos de riego para maximizar el beneficio obtenido por el cultivo de productos agrícolas, sin poner en riesgo el suministro de agua futuro y minimizando los costos de operación de la micro-red.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Modelar un sistema hidrogeológico consistente en pozos, bombas y estanques, acoplados entre sí mediante un acuífero confinado.
2. Determinar los requerimientos de agua para los distintos cultivos presentes en una comunidad en el sur de Chile ante escenarios de escasez hídrica en un mediano plazo.
3. Integrar una estrategia de gestión de agua de riego con el funcionamiento típico de una micro-red, con el fin de incorporar criterios de disponibilidad energética y de costo-beneficio a la propuesta.
4. Implementar por simulación y evaluar los resultados de la estrategia integrada de gestión de agua, energía y alimentos ante distintos escenarios de disponibilidad hídrica, características del acuífero y umbrales de rendimientos esperados.

1.3. Hipótesis

- La incorporación de un sistema que gestione integralmente el agua y energía, permitirá un uso responsable y limitado del recurso hídrico, que tome en consideración la disponibilidad existentes de lluvias y energía.
- El almacenamiento de agua en estanques permite hacer uso de la energía solar fotovoltaica en los momentos en que ésta se encuentra disponible, pudiendo disminuir los costos de operación de la micro-red que están relacionados con el bombeo, evitando realizarlo con energías que cuentan con un costo de operación mayor.
- El control predictivo en un esquema jerárquico permitirá la integración de los problemas de gestión de agua y energía, ambos con dinámicas de tiempo distintas, siendo la gestión agua en el mediano plazo, y la gestión de energía en el corto plazo.

Capítulo 2

Estado del arte

En esta sección se realizará una revisión de los conceptos generales relativos a la optimización en micro-redes y en particular al sistema de gestión de la energía, para luego continuar con un estudio de los trabajos realizados para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos, y así finalizar con desarrollos que han realizado la integración entre la gestión de agua para riego y las fuentes energéticas que soportan la operación del sistema.

2.1. Micro-redes

Si bien no existe una única definición para las micro-redes, el Grupo de Trabajo WG6.22 de *CIGRE* [12] las define como “sistemas de distribución eléctrica conteniendo cargas y recursos energéticos distribuidos (como generadores distribuidos, sistemas de almacenamiento o cargas controlables) que pueden ser operados de forma controlada y coordinada, ya sea conectadas a la red principal o en modo aislado”. De esta forma, una micro-red debe ser capaz de operar tanto en modo conectado y aislado, y poder hacer la transición entre ambos [13]. Además, la micro-red puede desconectarse de la red principal ya sea de forma programada o imprevista: el primero de los casos se puede dar en situaciones de mantenimiento de la red y el segundo ante perturbaciones desde la red.

Se han definido tres jerarquías de control en micro-redes [14, 15]:

- **Control Primario:** Tiene una rápida respuesta para hacer balance de potencia activa y reactiva, estabilizando las desviaciones de frecuencia y tensión, además de detectar el modo aislado. Opera en el orden de los segundos.
- **Control Secundario:** Busca anular las desviaciones respecto a la referencia de tensión y frecuencia en la micro-red causadas por el control primario. Opera en el orden de los minutos.
- **Control Terciario:** Se refiere a la operación económica de la micro-red y coordina la operación de los recursos energéticos distribuidos (*DER - Distributed Energy Resources*) en los modos conectados y aislados. Esta labor le compete al sistema de gestión de la energía (*EMS - Energy Management System*). Opera en el orden de los minutos u horas.

En [16] se hace una revisión de distintas estrategias aplicadas al EMS, dependiendo si son aplicadas a micro-redes conectadas o aisladas. Identifican estrategias que buscan asegurar

el suministro energético, otras que buscan maximizar la eficiencia operacional, minimizar el costo de la energía generada, o aumentar la vida útil de los componentes. La optimización puede estar dada por soluciones de programación lineal o de inteligencia artificial, aplicadas en esquemas centralizados o distribuidos. Con todo, su aplicación depende del caso particular a resolver.

Para el despacho económico de las micro-redes, las estrategias más utilizadas consisten en horizonte deslizante o control predictivo con criterio económico (EMPC - *Economic Model Predictive Control*). Para la gestión de la energía en una micro-red con modos de operación conectada y aislada, [17] diseña un EMS estableciendo como objetivos la maximización de ingresos económicos producto de la venta de energía en el caso conectado, y la minimización de costos de operación en el caso aislado. En [18], se propone un EMS con horizonte deslizante de 48 horas para una micro-red aislada en el norte de Chile, cuyo objetivo principal es la minimización de los costos de operación. Esta formulación además incorpora el uso de agua para consumo junto a una condición de borde al final del período de optimización; sin embargo, no se hace cargo de las fuentes de dónde proviene el agua y ésta se asume ilimitada.

Al utilizar estrategias de EMPC, uno de los parámetros a definir es el horizonte de optimización. Según [19], como caso general, el desempeño económico a largo plazo del proceso a controlar se ve mermado mientras menor sea el horizonte de optimización. Si bien un horizonte corto puede adoptar las mejores decisiones para el corto plazo, esto no es necesariamente cierto para el largo plazo. Al ir aumentando el horizonte, van variando las entradas $u^*(t)$ que son económicamente óptimas para el sistema: esto se conoce como la propiedad *turnpike* [20]. Para remediar este problema, se identifican dos opciones: (i) utilizar un horizonte lo suficientemente largo, o (ii) aplicar una restricción terminal de costos. Esta última opción es problemática cuando se está sujeto a perturbaciones, como es el caso de las micro-redes. Adicionalmente, no se asegura que las consignas entregadas por el EMPC puedan ser alcanzadas por el control de una jerarquía inferior.

En las zonas rurales, donde las micro-redes han surgido como una solución a los problemas del suministro eléctrico, se hace relevante su integración con los sistemas de riego, ya que su demanda de agua impacta en la demanda energética producto del bombeo.

2.2. Sistema de riego

De acuerdo al comité ASCE (*American Society Of Civil Engineers*) de *Criterios de Sustentabilidad para Recursos Hídricos* [21], los sistemas hídricos sustentables son aquellos “diseñados y gestionados para contribuir completamente a los objetivos de la sociedad, ahora y en el futuro, mientras mantienen su integridad ecológica, ambiental e hidrológica”. De esta forma, los modelos de optimización para sistemas de reserva hídrica deben incorporar criterios de eficiencia (maximizar el bienestar), supervivencia (asegurar que el bienestar futuro sea mayor a niveles mínimos de subsistencia) y sustentabilidad (maximizar las mejoras acumulativas en el tiempo) [22].

La gestión de reservas de agua para múltiples propósitos (consumo, riego, generación eléctrica, etcétera), puede tener ciertas limitaciones: volúmenes máximos y mínimos de almacenamiento y extracción, limitaciones físicas del equipamiento y obligaciones legales, entre

otros [23]. Para una operación óptima, el estado al final del periodo debe asegurar operaciones futuras satisfactorias. Al ser un problema de mediano-largo plazo, los autores de [22] expresan una función general para la optimización de la operación de un sistema de estanques, incorporando una función de costos futuros al término del horizonte de optimización. Esta función de costos tiene relación con el volumen de agua final almacenado en el estanque y da cuenta de cómo se podría sustentar la operación a futuro.

El trabajo de Brdys *et al.* [24], utiliza un control predictivo jerárquico para la gestión de agua de desecho dividido en capas: *supervisora*, *optimizadora* y *seguidora*. Dependiendo de su jerarquía, tienen distintos horizontes de operación con objetivos que pueden estar encadenados entre capas, en que las consignas a largo plazo son pasadas a los capas inferiores. Se plantea el problema sólo como un seguimiento de referencia, sin penalizar estados que puedan tener consecuencias a futuro para la operación del sistema.

Con el fin de optimizar la operación de reservas de agua, [25] maximiza los beneficios de los cultivos en un modelo mensual bajo restricciones lineales de uso de suelo, área cultivada, cumplimiento de requerimientos de riego y límites en el almacenamiento. Esta estrategia sin embargo, no considera casos en que no se pueda abastecer de agua ni las consecuencias que puede tener en el rendimiento de los cultivos esta carencia.

Para una gestión eficaz de las reservas de agua para uso agrícola, es fundamental conocer los requerimientos de riego de los cultivos con el fin de maximizar su rendimiento ante escenarios de escasez hídrica.

El déficit de agua tiene un efecto en los cultivos, en particular sobre la “evapotranspiración”¹, lo que afecta su rendimiento (entendido como producción por unidad de área [kg/ha]). Para dar cuenta de estos efectos, existen las relaciones de Jensen [26], Hanks [27] y Doorenbos [28], que relacionan el rendimiento relativo (en base a un máximo característico del cultivo, propio de la zona donde se desarrolla) con la evapotranspiración mediante una constante multiplicativa que representa la sensibilidad a la falta de agua. Estas relaciones se basan en evaluaciones por temporada o etapa de crecimiento, por lo que son periodos de varios días o semanas.

La medición o estimación de la evapotranspiración real (ET_a) no es directa, y se hace usualmente en base a una evapotranspiración de referencia (ET_o) (usualmente pasto o alfalfa) y otra potencial (ET_p), que es la ideal para el cultivo. Para determinar ET_o , Penman [29] introdujo una ecuación que hace uso de datos meteorológicos, y ésta fue modificada para dar paso a la ecuación de Penman-Monteith [30], que es actualmente recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO - *Food and Agriculture Organization*) en los documentos FAO-56 [31] y FAO-66 [32].

La relación entre ET_o , ET_p y ET_a puede ser compleja, pero usualmente se expresa por medio de valores multiplicativos que dependen del tipo de cultivo, su etapa de crecimiento y la disponibilidad de agua [26]. Raes *et al.* [33] se basa en [26, 27] para determinar el efecto del riego diario (incluyendo las distintas etapas de crecimiento) en el rendimiento final del cultivo. Con esto, obtiene un mayor detalle y mejores resultados que los modelos que realizan

¹ Efecto agregado de la evaporación de agua del suelo y transpiración de las plantas.

el cálculo por temporada o por etapa de crecimiento. El modelo resultante está disponible en el software *BUDGET* [34].

Cuando existen múltiples cultivos que deben compartir una misma fuente de agua limitada, surge el problema de cómo debe ser la distribución del agua disponible. Los autores de [35] maximizan la suma de los rendimientos relativos de todos los cultivos; sin embargo, esto no considera las cantidades existentes de cada cultivo o los retornos esperados. Tal como lo indica [36], el maximizar únicamente los rendimientos relativos tiende a favorecer aquellos cultivos con pocos requerimientos de agua o con áreas cultivadas pequeñas. Con el fin de corregir esto, incorpora un factor que da cuenta de los beneficios relativos que trae cada cultivo. Cai *et al.* [37] busca maximizar, entre otros, los beneficios de los cultivos en función del agua de riego que se dedica a cada cultivo al ponderar el rendimiento real por el precio de venta del cultivo, y Georgiou *et al.* [38, 39] usa un procedimiento similar, además tener como variable de decisión el área a cultivar de cada uno. Ninguno de estos procedimientos consideran un rendimiento base a mantener, esencial para el caso de la agricultura de subsistencia, en que los campesinos cultivan primero para su autoconsumo y luego para la venta.

Otro factor a considerar para la gestión de agua es la disponibilidad futura del recurso. En el corto plazo es conveniente considerar demandas y entradas de agua como determinísticas, mientras que en el largo plazo es conveniente considerar la incertidumbre [23]. Labadie [22] revisa métodos que incorporan implícita o explícitamente estocacidades: en el caso implícito se hacen varias iteraciones con distintas series hidrológicas (históricas o generadas sintéticamente), mientras que en el caso explícito se usan series probabilísticas de hidrologías (trabajando directamente con las probabilidades).

Se estima que los acuíferos constituyen un 30,1 % de las reservas de agua dulce a nivel mundial [40], siendo la agricultura una de las actividades que más consumen, con un 60 % del total de agua extraída [41]. De ahí la importancia de estimar qué fracción de las precipitaciones se infiltra a los acuíferos (lo que no es una tarea sencilla), con el fin de gestionar adecuadamente el riego sin agotar el acuífero.

Para una primera estimación de la recarga, existen los siguientes métodos simples: (i) la fórmula empírica de Chaturvedi utiliza parámetros que dependen de la zona geográfica donde sea utilizada y es una función de las precipitaciones anuales, por lo que se aplica sobre periodos largos de tiempo; (ii) el método “*Water Budget*” [42], que estima la recarga en función de los ingresos y egresos de aguas subterráneas; y (iii) el “*Water Table Fluctuation*” (WTF) [43], que es una simplificación del anterior y relaciona el almacenamiento específico del acuífero con la variación del nivel del agua en un pozo de observación en un tiempo determinado (usualmente de unos pocos días), bajo el supuesto que el aumento en la cota hidráulica se debe a recargas. Los autores en [44, 45] probaron distintos métodos, concluyendo que aquellos basados en ecuaciones hidrológicas de balance (como el WTF o *Water Budget*) presentaban mejores resultados tomando en cuenta su simplicidad e incluso permite hacer correcciones en los parámetros de los métodos empíricos, como el de Chaturvedi.

La determinación del agua disponible que haga sustentable la extracción de agua, es un elemento clave para gestionar y programar el riego en comunidades agrícolas.

2.3. Gestión de riego y energía

De acuerdo a [46], el actual escenario de calentamiento global y sequías, ha generado un bombeo indiscriminado de los acuíferos a una tasa mayor a la cual se recargan naturalmente; esto incrementa los gastos energéticos actuales debido a la mayor tasa de bombeo y también porque se hace necesario bombear a mayores profundidades. La incorporación de energías renovables en zonas agrícolas implica el uso de esta energía, de una u otra forma, en los procesos productivos. Este uso de energía se puede dar en dos procesos: la extracción de agua y el riego propiamente tal. La incorporación de sensores de bajo costo en el agro tiene el potencial de prevenir el agotamiento de los acuíferos, además de coordinar las fuentes de energías renovables con las necesidades de riego [47].

En [48], se realiza un dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para operar un invernadero autosustentable capaz de alimentar a una familia. Se entrega el agua requerida para irrigar los cultivos, y además se cubren las demandas de agua y energía que tiene la familia. Si bien los costos de inversión son altos, los costos de operación del sistema son bajos y el rendimiento de los cultivos resultantes es mayor a un sistema sin gestión.

Se ha estudiado el uso de bombeo con energía solar para riego [49], acoplando la generación solar con los requerimientos de agua, sin considerar el almacenamiento de agua en estanques, es decir, que el riego se realiza en los momentos en que exista energía fotovoltaica disponible. El sistema propuesto programa el riego en función de la potencia generada, para así irrigar cada uno de los sectores en estudio, logrando cumplir generalmente con los requerimientos de riego establecidos. Sin embargo, no evalúa los rendimientos finales de los cultivos ni considera limitantes en la disponibilidad de agua para riego.

El almacenamiento de agua permite un mejor aprovechamiento del recurso solar, de forma tal de adelantarse a los requerimientos futuros; así lo demuestran Powell *et al.* [50]. En su trabajo, estudian un sistema híbrido fotovoltaico/diésel con capacidad de almacenamiento de agua, aplicado al cultivo de algodón. Además de reducir las emisiones de dióxido de carbono equivalente, se tiene que el sistema es rentable económicamente.

2.4. Discusión

La revisión bibliográfica realizada muestra que, si bien las temáticas de gestión de aguas subterráneas, gestión de la energía en micro-redes, y rendimiento de los cultivos en función del riego son bastante maduras, los esfuerzos en el desarrollo de sistemas que gestionen estos recursos de manera integrada son más bien reducidos.

La temática del “*Water-Food-Energy Nexus*” (WFE) ha buscado reducir esta brecha, buscando relaciones entre estos tres elementos, pero ha sido aplicado principalmente a sectores urbanos o de grandes productores agrícolas. Aunque reducidos, existen algunos avances aplicados a sectores rurales de pequeños productores, que son quienes más se beneficiarían de la incorporación de tecnologías como las descritas en [47], incluyendo imágenes satelitales, vehículos aéreos no tripulados y sensorización remota, entre otros, con el fin de estimar la disponibilidad de recursos hídricos y energéticos disponibles. Es en este nicho donde el presente trabajo busca realizar un aporte a la investigación.

Capítulo 3

Modelación del sistema hidrogeológico propuesto

En esta sección se detallarán los modelos fenomenológicos que serán utilizados para describir el sistema hidrogeológico propuesto.

Como término general, en este trabajo se entiende por “sistema hidrogeológico” a aquel compuesto por un pozo, una bomba, un estanque y un consumo para riego q_i^r , en $[m^3]$. Además, cada sistema hidrogeológico pertenecerá a un agricultor, por lo que sus requerimientos de riego y horarios de bombeo y riego pueden ser distintos entre sí. De esta forma, la Figura 3.1 muestra el diagrama de dos sistemas hidrogeológicos simplificados, interconectados mediante un acuífero confinado. Se puede identificar la cota hidráulica inicial (línea segmentada) y los conos de depresión que generan el descenso en la cota hidráulica final (línea punteada), causados por la extracción de agua desde los pozos.

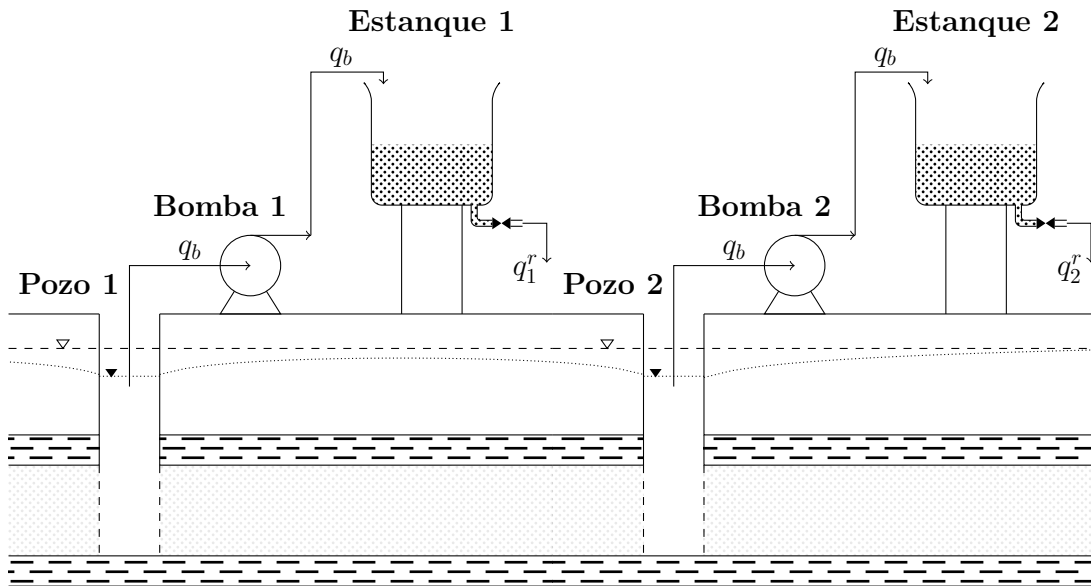


Figura 3.1: Sistema hidrogeológico simplificado en acuífero confinado.

Para definir las ecuaciones que rigen la evolución del sistema hidrogeológico, se considerará el agua como un líquido incompresible, por lo que tiene densidad constante ρ . Así, el realizar un balance de masa es equivalente a hacer un balance de volumen.

Por su parte, los requerimientos de riego V_r consisten en volúmenes diarios de agua a ser regados, y están compuestos por los requerimientos individuales de riego que tengan los cultivos de cada agricultor. La Figura 3.2 muestra un ejemplo del requerimiento de riego global para el agricultor “1” (V_1^r), compuesto por los requerimientos de riego ($V_{1,1..4}^r$) de sus 4 cultivos ($c_{1..4}$).

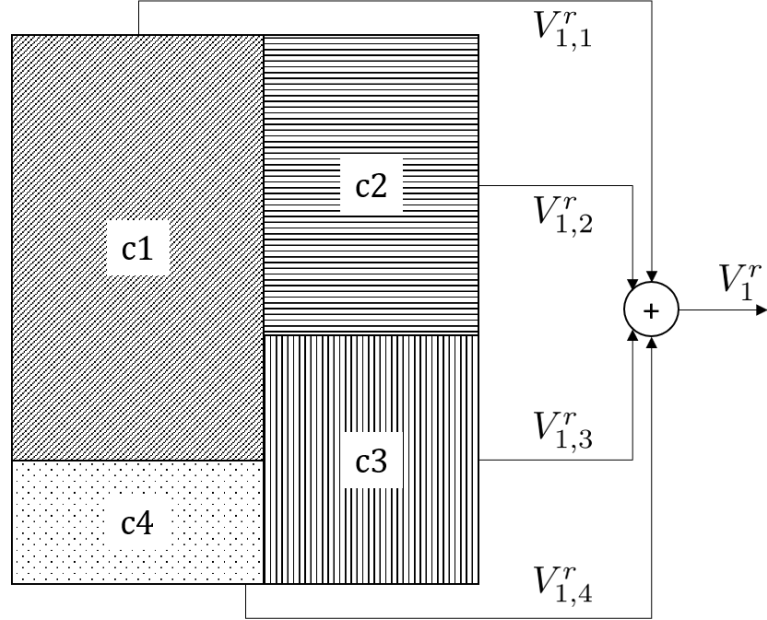


Figura 3.2: Requerimientos de riego para un agricultor.

3.1. Dinámica de pozos y estanques

Como se puede apreciar en detalle en el Anexo A, el bombeo de agua genera un descenso en la cota hidráulica; para un acuífero confinado, esto se rige por la ecuación de Theis - ver ecuación (A.3) del Anexo A. Conociendo la distancia entre pozos para una sector de interés, se puede establecer un límite ε en que se puede aceptar que descienda la cota hidráulica en el pozo vecino más cercano; esto limita las secuencias de bombeo. Así, para un pozo i siendo bombeado, se limita el descenso a una distancia r_{ij} según:

$$\varepsilon \geq s(r_{ij}, t_n) = \sum_{k=0}^n \frac{\Delta (b_{i,k}^b q_i^b)}{4\pi T} \cdot W \left(\frac{S r_{ij}^2}{4T(t_n - t_k)} \right), \quad \forall i, \quad (3.1)$$

con $b_{i,k}^b$ una variable binaria de decisión del bombeo en el pozo i en el instante k ; q_i^b el flujo de bombeo, en $[lt/s]$; y r_{ij} la distancia entre el pozo i y el pozo j más cercano, en $[m]$.

En el caso de los **estanques**, estos se consideran cilíndricos de radio r_e y altura h_e , por lo cual su volumen máximo a contener es $V_e^{e,max} = \pi r_e^2 \cdot h_e$. Para el estanque asociado al pozo “ i ” se establece la siguiente ecuación de continuidad:

$$V_{i,k+1}^e = V_{i,k}^e + (q_{i,k}^b - q_{i,k}^r) \cdot \Delta t, \quad (3.2)$$

donde $V_{i,k}^e$ es el volumen contenido en el estanque asociado al pozo i en el instante k , $q_{i,k}^b$ es el caudal que bombeado hacia el estanque, y $q_{i,k}^r$ es el agua demandada para el riego, en el instante k . Existen algunas restricciones adicionales asociadas a esta formulación:

$$V^{e,min} \leq V_{i,k}^e \leq V^{e,max} \quad \forall k, \quad (3.2a)$$

$$V_T^{e,min} \leq V_{i,k}^e \quad \forall k, \quad (3.2b)$$

$$0 \leq q_{i,k}^b \leq q_{i,k}^{b,max} \quad \forall k, \quad (3.2c)$$

$$0 \leq q_{i,k}^r \leq q_{i,k}^{r,max} \quad \forall k, \quad (3.2d)$$

donde $V^{e,min}$ es un volumen mínimo físico del estanque (pudiendo ser igual a 0), $V^{e,max}$ el volumen máximo del estanque, $V_T^{e,min}$ un volumen mínimo que se quiera mantener en el instante T , $q_{i,k}^{b,max}$ es el máximo bombeo permitido, y $q_{i,k}^{r,max}$ es el máximo flujo que se puede extraer desde el estanque para riego.

La restricción (3.2b) se implementa con el fin de poder continuar con la operación del sistema de riego adecuadamente [19]. Las restricciones (3.2c) y (3.2d) son por límites físicos impuestos por la operación de la bomba, las capacidades de las cañerías y máximo flujo extraído por gravedad del estanque.

Cabe destacar que se busca que el caudal de riego cumpla con un volumen dado dentro de cierto periodo T (un día), es decir $V_r = \sum_{k=0}^T q_k^r \cdot \Delta t$. La siguiente sección detalla el cálculo de este volumen de riego requerido.

3.1.1. Recarga del acuífero

Con el fin de propiciar la sustentabilidad en el uso de agua para riego del sistema hidrogeológico, es que se impone una restricción en la extracción de agua desde todos los pozos: esta extracción no puede superar a la recarga esperada del acuífero dentro de un periodo determinado. Se considera una recarga directa del acuífero, que es principalmente una consecuencia de las precipitaciones que, como todo fenómeno meteorológico con características caóticas, son difíciles de predecir en un horizonte prolongado de tiempo, por lo que basta con tener una primera aproximación de la recarga del acuífero.

Con esto en vista, se utilizará la fórmula de Chaturvedi debido a su simplicidad, aplicabilidad para periodos largos de tiempo y por representar una buena primera aproximación para la recarga de agua en el acuífero. Esta fórmula se usa para periodos anuales y se expresa como:

$$R = \alpha(P - \beta)^\gamma, \quad (3.3)$$

con R la recarga para un año, en $[in]$; P las precipitaciones en un año, en $[in]$; y en que α , β y γ son factores que dependen de las condiciones geográficas y características propias de la zona. La fórmula original de Chaturvedi utiliza los siguientes valores: $\alpha = 2$, $\beta = 15 [in]$ y $\gamma = 0,4$. Cabe destacar que los datos de precipitaciones en $[mm]$ deben ser pasados a $[in]$ multiplicando por el factor $\frac{1}{2,54} = 0,3937$.

Se aprecia que la fórmula utiliza periodos anuales de precipitaciones para calcular la recarga; sin embargo, para efectos de este trabajo, interesan periodos menores en la estimación

de la recarga (en particular 28 días). Es por esto, que se modifica la ecuación (3.3) utilizando precipitaciones equivalentes anuales para el cálculo de la recarga, para luego calcular la recarga promedio diaria, que es la que se permitirá extraer. Así, sea T un horizonte de tiempo:

$$R = \left[2 \cdot \left(\frac{365}{T} \cdot \sum_T P - 15 \right)^{0,4} \right] \cdot \frac{1}{365}. \quad (3.4)$$

El agua necesaria a extraer desde los pozos, y por consiguiente, del acuífero, dependerá de los requerimientos de agua para riego que presenten los cultivos, por lo que éste constituirá el nexo entre el sistema energético e hidrogeológico.

3.2. Demanda de riego

Para determinar la demanda de riego, primero es necesario conocer algunas características de los cultivos. En general, las plantas tienen 4 etapas de crecimiento: inicial, desarrollo del cultivo, media temporada, temporada final [51]. Estas distintas etapas tienen distintos requerimientos de agua y sensibilidades ante su escasez, por lo que hacer evaluaciones por etapas y cultivos es un factor crítico a considerar al momento de determinar los requerimientos de agua.

En cualquier terreno se debe cumplir el balance hídrico:

$$P + I - ET + Q_i - Q_o - \Delta S = 0, \quad (3.5)$$

con P el volumen de precipitaciones, I el volumen de riego, ET el volumen de evapotranspiración, Q_i el volumen de ingresos de agua (aparte de P e I), Q_o el volumen de salidas de agua (fuera de ET) y ΔS el cambio de capacidad de almacenamiento de agua.

La **evapotranspiración** es un concepto que une dos efectos que se dan en la naturaleza: evaporación y transpiración de las plantas [51]. El primero es la evaporación del agua líquida desde la superficie hacia la atmósfera, producto de la radiación solar y, en menor medida, temperatura del aire. Por otro lado, la transpiración de las plantas es la pérdida de agua directamente desde los tejidos de la planta (estoma). Estos dos efectos ocurren simultáneamente y se afectan mutuamente; esto dificulta su separación, por lo que se ocupa el término *evapotranspiración* para hacer referencia a ambos. Se expresa típicamente en $[mm/día]$, por lo que al multiplicarlo por el área del terreno cultivado se tiene el volumen de agua perdida en un día.

