



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe 1

**Optimizar la planificación del sistema de riego del
Parque Metropolitano para reducir costos y
asegurar el uso eficiente del recurso hídrico**

Grupo 40

Pia Ayala Nanjarí 21203601 sección 3
Samuel Donoso 2162688J sección 4
Ignacio Gabler 21626987 sección 2
Rafael Behnke 24641944 sección 2
Martin Gleser 24643777 sección 2
Isidora Pavic 22643567 sección 1
María Augusta Yáñez 22637702 sección 1

Fecha entrega: 14 de abril de 2025

a. Descripción del Problema

a.1. Descripción de la problemática

Santiago se enfrenta desde hace décadas a la crisis hídrica que ha ido en aumento por el cambio climático, el crecimiento urbano y la reducción de las fuentes naturales de agua. Según instituciones como el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (2021) y el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, 2020) han advertido que la escasez hídrica no es transitoria, sino más bien estructural, por lo que es necesario volver a diseñar la distribución de este recurso, inclusive en áreas que han sido tradicionalmente cruciales respecto al debate hídrico, como lo son los espacios verdes urbanos. [1].

En este contexto, el Parque Metropolitano de Santiago —el parque urbano más grande de Latinoamérica, con más de 700 hectáreas, juega un rol fundamental como pulmón verde de la capital, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad, la recreación, la salud pública y la mitigación de la isla de calor; es decir, destaca por su multifuncionalidad en el ecosistema urbano [13]. El Parque cumple con funciones ambientales (como la regulación térmica y conservación de biodiversidad), sociales (espacios de encuentro, recreación y educación) y culturales (patrimonio paisajístico e identidad local). A partir de su importancia, es crucial considerar una mantención del espacio situado en el contexto de escasez, por lo que requiere una gestión hídrica efectiva y eficiente.

El parque enfrenta actualmente importantes desafíos de gestión hídrica: más del 60 % de su superficie aún es regada mediante sistemas de surcos tradicionales, método caracterizado por una baja eficiencia en el uso del recurso agua [9]. Esto genera pérdidas significativas tanto en cantidad de agua, como en los costos asociados al riego y mantención de las áreas verdes. Consigo, la disminución de las fuentes de abastecimiento principales (canales El Carmen y Mapocho) y las condiciones de pendiente del terreno agravan la situación, afectando la capacidad de infiltración de suelos y la salud de la vegetación [3].

El Plan de Desarrollo Sustentable Parquemet 2030 establece como objetivo central la implementación de tecnologías de riego eficiente, priorizando la instalación de sensores inteligentes de humedad, sistemas de control de riego automatizado, y mejoras en las redes de captación y almacenamiento [10]. Sin embargo, para tomar decisiones estratégicas que permitan cumplir con estas metas, se hace necesario establecer un mecanismo de asignación eficiente que oriente ¿Cuántos y qué tipo de regadores instalar? ¿En qué sectores? ¿Con qué frecuencia y volumen regar cada zona? ¿Cómo minimizar los costos asociados a agua, mantenimiento y renovación de infraestructura?

Desde esto, para atender la problemática es necesario abarcar ámbitos como los requerimientos hídricos de las plantas, las condiciones climáticas, el estado de la infraestructura de riego, costos de operación, instalación y mantenimiento en un horizonte de planificación. Entonces, es de suma importancia diseñar una herramienta de modelación rigurosa, adaptable y alineada respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, exactamente con los ODS 6 y 11 [10], así también con la Estrategia Nacional de la Biodiversidad 2017-2030 para respetar su integridad. [8].

La herramienta debe responder al desafío fundamental de la optimización respecto a la gestión hídrica. Lo anterior, no solamente en virtud de una necesidad inmediata, sino más bien, enmarca un escenario de desafíos climáticos, urbanísticos y también presupuestarios. El Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) indica que la eficiencia de la aplicación del riego por surcos en Chile es aproximadamente un 45 %, aquello significa grandes pérdidas de agua cercanas al 55 %, en comparación con el riego por goteo alcanzando un 90 % de eficiencia [6]. Desde esto, la ineficiencia en el uso del agua es un compromiso que es de carácter ecológico, económico y social del parque. Lo anterior evidencia la urgencia de plantear soluciones en materia de planificación y operación de forma sistemática a largo plazo. En suma, se busca optimizar el uso del agua respecto a la reducción de costos operativos, una extensión de vida útil en las áreas verdes, y también contribución a los objetivos de sostenibilidad medioambiental del parque.

a.2. Valor de resolver el problema

La implementación de este modelo de planificación de riego aporta beneficios concretos tanto en términos cualitativos como cuantitativos.