Además de la radiación solar y el aire, existen parámetros climáticos, otros propios del cultivo, del suelo y de gestión que afectan la evapotranspiración. La respuesta del cultivo es una función de la evapotranspiración potencial (o ideal) ET_p y la real ET_a : cuando $ET_a < ET_p$, existe *estrés* sobre la planta. Esta respuesta se relaciona al rendimiento relativo de un cultivo según [28]:

$$\frac{Y_a}{Y_{max}} = 1 - K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_p} \right), \quad (3.6)$$

con Y_a y Y_{max} los rendimientos reales y máximos¹ (en $[kg/ha]$); y K_y el factor de respuesta del rendimiento, que representa qué tan sensible es el cultivo (en una etapa de crecimiento dada) ante un déficit de riego. Valores altos indican una alta sensibilidad, y viceversa. Como se busca que $Y_a \approx Y_{max}$ (rendimiento relativo igual a 1), entonces se busca maximizar el lado derecho de la ecuación (3.6), donde el factor ET_a es controlable mediante la irrigación, particularmente.

Cabe destacar que los términos de la ecuación (3.6) son en base a etapas completas de crecimiento y dependen del factor K_y en cada una de las etapas. Con esta metodología no se puede determinar directamente el efecto de no entregar el agua adecuada en, por ejemplo, un día o semana particular. Para poder estimar esto, Raes *et al.* [33] se basa en [26] para obtener el efecto agregado sobre el rendimiento relativo:

$$\frac{Y_a}{Y_{max}} = \prod_{i=1}^N \left[1 - K_{y,i} \left(1 - \frac{ET_{a,i}}{ET_{p,i}} \right) \right], \quad (3.7a)$$

y dividiendo cada una de las N etapas de crecimiento en M pasos de largo Δt_j , se tiene que:

$$1 - K_{y,i} \left(1 - \frac{ET_{a,i}}{ET_{p,i}} \right) = \prod_{j=1}^M \left[1 - K_{y,i} \left(1 - \frac{ET_{a,j}}{ET_{p,j}} \right) \right]^{\frac{\Delta t_j}{L_i}}, \quad (3.7b)$$

con N las etapas de crecimiento, $K_{y,i}$ el factor de respuesta para cada una de las etapas, M la cantidad de subperíodos, Δt_j la duración de cada subperíodo y L_j la duración de cada etapa de crecimiento. Se cumple que: $\sum_{j=1}^M \Delta t_j = L_j$.

Los cálculos de evapotranspiración real y potencial se hacen en base a la llamada **evapotranspiración de referencia** ET_o . Si se desarrolla la ecuación de Penman-Monteith [31] usando parámetros del cultivo de referencia (pasto o alfalfa), se obtiene:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{C_n}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}, \quad (3.8)$$

donde ET_o está en $[mm \text{ dia}^{-1}]$; G es la densidad de flujo térmico en $[MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}]$; R_n es la radiación neta en $[MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}]$; T es la temperatura media diaria en $[^\circ C]$; u_2 es la velocidad media del viento a 2 metros de altura en $[m \text{ s}^{-1}]$; e_s la presión de vapor de saturación y e_a la presión de vapor real, ambas en $[kPa]$; Δ es la pendiente de la presión de saturación de vapor con la temperatura en $[kPa \text{ }^\circ C]$; y $\gamma = c_p P / (0,622\lambda)$ la constante psicrométrica en $[kJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^\circ C^{-1}]$; λ el calor latente de vaporización en $[MJ \text{ kg}^{-1}]$; P es la presión atmosférica en $[kPa]$; y C_n y C_d , ambas constantes dadas por la ASCE [52] que dependen del paso de tiempo de cálculo, y en el caso diario son iguales a $0,9 [K \text{ mm } s^3 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}]$ y $0,34 [s \text{ m}^{-1}]$, respectivamente.

Sobre la evapotranspiración de referencia es que se determinan los requerimientos de agua para cada cultivo. Más detalles para el cálculo de ET_o están dados en [28].

La **evapotranspiración potencial** es cuando se tienen las mejores condiciones para el

¹ El rendimiento máximo no es absoluto y depende de la zona en que se desarrolle el cultivo.

cultivo, sin restricciones de ningún tipo, y se calcula como [28]:

$$ET_p = K_c \cdot ET_o, \quad (3.9)$$

donde K_c es un coeficiente adimensional por cultivo y ET_o es la evapotranspiración de referencia.

El coeficiente K_c depende de diversos factores (la altura del cultivo, ya que influye en el término de resistencia aerodinámica; el albedo (reflectancia), que depende de la fracción de superficie cubierta por vegetación y afecta la radiación neta en la superficie; la resistencia *canopy*, afectada por el área, edad y control de estoma, que afecta la resistencia del suelo; y la evaporación desde el suelo), aunque se utilizan valores tabulados por cultivo, y se interpola en las transiciones entre etapas. Si bien el coeficiente K_c se puede dividir en la suma de dos componentes (evaporación y transpiración), esto último se hace principalmente para fines de investigación agrícola, prefiriéndose el uso del coeficiente unificado para la planificación del riego.

En el caso de que exista la suficiente agua disponible para el cultivo, se cumple que la **evapotranspiración real** es igual a la potencial ($ET_a = ET_p$). Sin embargo, esto no es siempre posible, por lo que el contenido total disponible de agua en el terreno es reducido, haciendo que $ET_a < ET_p$. Este estrés generado se cuantifica con el coeficiente K_s , que relaciona el agua suministrada de riego con el rendimiento del cultivo de la ecuación (3.7a) [31]:

$$ET_a = K_s \cdot ET_p = K_s \cdot K_c \cdot ET_o, \quad (3.10)$$

$$K_s = \begin{cases} \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} & \text{si } RAW < D_r, \\ 1 & \text{si no,} \end{cases} \quad (3.10a)$$

donde TAW (*Total Available ater*) es el agua disponible total del suelo, en [mm]; D_r es el *agotamiento en la zona de la raíz* (falta de agua en relación a la capacidad del terreno), en [mm]; RAW cumple que $RAW = p \cdot TAW$, donde p es la fracción de TAW que el cultivo puede extraer del suelo sin sufrir estrés.

Por su parte, la fracción p se calcula como:

$$p = p_c + 0,04 \cdot (5 - ET_p), \quad (3.11)$$

con p_c un factor propio de cada cultivo, y se debe cumplir que $0,1 \leq p \leq 0,8$.

Los cálculos de TAW y D_r se derivan de los siguientes cálculos en periodos diarios:

$$TAW = 1.000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot Z_r, \quad (3.12a)$$

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + DP_i + ET_{p,i}, \quad (3.12b)$$

$$D_{r,0} = 1.000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_0) \cdot Z_r, \quad (3.12c)$$

$$0 \leq D_{r,i} \leq TAW, \quad (3.12d)$$

en que i es el día actual e $(i - 1)$ es el día anterior; θ_{FC} el contenido de agua que retiene naturalmente el suelo, en [$m^3 \cdot m^{-3}$]; θ_{WP} es el contenido de agua al cual las plantas se

marchitarían permanentemente, es decir, que no hay agua disponible para extraer, en $[m^3 \cdot m^{-3}]$; Z_r es la profundidad de las raíces, en $[m]$; P_i las precipitaciones; RO_i el escurrimiento; I_i es el riego; CR_i la absorción de agua por capilaridad; $D_{r,i-1}$ es el agotamiento en la zona de la raíz en el día $i - 1$, en $[mm]$; y DP_i el agua perdida por filtración. En particular, la ecuación (3.12b) puede ser vista gráficamente en la Figura 3.3.

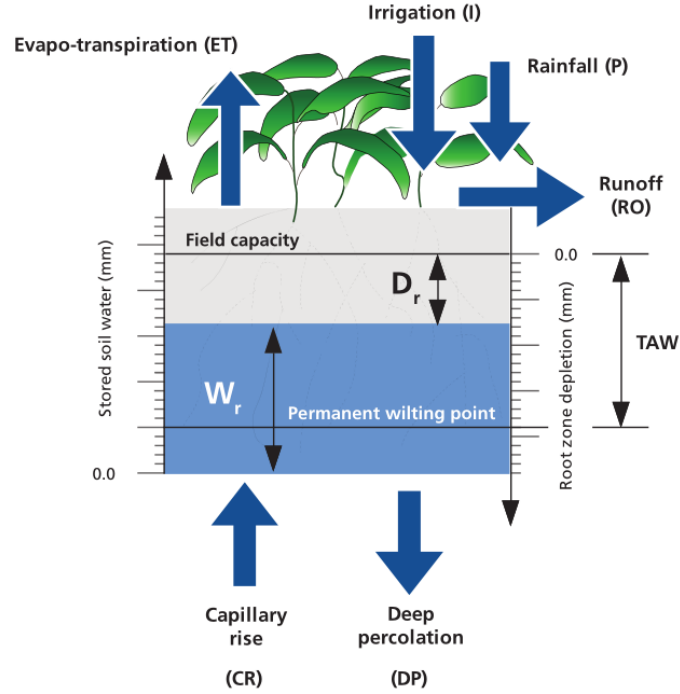


Figura 3.3: Balance de agua en la zona de la raíz [32].

De la ecuación (3.10a), se desprende que el estrés sobre la planta ocurre cuando se da la condición de que $RAW < D_r$, en que el agua disponible para el cultivo es menor a la restante que requiere la planta: es relevante realizar el riego antes que ocurra esa condición. Por otra parte, con el objeto de evitar la pérdida de nutrientes por filtración, el riego no debe ser mayor a D_r , es decir, $I \leq D_r$ [31]. Así, es conveniente regar sólo lo necesario por el cultivo.

Si se impone que $D_{r,i} = RAW$ de tal forma que $K_s = 1$ en la ecuación (3.10a), se puede despejar algebraicamente el riego necesario de la ecuación (3.12b):

$$I_i = D_{r,i-1} - RAW - P_i + RO_i - CR_i + DP_i + ET_{p,i}. \quad (3.13)$$

Cabe destacar que esta última formulación no toma en consideración la escasez de agua, por lo que no puede ser utilizada directamente en la determinación de los niveles de riego tales que maximicen el rendimiento.

La profundidad de las raíces Z_r , se asume con crecimiento lineal desde el primer día de cultivo hasta la segunda etapa de crecimiento [53].

Conociendo el área A cultivada que se quiere regar en $[m^2]$, se obtiene el volumen de agua diario requerido. Usando los requerimientos diarios de la ecuación (3.12), se tiene:

$$V_{r,i} = p_t \cdot \frac{I_i \cdot A}{1000 \cdot \eta_r}, \quad (3.14)$$

con p_t la porosidad total del terreno, adimensional; I el riego requerido por la planta, en $[mm/dia]$; y η_r una eficiencia de riego que depende del tipo de sistema utilizado [54].

Sumando los volúmenes de riego necesarios para todos los cultivos que son abastecidos por un mismo sistema hídrico (pozo-bomba-estanque), se tiene el volumen total requerido:

$$V_r^* = \sum_{i \in C} V_{r,i}. \quad (3.15)$$

Con la determinación del volumen de riego requerido por agricultor, se podrá incorporar este requisito en los objetivos que deben ser cumplidos por el riego en los horarios definidos.

3.2.1. Programación del riego

El riego se considera como un consumo programable, en que se busca que el volumen de agua requerido para el riego sea provisto. Adicionalmente, puede que sea preferible hacerlo a ciertas horas del día; en este caso se define:

$$h_k^r = \begin{cases} 1 & \text{si } t_k \text{ es horario de riego;} \\ 0 & \text{si no.} \end{cases} \quad (3.16)$$

Se incluye la siguiente restricción, que limita que el riego ocurra únicamente en aquellos horarios permitidos:

$$h_k^r \geq b_k^r, \quad (3.17)$$

con b_k^r una variable de decisión binaria que determina la existencia o no riego.

Con esto, se puede determinar el volumen de agua que ha sido usado para riego durante un día como:

$$V_k^r = V_{k-1}^r + b_{k-1}^r q_{k-1}^r \Delta t, \quad (3.18a)$$

$$-w_{lst} \leq V_r^* - V_k^r \leq w_{ns}, \quad \forall k, \quad (3.18b)$$

donde V_r^* es el volumen de agua requerida para riego, en $[m^3]$; V_k^r es el volumen de agua efectivamente regada en el instante k , en $[m^3]$; q^r es el caudal de riego provisto por el sistema para el riego, en $[m^3/s]$; w_{lst} y w_{ns} son variables de holgura, y representan el agua perdida por exceso de riego y el agua no servida, respectivamente.

La modelación descrita en esta sección será incorporada al EMS de la micro-red, en que se limitará la extracción de agua desde los pozos, y con ello, el funcionamiento de las bombas. Las siguientes secciones detallarán los componentes de la micro-red y la incorporación de estas restricciones en la gestión del EMS.

3.3. Arquitectura de la micro-red

La gestión de agua de riego debe ser incorporada en la operación de una micro-red basada en energías renovables. La estructura considerada se muestra en la Figura 3.4, que cuenta con los buses AC y DC , conectados entre si por medio de un inversor. En el bus AC está la conexión a la red eléctrica, las cargas controlables C_C y las no controlables C_{NC} (en estas últimas, está el bombeo de agua). El bus DC tiene los paneles fotovoltaicos PV y el banco de baterías BB .

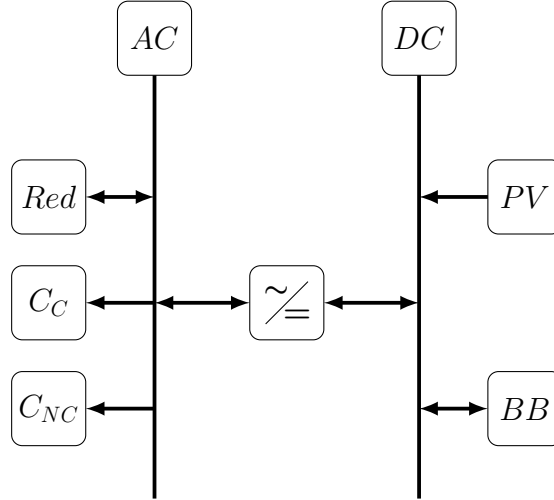


Figura 3.4: Micro-red considerada.

3.3.1. Arreglo fotovoltaico

El funcionamiento de las celdas fotovoltaicas se basa en el efecto fotoeléctrico, generando energía eléctrica mediante la incidencia de fotones. La energía generada depende de la irradiación solar, la temperatura de la celda y características de construcción de la celda.

Si bien existen modelos complejos que describen el comportamiento completo de un panel solar (como el propuesto en [55]), para fines de este trabajo se utilizará un modelo simple de generación fotovoltaica.

$$P_{fv} = P_{fv,n} \frac{I}{I_{STC}} [1 + \alpha_{fv} (T - T_{STC})], \quad (3.19)$$

con $P_{fv,n}$ la potencia nominal del panel, en $[W]$; I la irradiancia incidente en el panel, en $[kW/m^2]$; I_{STC} la irradiancia medida en condiciones estándar (equivalente a $1 [kW/m^2]$); α_{fv} un coeficiente de temperatura propio del panel, en $[\%]$; T la temperatura de operación la celda, en $[^{\circ}C]$; y T_{STC} la temperatura en condiciones estándar (equivalente a $25^{\circ}C$).

Por otra parte, la temperatura de operación T de la celda se obtiene como [56]:

$$T = T_{amb} + \frac{I}{0,8} (T_n - 20), \quad (3.20)$$

con T_{amb} la temperatura ambiente, en $[^{\circ}C]$; I la irradiancia incidente en el panel, en $[kW/m^2]$;

y T_n es la temperatura nominal de operación ($25^\circ C$).

3.3.2. Banco de baterías

Se consideran baterías de plomo-ácido de ciclo profundo que corresponde a la tecnología actualmente más utilizada para aplicaciones de respaldo energético estacionarias, además de tener un bajo costo de inversión por unidad de energía y ser una tecnología madura².

Uno de los parámetros relevantes de las baterías consiste en el estado de carga (*SoC - State of Charge*), que da cuenta de qué tan cargado está el banco de baterías y está definido como:

$$SoC_k = \frac{C_k}{C_{n,k}} \cdot 100\%, \quad (3.21)$$

con SoC_k el estado de carga en el instante k , [%]; C_k la capacidad instantánea del banco de baterías, en [Ah]; y $C_{n,k}$ la capacidad nominal del banco para el instante k .

Su relevancia, además de conocer la autonomía del sistema, es el poder limitar el *SoC* mínimo que puede tener el banco en cada instante, con el fin de extender la vida útil de éste³.

El *SoC* es un estado no medible, por lo que debe ser estimado mediante mediciones. Uno de los modelos más simples y extendidos es el de “Integral de la Corriente” (o *Coulomb Counting*). Básicamente, consiste en sumar en cada instante la corriente que entra o sale del banco de baterías:

$$SoC_{k+1} = SoC_k + \eta_c \cdot \frac{I_{c,k} \Delta t}{C_{n,k}} - \frac{I_{d,k} \Delta t}{\eta_d \cdot C_{n,k}}, \quad (3.22)$$

con η_c y η_d la eficiencia de carga o descarga, respectivamente, adimensional; $I_{c,k}$ la corriente de carga o descarga, respectivamente, en [A]; $C_{n,k}$ la capacidad nominal en el instante k de la batería, en [Ah]; y Δt el paso de tiempo, en [H].

Su forma equivalente como el estado de energía almacenada en el banco de baterías (*SoE - State of Energy*) será la utilizada en este trabajo, en que se permite la máxima energía que se puede extraer del banco en un instante de tiempo, por limitaciones de fabricación en la batería. Definiendo una variable binaria de carga y descarga de la batería como b_c^{BB} y b_d^{BB} , se tiene la siguiente formulación:

$$SoE_{k+1} = SoE_k + \left(\eta_c \cdot P_{c,k} - \frac{P_{d,k}}{\eta_d} \right) \Delta t, \quad (3.23a)$$

$$SoE_{min} \leq SoE_k \leq SoE_{max}, \quad (3.23b)$$

$$0 \leq P_{c,k} \leq P_{c,max} \cdot b_c^{BB}, \quad (3.23c)$$

$$0 \leq P_{d,k} \leq P_{d,max} \cdot b_d^{BB}, \quad (3.23d)$$

$$b_c^{BB} + b_d^{BB} \leq 1, \quad (3.23e)$$

² Cabe destacar que se espera que los precios de ion-litio equiparen a los de plomo-ácido. Es más, si se considera el costo de inversión por energía suministrada en su vida útil, las baterías de ion-litio se tornan competitivas.

³ Los fabricantes de baterías entregan curvas de número de ciclos respecto a la profundidad de descarga (DoD - *Depth of Discharge*, equivalente a $100 - SoC$).

con $P_{c,k}$ y $P_{d,k}$ las potencias de carga y descarga de la batería en el instante k , respectivamente; y Δt el paso de tiempo.

3.3.3. Inversor

El inversor es un elemento esencial de la micro-red, que conecta los buses AC/DC y en este caso, integra las funciones de controlador de carga MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) y cargador del banco de baterías. Convierte la generación de potencia DC a AC, de tal forma que sea distribuida a través de la red de distribución existente en la micro-red, con el fin de ser utilizada por los usuarios.

Las consignas de carga y descarga de las baterías son gestionadas por el inversor a través del resultado de optimización del *Energy Management System*. Para fines de este trabajo, se asumirá el inversor con eficiencia del 100 %.

3.3.4. Cargas

Cargas no controlables

Las cargas no controlables constituyen una perturbación del sistema, se modelarán en forma conjunta, y corresponderán al consumo agregado de todas las viviendas que se encuentran conectadas a la micro-red. Para la operación del sistema, se estimará el consumo a n pasos, correspondientes a un día de operación.

Cargas controlables

En este trabajo, las cargas controlables consisten en cada una de las bombas de agua que realizan la extracción desde los pozos, que junto al actuador de riego, son los equipos que enlazan los requerimientos del WMS con la operación del EMS. Estas bombas tienen un funcionamiento de encendido/apagado y se asume que mientras están encendidas pueden proveer un flujo constante de agua desde el pozo hacia el estanque. No se imponen restricciones por uso continuo por más de un periodo, aunque estas pueden ser incorporadas en la formulación. En este caso, el EMS tiene el control de todas las bombas existentes, y realiza la coordinación en el uso de las distintas bombas existentes en la operación económica.

El agua bombeada es tal que busca cumplir con el riego requerido por el WMS. El riego se asume hecho por gravedad, por lo que no constituye un consumo relevante.

3.4. Energy Management System (EMS)

El *Energy Management System* (EMS) gestionará la micro-red en modo **conectado**, el balance de energía incorpora términos que dan cuenta de la compra y venta de energía desde y hacia la red principal, además de la generación propia del sistema fotovoltaico. Así, el balance de energía queda expresado como:

$$E_k^{in} + \sum_{g \in G} E_k^g = E_k^{out} + E_k^C + E_k^{NC}, \quad (3.24)$$

donde E_k^g es la suma de la energía generada por las unidades g en el período k , donde G agrupa al arreglo fotovoltaico y el banco de baterías; E_k^C es la energía consumida por las cargas controlables (bombas), E_k^{NC} es la energía consumida por las cargas no controlables (demanda), y E_k^{in} y E_k^{out} son la energía comprada y vendida a la red en el período k , respectivamente.

Como en la micro-red conectada sólo se puede comprar o vender energía, pero no ambos a la vez, se incorpora la siguiente restricción:

$$\text{sgn}(P_k^{in}) + \text{sgn}(P_k^{out}) \leq 1. \quad (3.25)$$

Así, las restricciones de balance de energía se incorporan al EMS, que buscará minimizar la siguiente función objetivo de costos de operación en un horizonte de predicción N :

$$\min_{\substack{E_{in}, E_{out}, E_g, \\ B_b, b_c^{BB}, b_d^{BB}}} J_k = \sum_{j=0}^N [C^{in} \cdot E_{k+j}^{in} - C^{out} \cdot E_{k+j}^{out}] + \quad (3.26a)$$

$$\sum_{j=0}^N \sum_{l=1}^{N_{ag}} (C_w^{lst} \cdot w_{k+j, lst}^l + C_w^{ns} \cdot w_{k+j, ns}^l). \quad (3.26b)$$

El término (3.26a) hace referencia a la minimización de costos en las transacciones de energía con la compañía distribuidora, a un precio de C^{in} para la compra y C^{out} para la venta; y el término (3.26b) busca, para todo el número de agricultores (N_{ag}) en el horizonte de predicción N , minimizar el agua no suministrada w_{ns}^l (con un costo C_w^{ns}) y el agua perdida w_{lst}^l por riego en exceso (con un costo C_w^{lst}), en que se cumple que $C_w^{ns} > C_w^{lst}$.

Las restricciones asociadas a esta formulación corresponden a las vistas en las ecuaciones de balance de energía y a las correspondientes a cada uno de los componentes de generación del sistema. Además, se tiene en consideración las restricciones sobre el descenso de la cota hidráulica en los pozos vecinos, dado por la restricción (3.1).

El término (3.26b) está asociado a los requerimientos de agua obtenidos para cada uno de los cultivos, los que son entregados por el WMS o *Water Management System*, detallado en la siguiente sección.

3.5. Water Management System (WMS)

Utilizando lo visto en la subsección 3.2, y viendo los paralelismos con el EMS, se usa la notación de [57] para establecer un Sistema de Gestión del Agua (WMS - *Water Management System*) que buscará maximizar el rendimiento de los cultivos, con restricciones asociadas a la disponibilidad de agua. Según lo propuesto por [36], y como una forma de incluir los beneficios del cultivo en la comunidad o agricultor, el rendimiento relativo se ponderará por un factor de beneficio relativo:

$$B_c = Y_{p,c} P_c A_c, \quad (3.27)$$

con $Y_{p,c}$ el rendimiento óptimo del cultivo c para la zona (cuando $ET_a = ET_p$), en $[kg/ha]$; P_c el precio por kilo esperado de dicho cultivo, en $[\$/kg]$; y A_c su área cultivada, en $[ha]$. Estos datos son obtenidos de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [58] y de los informes de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* en sus números 56 y 66 [31, 32].

De esta forma e incorporando a la ecuación (3.7) en que Δt es igual a un día y $L_i = M_{i,c}$ es la duración en días de cada etapa del cultivo, la resolución de este problema de optimización dará el volumen de agua requerido para cada día:

$$\max_{V_{r,c}} \sum_{c=1}^{N_c} B_c \cdot Y_{r,c} = \sum_{c=1}^{N_c} B_c \left\{ \prod_{i=1}^{E_c} \prod_{j=1}^{M_{i,c}} \left[1 - K_{y_{i,c}} \left(1 - \frac{ET_{a_{j,c}}}{ET_{p_{j,c}}} \right) \right]^{\frac{\Delta t}{M_{i,c}}} \right\}, \quad (3.28)$$

con $Y_{r,c}$ el rendimiento relativo, N_c el número de cultivos que serán provistos de agua por el sistema, E_c las etapas de cada cultivo, $M_{i,c}$ los días de la etapa i para el cultivo c . Los cálculos de rendimiento se realizan según lo visto en la Sección 3.2.

Se debe cumplir con las siguientes restricciones, además de las expuestas en la Sección 3.2:

$$s.a \quad Y_{r,c} \geq \omega_c \quad \forall c, \quad (3.29a)$$

$$V_{r,s} = \sum_{i \in C_s} V_{r,i} \leq \sum_{k=1}^T q_k^{r,max} \Delta t_k, \quad \forall k, \quad (3.29b)$$

en que ω_c es un umbral mínimo de rendimiento para el cultivo c y depende del mínimo para autoconsumo. Además, el volumen total requerido de riego $V_{r,s}$ para el agricultor s (compuesto por la suma de los volúmenes individuales requerido para sus cultivos), no puede exceder lo que físicamente puede ser provisto por el estanque dentro de un día, representado por el caudal máximo de riego $q_k^{r,max}$.

El umbral ω_c planteado en la restricción (3.29a) es relevante ya que en un caso real de una comunidad, no todas las familias tendrán necesariamente los mismos cultivos en la misma cantidad plantada. Si solo se considerara el maximizar con el criterio de precio de venta y área cultivada, se podría dar el caso de que ciertas familias con pocos cultivos o que son vendidos a bajo precio, no tuvieran agua disponible para riego, lo que tendría consecuencias en su subsistencia.

El problema de optimización planteado en (3.28) es no lineal, por lo que se opta por resolverlo con algoritmos genéticos (GA). La herramienta computacional con la que se implementan los algoritmos genéticos permite la inclusión de restricciones lineales en los estados, pero la restricción de rendimiento mínimo de (3.29a) está relacionada con un término de la función objetivo por lo que para poder ser resuelto con GA, la función objetivo (3.28) debe modificarse agregando un término extra que penalice con un alto costo la desviación respecto al rendimiento relativo establecido por agricultor:

$$\max_{V_{r,c}} \sum_{c=1}^{N_c} B_c \left\{ \prod_{i=1}^{E_c} \prod_{j=1}^{M_{i,c}} \left[1 - K_{y_{i,c}} \left(1 - \frac{ET_{a_{j,c}}}{ET_{p_{j,c}}} \right) \right]^{\frac{1}{M_{i,c}}} \right\} - \sum_{c=1}^{N_c} C_{\omega_c} \cdot g(Y_{r,c}, \omega_c), \quad (3.30a)$$

$$g(Y_{r,c}, \omega_c) = \max \{0, (\omega_c - Y_{r,c})\}, \quad (3.30b)$$

con C_{ω_c} un costo relativo alto y $g(Y_{r,c}, \omega_c)$ la función que penaliza la desviación por bajo el rendimiento mínimo esperado ω_c . Notar que el signo negativo que acompaña a este término implica que se busca minimizarlo.

3.5.1. Optimización con algoritmos genéticos

Como se mencionó anteriormente, para resolver el problema de optimización de la ecuación (3.30) se hará uso de algoritmos genéticos. La definición de los individuos está dada por el número de variables de optimización del problema, que en este caso es:

$$N_{var} = N_c \cdot H_p, \quad (3.31)$$

con N_c el número de cultivos totales y H_p el horizonte de predicción, en días.

Dadas las características del problema, se utiliza una codificación en punto flotante de las variables de optimización, en que cada individuo está representado por un cromosoma, compuesto de genes en que cada una de ellos corresponde a un volumen de riego diario para un cultivo en particular, como se puede apreciar en la Figura 3.5.

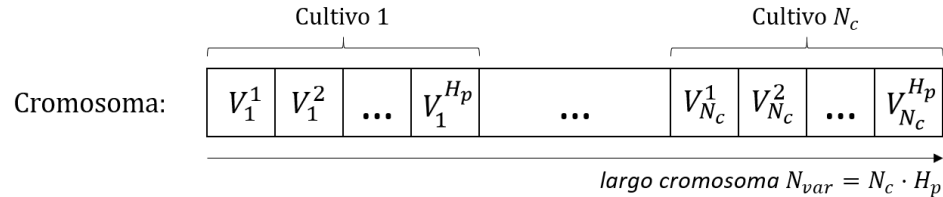


Figura 3.5: Representación de un cromosoma.

Las operaciones principales que generan y transforman a la población son:

- **Creación:** La creación de los individuos se ejecuta con realizaciones de una variable aleatoria con distribución uniforme entre el límite inferior (LB) y superior (UB).
- **Crossover:** Consiste en la generación de un hijo (H) mediante una suma ponderada de los padres $H = P_1 + rnd \cdot (P_2 - P_1)$, con rnd un número aleatorio entre 0 y 1.
- **Mutación:** Como este problema cuenta con restricciones, se usa una mutación de tipo *adaptive feasible*, que genera direcciones aleatorias (según hayan sido exitosas anteriormente) y un largo de paso tal que se cumple con las restricciones del problema.

En el Anexo B se pueden encontrar más detalles respecto al uso de algoritmos genéticos para este problema.

3.6. Solución propuesta

De esta forma, el sistema completo de gestión de la energía eléctrica y agua se representa gráficamente en la Figura 3.6, en que como entrada se tienen los datos meteorológicos (temperatura, radiación solar, precipitaciones y velocidad del viento), las cuales ingresan al sistema WMS y EMS. El WMS realiza la optimización en un horizonte de tiempo mayor que

el EMS (semanas vs. minutos), entregando la consigna de requerimiento de agua diario ($V_{r,p}$) al EMS para cada sistema hídrico (bomba/pozo/estanque). Por su parte, el EMS entrega las consignas para la compra (E_{in}) y venta (E_{out}) de energía, operación del banco de baterías (E_{BB}) y de las cargas controlables (E_{CC}) y la consigna de volumen de riego (\bar{V}_r).

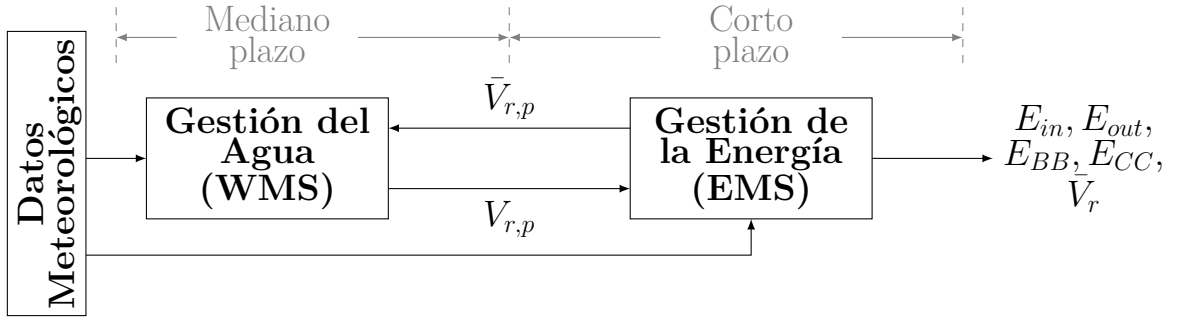


Figura 3.6: Diagrama de la solución propuesta.

En el esquema de control jerárquico propuesto puede ocurrir que la consigna de volumen de agua para riego dada por el WMS para el pozo p ($V_{r,p}$) no pueda ser suministrada por el EMS en su optimización, la que puede ser modificada a un volumen \bar{V}_r ; además, en la operación en tiempo real es posible que incluso esta consigna no sea satisfecha, entregando un volumen de agua ($\bar{V}_{r,p}$) menor al requerido, es decir, $\bar{V}_{r,p} < V_{r,p}$, ocurriendo un racionamiento extra del agua.

El WMS deberá entregar información de las consignas de volúmenes de agua requeridos por los cultivos y sus sensibilidades ante la falta de agua K_y , y con esta información, se buscará cumplir con los volúmenes de agua para riego. En el caso de que no sea posible cumplir con las consignas de riego asignadas para los cultivos de un agricultor, se propone repartir el volumen disponible que puede entregar el estanque V_e de ese agricultor de forma proporcional a la sensibilidad del cultivo ante la falta de agua y a su volumen de riego asignado. Esto se expresa como:

$$\bar{V}_{r,j} = \frac{K_{y,j} \cdot V_{r,j}}{\sum_{c \in C} K_{y,c} \cdot V_{r,c}} \cdot V_e, \quad \forall j \in C, \quad (3.32)$$

donde $V_{r,j}$ es el volumen ideal de riego para el cultivo j , $K_{y,j}$ es la sensibilidad del cultivo j ante la falta de agua, V_e es el volumen disponible en el estanque del agricultor y C el conjunto de cultivos de dicho agricultor. Este enfoque privilegia aquellos cultivos que son más sensibles a la falta de agua y no solamente aquellos que tienen menores requerimientos de agua.

3.7. Estimación de datos

Para el correcto funcionamiento tanto del EMS como del WMS, es necesario hacer una estimación de los datos de irradiación, consumo eléctrico, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitaciones.

Para los datos de la irradiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, se cuenta con los registros de una estación meteorológica presente en la comunidad, que registra

dichos datos cada 10 minutos. Los datos de precipitaciones se obtienen desde el Explorador Climático del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (<http://explorador.cr2.cl/>) para una localidad cercana a la comunidad objeto de este estudio, en $[mm/dia]$. Por su parte, los datos de consumo provendrán de un modelo basado en cadenas de Markov [59], que genera datos de consumo representativos para la comunidad José Painecura Hueñalihuen, ubicada al sur de Chile (Región de La Araucanía).

Para la operación del sistema, se estimará la irradiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento a n pasos, haciendo uso de un modelo auto-regresivo ARIMA de la forma:

$$\hat{y}_k = \alpha_1 y_{k-1} + \dots + \alpha_p y_{k-p} + \theta_1 \varepsilon_{k-1} + \dots + \theta_p \varepsilon_{k-p}, \quad (3.33)$$

en que α_i y θ_i son los parámetros del modelo, y_{k-i} son los regresores de la variable a estimar, y ε_{k-i} son los regresores del error en la estimación.

Los datos obtenidos se dividirán en tres conjuntos: de entrenamiento, en que se buscan los valores de los parámetros del modelo, minimizando el error entre la estimación y el valor real; de test, bajo el cual se evalúa el modelo obtenido, entrenando hasta que aumente el error en el conjunto de test (evitando el *overfitting*); y de validación, con el que se determina la estructura del modelo.

La siguiente sección mostrará los resultados de implementar la metodología descrita para el caso de estudio.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Caso de estudio

La implementación de la estrategia WMS-EMS propuesta se realizará tomando como caso de estudio a la comunidad José Paineicura Hueñalihuen, ubicada en la comuna de Carahue, Región de la Araucanía. Esta comunidad se identifica como una comunidad Mapuche, con una marcada actividad agrícola, teniendo como cultivos principales la papa, arvejas y trigo. La comunidad está compuesta por 44 viviendas, todas las cuales se considera que serán beneficiadas por la instalación de la micro-red.

Si bien la comunidad cuenta con suministro eléctrico, éste es deficiente, sufriendo constantes cortes. Como antecedente, a lo largo del año 2018 la comuna de Carahue contó con un índice SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) de 69,51 horas, mientras que el promedio regional fue de 28,28 horas y el promedio nacional de 12,17 horas [10]. Esto refleja la magnitud del problema existente en la zona, en que se identifican al menos dos causas de esta baja calidad del suministro: (i) la extensión de las redes eléctricas respecto a la ubicación de las subestaciones genera una caída de tensión y una baja en la calidad por motivos de distancia; (ii) la ubicación en la zona costera, que disminuye la vida útil de los equipos y tendido eléctrico.

Existen pozos desde los cuales se obtiene el agua, tanto potable como para riego, los cuales tienen instaladas bombas centrífugas que funcionan haciendo uso del suministro eléctrico. Así, cortes en el suministro impiden la extracción de agua para consumo y para riego, con la consecuente pérdida en la obtención de servicios básicos y rendimiento en los cultivos.

Es por esto que una micro-red conectada se visualiza como una solución al problema existente, permitiendo el aislamiento de la red principal cuando existan fallas, y además posibilitando la venta de energía a la red principal, que pueda aliviar los costos económicos que significa para las familias el pago de la energía.

La micro-red del caso de estudio se hará en base al dimensionamiento de los equipos realizado en [59, 60], que considera:

- Planta fotovoltaica de 90 [kWp].
- Banco de baterías de plomo ácido de 43,2 [kWh].

- Bombas centrífugas de 0,25 [kW] y 1,1 [m^3/h] a una altura hidráulica de 14 [m]. En este caso, se asume una bomba para cada uno de los 10 agricultores considerados.

4.2. Datos

Los datos meteorológicos a utilizar consisten en la temperatura, radiación solar, velocidad del viento y precipitaciones.

La temperatura, radiación solar y velocidad del viento se obtienen de una estación meteorológica instalada en la comunidad José Painecura ($38^{\circ}32'11.1''S$, $73^{\circ}30'12.9''W$), la cual registra datos cada 10 minutos. Se utilizan datos entre el 5 de julio y el 31 de diciembre de 2015, totalizando 180 días. Se seleccionan estas fechas ya que contienen los tiempos completos de cultivo y cosecha de los distintos productos considerados. La Figura 4.1 muestra dos semanas de datos tomados por la estación meteorológica.

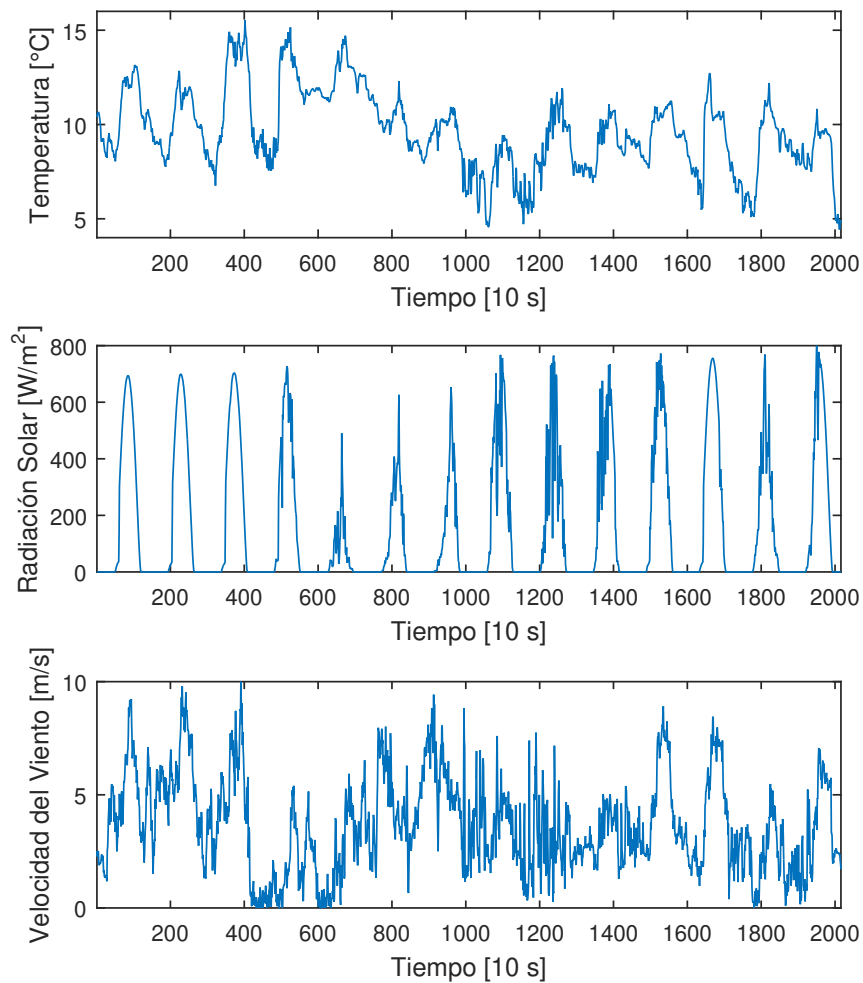


Figura 4.1: Ejemplo de datos meteorológicos registrados durante dos semanas.

Por otra parte, los datos de precipitaciones se obtienen de la Dirección General de Aguas (DGA), que tiene datos históricos de milímetros de aguas caídas diarios, seleccionando aquellos correspondientes a los días medidos por la estación meteorológica. La Figura 4.2 muestra las precipitaciones registradas por la DGA para el período completo de 180 días.

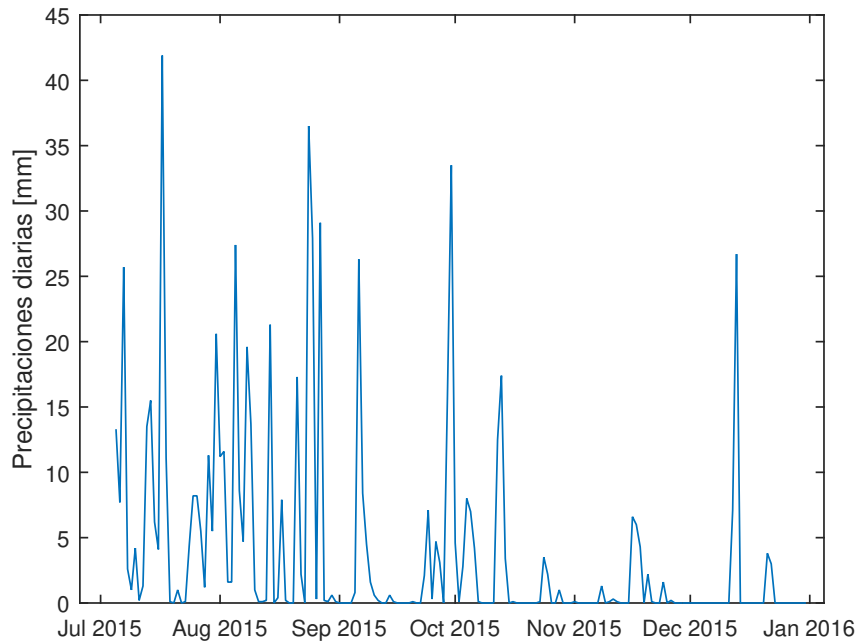


Figura 4.2: Precipitaciones registradas entre el 5 de julio y 31 de diciembre de 2015.

Finalmente, los datos de consumo eléctrico de la comunidad se obtienen de aquellos generados en [59] para 44 hogares presentes en la comunidad. Estos datos fueron generados utilizando cadenas de Markov, basados en el trabajo de [61]. La Figura 4.3 muestra los consumos estimados para dos semanas.

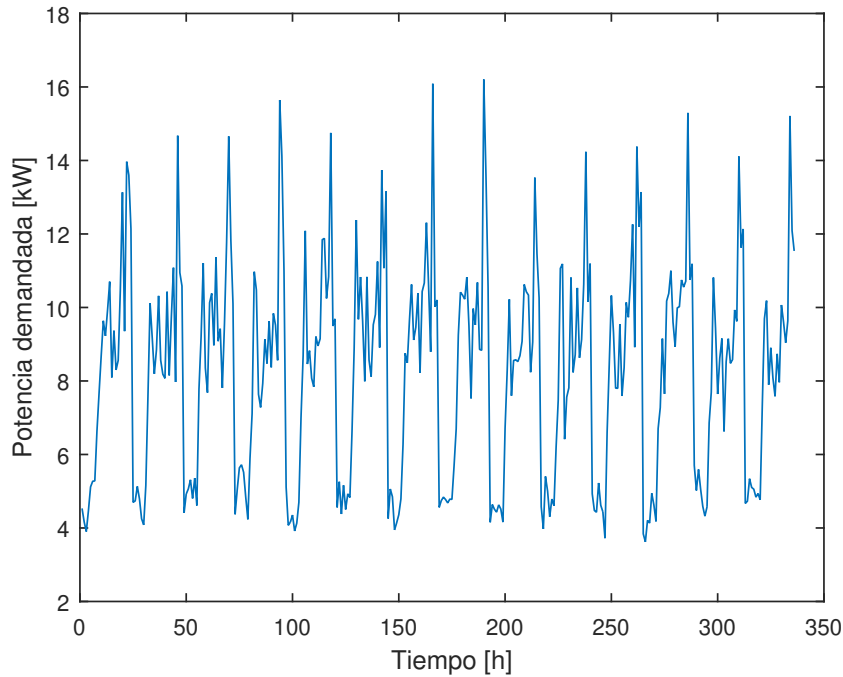


Figura 4.3: Ejemplo de consumos generados para dos semanas.

Los datos de humedad relativa de la estación meteorológica presente, no son del todo confiables, ya que existen datos faltantes o éstos se saturan en 0 y 100 % de forma constante. Siguiendo los lineamientos del documento FAO-56 [31], en que se indica que “donde los datos de humedad no existen o son de calidad cuestionable, una estimación de la presión de vapor real se puede obtener bajo el supuesto de que la temperatura de rocío es cercana a la temperatura mínima”. Así, se utiliza dicho procedimiento, evitando el uso de los datos de humedad relativa.

Para una correcta aplicación de los métodos propuestos en este trabajo, se hace necesario contar con estimaciones de variables meteorológicas a corto y largo plazo, correspondiendo al EMS y WMS, respectivamente. En este caso, un corto plazo equivale a un día a futuro, mientras que el largo plazo es una estimación a 28 días.

4.2.1. Estimación de datos en el largo plazo (WMS)

Dado que para el control predictivo se utilizará un horizonte de 28 días en el caso del WMS, por lo que para la estimación de los datos meteorológicos se utilizará un modelo de media móvil de los datos de los últimos 7 días, obtenidos en periodos diarios. Lo anterior se justifica ya que los pronósticos meteorológicos no son confiables en un horizonte mayor a 7 días dado que los modelos utilizados usualmente son del tipo caótico, en que pequeñas variaciones en la entrada generan grandes variaciones en la estimación. Como sólo se necesitan los valores mínimos y máximos diarios de la temperatura, radiación media, velocidad media del viento y precipitaciones, se opta por la media móvil como un modelo que entregue una primera aproximación adecuada.

La Figura 4.4 muestra los resultados de la utilización de media móvil para la predicción de lluvia en el largo plazo. Por su parte, la Tabla 4.1 muestra los valores del error RMSE a uno y a 28 pasos en promedio diario.

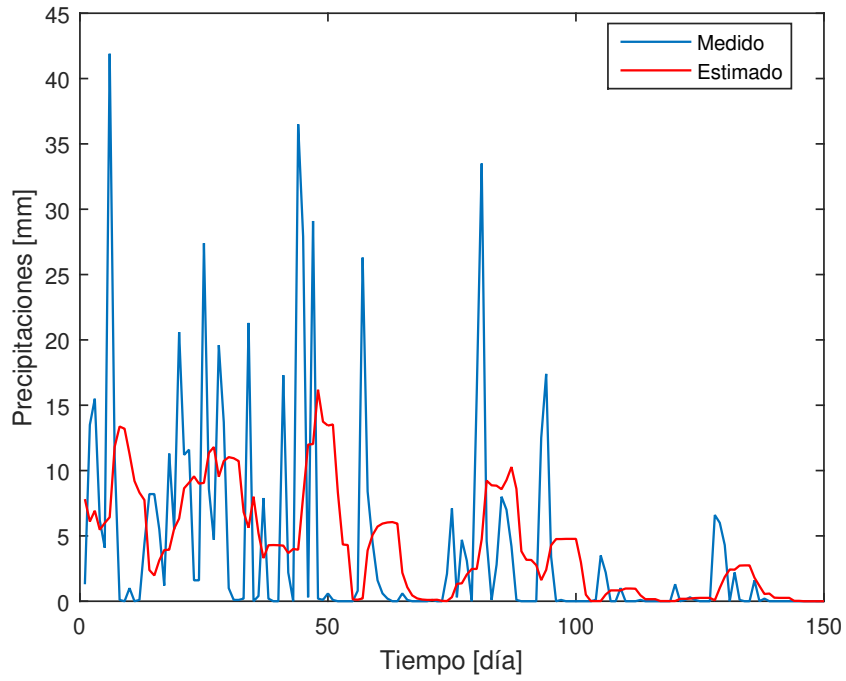


Figura 4.4: Precipitaciones estimadas con media móvil a un paso.

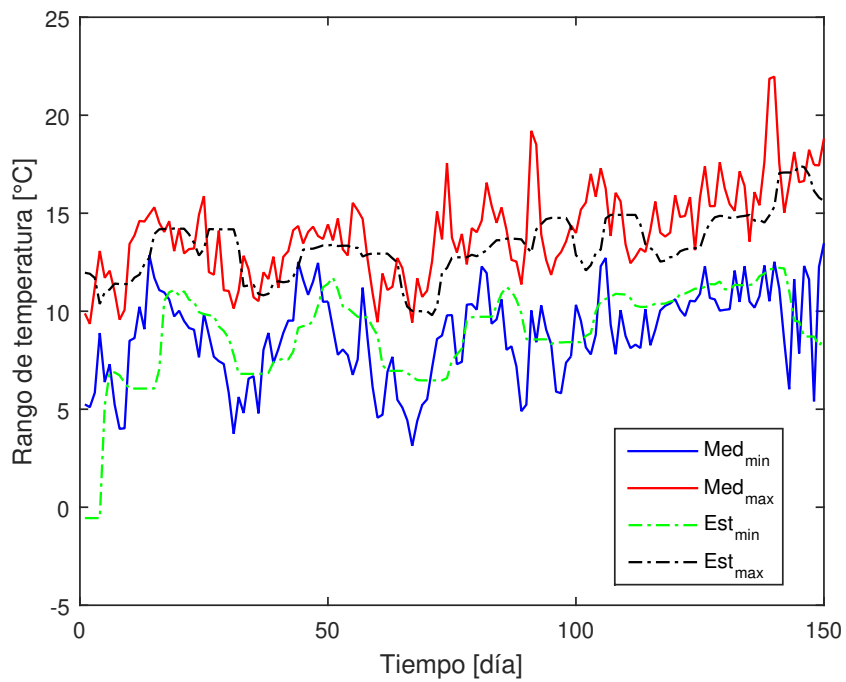


Figura 4.5: Temperaturas mínimas y máximas estimadas con media móvil a un paso.

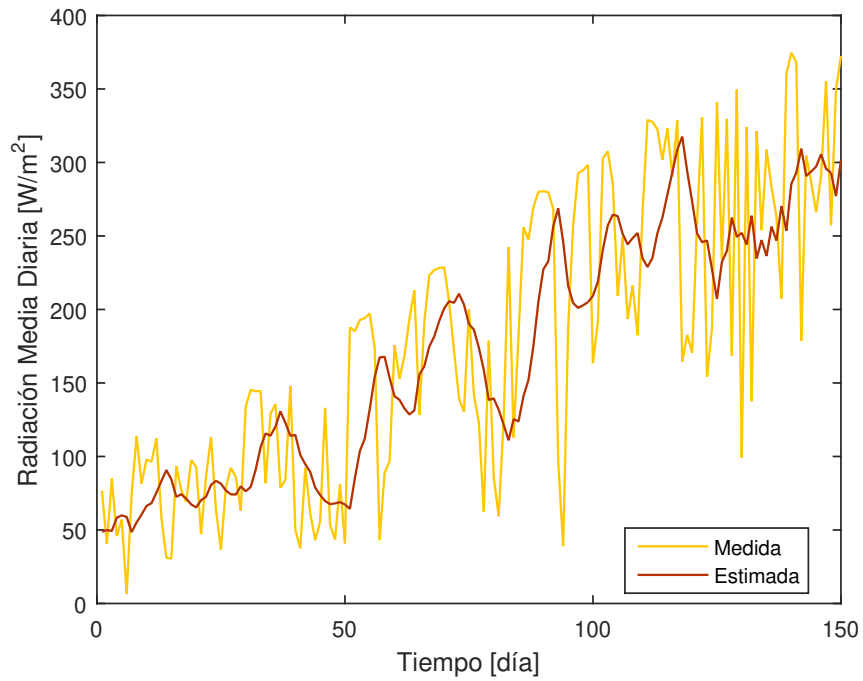


Figura 4.6: Radiación solar estimada con media móvil a un paso.

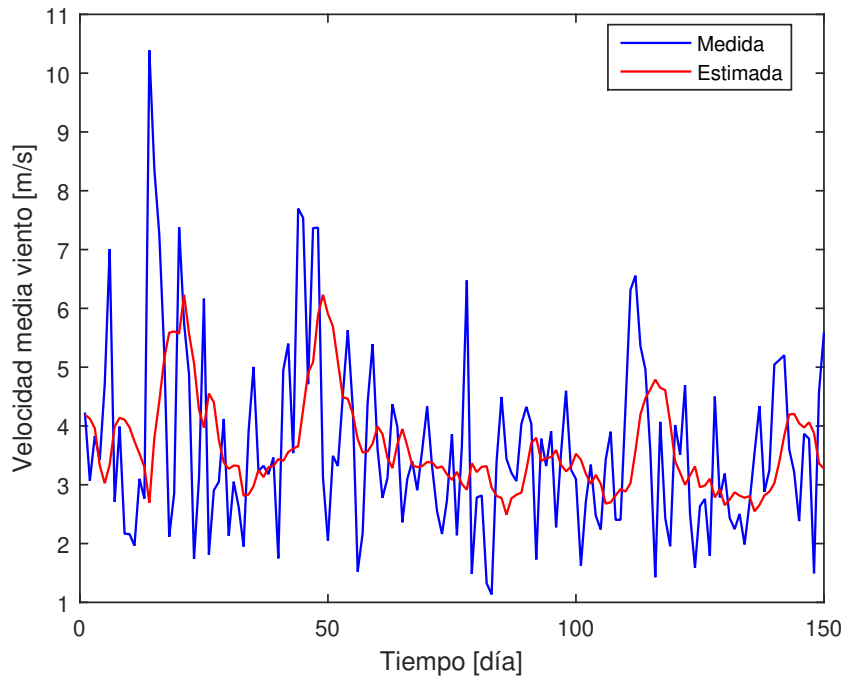


Figura 4.7: Velocidad del viento estimada con media móvil a un paso.

Se aprecia que estos modelos siguen la tendencia de los valores reales con un retraso. Si bien no son idénticos a los datos reales, permiten tener una estimación adecuada en el largo plazo para la ejecución del WMS.

Tabla 4.1: Errores RMSE de modelos de Media Móvil utilizados en el WMS a un paso y 28 pasos.

Variable	$RMSE_1$	$RMSE_{28}$
Precipitaciones	1,7240 [mm]	20,5372 [mm]
Temperatura_{max}	2,0932 [°C]	2,6469 [°C]
Temperatura_{min}	2,4175 [°C]	3,0162 [°C]
Radiación solar	64,9831 [W/m ²]	79,1983 [W/m ²]
Velocidad viento	1,6543 [m/s]	1,6744 [m/s]

Para la estimación de la recarga del acuífero, se utilizará un intervalo de 28 días en la ecuación (3.4), es decir, que en el horizonte de evaluación del WMS, se podrá extraer la cantidad de agua que sea recargada por debido a las lluvias en el mismo intervalo. En la Figura 4.8 se puede observar la aplicación de esta estimación, considerando un área de influencia para la recarga de 2,38 [km²], que corresponde al área sobre la cual se ubican la mayoría de los pozos y se desarrollan las actividades agrícolas. Se muestran los valores máximos de extracción que se podrían obtener si el área de influencia fuera un 100 %, 80 %, 50 % y 10 % de los 2,38 [km²] estimados.

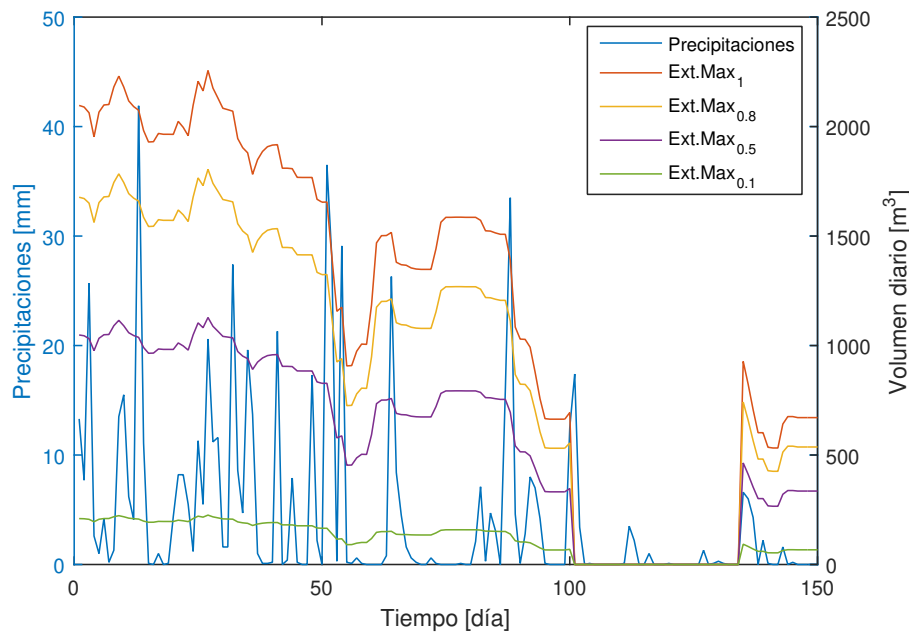


Figura 4.8: Volumen máximo de agua extraíble del acuífero.