Desde una perspectiva cualitativa, permite una toma de decisiones más informada, transparente y replicable, lo que fortalece la gestión pública de un recurso escaso como el agua. También ayuda a priorizar el uso eficiente del equipamiento, promoviendo prácticas más sostenibles en la administración del parque.

Cuantitativamente, el modelo permite minimizar los costos operacionales relacionados con la instalación, mantención y activación de los sistemas de riego, a la vez que evita daños por exceso de agua en las áreas verdes. La inclusión de parámetros como eficiencia de regadores, consumo hídrico estimado y restricciones horarias permite calcular soluciones óptimas que maximizan el impacto positivo del riego dentro de las condiciones operativas reales del parque.

a.3. Objetivo, decisiones y restricciones involucradas

En este proyecto, se enfrenta el desafío de planificar de forma eficiente el sistema de riego del Parque Metropolitano de Santiago, una de las principales áreas verdes urbanas del país. En el contexto de crisis hídrica que afecta a gran parte de Chile [5], la administración del parque busca implementar un modelo de planificación que le permita utilizar los recursos hídricos de forma más sustentable, sin descuidar la mantención de las áreas verdes ni comprometer la calidad de vida de quienes visitan el parque [11].

La entidad encargada de la toma de decisiones es la administración del Parque Metropolitano, organismo público responsable del funcionamiento y desarrollo del recinto [9], la cual debe definir qué tipo de tecnologías de riego utilizar, cuántos equipos instalar en cada sector, en qué momentos activar el riego y cuánta agua aplicar en cada sesión. Para ello, se considera un conjunto de zonas a regar $n \in N$, cada una con un área específica A_n , y un conjunto de tipos de regadores $r \in R$, cada uno con una capacidad de cobertura F_r y una eficiencia β_r , donde los regadores deben ser capaces de cubrir al menos el área de la zona a la que pertenecen. La planificación se realiza sobre un horizonte temporal discreto $D \in \{1, 2, \dots, H\}$, con un conjunto $T \in \{0, \dots, 23\}$ de horas para cada día y con un subconjunto $T_h \subseteq T$ que representa las horas donde no se permite realizar riego por alta evapotranspiración.

Cada zona del parque presenta requerimientos hídricos variables representados por el parámetro J_n , correspondiente a la cantidad promedio de agua necesaria en la zona $n \in N$ en el tiempo $t \in T$, así como una condición inicial de agua que hay en una zona Q_n . A su vez, el sistema cuenta con una dotación inicial de regadores R_{rn} en cada zona, con posibilidad de agregar o remover unidades durante el periodo, lo que implica costos de instalación C_r y otro de remoción S_r , respectivamente. Además, el uso prolongado de los equipos conlleva un costo de mantención E_r , y cada activación del sistema de riego en una zona en un tiempo dado genera un costo adicional H_{rn} .

El modelo también contempla una serie de parámetros que permiten generar ciertas restricciones, como el número máximo de horas consecutivas de riego en una misma zona, determinado por el parámetro L_n , con el fin de evitar sobrecargas hídricas. Cada litro de agua utilizado se incurre en un costo K , y un parámetro $Cant_r$ que expresa la cantidad de agua que esparce un regador r en un periodo.

También se incorporan parámetros que permiten modelar de mejor manera la realidad del sistema: $Amin_n$ representa la cantidad mínima de agua presente en un suelo $n \in N$ para su supervivencia, mientras que $Amax_n$ indica la cantidad máxima de agua que es capaz de soportar dicho suelo. En caso de sobrepasar ese umbral, se asume un costo de replantación proporcional al daño, representado por $Carea_n$, que refleja el costo asociado a replantar el área equivalente a lo perdido por haber regado en exceso un litro de agua en la zona $n \in N$. Por último, el parámetro $Mbig$ corresponde a una constante suficientemente grande utilizada en la formulación del modelo matemático.

De esta forma, el modelo permite definir una estrategia integrada que articula decisiones sobre instalación, operación y mantenimiento del sistema, dentro de un marco temporal detallado. El objetivo es encontrar una planificación que permita cubrir las necesidades hídricas del parque de forma técnica y económicamente eficiente, reduciendo al mínimo los costos asociados y contribuyendo a una gestión más racional de un recurso cada vez más escaso como lo es el agua.