Se aprecia que cuando las precipitaciones futuras son bajas, se reduce la disponibilidad de agua a extraer. Esto llega a ser cero cuando las precipitaciones acumuladas en los 28 días son menores a 15 [mm], lo que se puede observar cercano a la muestra número 100, en que el volumen disponible para extraer agua es nulo. Dada la estructura de la fórmula de Chaturvedi, la disponibilidad de agua para riego varía proporcionalmente al área de influencia de la recarga. En este caso, se optará por mantener para el acuífero los 2,38 [km²] de área de captación de las precipitaciones, siendo éste uno de los supuestos del trabajo.

4.2.2. Estimación parámetros en el corto plazo (EMS)

Por parte del EMS, el horizonte es de 1 día (equivalente a 144 muestras cada 10 minutos), por lo que la estimación tiene menos incertidumbre que en el caso anterior. Para hacer la estimación de los datos de consumo eléctrico, radiación solar y temperatura (relevante al momento de estimar la generación fotovoltaica), se hará mediante modelos auto-regresivos del tipo ARIMA.

Los modelos son obtenidos utilizando mínimos cuadrados y las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran los resultados para las estimaciones del consumo eléctrico a 24 pasos (datos cada una hora), radiación solar y temperatura ambiente a 144 pasos (datos cada 10 minutos), respectivamente. Por otra parte, la Tabla 4.2 muestra características relevantes de los modelos obtenidos.

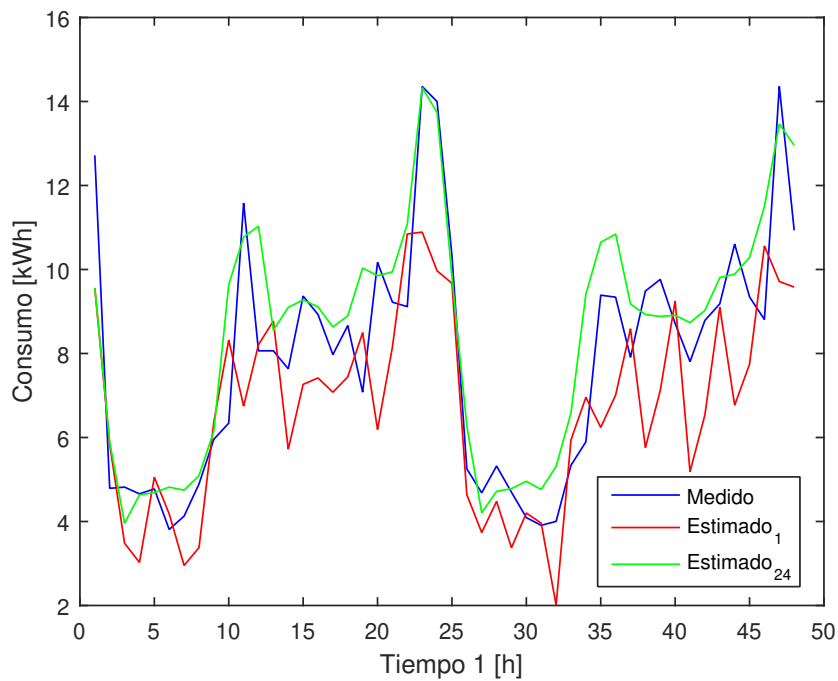


Figura 4.9: Predicción a 1 y 24 pasos del consumo.

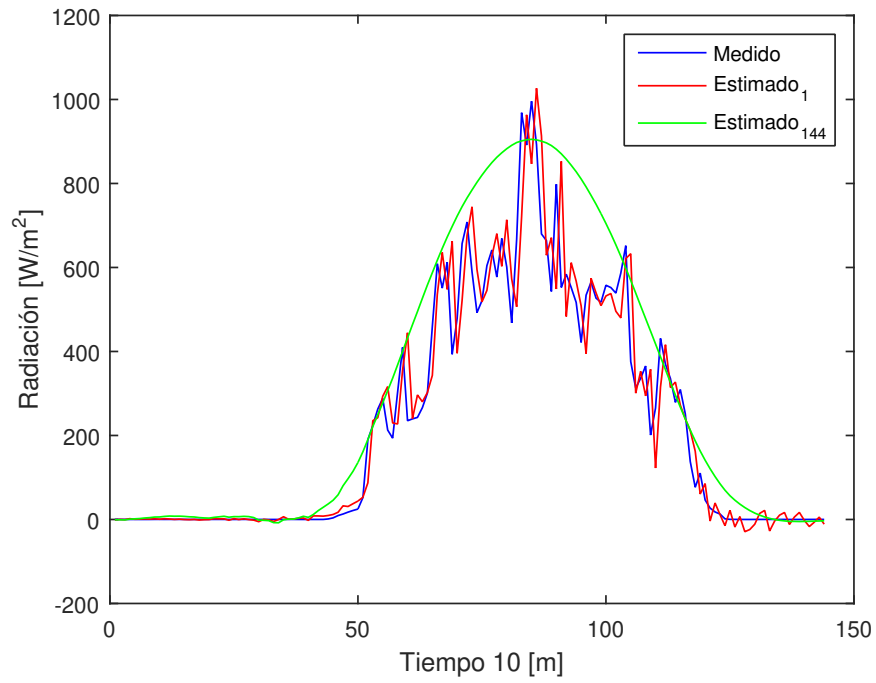


Figura 4.10: Predicción a 1 y 144 pasos de la radiación solar.

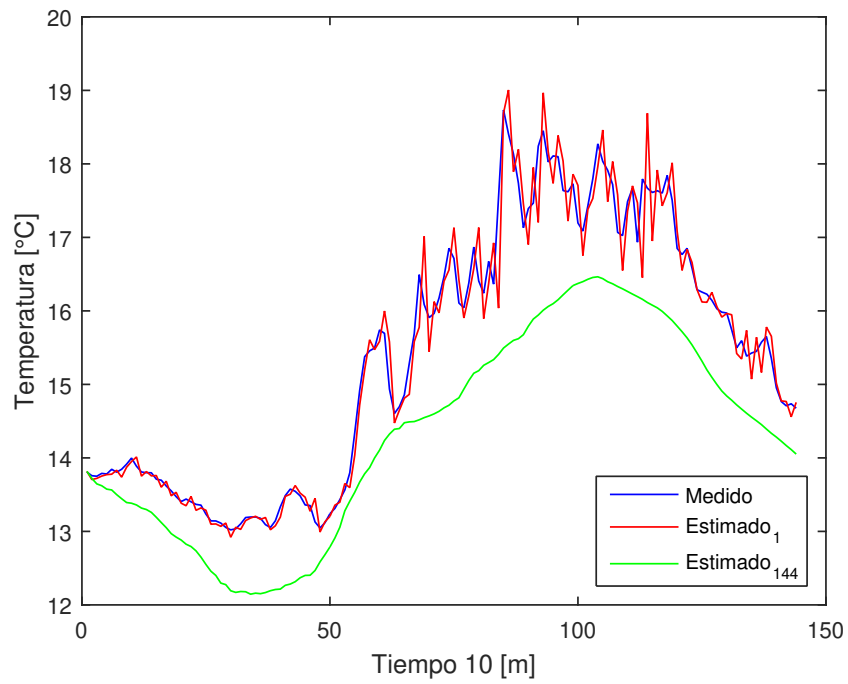


Figura 4.11: Predicción a 1 y 144 de la temperatura.

Tabla 4.2: Características de modelos ARIMA.

Variable	Regresores	$RMSE_1$	$RMSE_{24}$	$RMSE_{144}$
Consumo	23	10,09 [kWh]	6,40 [kWh]	-
Radiación	146	265,66 [W/m^2]	-	727,36 [W/m^2]
Temperatura	144	1,44 [$^{\circ}C$]	-	6,13 [$^{\circ}C$]

Como es de esperar, en la mayoría de los casos la predicción a un paso tiene menores errores que la predicción a un día; sin embargo, se aprecia que para la predicción de consumo esto no es así. La predicción a un paso en este caso entrega peores resultados que a 24 pasos; esto puede deberse a que los datos de entrada son generados mediante un modelo de Cadenas de Markov, los que tienen la conocida como “propiedad de Markov”, en que la probabilidad de un evento depende únicamente del evento anterior, es decir, que no tienen más memoria que aquella del instante inmediatamente anterior. Esta propiedad impide que las series de tiempo generadas tengan un sentido de continuidad claro para datos generados dentro de un día: por ejemplo, se podría esperar que si para un día existe un consumo relativamente alto en la mañana, este consumo sea también alto en la noche, pero un modelo de Cadena de Markov con estas características no permite generar este tipo de relaciones. Así, la falta de correlación entre datos consecutivos no perjudica la estimación a 24 pasos, ya que los datos generados por la propia estimación (y que son realimentados en el modelo ARIMA), tampoco están correlacionados con el consumo del día, pero de todas formas poseen el patrón de consumo típico generado.

4.3. Características del sistema

Para efectos de la simulación, se deben caracterizar tanto los cultivos como los agricultores. Esta sección detalla dicha caracterización.

4.3.1. Parámetros de cultivos

Los parámetros a utilizar para los cultivos se resumen en la Tabla 4.3. Entre otros datos, estos detallan la duración de cada una de las etapas de crecimiento de las plantas, las sensibilidades ante la falta de agua para cada etapa (K_y) y los coeficientes característicos del cultivo (K_c y P_c), la impermeabilidad relativa suelo-vegetación (CN). En todos los casos se asume que inicialmente que no existe agotamiento en la zona de la raíz, haciendo $D_r = 0$.

Tabla 4.3: Parámetros de los cultivos considerados en la simulación.

Parámetro	Papa	Arveja	Tomate
Día inicio cultivo ^a	31 de julio	15 de julio	01 de agosto
Precio [\$/kg] ^a	\$280	\$560	\$220
Rendimiento máximo [kg/ha] ^a	31.760	1.280	86.910
Altura máxima [m] ^b	0,6	0,5	0,9
Profundidad raíces [m] ^b	0,4	0,8	0,6
Duración E_1 [días] ^b	25	20	30
Duración E_2 [días] ^b	30	30	40
Duración E_3 [días] ^b	45	35	40
Duración E_4 [días] ^b	30	15	25
Ky_1 ^b	0,4	1	1
Ky_2 ^b	0,33	1	1
Ky_3 ^b	0,46	1	1
Ky_4 ^b	0,2	1	1
Kc_1 ^b	0,4	0,5	0,6
Kc_2 ^b	1,15	1,15	1,15
Kc_3 ^b	0,75	1,1	0,8
P_c ^b	0,35	0,35	0,4
CN ^c	70	63	65

^a Fuente: ODEPA [58].

^b Fuente: Allen *et al.*, 1998 [31].

^c Fuente: Jensen & Allen, 2016 [51].

4.3.2. Caracterización de los agricultores

Para efectos de la simulación, se considerará que existen 10 agricultores que tienen sus sistemas de riego siendo gestionados por el sistema WMS-EMS, en que sus parámetros se resumen en la Tabla 4.4. Éstos detallan, por agricultor: el área cultivada, el rendimiento relativo mínimo esperado (relacionado con el auto-consumo esperado), y el costo de no cumplir con dicho rendimiento relativo mínimo. Este costo debe ser al menos el costo de adquirir el producto en el mercado; es así que, por diseño, se establece que este costo será el doble de los ingresos que se podrían esperar por la venta del producto.

Tabla 4.4: Características de los cultivos de los agricultores.

	Papa		
	Área [m^2]	Y_{min}	Costo [$\frac{\$}{kg}$]
A_1	500	0,9	560
A_2	1.000	0,9	560
A_3	-	-	-
A_4	-	-	-
A_5	250	0,9	560
A_6	250	0,9	560
A_7	250	0,9	560
A_8	-	-	-
A_9	-	-	-
A_{10}	250	0,9	560

	Arveja		
	Área [m^2]	Y_{min}	Costo [$\frac{\$}{kg}$]
A_1	250	0,8	1.120
A_2	500	0,8	1.120
A_3	750	0,8	1.120
A_4	-	-	-
A_5	125	0,5	1.120
A_6	250	0,8	1.120
A_7	500	0,8	1.120
A_8	750	0,8	1.120
A_9	-	-	-
A_{10}	500	0,7	1.120

	Tomate		
	Área [m^2]	Y_{min}	Costo [$\frac{\$}{kg}$]
A_1	-	-	-
A_2	250	0,7	440
A_3	1.000	0,7	440
A_4	125	0,7	440
A_5	125	0,7	440
A_6	-	-	-
A_7	125	0,7	440
A_8	500	0,7	440
A_9	125	0,7	440
A_{10}	125	0,7	440

4.3.3. Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos son los relativos al acuífero y el modelamiento de los pozos que extraen agua desde él, que corresponden a la Transmisividad y el Almacenamiento Específico. Además, es relevante la distancia entre los pozos, definida a 150 [m], que permite establecer en 50 [m] (menor a la mitad de la distancia entre pozos) la estimación del descenso de la cota hidráulica (D_r). La Tabla 4.5 resume estos valores.

Tabla 4.5: Parámetros hidrogeológicos.

Parámetro	Valor
Transmisividad (T)	$1,1574 \times 10^{-4} [m^2/s] = 10[m^2/dia]$
Almacenamiento Específico (S)	5×10^{-5}
Distancia entre pozos (r)	150 [m]
Distancia de estimación (r_d)	50 [m]
Descenso máximo ($D_{r_{max}}$)	1 [m]

4.3.4. Parámetros de la optimización

Finalmente, se deben establecer los parámetros de la optimización, correspondiente principalmente a los costos de las funciones objetivo del EMS y del WMS (ecuaciones (3.30) y (3.30), respectivamente). Estos costos se resumen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Parámetros de la optimización WMS-EMS.

Parámetro	Valor
C^{in}	100 [\$/kWh]
C^{out}	50 [\$/kWh]
C_e^{ms}	1.000 [\$/kWh]
C_e^{lst}	100 [\$/kWh]
C_w^{ms}	1.000 [\$/lt]
C_w^{lst}	10 [\$/lt]

El WMS será resuelto con dos métodos: (i) mediante el *toolbox* de MATLAB de Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* - GA) y (ii) utilizando el método Algebraico de la ecuación (3.13). Por otra parte, el EMS se optimizará utilizando el *toolbox* YALMIP [62], utilizando como *solver* el optimizador GUROBI con un método de programación lineal basado en *branch-and-bound* para la resolución.

4.4. Escenarios

Se consideran distintos escenarios, los cuales reflejan una reducción en las precipitaciones esperadas (escenarios de calentamiento global), errores en la estimación de los datos hidrogeológicos y los rendimientos mínimos aceptables por los agricultores.

En el **Escenario Base (E0)**, los datos y modelos para el WMS y EMS son los obtenidos en la Sección 4.2, las precipitaciones se asumen con sus valores históricos, los rendimientos mínimos esperados por agricultor son los de la Tabla 4.4, y los parámetros relativos al sistema hidrogeológico son los descritos en la Tabla 4.5.

Los **Escenarios 1 y 2 (E1 y E2)**, representan las reducciones en las precipitaciones en un 15 % y un 30 %. Estas reducciones se obtienen al multiplicar los datos de precipitaciones registradas por los factores 0,85 y 0,7, respectivamente. Esto afectará la recarga del acuífero según la fórmula de Chaturvedi, tal como se aprecia en la Figura 4.12, en que anterior al día 100, el volumen de agua disponible para extraer cae a cero en el escenario de disminución de las precipitaciones del 30 %, mientras que para los otros escenarios llega a cero en unas muestras siguientes. Esto es esperable, dado que una reducción de las precipitaciones provocará que no exista recarga del acuífero (ya sea por escurrimiento del agua antes de llegar al acuífero, evaporación, o la capilaridad que impida que el agua descienda).

Estos escenarios afectarán principalmente la optimización realizada por el WMS, ya que es el encargado de los volúmenes de agua para riego óptimos.

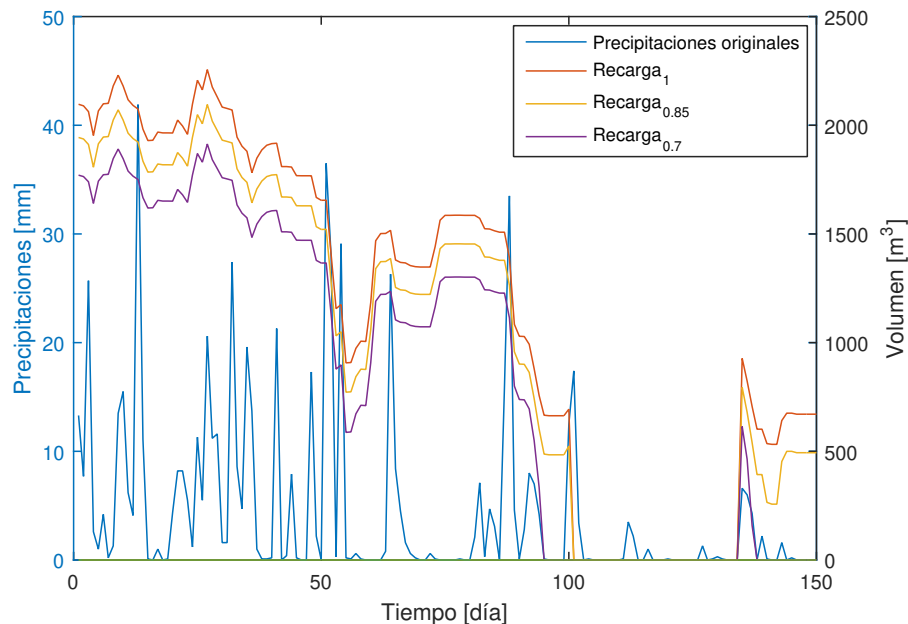


Figura 4.12: Variación de la recarga esperada según la reducción en las precipitaciones.

Los **Escenarios 3 y 4 (E3 y E4)**, representan variaciones de los parámetros T y S (transmisividad y almacenamiento específico) del acuífero. Se prueban los escenarios en que los parámetros son un orden de magnitud mayor ($\times 10$) o un orden de magnitud menor ($\times 0,1$) a los estimados inicialmente. Para el primer caso, significaría que se tiene un acuífero de “mejor calidad”, al que se le puede extraer más agua sin afectar mayormente el descenso de la cota hidráulica; para el segundo, implicaría un acuífero de “peor calidad”, en que la extracción de agua tiene un impacto mayor sobre el descenso de la cota hidráulica. Lo anterior se aprecia en la Figura 4.13, que representa el descenso en el tiempo a 50 metros de un pozo

para el escenario base y los dos escenarios descritos anteriormente. Se observa claramente la diferencia en los órdenes de magnitud del descenso en los distintos casos.

Estos escenarios deberían afectar principalmente la optimización del EMS, ya que es el encargado de determinar los instantes en que se bombeará el agua, sin llegar a afectar la cota hidráulica de los distintos pozos existentes en la comunidad.

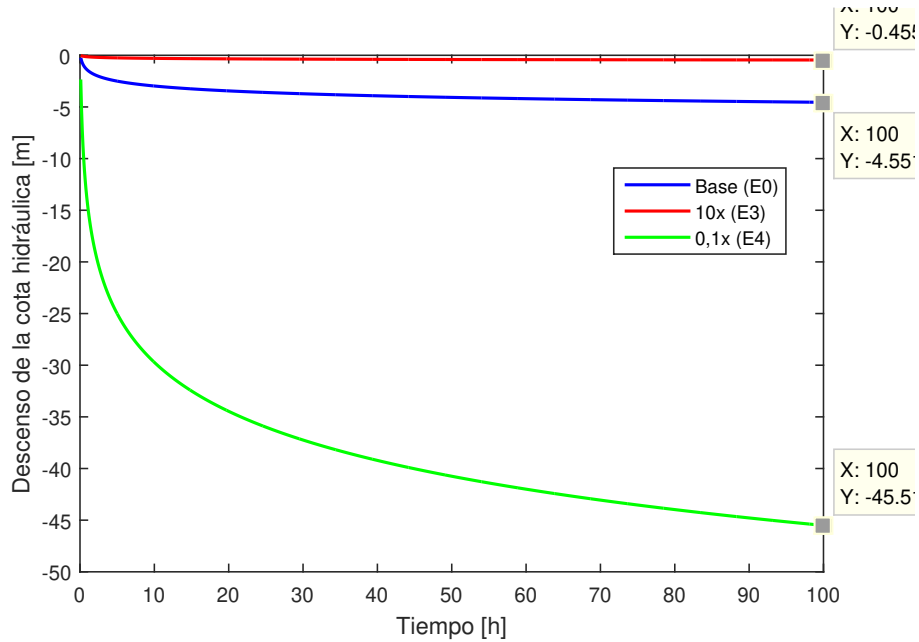


Figura 4.13: Descenso en la cota hidráulica para los escenarios E0, E3 y E4.

Finalmente, los **Escenarios 5 y 6 (E5 y E6)** plantean una variación de $\pm 0,1$ en los rendimientos relativos mínimos ($Y_{r,min}$) esperados por los agricultores. Cabe destacar que, de acuerdo a la formulación del problema en la ecuación (3.30), estas no son restricciones duras, sino que están penalizadas, por lo que estos escenarios afectarán el desempeño del WMS e impactarán en sus costos de operación.

La Tabla 4.7 muestra un resumen de los distintos casos planteados.

Tabla 4.7: Escenarios planteados.

	Variación precipitaciones	Variación parámetros hidrogeológicos	Variación $Y_{r,min}$
Escenario base (E0)	0 %	-	-
Escenario 1 (E1)	-15 %	-	-
Escenario 2 (E2)	-30 %	-	-
Escenario 3 (E3)	-	x10	-
Escenario 4 (E4)	-	x0,1	-
Escenario 5 (E5)	-	-	+0,1
Escenario 6 (E6)	-	-	-0,1

4.5. Resultados por escenarios

Para los escenarios E0 a E4, se presentan los resultados utilizando para la resolución del WMS Algoritmos Genéticos (GA) y el método Algebraico que despeja directamente la irrigación mínima para maximizar el rendimiento, descrita en la ecuación (3.13) para la resolución del WMS. Se grafican los rendimientos relativos de los cultivos junto a la recarga estimada del acuífero, con el fin de identificar los períodos en que se reducen los rendimientos por no existir agua disponible.

4.5.1. Escenario base - Algoritmos genéticos

El escenario base (E0) servirá de comparación para el resto de los escenarios analizados. La Figura 4.14 muestra los rendimientos individuales por tipo de cultivo, los rendimientos mínimos esperados, y la disponibilidad de agua, tanto de las precipitaciones, como de la recarga del acuífero.

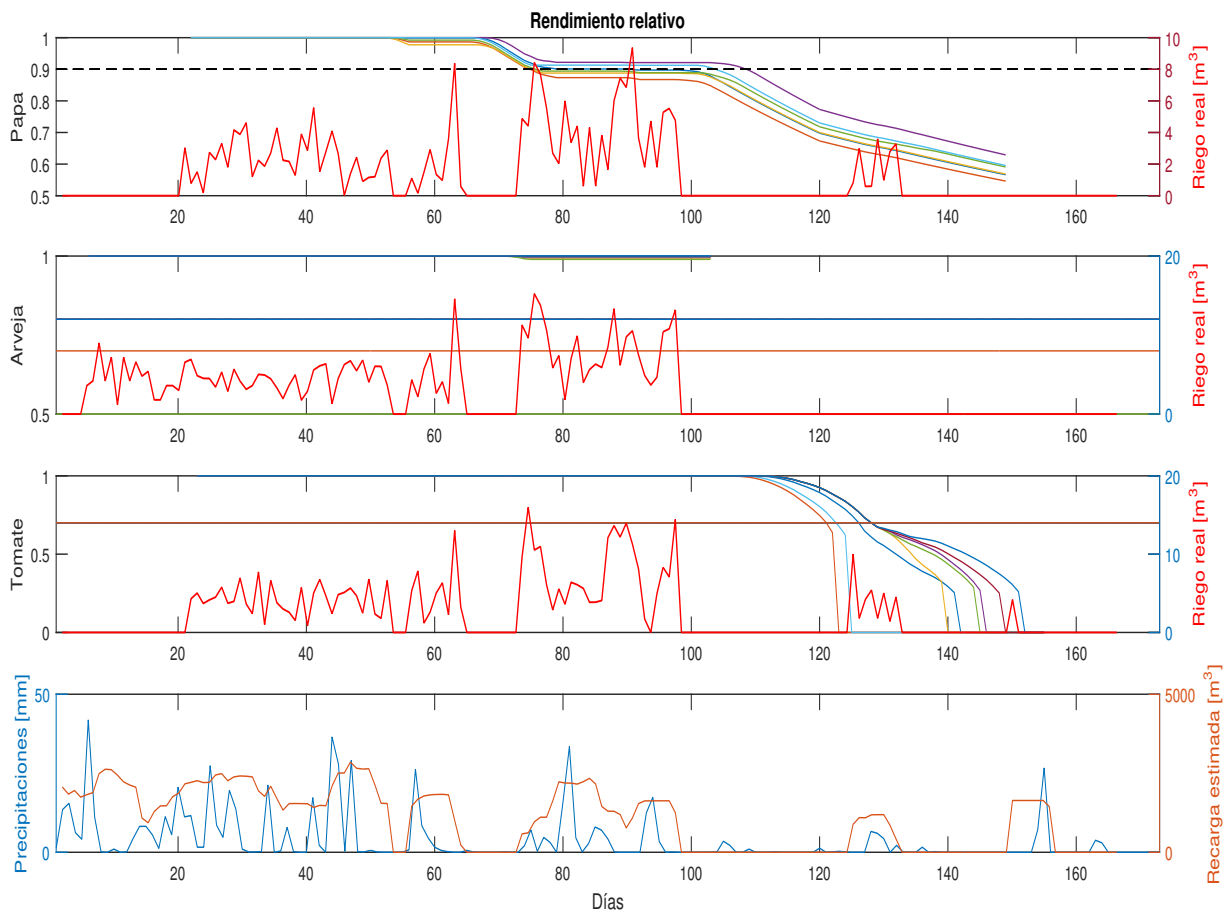


Figura 4.14: Rendimientos relativos de los cultivos, escenario base (GA).

Se aprecia que sólo los cultivos de arveja logran tener un rendimiento superior al límite establecido. Esto se explica principalmente porque la arveja se siembra antes que los otros

cultivos y tiene una duración total entre la siembra y cosecha de sólo 100 días. De acuerdo a los datos de disponibilidad de agua, existen tres periodos principales en los cuales se determina que no hay recarga del acuífero, y sólo uno de ellos (el más breve), en torno al día 70, coincide con la época de cultivo de la arveja.

Como se puede observar, hasta el día 100 gran parte de los cultivos estaban por sobre el rendimiento mínimo exigido; sin embargo, desde ese momento empezaron a disminuir la frecuencia e intensidad de las lluvias por el comienzo del verano. Esto implica una reducción en la recarga del acuífero que no es suficiente para realizar el riego requerido. Si a esto se le suma el hecho que los estanques dimensionados no pueden almacenar el agua suficiente como para regar por más de un día, se llega al eventual agotamiento del agua disponible para ser absorbida por la planta, lo que resulta en la pérdida del rendimiento o muerte de la planta.

Los datos de la Tabla 4.3 indican que el tomate tiene una sensibilidad ante la falta de agua en su última etapa (K_{y_4}) mayor que aquella de la papa. Esto impacta en que su decaimiento en el rendimiento en los últimos períodos sea abrupto, llegando a perderse la totalidad del cultivo.

De esta forma, si sólo se piensa en la sustentabilidad del acuífero en el corto o mediano plazo, junto a estanques reducidos que no puedan almacenar el agua necesaria en épocas de abundancia, se torna una tarea compleja el hacer crecer cultivos que tengan un rendimiento adecuado.

La operación diaria del EMS se aprecia en la Figura 4.15, en que se muestra un día de operación (valores negativos del eje de las abscisas) y la predicción a 144 pasos al futuro (valores positivos del eje de las abscisas).

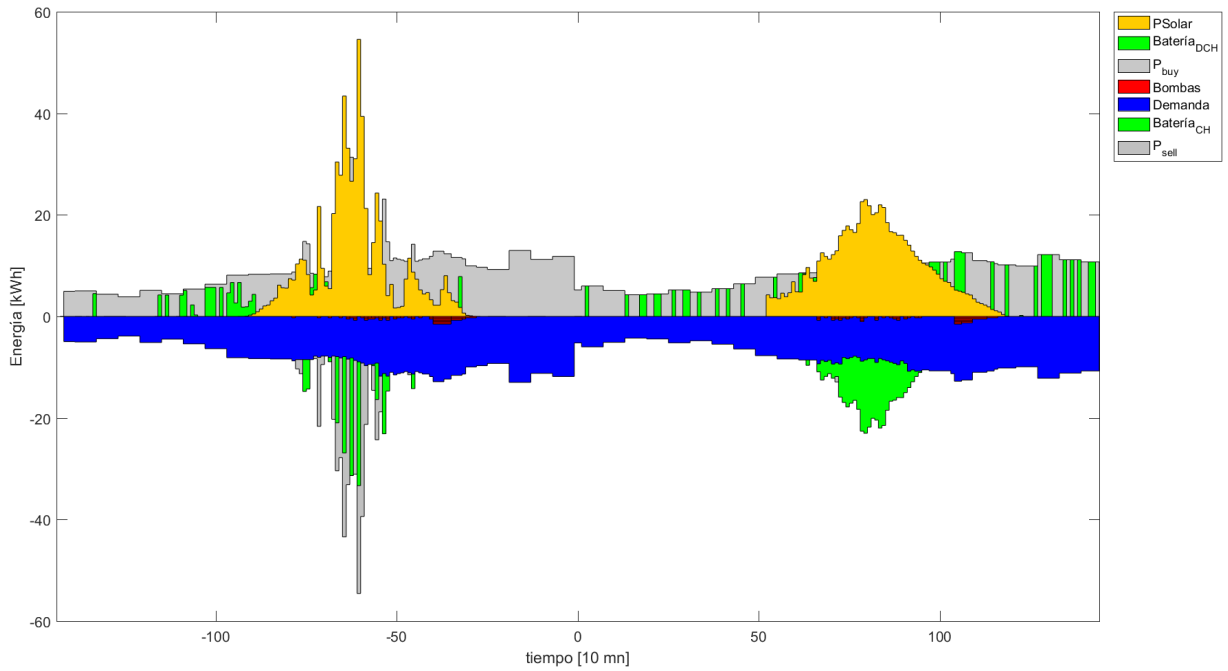


Figura 4.15: Detalle de la operación del EMS, escenario base (GA).

El EMS opera según lo esperado, autoconsumiendo energía cuando existe generación fotovoltaica, tanto para abastecer los consumos de la comunidad, como para los consumos por conceptos de bombeo de agua y de carga del banco de baterías. Además, de existir aún excesos de energía generada, estos se venden a la red de distribución

Por otra parte, en los horarios nocturnos o en aquellos en que la generación fotovoltaica no es suficiente para abastecer la demanda total, se hace uso de la energía almacenada en el banco de baterías o se compra energía desde la red de distribución. El detalle de la programación del bombeo y riego para cada uno de los agricultores se aprecia en la Figura 4.16.

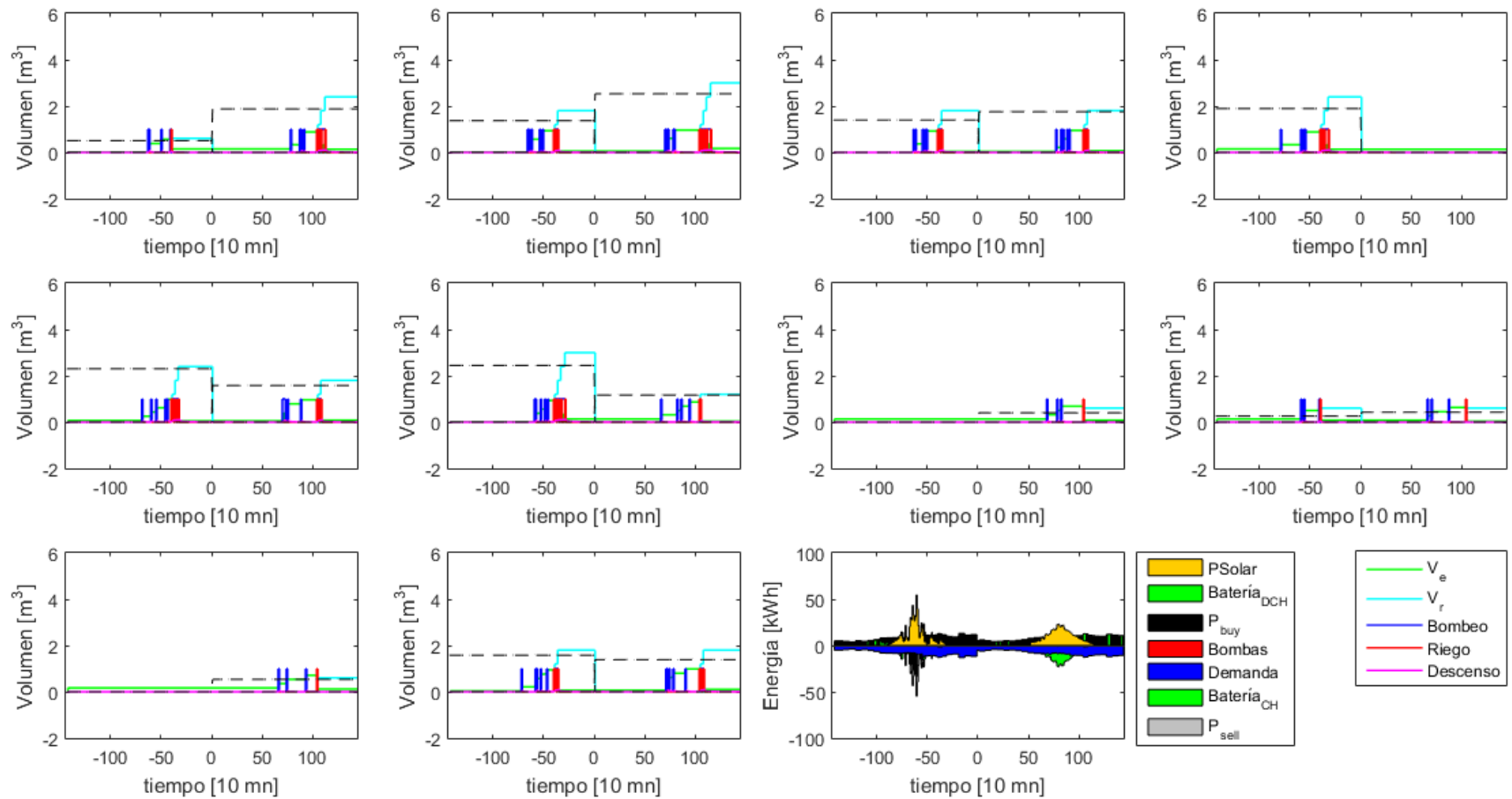


Figura 4.16: Operación del EMS, escenario base (GA).

Como se puede apreciar, en todos los casos expuestos para el día particular, se alcanzan o superan las referencias de volumen riego, indicada por las líneas punteadas. Como el costo de regar en exceso es menor al costo de no regar, el optimizador del EMS determina que es más económico el superar la referencia y, como el riego se realiza en periodos discretos de 10 minutos, en la mayoría de los casos se riega un poco más que lo requerido.

Los estanques por agricultor se dimensionaron en $1 [m^3]$, lo que en mucho de los casos no es suficiente para realizar el riego total de los cultivos. En estos casos, ocurre un riego simultáneo al bombeo, como se puede observar en la Figura 4.17.

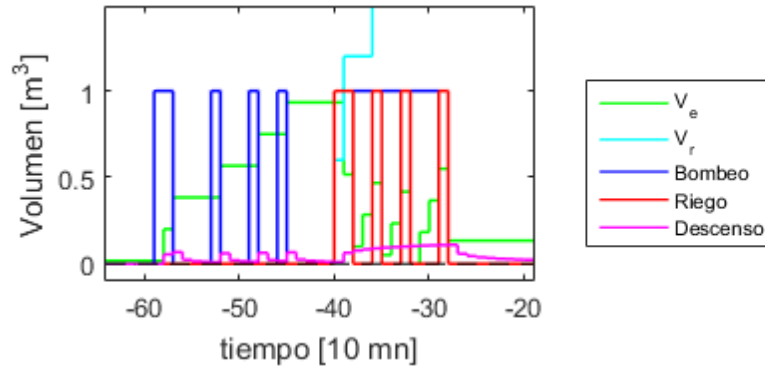


Figura 4.17: Acercamiento al bombeo y riego, escenario base (GA).

Antes de que empiece el horario de riego, el bombeo llenó el estanque a su capacidad máxima (V_e , en torno a la muestra -45), y una vez que empieza el riego, la bomba sigue operando con tal de rellenar el agua del estanque mientras se realiza el riego (muestras -40 a -30). También se puede apreciar que en ninguno de los casos se supera el descenso máximo impuesto de $1 [m]$.

En la Figura 4.18 se puede observar la coordinación de las bombas de los distintos agricultores, con la energía consumida por cada una de ellas.

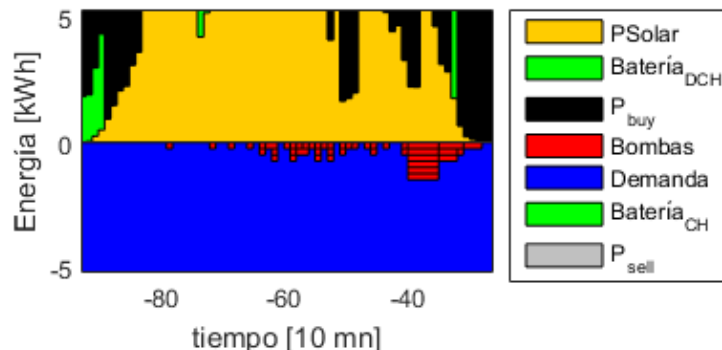


Figura 4.18: Acercamiento a la coordinación de las bombas, escenario base (GA).

Se aprecia que para el llenado de los estanques de los agricultores, los bombeos se reparten preferentemente durante el día, que es cuando existe un exceso de generación fotovoltaica.

Por otra parte, se identifica una alta concentración de bombeos en torno a la muestra -40, que corresponde al inicio del horario de riego establecido entre las 17:00 y 00:00 horas. Esta concentración ocurre por el bombeo y riego simultáneo explicado anteriormente.

La Tabla 4.8 muestra los volúmenes de agua utilizados para el riego de cada uno de los cultivos presentes en la comunidad y el rendimiento relativo final obtenido. El consumo total de agua es de 1.159,2 [m^3] para todos los cultivos considerados.

Tabla 4.8: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 0 (GA).

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	38,585	95,215	-	0,566	1,000	-
A2	46,309	53,506	59,785	0,546	0,994	0,000
A3	-	58,607	51,793	-	0,995	0,000
A4	-	-	55,800	-	-	0,000
A5	23,260	46,675	68,065	0,569	0,996	0,000
A6	55,736	72,064	-	0,629	0,990	-
A7	28,765	51,924	49,512	0,591	0,997	0,000
A8	-	58,182	36,018	-	0,998	0,000
A9	-	-	57,600	-	-	0,000
A10	43,198	58,735	49,867	0,596	1,000	0,000
Total	235,85	494,91	428,44	-	-	-

Se aprecia el impacto que tiene el utilizar Algoritmos Genéticos (GA) en el WMS, existiendo diferencias relevantes en los volúmenes de riego optimizados para cada uno de los cultivos de los agricultores. El motivo de esto es que los GA no aseguran el encontrar el óptimo global de la función objetivo y tienen una dependencia importante en su inicialización y determinación de parámetros (como mutación, *crossover*, número de individuos, etcétera). Si bien en muchos casos se acercan bastante al óptimo global (ubicándose en un sub-óptimo), en este caso, debido a la cantidad de variables, al tiempo computacional disponible y a las restricciones adicionales incluidas para este método de resolución, es que se obtuvieron resultados que involucran un mayor consumo de agua.

4.5.2. Escenario base - Solución algebraica

Con fines comparativos, se utilizará la ecuación (3.13) para la determinación de los requerimientos de agua óptimos día a día por cultivo, sin considerar la maximización de la función objetivo (3.30) para un largo plazo ni tampoco el rendimiento mínimo esperado por cada agricultor. La Figura 4.19 detalla el rendimiento relativo para los distintos tipos de cultivos. Como era de esperar, en todos los casos se mantiene cercano al rendimiento relativo máximo. Si bien la solución algebraica da un valor de riego óptimo, depende de la exactitud de la predicción de las variables meteorológicas, razón por la cual se explica que los rendimientos relativos no sean igual a la unidad. Adicionalmente, se está limitado a las capacidades del sistema hídrico gestionado por el EMS, lo que impacta en los rendimientos al no poder proveer

toda el agua necesaria.

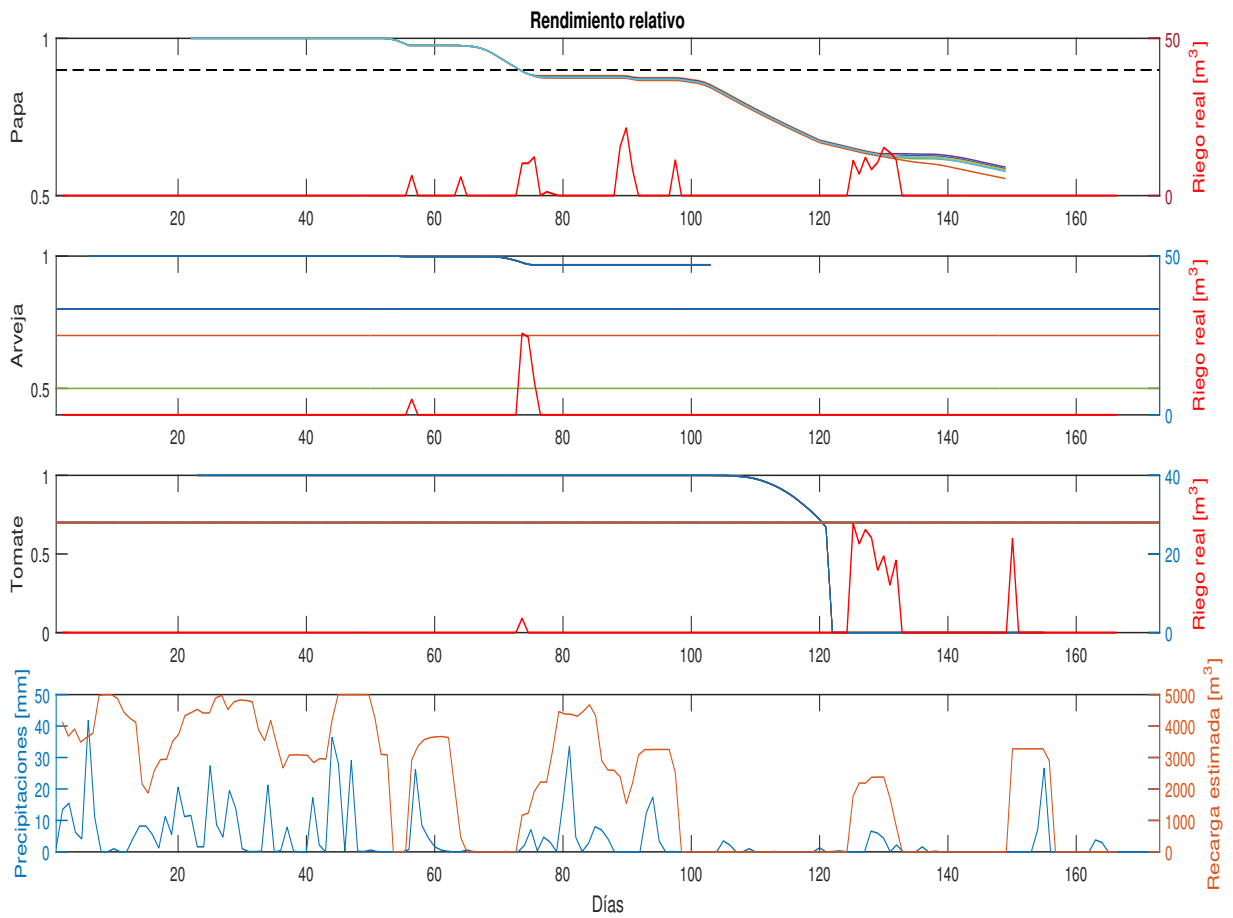


Figura 4.19: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario base (Algebraica).

La Tabla 4.9 detalla los consumos de agua por tipo de cultivo y sus rendimientos relativos.

Tabla 4.9: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario base - Algebraica.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	42,154	5,246	-	0,585	0,967	-
A2	68,152	9,671	24,177	0,554	0,966	0,000
A3	-	11,646	55,554	-	0,966	0,000
A4	-	-	13,800	-	-	0,000
A5	21,742	3,706	14,752	0,582	0,967	0,000
A6	21,306	5,694	-	0,590	0,967	-
A7	20,780	9,341	14,879	0,578	0,967	0,000
A8	-	11,470	43,730	-	0,966	0,000
A9	-	-	13,800	-	-	0,000
A10	19,636	8,866	13,499	0,577	0,967	0,000
Total	193,77	65,64	194,19	-	-	-

El consumo total de agua es de 453,6 [m^3], el cual es menor al consumo total obtenido utilizando la resolución mediante Algoritmos Genéticos (GA), de 1.159,2 [m^3]. Esto se explica por tres motivos:

- La optimización con GA propuesta incorpora restricciones adicionales a la función objetivo que restringen el espacio de búsqueda y reduce el desempeño de la solución. Además, el GA no asegura encontrar el óptimo global de la función objetivo, por lo que es probable que el sub-óptimo encontrado sobreestime los requerimientos de agua sin necesariamente mejorar los rendimientos de los cultivos.
- La predicción del agua disponible en un horizonte de tiempo de 28 días le permite al optimizador del WMS basado en GA contar con un volumen de agua a futuro que relaja las restricciones impuestas.
- Dadas sus características, la resolución algebraica de la ecuación (3.13) determina el mínimo volumen de agua tal que el rendimiento del cultivo no disminuya.

Así, el método algebraico evita sobredimensionar en el día a día el agua requerida de riego: en particular para el cultivo de tomate, se observa que se realiza un riego mínimo hasta el día 100 sin reducir el rendimiento relativo (posterior a eso, existe un periodo sin lluvias en que no existe agua disponible para extraer). Esto a diferencia del método con algoritmos genéticos, que realiza un riego activo (ver Figura 4.14) sin que éste sea necesario para mantener un rendimiento alto del cultivo.

Otra diferencia entre ambos métodos es el tiempo de resolución: cerca de 4 minutos en el caso de GA y del orden de los milisegundos en el caso de la solución algebraica. Si bien en una operación real el sistema tendría cerca de 7 horas para realizar la optimización correspondiente (antes de que se requiera realizar el despacho de las bombas en horarios diurnos), de todas

formas se necesitaría de un computador con una potencia considerable para ejecutar un GA con 616 variables de decisión.

Cabe destacar que la diferencia entre ambos métodos radica únicamente en la optimización del WMS, con un método algebraico que despeja el riego mínimo requerido para mantener el rendimiento y otro método basado en Algoritmos Genéticos, que maximiza el rendimiento global de los cultivos y busca mantener un rendimiento relativo mínimo por agricultor (incorporado como restricción); sin embargo, ambos métodos mantienen la misma lógica de control para la resolución del EMS. Esto se puede apreciar en la Figura 4.20.

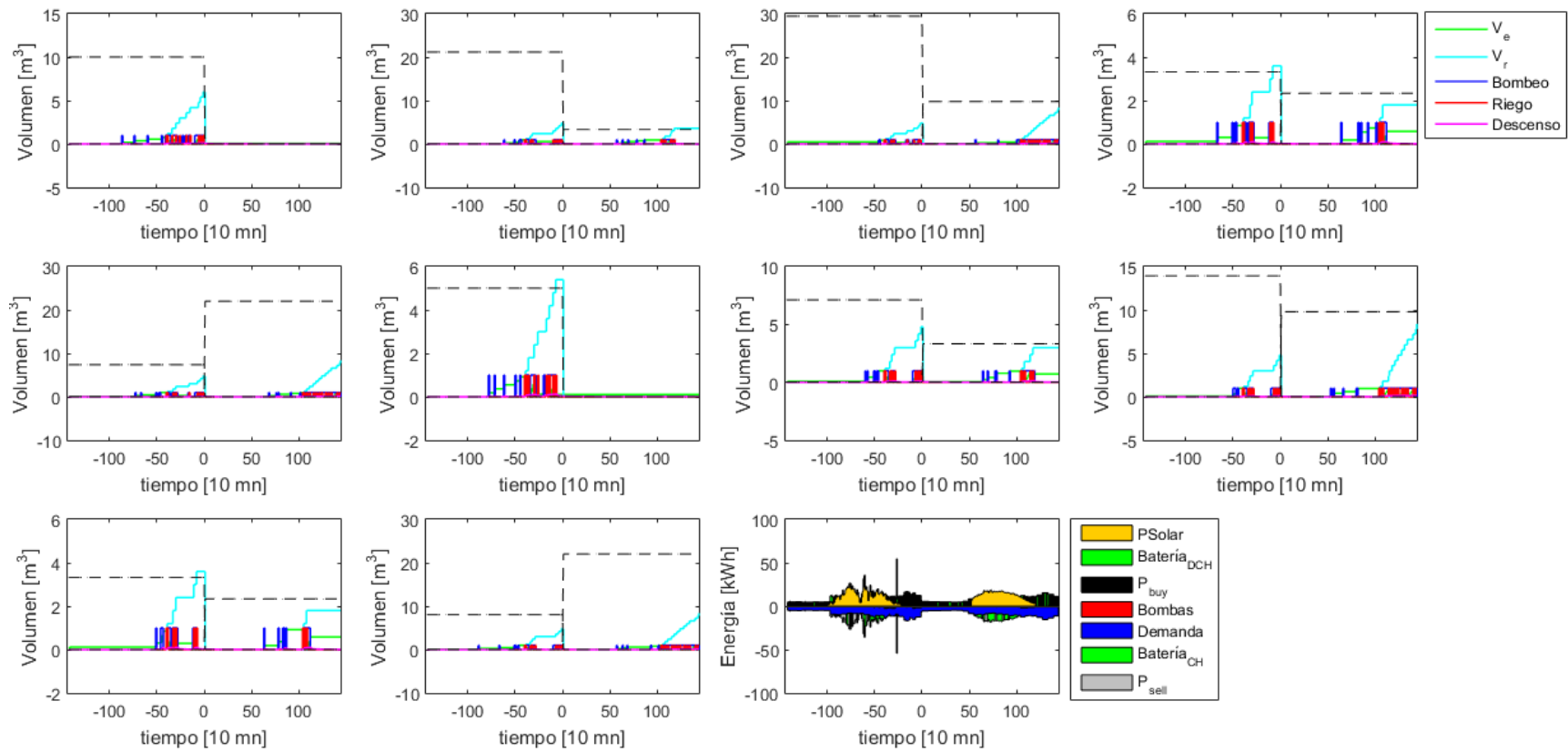


Figura 4.20: Operación del EMS, escenario base (Algebraico).

De esta forma, se opta por continuar con la ejecución de ambos métodos, algebraico y mediante GA, comparando los resultados entre ambos tanto en el uso de agua como en el rendimiento relativo de los cultivos. El Anexo C presenta las tablas de resultados completos de las soluciones con algoritmos genéticos y algebraica.

4.5.3. Escasez hídrica

Para los casos de escasez hídrica, se ponderan los datos de precipitaciones por los factores 0,85 (E1) y 0,7 (E2), representando una reducción de las precipitaciones de 15% y 30%, respectivamente. Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran los rendimientos relativos de los cultivos y la disponibilidad de agua para extracción desde el acuífero, utilizando el método algebraico.

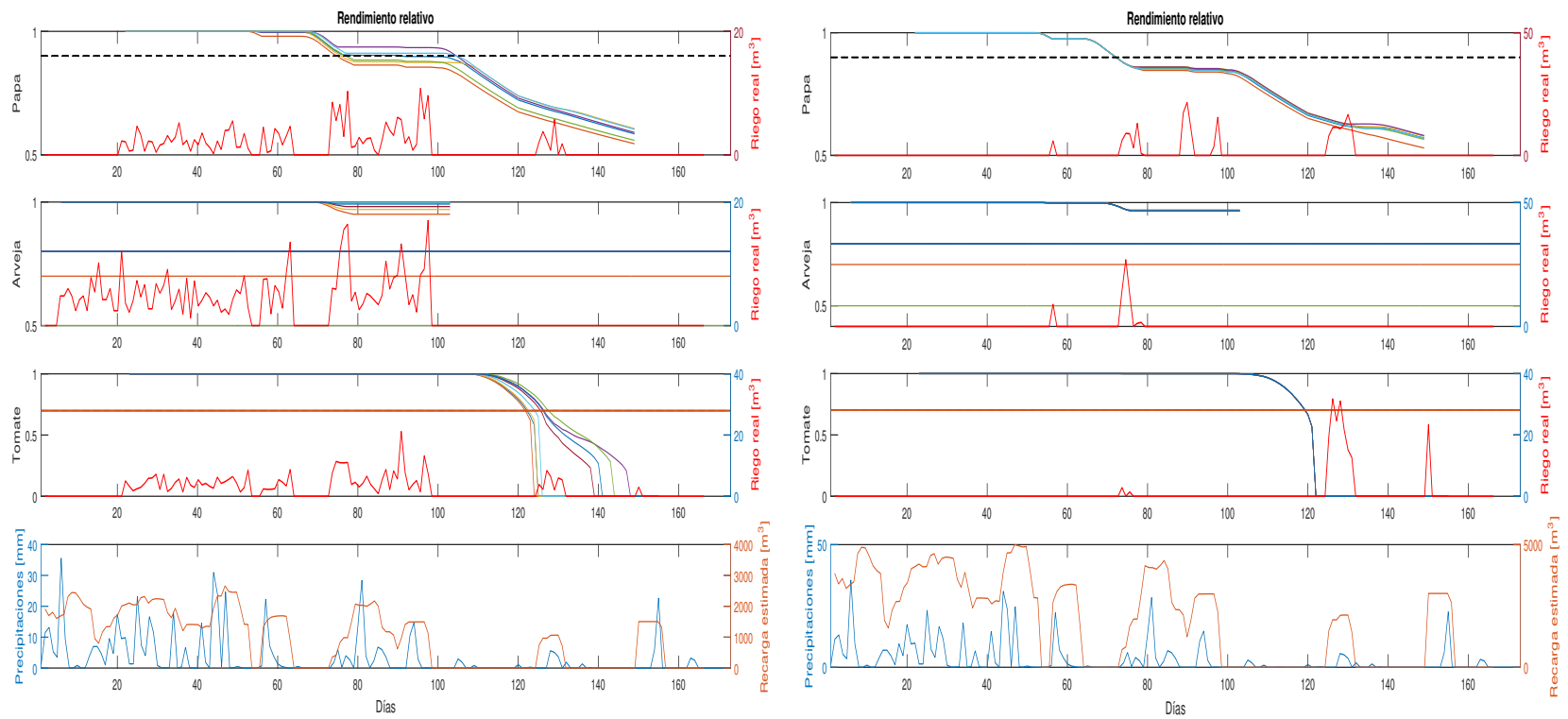


Figura 4.21: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 1 - GA (izq), Algebraico (der).

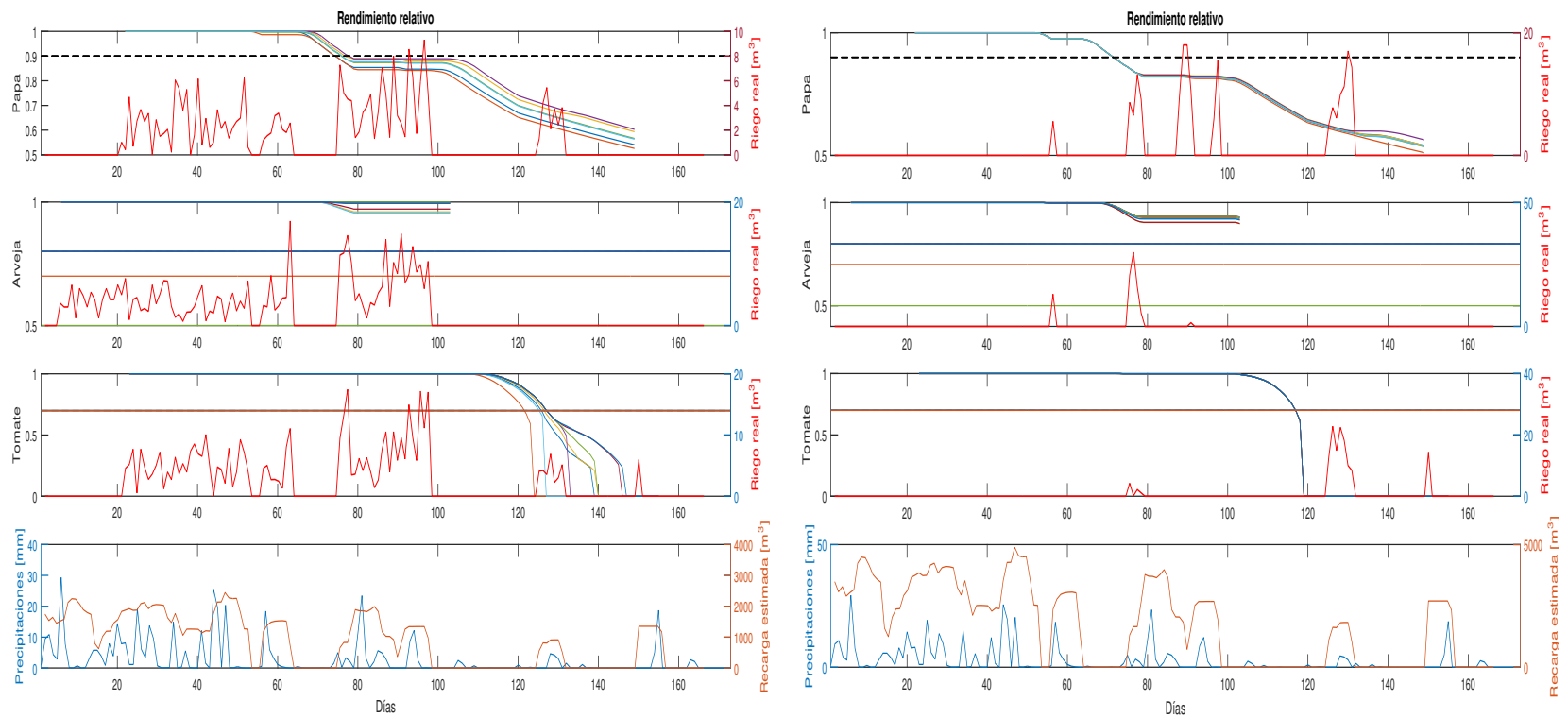


Figura 4.22: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 2 - GA (izq), Algebraico (der).

Para ambos casos se tienen rendimientos similares para todos los cultivos, siendo el caso de la arveja el que presenta las diferencias más significativas, en particular en el escenario 2, donde la solución con el método algebraico presenta un rendimiento menor que la solución con GA, pero de todas formas por sobre el rendimiento relativo mínimo.

Los consumos de agua se muestran en la Tabla 4.10 para ambos escenarios de reducción hídrica.

Tabla 4.10: Uso de agua escenarios 1 y 2.

Método	Escenario 1			Escenario 2		
	Volumen regado [m^3]			Volumen regado [m^3]		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
GA	223,21	484,41	382,57	233,16	431,66	440,38
Algebraico	198,04	66,57	184,19	192,15	86,43	131,82

Para el caso de GA, y con una reducción del 15 % en las precipitaciones, se utiliza un volumen total de agua para riego de 1.090 [m^3], mientras que para una reducción del 30 % en las precipitaciones, este volumen aumenta a 1.110 [m^3], es decir, un 1,8 % más. Comparado al caso base, esto equivale a un 6 % y un 4,3 % menos de extracción desde el acuífero, respectivamente. En este sentido, se dan dos efectos simultáneos: (i) la menor disponibilidad de agua para extraer desde el acuífero, lo que afecta la capacidad de extracción desde los pozos, y (ii) el menor aporte de las precipitaciones en el riego natural de los cultivos. Al existir menores precipitaciones, el sistema tiende a requerir más agua desde los pozos, pero como existe una menor recarga del acuífero, esta extracción está limitada.

Para el caso del método Algebraico, y con una reducción del 15 % en las precipitaciones, se utiliza un volumen total de agua para riego de 448,8 [m^3], mientras que para una reducción del 30 % en las precipitaciones, este volumen disminuye a 410,4 [m^3], es decir, un 8,56 % menos. Comparado al caso base, esto equivale a un 1,05 % y un 9,52 % menos de extracción desde el acuífero, respectivamente. Estos resultados son consistentes con la menor disponibilidad de agua de recarga que tiene el acuífero.

4.5.4. Variación en parámetros del acuífero

Si bien, y dada la formulación del WMS, la variación de los parámetros del acuífero no afecta los requerimientos de agua que calcula el EMS, sí afecta la capacidad de extracción de agua desde los pozos que tengan las bombas, que deben cumplir con la restricción fuerte de que el descenso de la cota hidráulica sea menor al umbral.

La Figura 4.23 muestra los resultados en el caso de que el acuífero sea de “mejor calidad”, mientras que la Figura 4.24 muestra el caso en que éste fuera de “peor calidad”.

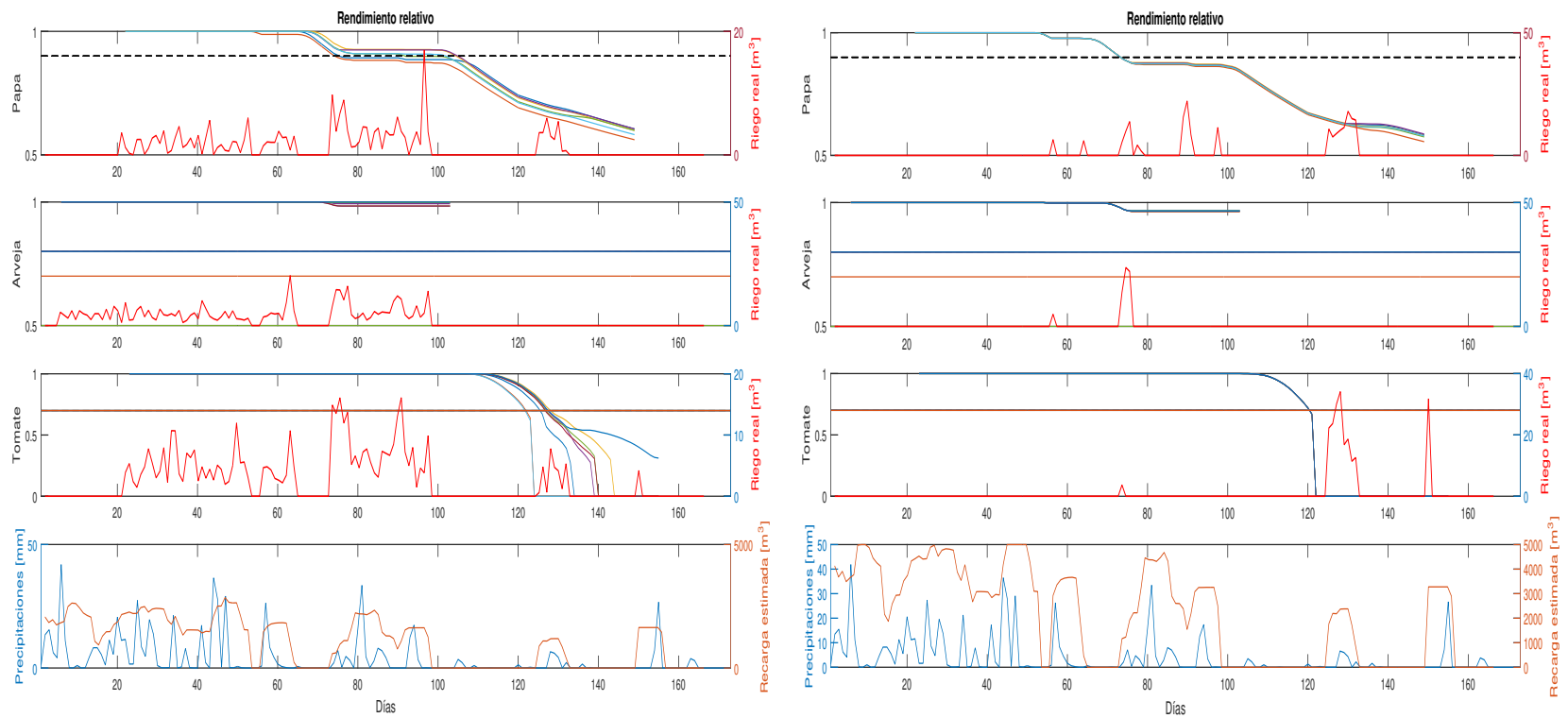


Figura 4.23: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 3 - GA (izq), Algebraico (der).

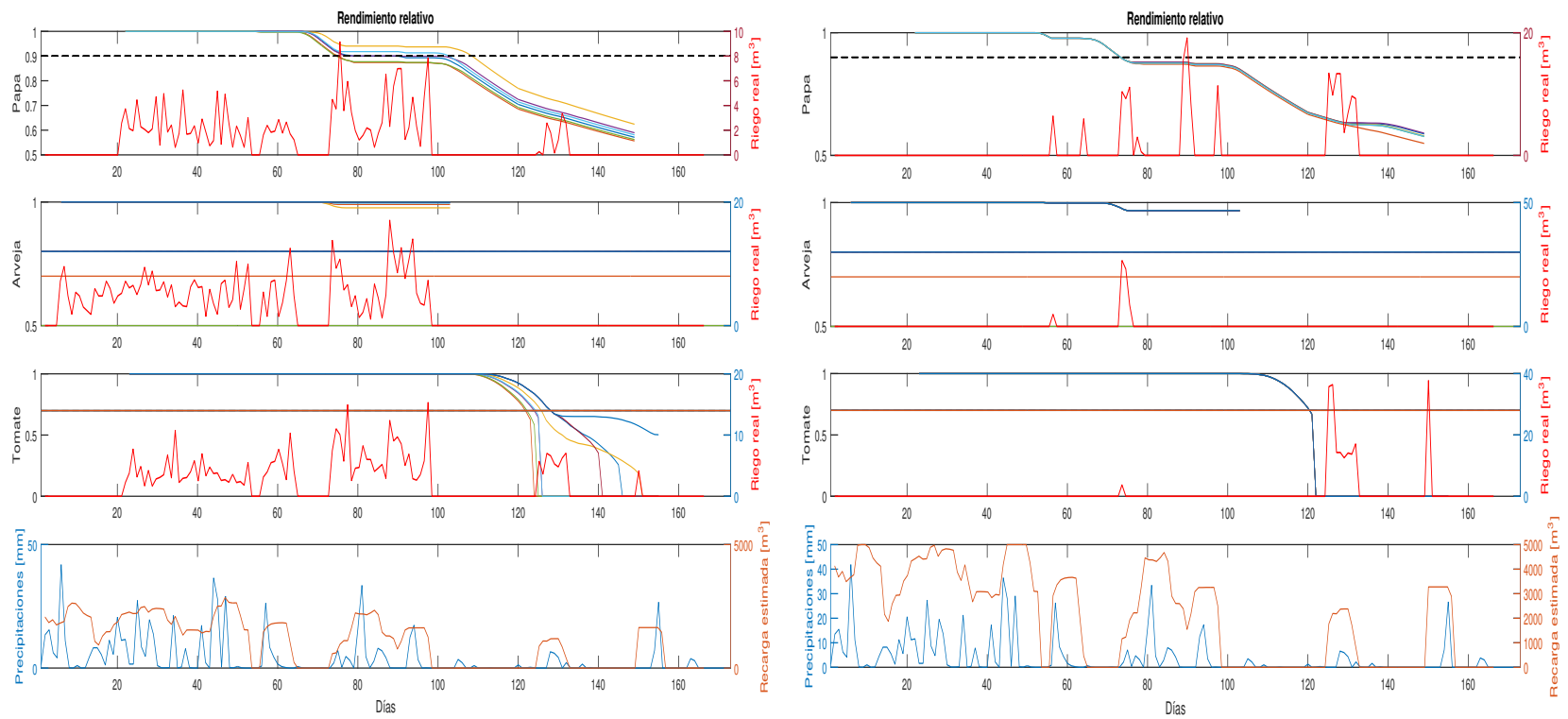


Figura 4.24: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 4 - GA (izq), Algebraico (der).

La Tabla 4.11 muestra los consumos de agua para los distintos tipos de cultivos en ambos escenarios.

Tabla 4.11: Uso de agua escenarios 3 y 4.

Método	Escenario 3			Escenario 4		
	Volumen regado [m^3]			Volumen regado [m^3]		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
GA	221,06	461,08	448,87	206,65	504,91	404,43
Algebraico	201,29	64,65	205,06	180,86	63,45	199,69

En el caso de la solución con Algoritmos Genéticos, para los cultivos de papa y tomate se aprecia que el agua requerida es menor en el escenario 4. Si bien esto es esperable, como el método de GA no es determinístico no se puede asegurar que esto no se deba simplemente a diferencias en las referencias de riego en ambas ejecuciones. En efecto, en la Figura 4.25 se puede apreciar que las referencias son distintas en ambos escenarios para un día y agricultor en particular, y de todas formas el optimizador el EMS busca cumplir con las referencias dadas. También se observa la diferencia en el descenso de la cota hidráulica, que es más pronunciado en el caso del acuífero de “peor calidad”.

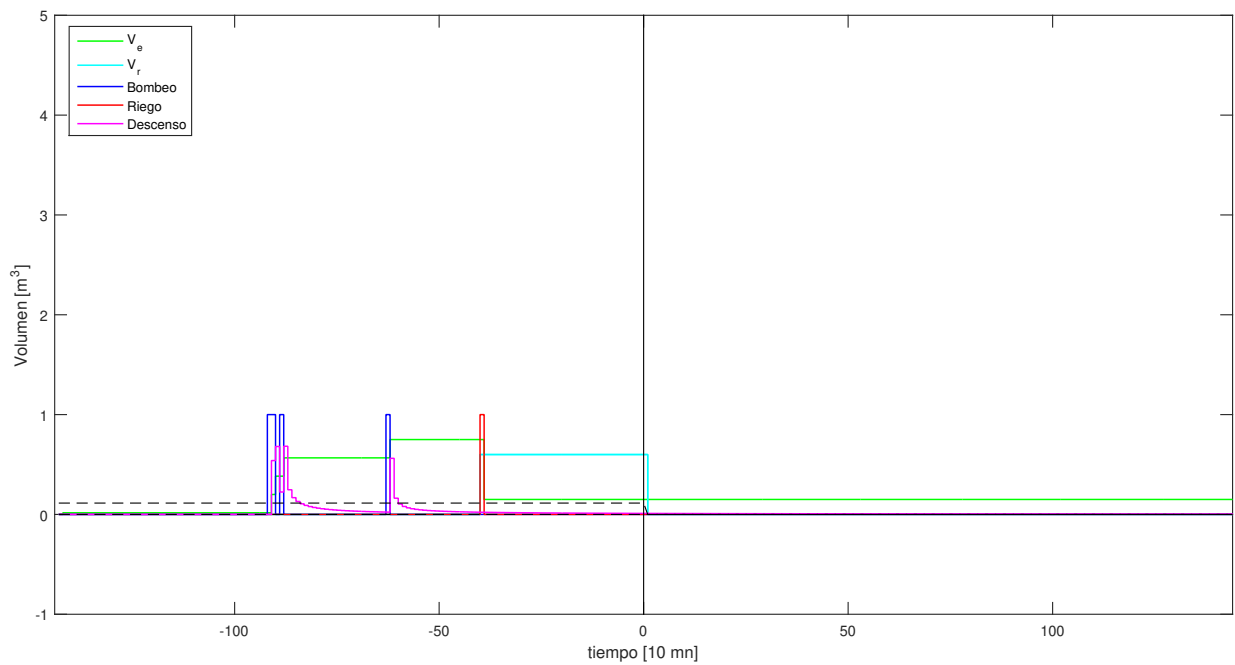
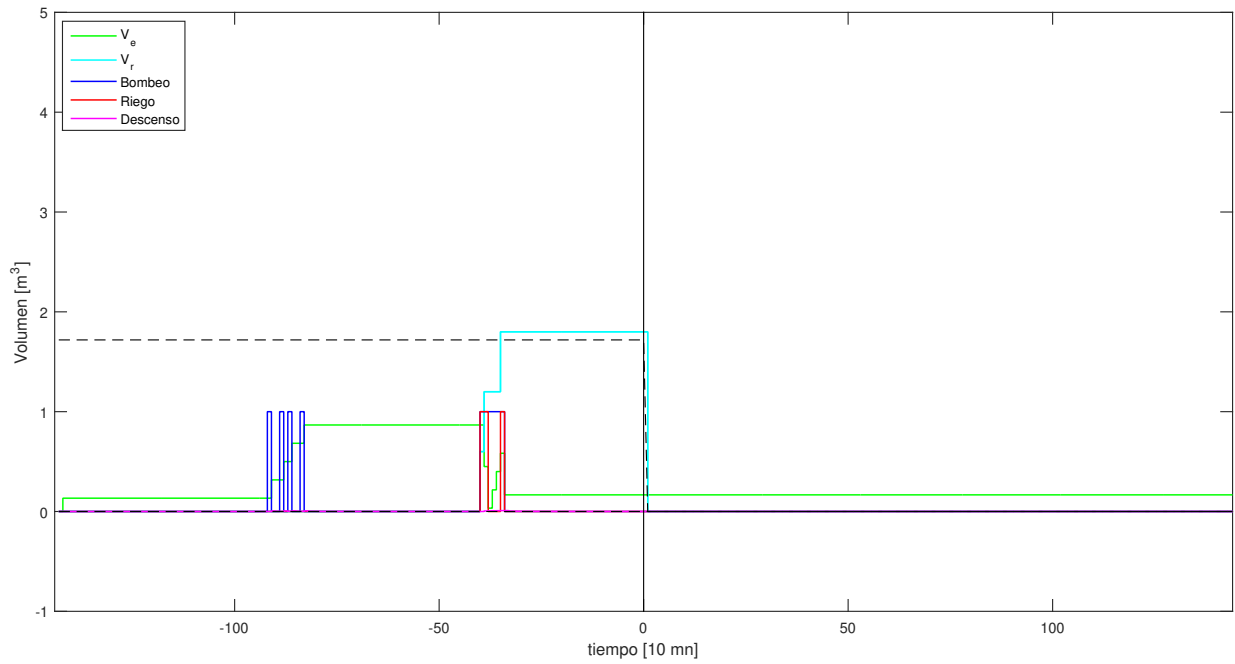


Figura 4.25: Riego para agricultor N°6, escenario 3 (arriba) y 4 (abajo)
- GA.

En el caso del método algebraico ocurre lo esperado, en que el acuífero de “mejor calidad” (E3), permite un mayor consumo de agua. Si bien el método de por sí debería entregar las mismas referencias de riego del WMS, esto es cierto sólo si los datos de entrada y parámetros de la simulación son iguales. En este caso, al variar los parámetros del acuífero se afectan los

riegos iniciales que pudo tener un cultivo en particular, lo que a su vez afecta la humedad retenida en el suelo y por consiguiente, pudiendo requerir un mayor riego en el futuro.

La Figura 4.26 muestra claramente esta situación en torno al día 140 para los cultivos de papa y tomate. Se aprecia que en unas muestras anteriores el riego realizado en el escenario 3 es mayor al escenario 4, impactando en que para las muestras siguientes el volumen de riego ideal del escenario 4 sea mayor al escenario 3.

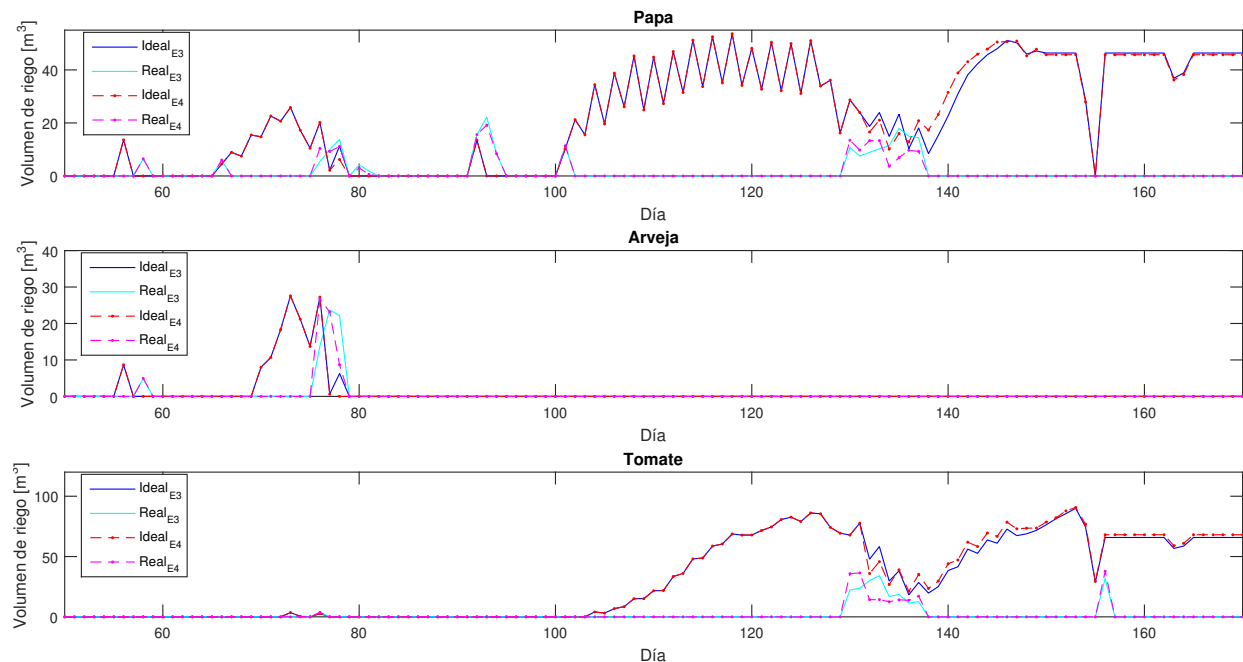


Figura 4.26: Riegos ideales y reales escenarios 3 y 4 - Algebraico.

Por otra parte, la Figura 4.27 muestra un ejemplo de la ejecución para un agricultor y día en particular, donde, ante un requerimiento similar de volumen de agua a extraer, la extracción desde el pozo del escenario 4 es menor al del escenario 3. Esto se debe a que en E3 se puede realizar un bombeo continuo sin que exista un descenso notorio en la cota hidráulica del acuífero, mientras que en E4 existe un descenso de la cota hidráulica tal que viola la exigencia de que el descenso. Es por esto que el EMS le indica a la bomba que deje de operar para que el acuífero se recupere y así se pueda seguir extrayendo, generando de esta forma una intermitencia en el bombeo que implica una menor disponibilidad de agua para riego.

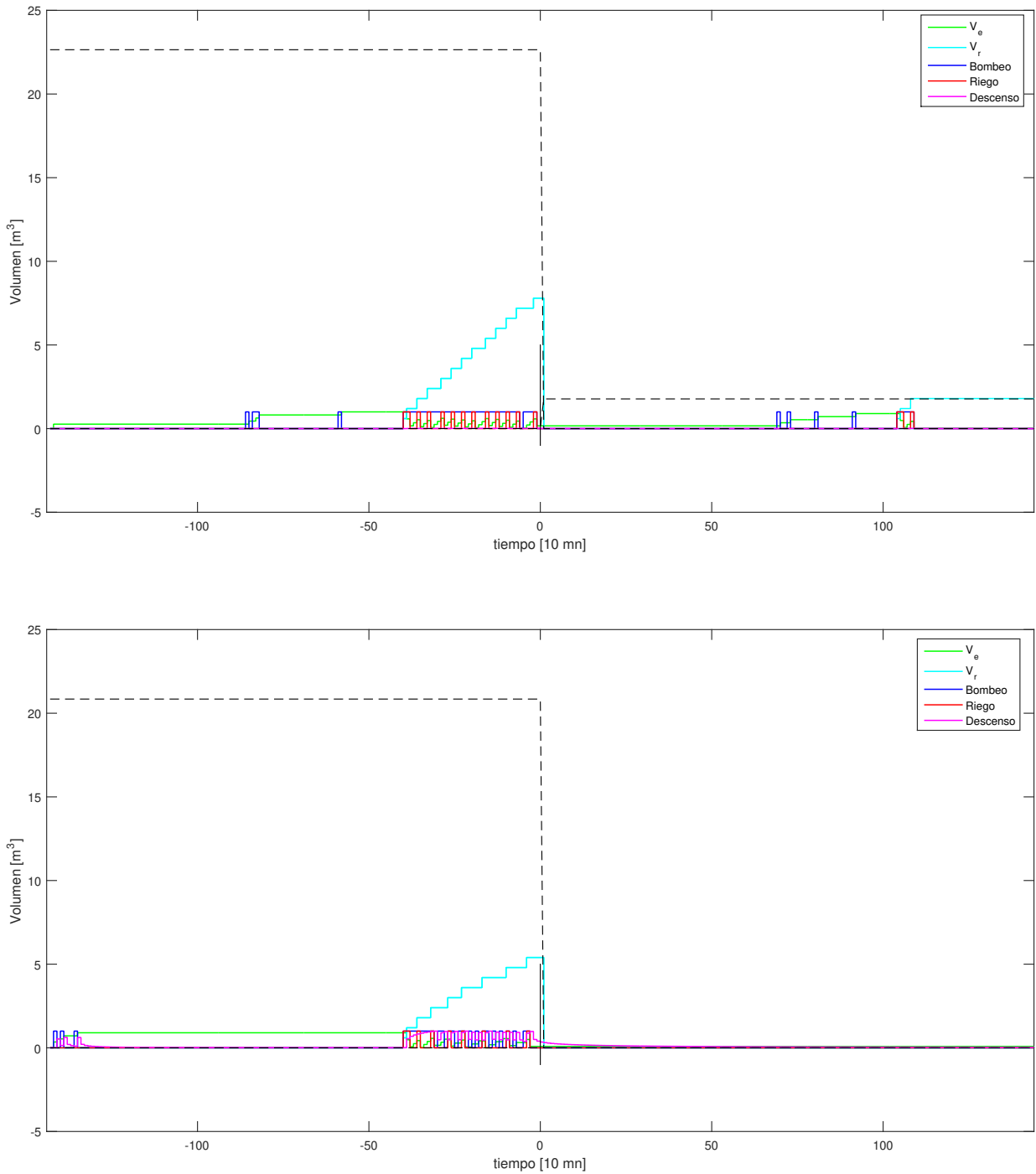


Figura 4.27: Riego para agricultor N°3, escenario 3 (arriba) y 4 (abajo) - Algebraico.

4.5.5. Variación en rendimiento mínimo

Como se mencionó anteriormente, la solución algebraica no tiene en cuenta los rendimientos mínimos esperados por los agricultores, por lo que esta solución no tiene variaciones respecto al caso base (E0). Se presentarán únicamente los resultados obtenidos con la opti-

mización del WMS mediante algoritmos genéticos.

La Tabla 4.12 muestra los consumos de agua para ambos escenarios. Como se puede apreciar, para todos los cultivos los requerimientos de agua son menores cuanto menor sean las exigencias de rendimiento mínimo. Esto es esperable, puesto que el optimizador se puede permitir reducir el rendimiento relativo sin aumentar los costos de operación del sistema por las menores penalizaciones existentes.

Tabla 4.12: Uso de agua escenarios 5 y 6.

Método	Escenario 5			Escenario 6		
	Volumen regado [m^3]			Volumen regado [m^3]		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
GA	240,65	471,80	453,34	212,96	452,71	398,13

La Figura 4.28 muestra los riegos y rendimientos relativos para los cultivos presentes en la comunidad ante variaciones en los rendimientos mínimos esperados. Se observa que en ninguno de los dos casos los cultivos de papa y tomate cumplen con los umbrales requeridos.

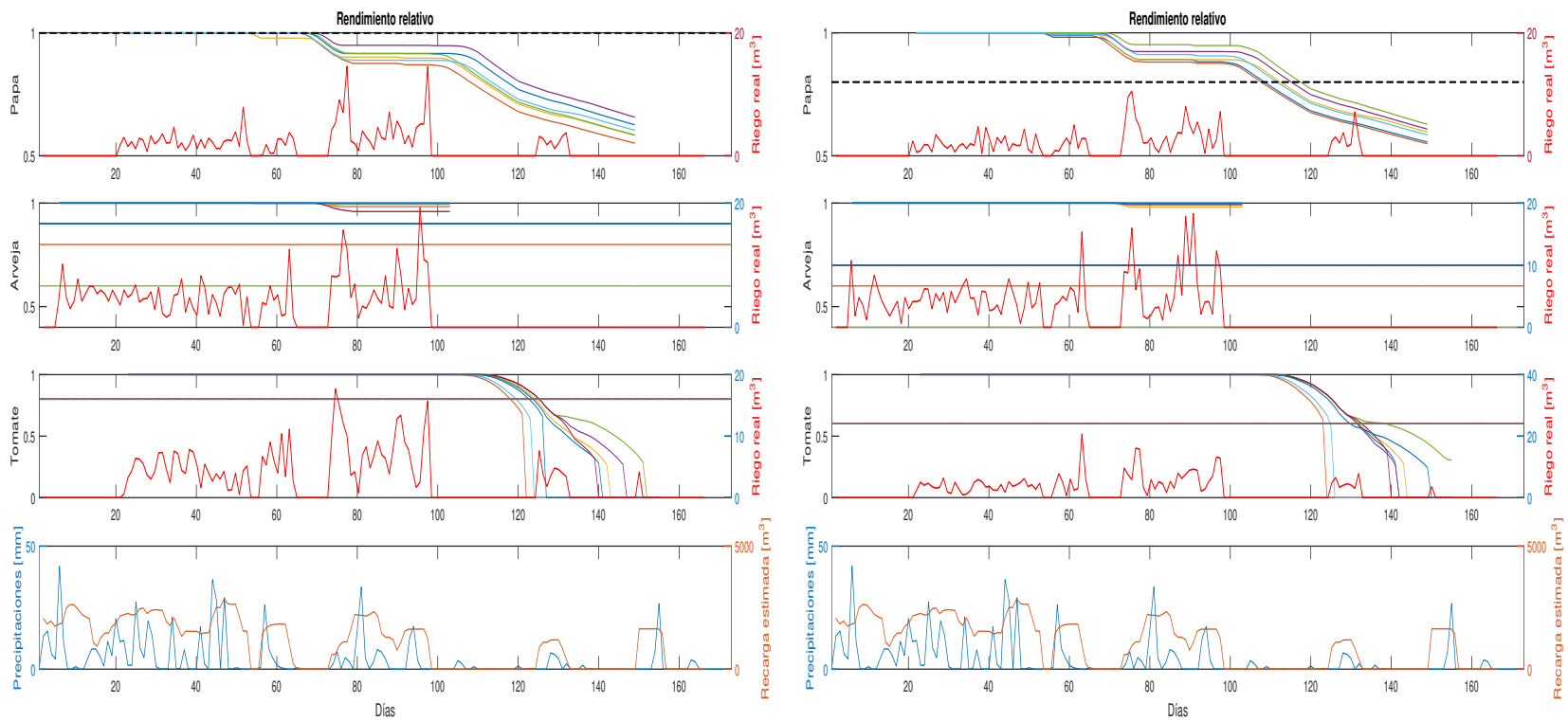


Figura 4.28: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica, escenario 5 (izq) y 6 (der).

Cabe destacar que, según la ecuación (3.30), la penalización asociada al rendimiento ocurre sólo cuando los rendimientos están por debajo del umbral definido. Lo anterior permite explicar en parte el por qué los cultivos de arveja tienen un rendimiento relativo menor en el escenario 5 respecto al escenario 6: en ambos casos los rendimientos no son penalizados, puesto que están por sobre el umbral definido.

Aún cuando en el E5 se tiene un volumen de agua regado mayor al E6 para la arveja, el rendimiento final obtenido es menor. Esto ocurre ya que no sólo es importante el volumen de agua regado, sino que también es relevante los instantes en que se riega. En esto cobra relevancia el método no determinístico y el resultado subóptimo que entregan los algoritmos genéticos.

Para el cultivo de la papa, se aprecia que al incrementar la exigencia sobre el rendimiento relativo, en el E5 se obtiene un umbral de 1, que puede ser mantenido inicialmente en gran parte de los casos, pero que a contar de la escasez de agua en torno al día 70, ya no puede ser logrado. En el E6, se aprecia que ya en torno al día 60 los cultivos en su mayoría reducen su rendimiento relativo. Esta instancia muestra que la mayor exigencia en los rendimientos tiene efectos en la programación del riego.

En el caso del tomate, se aprecia que en el E5 parte de los cultivos bajan del umbral en un periodo en que no se podía realizar riego, por lo que no se podían realizar acciones correctivas; sin embargo, al existir agua disponible para riego, se genera una acción de control más agresiva que aquella del E6, puesto que los rendimientos ya están siendo penalizados. Como se mencionó anteriormente, no solo es importante la cantidad de riego, sino que los instantes en que éste se realiza. Así, la mayoría de los cultivos no logran sobrevivir, a excepción de uno en el E6 (disminución en el umbral de rendimiento relativo).

4.5.6. Resumen de resultados

Las Tablas 4.13 y 4.14 muestra un resumen de los resultados más relevantes para los distintos escenarios.

Tabla 4.13: Resultados por escenario con GA en optimización del WMS.

	Costo EMS [$M\$$]	Costo WMS [$M\$$]	Agua extraída [m^3]
E0	120.343	1.514	1.160
E1	127.135	1.511	1.090
E2	140.840	1.467	1.110
E3	123.473	1.615	1.131
E4	122.266	1.636	1.160
E5	147.456	1.550	1.166
E6	121.641	1.590	1.064

Tabla 4.14: Resultados por escenario con resultado algebraico del WMS.

	Costo EMS [$M\$$]	Costo WMS [$M\$$]	Agua extraída [m^3]
E0	197.447	1.509	453,6
E1	208.417	1.472	448,8
E2	300.555	1.401	410,4
E3	202.083	1.507	471,0
E4	195.467	1.504	444,0

Primero, cabe destacar que la función de optimización del EMS - ecuación (3.26) - consiste en minimizar los costos, mientras que la del WMS - ecuación (3.30) - tiene como objetivo el maximizar los beneficios. Como estas funciones objetivos tienen términos que le asocian un costo a no cumplir con los requerimientos de agua o con los rendimientos mínimos, no tienen un sentido que pueda ser analizado de forma puramente económica.

Como tendencia para ambos métodos propuestos de resolución, se aprecia que en los escenarios de menor disponibilidad de recursos hídricos (**E1** y **E2**), se tienen costos de operación incrementales del EMS según menor sea la disponibilidad de agua. Estos mayores costos de operación se deben a que, si bien el agua extraída es menor según existan menos precipitaciones, la demanda de agua para riego del WMS es mayor (con el fin de compensar las menores precipitaciones). Como la operación en tiempo real no puede cumplir con estos mayores volúmenes demandados (tanto por poca disponibilidad del acuífero como por limitaciones técnicas), existen mayores costos asociados de no regar.

Por su parte, el WMS presenta menores beneficios según existan menores precipitaciones, lo cual es lo esperable puesto que los rendimientos que logran los cultivos son menores (en particular el cultivo de papa, que es el que presenta las variaciones). Para el método algebraico es necesario recordar que no se utiliza la ecuación (3.30) de maximización del WMS para la operación; aún así, se obtiene la misma tendencia que en el método basado en algoritmos genéticos.

Para los escenarios de variación de los parámetros del acuífero (**E3** y **E4**), en el método algebraico se observa que los costos de operación del EMS son mayores mientras “mejor” sea el acuífero. Para explicar esta situación, se deben considerar dos situaciones: (i) la mayor disponibilidad de extracción de agua, y por consiguiente de riego, implica que en iteraciones sucesivas se requerirá un menor volumen de agua respecto a un caso en que hay poca disponibilidad de agua y (ii) el tiempo de muestreo de 10 minutos implica que cuando se realiza la acción de control de bombeo o de riego, éste se realiza durante los 10 minutos continuos. Así, al existir un requerimiento reducido de agua, es probable que éste sea superado, lo que genera un costo asociado al “agua perdida” (C_w^{lst}).

Acorde a lo esperado, el agua extraída desde el acuífero es mayor según éste sea de mejor calidad: el “peor” acuífero (**E4**) tiene una extracción menor que el caso base (**E0**) y éste a su vez extrae menos agua que el caso en que se tenga un acuífero de mejor calidad (**E3**). Por otra parte, no se tiene un resultado consistente en los beneficios obtenidos en la función objetivo del WMS: cabría esperar que a mejor calidad del acuífero se tuvieran mayores beneficios, y

si bien el los escenarios 3 y 4 se sigue esa tendencia, el escenario base obtiene un beneficio mayor. Esto se puede deber a diversos factores, como pueden ser la temporalidad de los riegos realizado (por ejemplo, se puede cumplir la mayor parte del tiempo con los riegos establecidos por el WMS, pero que en los momentos críticos esto no sea así) e incluso al método mismo de resolución del EMS.

Los escenarios que reflejan una variación de los rendimientos mínimos (**E5** y **E6**) fueron resueltos con algoritmos genéticos, y entregan resultados dentro de lo que cabría esperar: al ser más exigente en el rendimiento mínimo (E5), disminuyen los beneficios del WMS por la mayor diferencia entre el rendimiento mínimo umbral a mantener, y aumentan los costos de operación del EMS por la mayor cantidad de agua requerida para riego. Cabe destacar que si bien el escenario base (E0) se encuentra en una situación intermedia entre E5 y E6 (situación que se ve reflejada en el volumen de agua extraída), sus costos de operación tanto del EMS como del WMS no siguen este comportamiento. El mecanismo de solución de los algoritmos genéticos tiene un impacto en este sentido, ya que no se asegura que estas soluciones consistan en un óptimo global.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo, se planteó un diseño para la gestión de energía y agua con fines agrícolas en una micro-red conectada.

En el caso del WMS, se estudiaron dos métodos para la determinación de los volúmenes ideales de riego de los cultivos: uno implementó una función objetivo, resuelta con algoritmos genéticos, que maximiza el beneficio que proveen los cultivos para la comunidad, penalizando el no cumplimiento de un rendimiento mínimo por agricultor; mientras que el otro despeja el volumen de agua tal que hace que el rendimiento del cultivo sea máximo. Entre las restricciones relevantes está la consideración que no se puede extraer mayor volumen de agua que el que se recarga del acuífero en un periodo determinado, asegurando de esta forma la sustentabilidad del sistema. Los volúmenes de agua determinados son enviados al EMS.

Por su parte, el EMS busca minimizar los costos de operación del sistema, incorporando factores que penalizan tanto la falta de agua como su exceso, basado en los volúmenes de referencia enviados por el WMS. Una restricción relevante da cuenta del máximo descenso en la cota hidráulica que se permite al realizar el bombeo, evitando de esta forma afectar el suministro entre pozos de distintos agricultores.

La estrategia propuesta permitió resolver el problema planteado, logrando la interacción entre los problemas resueltos a distintas escalas de tiempo (el WMS en un horizonte de 28 días y el EMS en un horizonte de 24 horas) compartiendo las consignas de volumen óptimo.

Los resultados de ejecutar el esquema propuesto en distintos escenarios muestran que el método más eficiente para la resolución de los requerimientos de agua consiste en el método algebraico, esto a pesar de que no incorpora estimaciones hacia el futuro ni puede incorporar los requerimientos de rendimientos mínimos exigidos.

Adicionalmente, se aprecia que no todos los cultivos logran cumplir con los requerimientos mínimos. Esto se debe a que en periodos en que existen pocas lluvias, no existe recarga del acuífero, por lo que no se puede realizar riego. Si estos periodos se dan en épocas críticas para el cultivo, es probable que el rendimiento de se vea disminuido gravemente, llegando a perder la totalidad de la producción. En ese sentido, para los datos meteorológicos del año 2015 para la zona, el cultivo de arveja fue el que obtuvo los mejores rendimientos, seguido del cultivo de papa. En ese sentido, el tomate no logró sobreponerse a la falta de agua en sus etapas finales de crecimiento.

La estrategia de resolución del WMS basada en el método algebraico demostró ser más conveniente, tanto en tiempo de resolución como en optimización del volumen de agua extraído, a pesar de no tener en consideración restricciones por limitaciones hídricas. Su simple derivación desde las ecuaciones de evapotranspiración y la obtención del riego mínimo óptimo diario tal que se mantenga el rendimiento, hacen que pueda ser utilizada de forma directa y como una aproximación en el largo plazo.

La metodología implementada permite modificaciones y extensiones, pudiendo ser aplicada en un caso real a escala.

5.1. Trabajo futuro

Como continuación de este trabajo, se proponen los siguientes puntos como una forma de mejorar los resultados de este trabajo:

1. Determinar un volumen óptimo del estanque: un estanque acorde a los volúmenes de riego requeridos permitiría almacenar una mayor cantidad de agua en los momentos del día donde hay un exceso de energía. De lo que se pudo apreciar en la operación, para las magnitudes de los cultivos planteados, los estanques proyectados son llenados constantemente a su volumen máximo, por lo que estanques de una mayor capacidad podrían reducir los costos de operación del EMS.
2. Considerar la acumulación de agua en el acuífero: si bien en este trabajo se realizó una primera aproximación de considerar la acumulación en el acuífero (algunos resultados del escenario base se pueden apreciar en el Anexo D), se debe además tomar en cuenta una descarga natural del acuífero, además de tener en cuenta sus dimensiones físicas. El considerar esta acumulación permitiría realizar riegos aún cuando hay épocas en que no existen precipitaciones.
3. Considerar salinidad: existen ecuaciones para determinar requerimientos de riego, similares a las utilizadas en este trabajo, que consideran la salinidad del agua y terreno en el cálculo. Esto cobra especial relevancia en las zonas costeras (como al caso de estudio al que hace referencia este trabajo) y en aquellas en que exista la posibilidad de optar por agua desalinizada, especialmente si se toma en consideración la búsqueda de alternativas para realizar el riego ante los escenarios actuales de sequías.
4. Simplificar la función objetivo del WMS de forma tal que pueda ser resuelto en tiempos manejables y con resultados más cercanos al óptimo global y consistentes entre sí: La solución con algoritmos genéticos de la función objetivo de (3.30) implementada no obtuvo resultados consistentes ni optimizó el agua requerida, además de tomar un largo tiempo para obtener los resultados (en esto es relevante el número de variables que deben ser optimizadas, que son un volumen de riego por cada uno de los 22 cultivos para los 28 días, es decir, 616 variables de optimización).
5. Con algunas modificaciones menores, la estrategia planteada permitiría determinar qué tipos de cultivos serían los más adecuados en base a las características de los sistemas de riego implementados y las características meteorológicas, y los rendimientos y beneficios que se podrían esperar de dichos cultivos.

Bibliografía

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “World Population 2017,” 2017. [Online]. Available: https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_Wallchart.pdf
- [2] R. Ferroukhi, D. Nagpal, A. Lopez-Peña, T. Hodges, R. Mohtar, B. Daher, S. Mohtar, and M. Keulertz, “Renewable energy in the water, energy & food nexus,” *IRENA, Abu Dhabi*, 2015.
- [3] C. Zhang, X. Chen, Y. Li, W. Ding, and G. Fu, “Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 195, pp. 625 – 639, 2018.
- [4] United Nations, “The Sustainable Development Goals Report,” New York, USA, 2018.
- [5] J. Sandoval, *El Riego en Chile*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, 2003.
- [6] R. D. Garreaud, J. P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H. H. Sepúlveda, and D. Veloso-Aguila, “The central chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective,” *International Journal of Climatology*, vol. 40, no. 1, pp. 421–439, 2020.
- [7] D. Bozkurt, M. Rojas, J. P. Boisier, and J. Valdivieso, “Climate change impacts on hydroclimatic regimes and extremes over andean basins in central chile,” *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–29, 2017.
- [8] Información para el Desarrollo Productivo Ltda., “Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050,” jul 2016.
- [9] Rocky Mountain Institute and Carbon War Room, “Renewable Microgrids: Profiles form Islands and Remote Communities across the Globe,” Boulder, USA, 2015.
- [10] Comisión Nacional de Energía, “Energía Abierta,” 2018. [Online]. Available: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/241323/CALID-DEL-SERVI-SAIDI-REGIO/>
- [11] Instituto Nacional de Estadísticas, “Encuesta Suplementaria de Ingresos - ESI,” Chile, 2015.
- [12] C. Marnay, S. Chatzivasileiadis, C. Abbey, R. Iravani, G. Joos, P. Lombardi, P. Mancarella, and J. von Appen, “Microgrid evolution roadmap,” in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, Sept 2015, pp. 139–144.

- [13] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 248–257, Jan 2005.
- [14] A. Bidram and A. Davoudi, “Hierarchical structure of microgrids control system,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, Dec 2012.
- [15] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T. Lee, and P. C. Loh, “Advanced control architectures for intelligent microgrids—part i: Decentralized and hierarchical control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, April 2013.
- [16] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, M. Ismail, and M. Moghavvemi, “Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 821 – 835, 2016.
- [17] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, “Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380–3389, Aug 2013.
- [18] R. Palma-Behnke, C. Benavides, F. Lanas, B. Severino, L. Reyes, J. Llanos, and D. Sáez, “A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 996–1006, June 2013.
- [19] M. Ellis, H. Durand, and P. D. Christofides, “A tutorial review of economic model predictive control methods,” *Journal of Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1156 – 1178, 2014, economic nonlinear model predictive control.
- [20] L. W. McKenzie, “Turnpike theory,” *Econometrica*, vol. 44, no. 5, pp. 841–865, 1976.
- [21] A. S. of Civil Engineers. Task Committee on Sustainability Criteria and U.-I. P. M-4.3, *Sustainability Criteria for Water Resource Systems*. American Society of Civil Engineers, 1998.
- [22] J. W. Labadie, “Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130, no. 2, pp. 93–111, 2004.
- [23] W. Yeh, “Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review,” *Water Resources Research*, vol. 21, no. 12, pp. 1797–1818, 1985.
- [24] M. Brdys, M. Grochowski, T. Gminski, K. Konarczak, and M. Drewa, “Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems,” *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 6, pp. 751 – 767, 2008, special Section on Large Scale Systems.
- [25] N. G. Nikam and D. G. Regulwar, “Optimal Operation of Multipurpose Reservoir for Irrigation Planning with Conjunctive Use of Surface and Groundwater,” *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 7, no. June, pp. 636–646, 2015.
- [26] M. E. Jensen, *Water consumption by agricultural plants (Chapter 1)*. New York: Academic Press, 1968.
- [27] R. J. Hanks, “Model for predicting plant yield as influenced by water use,” *Agronomy journal*, vol. 66, no. 5, pp. 660–665, 1974.

- [28] J. Doorenbos, A. H. Kassam, and C. I. M. Bentvelsen, *Yield response to water*, ser. FAO irrigation and drainage paper. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979.
- [29] H. L. Penman, “Estimating evaporation,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 37, no. 1, pp. 43–50, 1956.
- [30] J. L. Monteith, “Evaporation and Environment,” in *The State and Movement of Water in Living Organisms*, ser. Symposia of the Society for Experimental Biology, S. for Experimental Biology (Great Britain), Ed. Published for the Company of Biologists, 1965, no. 19, pp. 205–234.
- [31] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*, ser. FAO Irrigation and Drainage. Rome: FAO, 1998, vol. 56.
- [32] P. Steduto, Food, and A. O. of the United Nations, *Crop Yield Response to Water*, ser. FAO irrigation and drainage paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012, vol. 66.
- [33] D. Raes, S. Geerts, E. Kipkorir, J. Wellens, and A. Sahli, “Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model,” *Agricultural Water Management*, vol. 81, no. 3, pp. 335 – 357, 2006.
- [34] D. Raes, *BUDGET - a soil water and salt balance model. Reference Manual*. Leuven, Belgium: K.U.Leuven, Department Land Management, 2002.
- [35] S. Vedula and K. D. Nagesh, “An integrated model for optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops,” *Water Resources Research*, vol. 32, no. 4, pp. 1101–1108, 1996.
- [36] M. J. Reddy and D. N. Kumar, “Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 52, no. 4, pp. 686–701, 2007.
- [37] X. Cai, D. C. McKinney, and L. S. Lasdon, “Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 129, no. 1, pp. 4–17, 2003.
- [38] P. E. Georgiou, D. M. Papamichail, and S. G. Vougioukas, “Optimal irrigation reservoir operation and simultaneous multi-crop cultivation area selection using simulated annealing,” *Irrigation and Drainage*, vol. 55, no. 2, pp. 129–144, 2006.
- [39] P. E. Georgiou and D. M. Papamichail, “Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions,” *Irrigation Science*, vol. 26, no. 6, pp. 487–504, Sep 2008.
- [40] I. Shiklomanov, “World fresh water resources,” in *Water in Crisis: A Guide to the World’s Fresh Water Resources*, P. Gleick, Ed. Oxford University Press, 1993, ch. 2, pp. 13–24.

- [41] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), “AQUASTAT,” 2016. [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm
- [42] R. J. Schicht and W. C. Walton, “Hydrologic budgets for three small watersheds in illinois,” Illinois State Water Survey, Tech. Rep., 1961.
- [43] R. W. Healy and P. G. Cook, “Using groundwater levels to estimate recharge,” *Hydrogeology journal*, vol. 10, no. 1, pp. 91–109, 2002.
- [44] V. H. Vu and B. J. Merkel, “Estimating groundwater recharge for hanoi, vietnam,” *Science of The Total Environment*, vol. 651, pp. 1047 – 1057, 2019.
- [45] C. Kumar and P. Seethapathi, “Assessment of natural groundwater recharge in upper ganga canal command area,” *Journal of Applied Hydrology*, vol. 15, no. 4, pp. 13–20, 2002.
- [46] J. S. Famiglietti, “The global groundwater crisis,” *Nature Climate Change*, vol. 4, no. 11, p. 945, 2014.
- [47] K. T. Sanders and S. F. Masri, “The energy-water agriculture nexus: the past, present and future of holistic resource management via remote sensing technologies,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 117, pp. 73 – 88, 2016.
- [48] E. Karan, S. Asadi, R. Mohtar, and M. Baawain, “Towards the optimization of sustainable food-energy-water systems: A stochastic approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 171, pp. 662 – 674, 2018.
- [49] A. M. García, I. F. García, E. C. Poyato, P. M. Barrios, and J. R. Díaz, “Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 670 – 682, 2018.
- [50] J. Powell, J. Welsh, and R. Farquharson, “Investment analysis of solar energy in a hybrid diesel irrigation pumping system in new south wales, australia,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 224, pp. 444 – 454, 2019.
- [51] M. E. Jensen and R. G. Allen, *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements*, 2nd ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [52] T. C. on standardization of reference evapotranspiration, *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*. ASCE, 2005.
- [53] N. H. Rao, P. B. S. Sarma, and S. Chander, “Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water,” *Water Resources Research*, vol. 26, no. 4, pp. 551–559, 1990.
- [54] C. Brouwer, K. Prins, and M. Heibloem, *Irrigation water management: irrigation scheduling*, ser. Training manual no. 4. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1989.
- [55] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.

- [56] Y. Riffonneau, S. Bacha, F. Barruel, and S. Ploix, “Optimal power flow management for grid connected pv systems with batteries,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 309–320, July 2011.
- [57] S. Vemuri, W. Hobbs, and L. Lemonidis, “Hydro coordination in an energy management system,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 25, no. 1, pp. 347 – 350, 1992, iFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems, Munich, Germany, 9-11 March.
- [58] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, “ODEPA,” 2019. [Online]. Available: <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>
- [59] R. Morales, “Planificación de Micro-redes para Comunidades Rurales con Caracterización de Incertidumbre de los Recursos Renovables y Demanda Eléctrica,” 2017.
- [60] C. Ahumada, “Sistema de Gestión de Agua Acoplado a una Micro-red para Comunidades Mapuche,” 2019.
- [61] T. Roje, L. G. Marín, D. Sáez, M. Orchard, and G. Jiménez-Estévez, “Consumption modeling based on markov chains and bayesian networks for a demand side management design of isolated microgrids,” *International Journal of Energy Research*, vol. 41, no. 3, pp. 365–376, 2017.
- [62] J. Löfberg, “Yalmip : A toolbox for modeling and optimization in matlab,” in *In Proceedings of the CACSD Conference*, Taipei, Taiwan, 2004.
- [63] C. Ojha, R. Berndtsson, and P. Bhunya, *Engineering Hydrology*. Oxford University Press, 2008.
- [64] J. Boussinesq, “Recherches théoriques sur l’écoulement des nappes d’eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources,” *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, vol. 10, pp. 5–78, 1904.
- [65] A. Manglik, S. Rai, and V. Singh, “Modelling of aquifer response to time varying recharge and pumping from multiple basins and wells,” *Journal of Hydrology*, vol. 292, no. 1, pp. 23 – 29, 2004.
- [66] A. W. Harbaugh, *MODFLOW-2005*, ser. Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. U.S. Geological Survey modular ground-water model, 2005.
- [67] C. Theis, “The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 16, no. 2, pp. 519–524, 1935.
- [68] H. H. Cooper and C. E. Jacob, “A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history,” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 27, no. 4, pp. 526–534, 1946.
- [69] S. Neuman, “Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response,” *Water Resources Research*, vol. 11, no. 2, pp. 329–342, 1975.

- [70] —, “Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table,” *Water Resources Research*, vol. 8, no. 4, pp. 1031–1045, 1972.
- [71] Y. K. Birsoy and W. K. Summers, “Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data,” *Groundwater*, vol. 18, no. 2, pp. 137–146, 1980.
- [72] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + data structures = evolution programs*. Springer Science & Business Media, 1995.

Anexo A

Antecedentes hidrogeológicos

Este anexo revisa algunos conceptos hidrogeológicos importantes para entender los modelos de bombeo y aguas subterráneas utilizados.

A.1. Acuíferos

Un acuífero es una formación geológica permeable y saturada que contiene y transmite una cantidad significativa de agua. Las fuentes de agua del acuífero son principalmente por infiltración, mientras que su flujo es principalmente horizontal.

Si se considera el espacio que tienen los acuíferos, estos pueden ser clasificados en [63]:

- **Confinado:** Como su nombre lo indica, está confinado entre dos capas impermeables que hacen que el agua esté sometida a presión, por lo que la cota hidráulica está *por sobre* la capa confinante superior (Figura A.1a).
- **No confinado:** Es aquel en que el acuífero tiene una vía libre hacia la atmósfera, por lo que el agua no está sometida a más presión que la atmosférica (Figura A.1b).
- **Semi-confinado:** Es cuando el acuífero tiene una de sus capas semi-impermeables, permitiendo el paso de agua hacia el acuífero por diferencias de presión externas (Figura A.1c).

Existen distintas características que definen el comportamiento del acuífero¹:

- **Coefficiente de almacenamiento (S):** Es el volumen de agua que libera el acuífero al disminuir en una unidad la cota hidráulica, por una unidad de área. Adimensional.
- **Almacenamiento específico (S_s):** Similar al anterior, es el volumen liberado al variar la cota hidráulica en una unidad, pero por unidad de volumen, en $[L^{-1}]$. Ambos parámetros se relacionan por $S = S_s \cdot b$, donde b es el espesor saturado del acuífero confinado.

¹ Se utiliza la convención L - unidad de distancia y T - unidad de tiempo.

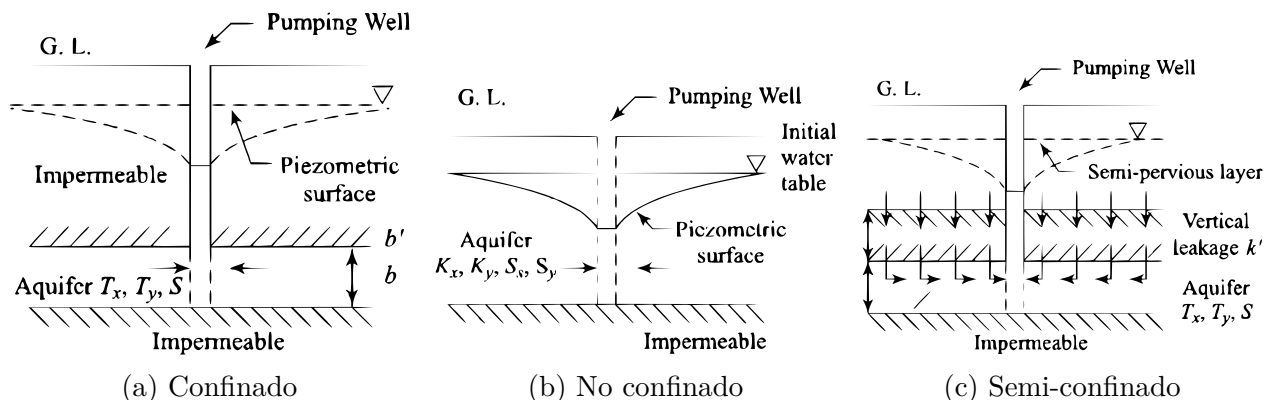


Figura A.1: Tipos de acuíferos [63].

- **Transmisividad (T):** Es la cantidad de agua que pasa por una sección de igual espesor saturado que el acuífero (b) y de ancho unitario, en $[L^2 \cdot T^{-1}]$.
- **Conductividad (K):** Constante de proporcionalidad entre el caudal y el gradiente hidráulico; es la cantidad de agua que pasa cuando el gradiente hidráulico es unitario, en $[L \cdot T^{-1}]$. Se relaciona a la transmisividad con $T = K \cdot b$, con b el espesor saturado del acuífero.

La Ley de Darcy es una ley fundamental en la hidrogeología, que relaciona la velocidad de un fluido en un medio con la diferencia de presión existente, la distancia, la sección transversal y la conductividad. Si se considera un medio homogéneo (su característica es constante en cualquier punto) e isotrópico (sus características no dependen de la dirección de movimiento), se tiene que:

$$v = -K \frac{dh}{dl}, \quad (\text{A.1})$$

con v es el flujo por unidad de área transversal $[L \cdot T^{-1}]$; K es la conductividad hidráulica $[L \cdot T^{-1}]$; dh es la diferencia en cota hidráulica $[L]$; y dl es la distancia entre los puntos evaluados $[L]$.

A partir de la ecuación (A.1), Boussinesq [64] derivó la ecuación de movimiento de aguas subterráneas, a lo que se puede aplicar el bombeo, relacionándola a la transmisividad y coeficiente de almacenamiento del terreno:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (\text{A.2})$$

con S y T el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad, respectivamente.

Respecto a los métodos analíticos que se basan en la ecuación de Boussinesq, muchos de ellos fallan en asumir las tasas de bombeo y recarga como constantes [65], lo que no los hace aplicable a problemas de riego. Es por esto que realiza linealizaciones de la ecuación de Boussinesq en que considera tasas de bombeo y recarga dependientes del tiempo.

Estos métodos analíticos tienen la desventaja de que, dependiendo de la magnitud del sistema a estudiar y de los procesos que se lleven a cabo, un modelado completo es muy complejo computacionalmente. Es por esto que se han desarrollado métodos numéricos basados en diferencias finitas para la resolución de las ecuaciones diferenciales, en que la implementación más conocida es MODFLOW [66].

Para el caso específico de bombeo desde pozos a partir de las ecuaciones fundamentales, y con el fin de modelar el efecto que tiene el bombeo de agua desde y hacia un pozo en las aguas, Theis [67], Cooper & Jacob [68], y Neuman [69] derivaron formulaciones para pozos en acuíferos confinados en los dos primeros casos, y para un acuífero no confinado en el tercer caso.

A.1.1. Acuífero confinado

De la ecuación (A.2), y considerando un pozo radial simétrico ($\frac{\partial h}{\partial \theta} = 0$) con flujo únicamente horizontal ($\frac{\partial h}{\partial z} = 0$) se puede derivar la ecuación de Theis [67] para el caso de un acuífero confinado con espesor constante b . Esta ecuación indica el descenso en la cota hidráulica (en $[L]$) alrededor del pozo, en función de la distancia desde el pozo y el tiempo que lleva el bombeo constante q :

$$s(r, t) = \frac{q}{4\pi T} \cdot W\left(\frac{Sr^2}{4Tt}\right) = \frac{q}{4\pi T} \cdot W(u), \quad (\text{A.3})$$

donde q es el caudal extraído del pozo (o inyectado, pero con signo negativo), en $[L^3/T]$; T es la transmisividad ($= K \cdot b$); S es el almacenamiento específico; r es la distancia horizontal desde el pozo, en $[L]$; t es el tiempo, en $[T]$; y $W(u)$ es la *función de pozo* (o exponencial-integral) adimensional, y está definida como:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx. \quad (\text{A.4})$$

Cooper & Jacob [68], realizan una linealización de primer orden a la ecuación (A.4), válida para valores de $u \leq 0,01$:

$$W(u) = -0,5772 - \ln(u). \quad (\text{A.5})$$

A.1.2. Acuífero no confinado

En el caso de un acuífero no confinado, su espesor varía según se va extrayendo agua, por lo que el supuesto de espesor constante no es válido.

El efecto del bombeo en un acuífero no confinado se encuentra acotado en los tiempos iniciales de bombeo por la solución de Theis con $S = S_b$, y los tiempos finales, están acotados por $S = S_s b + S_y$. Para los instantes intermedios, existe una transición entre ambas soluciones, que se ve como una depresión en la curva. Neuman [70, 69] formalizó este efec-

to, definiendo una solución general, y haciendo de los casos no confinados y confinados una situación particular:

$$s(r, t) = \frac{q}{4\pi T} \cdot W(u_A, u_B, \beta), \quad (\text{A.6})$$

donde $u_A = \frac{r^2 S_A}{4Kbt}$ para los instantes iniciales; $\beta = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h}$ para los instantes intermedios (en el caso isotrópico queda $\beta = \frac{r^2}{b^2}$); y $u_B = \frac{r^2 S_Y}{4Kbt}$ para los instantes finales.

En la Figura A.2 se puede observar la solución de Neuman y cómo esta está acotada por la solución de Theis para distintos valores de S . Para efectos de este trabajo, se considerará el peor caso de influencia a los pozos cercanos, que corresponde a la cota de la Ecuación (A.3) de Theis con $S = S_b$.

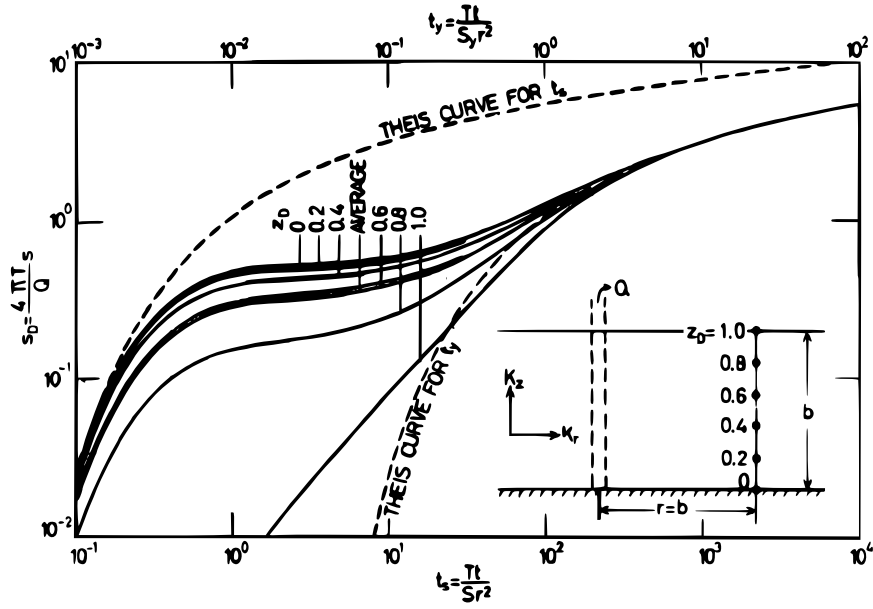


Figura A.2: Solución de Neuman acotada por la de Theis [70].

A.2. Bombeo variable

Si bien las ecuaciones (A.3) y (A.6) consideran una tasa constante de bombeo, por principio de superposición se puede obtener el descenso de la cota hidráulica para un bombeo variable en el tiempo. Para esto, se puede expresar el bombeo variable como la suma discreta de bombeos que se inician con distintos retardos (ver Figura A.3) [71]:

$$q^b(n) = q_0^b + \sum_{k=1}^n (q_k^b - q_{k-1}^b) = q_0^b + \sum_{k=1}^n \Delta q_k^b \quad (\text{A.7})$$

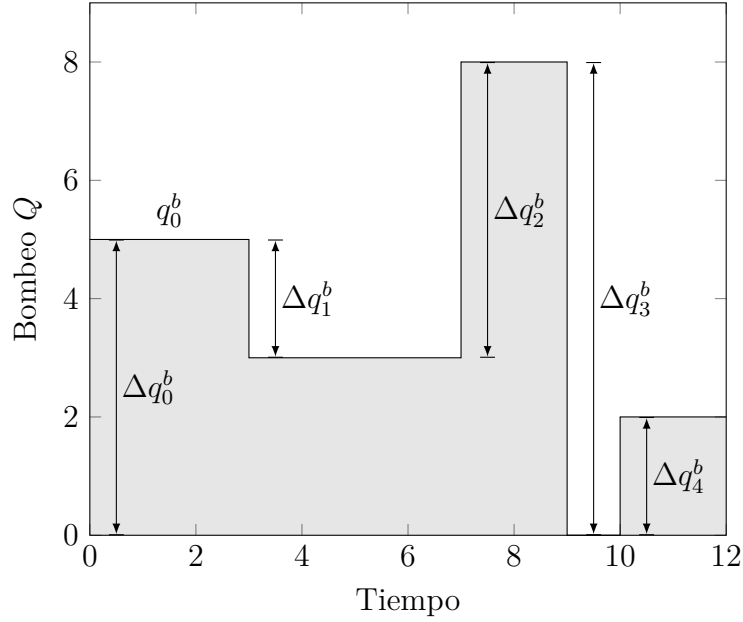


Figura A.3: Bombeo variable desde el pozo.

Si definimos $\Delta q_0 = (q_0 - 0)$, basta con reemplazar esta expresión del bombeo variable en la ecuación (A.3) para obtener el descenso:

$$s(r, t_n) = \sum_{k=0}^n \frac{\Delta q_k}{4\pi T} \cdot W \left(\frac{Sr^2}{4T(t_n - t_k)} \right) = \sum_{k=0}^n \frac{\Delta q_k}{4\pi T} \cdot W(u_k), \quad (\text{A.8})$$

con $(t_n - t_k)$ el tiempo desde que se inició la variación de bombeo Δq_k .

Así, se tiene el descenso para un bombeo a tasa variable en el tiempo discreto.

A.3. Sistema de múltiples pozos

En un sistema que consta de más de un pozo, el efecto sobre la cota hidráulica del acuífero en un punto r_o de los n pozos bombeados se puede determinar utilizando el principio de superposición de la ecuación (A.3):

$$s(r_o, t) = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi T} \cdot W \left(\frac{Sr_i^2}{4Tt} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi T} \cdot W(u_i), \quad (\text{A.9})$$

con r_i la distancia entre el pozo i al punto de evaluación r_o ; y q_i la tasa de bombeo del pozo i .

Si se unifica la ecuación (A.9) con la (A.7), se obtiene el descenso en el punto r_o para un sistema de n pozos, en que cada pozo i tiene bombeo variable de m_i etapas:

$$s(r_o, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{m_i} \frac{\Delta q_{i,k}}{4\pi T} \cdot W(u_{i,k}), \quad (\text{A.10})$$

con $u_{i,k} = \frac{Sr_i^2}{4T(t_m - t_k)}$; y $\Delta q_{i,k}$ la variación de la tasa de bombeo del pozo i en el instante k .

Cabe destacar que se busca limitar el descenso en el pozo j cuando se está bombeando en el resto de pozos vecinos, sin considerar el efecto del pozo mismo; así, se debe descontar el efecto del pozo j . De esta forma, se establece un umbral ε máximo:

$$\varepsilon > s(r_j, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{m_i} \frac{\Delta q_{i,k}}{4\pi T} \cdot W(u_{i,k}) \quad \forall i \neq j, \quad (\text{A.11})$$

donde r_j el punto donde se encuentra el pozo j .

Anexo B

Algoritmos genéticos

La optimización mediante algoritmos genéticos (*genetic algorithms - GA*) se basa en la teoría de la evolución para lograr soluciones que cuenten con un mayor *fitness*. Para esto, se crea una población inicial I_0 de N individuos, en que cada uno de ellos se representa por un **cromosoma** consistente de m genes.

Mediante distintos mecanismos que buscan modificar la población y darle variabilidad con tal de optimizar la función objetivo deseada, se van generando poblaciones de distintos individuos hijos de los padres mejor adaptados (mayor *fitness*), además de modificaciones aleatorias en los genes que buscan explorar en un espacio más amplio de soluciones.

B.1. Codificación

La codificación de algoritmos genéticos puede seguir dos estrategias principales: codificación binaria o de punto flotante [72].

B.1.1. Binario

La representación binaria consiste en codificar con código binario las variables de decisión de interés en el problema. De esta forma, cada gen corresponde a un bit de información. En el caso de problemas que consideren variables enteras o reales, éstas deben ser transformadas a números binarios, en que la precisión está dada según el número b de bits seleccionados para la codificación (es decir, que una variable está representada por b genes), y el rango del límite inferior (*lower bound - LB*) y superior (*upper bound - UB*). La precisión será:

$$\frac{UB - LB}{2^b - 1}.$$

B.1.2. Punto flotante

La codificación en punto flotante no requiere cambiar la representación del problema original, si es que este está en el dominio real, de forma tal que cada gen se representa directamente por una variable en punto flotante.

De acuerdo a Michalewicz [72], esta representación es superior a la binaria en cuanto a la precisión, consistencia en las ejecuciones, simplicidad (una variable es representada por un gen), evita un efecto de las mutaciones conocido como *Hamming cliff* (un pequeño cambio en

un bit puede resultar en un gran cambio en el *fitness* del individuo, y viceversa) entre otras.

B.2. Funciones

B.2.1. Creación

La creación de la población inicial de individuos se realiza en base a una distribución de probabilidades uniforme entre un límite inferior (*lower bound* - *LB*) y un límite superior (*upper bound* - *UB*). Estos individuos también deben cumplir con las restricciones impuestas por el problema.

B.2.2. Selección

La selección de los padres de la generación i que darán origen a los individuos de la generación $i + 1$ se realiza de forma aleatoria pero proporcional al *fitness* de los individuos. Dentro de este método, destacan las estrategias *Fitness Proportionate Selection* (FPS) y *Stochastic Universal Sampling* (SUS). En la primera, se escogen los individuos de forma proporcional a su *fitness*, en un método que se asemeja comúnmente a la ruleta de los casinos, en que cada casilla tiene un área proporcional al *fitness* del individuo, y donde cae la bola en las N realizaciones (basadas en una distribución uniforme), serán los padres seleccionados.

Para el caso de SUS, los individuos tienen un largo proporcional a su *fitness*, y según el número N de individuos que se quiera seleccionar, se determina un paso de largo F/N (con F la suma de todos los *fitness* de la generación). Así, se selecciona aleatoriamente el primer individuo de partida en el rango $[0, F/N)$ y luego se dan los N pasos para seleccionar a los individuos padre (ver Figura B.1).

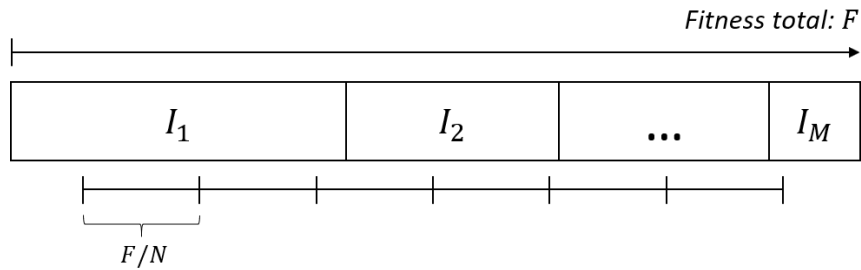


Figura B.1: Algoritmo *Stochastic Universal Sampling*.

Esta estrategia permite que individuos con un *fitness* bajo, y que utilizando FPS tuvieran una muy baja probabilidad de ser seleccionados como padres, tengan más posibilidades de ser elegidos, otorgando variabilidad genética a la población.

También existe la estrategia de *Tournament Selection*, en que la población se divide aleatoriamente en M grupos, en donde el mejor de cada grupo (mayor *fitness*) será el “ganador”

Para el caso de este trabajo, se utiliza la estrategia SUS para la selección de individuos padre.

B.2.3. Crossover

Teniendo a los individuos padre seleccionados, se realiza el *crossover* con tal de generar una población de hijos para la siguiente generación. Dependiendo de la codificación utilizada (binaria o de punto flotante), éste puede ser realizado de las siguientes formas:

- **Binario:** En este caso, se pueden seleccionar aleatoriamente uno o más puntos de corte de forma tal que los cromosomas padre intercambian sus genes por secciones, generando a los hijos. También existen otras estrategias en que cada uno de los genes es seleccionado con cierta probabilidad de uno u otro de los padres.
- **Punto flotante:** Como cada gen corresponde a una variable, la estrategia utilizada para el caso binario no es válida. Así, para este caso los hijos corresponden a un promedio ponderado de los padres, en que el ponderador (*rnd*) es un número aleatorio en el rango $[0, 1]$ con distribución uniforme $H = P_1 + rnd \cdot (P_2 - P_1)$.

B.2.4. Mutación

Finalmente, con el fin de agregar mayor variabilidad genética a la población y así explorar un espacio mayor de soluciones, se utiliza la mutación, que modifica aleatoriamente, y con cierta probabilidad (usualmente baja, de 5% o menos), algunos genes del cromosoma.

Al igual que con el *crossover*, la mutación varía según el tipo de codificación utilizada:

- **Binario:** La mutación genera que el bit a ser mutado varíe su estado, es decir, que pasa de 0 a 1 o viceversa.
- **Punto flotante:** Existen distintas estrategias, entre las que se cuenta la uniforme, en que uno de los genes se reemplaza por un valor aleatorio de distribución uniforme en el rango $[LB, UB]$, y gaussiana, similar a la uniforme pero con una distribución gaussiana. Sin embargo, éstas no tienen en cuenta el cumplimiento de las restricciones impuestas al problema, por lo que se utiliza una conocida como “adaptativa factible”, que selecciona una dirección aleatoria (adaptativa según el cumplimiento o no de restricciones en generaciones pasadas) y un largo de paso o magnitud de la variación.

Anexo C

Resultados completos

Tabla C.1: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 1 - GA.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	49,026	67,374	-	0,566	1,000	-
A2	39,773	55,029	51,598	0,546	0,994	0,000
A3	-	45,193	43,607	-	0,995	0,000
A4	-	-	48,000	-	-	0,000
A5	38,255	68,353	54,793	0,569	0,996	0,000
A6	36,130	65,870	-	0,629	0,989	-
A7	25,080	59,222	46,497	0,591	0,997	0,000
A8	-	60,029	40,771	-	0,998	0,000
A9	-	-	48,000	-	-	0,000
A10	34,951	63,342	49,306	0,596	1,000	0,000
Total	223,21	484,41	382,57	-	-	-

Tabla C.2: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 1 - Algebraica.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	42,533	6,067	-	0,570	0,962	-
A2	61,786	9,050	23,363	0,530	0,959	0,000
A3	-	11,769	47,031	-	0,959	0,000
A4	-	-	13,800	-	-	0,000
A5	24,670	3,221	15,309	0,578	0,963	0,000
A6	22,581	5,619	-	0,581	0,963	-
A7	22,897	9,651	14,252	0,565	0,961	0,000
A8	-	11,942	41,458	-	0,959	0,000
A9	-	-	13,800	-	-	0,000
A10	23,573	9,254	15,173	0,570	0,960	0,000
Total	198,04	66,57	184,19	-	-	-

Tabla C.3: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 2 - GA.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	41,589	59,211	-	0,566	1,000	-
A2	41,629	52,331	53,641	0,546	0,994	0,000
A3	-	61,112	42,088	-	0,995	0,000
A4	-	-	55,200	-	-	0,000
A5	30,338	51,423	58,639	0,569	0,996	0,000
A6	44,818	62,582	-	0,629	0,989	-
A7	41,567	40,854	54,379	0,591	0,997	0,000
A8	-	46,261	55,739	-	0,998	0,000
A9	-	-	71,400	-	-	0,000
A10	33,220	57,884	49,296	0,596	1,000	0,000
Total	233,16	431,66	440,38	-	-	-

Tabla C.4: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 2 - Algebraica.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	45,701	7,099	-	0,540	0,927	-
A2	47,864	11,139	16,597	0,511	0,920	0,000
A3	-	16,547	25,453	-	0,897	0,000
A4	-	-	13,200	-	-	0,000
A5	24,605	3,635	13,159	0,541	0,930	0,000
A6	27,305	6,295	-	0,563	0,928	-
A7	23,287	12,977	12,936	0,535	0,917	0,000
A8	-	16,498	24,302	-	0,898	0,000
A9	-	-	13,200	-	-	0,000
A10	23,385	12,241	12,973	0,536	0,916	0,000
Total	192,15	86,43	131,82	-	-	-

Tabla C.5: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 3 - GA.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	43,718	65,482	-	0,566	1,000	-
A2	41,413	67,142	48,645	0,546	0,994	0,000
A3	-	61,197	54,003	-	0,995	0,000
A4	-	-	54,000	-	-	0,000
A5	25,793	51,537	61,270	0,569	0,996	0,000
A6	47,725	52,475	-	0,629	0,989	-
A7	30,751	53,031	57,819	0,591	0,997	0,000
A8	-	46,054	48,146	-	0,998	0,000
A9	-	-	62,400	-	-	0,000
A10	31,655	64,160	62,585	0,596	1,000	0,000
Total	221,06	461,08	448,87	-	-	-

Tabla C.6: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 3 - Algebraica.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	40,732	5,468	-	0,583	0,966	-
A2	72,898	9,078	24,823	0,556	0,964	0,000
A3	-	11,523	55,077	-	0,964	0,000
A4	-	-	15,000	-	-	0,000
A5	23,246	2,894	17,661	0,580	0,967	0,000
A6	21,051	5,349	-	0,587	0,967	-
A7	21,436	9,301	16,063	0,575	0,966	0,000
A8	-	11,735	44,665	-	0,964	0,000
A9	-	-	15,000	-	-	0,000
A10	21,926	9,301	16,773	0,579	0,966	0,000
Total	201,29	64,65	205,06	-	-	-

Tabla C.7: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 4 - GA.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	32,054	80,146	-	0,571	1,000	-
A2	50,584	61,896	58,520	0,556	0,990	0,000
A3	-	55,738	50,462	-	0,977	0,000
A4	-	-	60,600	-	-	0,000
A5	31,245	50,778	45,777	0,624	1,000	0,000
A6	41,016	70,584	-	0,589	1,000	-
A7	24,162	58,266	51,373	0,562	0,996	0,000
A8	-	52,953	50,847	-	0,998	0,000
A9	-	-	42,600	-	-	0,000
A10	27,594	74,553	44,253	0,581	0,999	0,502
Total	206,65	504,91	404,43	-	-	-

Tabla C.8: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 4 - Algebraica.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	41,852	5,548	-	0,587	0,967	-
A2	58,813	8,054	25,533	0,549	0,966	0,000
A3	-	12,127	49,073	-	0,966	0,000
A4	-	-	14,400	-	-	0,000
A5	20,448	3,153	16,599	0,579	0,967	0,000
A6	21,306	5,694	-	0,590	0,967	-
A7	19,380	8,535	17,085	0,577	0,967	0,000
A8	-	11,470	45,530	-	0,966	0,000
A9	-	-	14,400	-	-	0,000
A10	19,060	8,866	17,074	0,577	0,967	0,000
Total	180,86	63,45	199,69	-	-	-

Tabla C.9: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 5 - GA.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	56,134	60,266	-	0,626	1,000	-
A2	36,208	51,579	67,613	0,551	0,984	0,000
A3	-	67,934	59,866	-	0,986	0,000
A4	-	-	48,000	-	-	0,000
A5	27,880	57,211	63,710	0,583	1,000	0,000
A6	47,567	73,633	-	0,657	1,000	-
A7	36,590	46,013	71,597	0,585	0,995	0,000
A8	-	49,024	45,776	-	0,959	0,000
A9	-	-	46,200	-	-	0,000
A10	36,269	66,151	50,580	0,604	0,998	0,000
Total	240,65	471,81	453,34	-	-	-

Tabla C.10: Uso de agua y rendimiento relativo, escenario 6 - GA.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	37,385	70,015	-	0,556	0,999	-
A2	32,872	50,908	53,621	0,549	1,000	0,000
A3	-	53,409	43,191	-	0,981	0,000
A4	-	-	55,800	-	-	0,000
A5	40,603	50,845	39,352	0,597	1,000	0,000
A6	39,270	56,730	-	0,608	1,000	-
A7	32,216	47,448	56,536	0,628	1,000	0,304
A8	-	60,686	50,314	-	0,993	0,000
A9	-	-	50,400	-	-	0,000
A10	30,612	62,676	48,912	0,585	0,999	0,000
Total	212,96	452,71	398,13	-	-	-

Anexo D

Resultados con acumulación en acuífero

Tabla D.1: Uso de agua y rendimiento relativo con acumulación en acuífero, escenario 0 - método algebraico.

Agricultor	Volumen regado [m^3]			Rendimiento relativo		
	Papa	Arveja	Tomate	Papa	Arveja	Tomate
A1	114,362	9,238	-	0,958	0,998	-
A2	226,444	17,474	47,682	0,946	0,998	0,998
A3	-	19,854	178,746	-	0,998	0,973
A4	-	-	23,400	-	-	0,987
A5	58,607	4,952	23,441	0,958	0,998	0,993
A6	57,851	9,349	-	0,960	0,998	-
A7	56,356	16,201	23,443	0,944	0,998	0,996
A8	-	20,001	89,799	-	0,998	0,979
A9	-	-	23,400	-	-	0,987
A10	56,577	16,165	25,057	0,950	0,998	0,994
Total	570,20	113,23	434,97	-	-	-

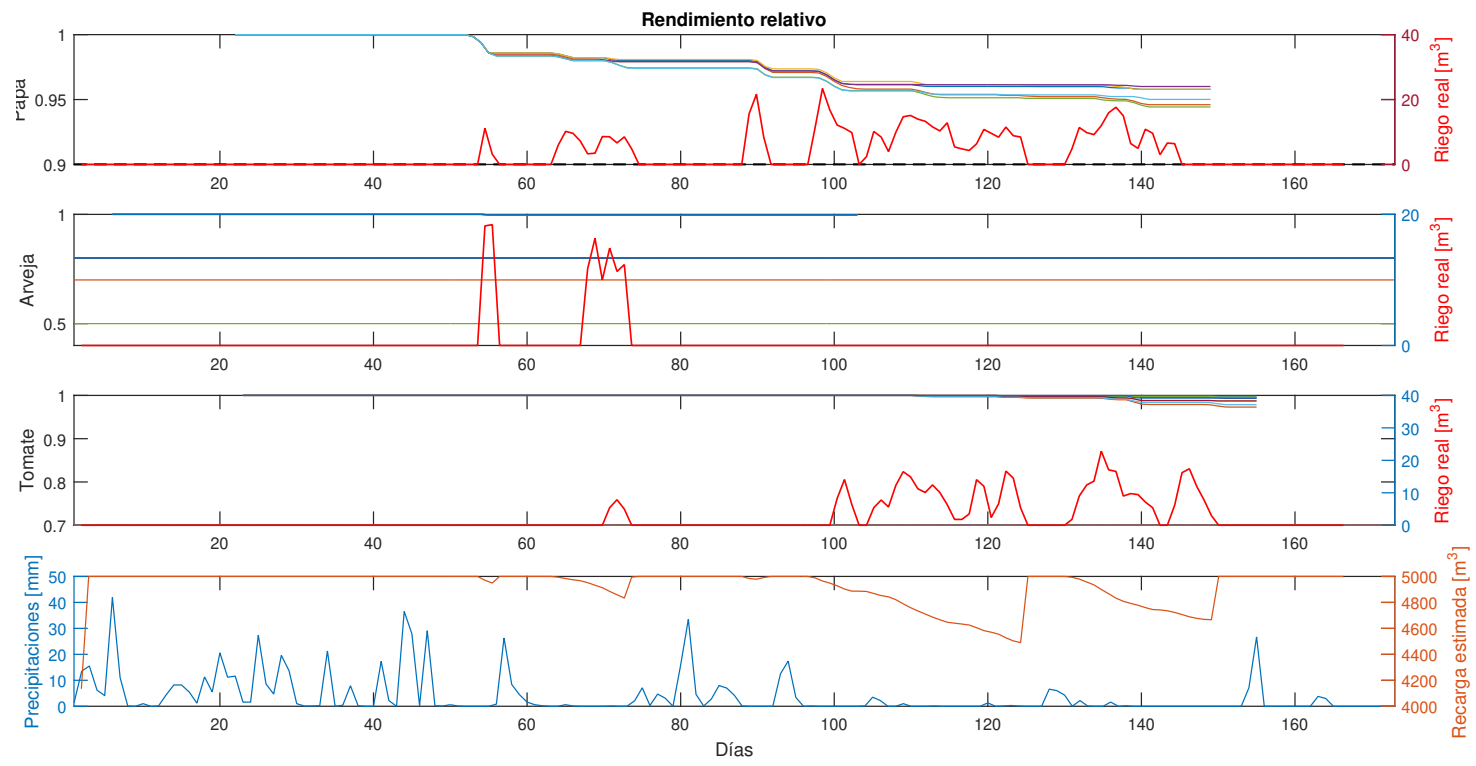


Figura D.1: Rendimientos relativos de los cultivos y disponibilidad hídrica con acumulación en acuífero, escenario 0.