Además, se considera que no existen fallas técnicas en la instalación de los regadores ni tampoco errores estructurales en su conexión, ya que toda decisión de instalación o remoción va a tener efecto inmediato y también correcto del sistema. El modelo no contempla restricciones logísticas ni de disponibilidad de personas, debido a que se considera una capacidad operativa que es suficiente para la ejecución de acciones ya definidas en el horizonte de planificación T . De esta manera, no se incluyen planes de mantenimiento preventivo ni tampoco procesos de degradación de forma progresiva del equipamiento; en lo que respecta a la mantención, esta se modela exclusivamente como un costo que es acumulado y asociado al uso. Por otro lado, se asume que toda el agua utilizada es proveniente de una fuente externa que es gestionada de manera convencional. Finalmente, se considera que el modelo busca cumplir los niveles mínimos y máximos de humedad establecidos para cada zona $n \in N$ en cada periodo $t \in T$. Sin embargo, en caso de que estos límites sean superados, el modelo incorpora un término de penalización proporcional al exceso, de modo de desincentivar estas situaciones sin prohibirlas completamente. Esto se expresa mediante los parámetros $Amin_n$, $Amax_n$ y el costo asociado $Carea_n$.

b. Modelación del Problema

b.1. Conjuntos

- R : conjunto de tipos de regadores, por ejemplo $R = \{\text{aspersor, goteo}, \dots\}$, $r \in R$
 N : conjunto de tipos de zonas a regar, por ejemplo $N = \{\text{césped, jardinera}, \dots\}$, $n \in N$
 $T = \{0, \dots, 23\}$: conjunto de horas del día, $t \in T$
 $D = \{0, \dots, H\}$: días desde la implementación del sistema, $d \in D$
 $T_h \subseteq T$: subconjunto de T que representa las horas en que no se permite el riego

b.2. Variables de decisión

- Y_{rnd} : Inventario de regadores $r \in R$ en la zona $n \in N$ en al final del día $d \in D$.
- $Z_{rntd} = \begin{cases} 1 & \text{si se riega con el riego } r \in R \text{ la zona } n \in N \text{ en la hora } t \in T \text{ en el día } d \in D \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
- V_{rnd} : Cantidad de regadores $r \in R$ comprados en la zona $n \in N$ en el día $d \in D$.
- V_{rnd}^- : Cantidad de regadores $r \in R$ quitados en la zona $n \in N$ en el día $d \in D$.
- X_{nrtd} : Cantidad de litros de agua regados en la zona $n \in N$ a la hora $t \in T$ el día $d \in D$ a través del método de riego $r \in R$.
- I_{ntd} : Cantidad de litros de agua disponibles en el suelo en la zona $n \in N$ a la hora $t \in T$ del día $d \in D$.
- W_{ntd} : Cantidad de error en litros de agua regadas en la zona $n \in N$ en la hora $t \in T$ del día $d \in D$.
- $G_{ntd} = \begin{cases} 1 & \text{si se riega en la zona } n \in N \text{ en la hora } t \in T \text{ en el día } d \in D \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

b.3. Parámetros

- A_n : Área en m^2 necesaria de regado de la zona $n \in N$.
- F_r : Área en m^2 que cubre un regador $r \in R$.
- C_r : Costo de instalación en CLP del método de riego $r \in R$.
- K : Costo en CLP por litro de agua utilizado.
- J_n : Cantidad de litros promedio de agua que utiliza una zona $n \in N$.
- L_n : Horas máximas consecutivas que se puede regar la zona $n \in N$.
- E_r : Costo en CLP por mantenimiento diario del regador $r \in R$.
- S_r : Costo en CLP por remover un regador de tipo $r \in R$.
- H_{rn} : Costo en CLP por activación del riego $r \in R$ de la zona $n \in N$.
- R_{rn} : Cantidad inicial de regadores $r \in R$ en la zona $n \in N$.

- β_r : Eficiencia del regador $r \in R$, parámetro entre 0 y 1.
- Q_n : Cantidad inicial de agua en litros en la zona $n \in N$.
- $Cant_r$: Cantidad de agua en litros que esparce el regador $r \in R$ en una hora.
- $Amin_n$: Cantidad mínima de agua en litros presente en un suelo $n \in N$ para su supervivencia.
- $Amax_n$: Cantidad máxima de agua en litros que es capaz de soportar un suelo $n \in N$.
- $Carea_n$: Costo en CLP asociado a replantar el área equivalente a lo perdido por haber regado un error de 1 litro de agua en la zona $n \in N$.
- M_{big} : Big M.
- D_t : Capacidad máxima de litros de agua disponibles para el sistema de riego en la hora $t \in T$.
- U : Tiempo en días que toma la instalación de un regador.
- U^- : Tiempo en días que toma la remoción de un regador, donde $U > U^-$.

b.4. Naturaleza de las variables

$$\begin{aligned}
Y_{rnd} &\in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall r \in R, \forall n \in N, \forall d \in D \\
Z_{rntd} &\in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, \forall r \in R, \forall t \in T, \forall d \in D \\
X_{rntd} &\geq 0, \quad \forall n \in N, \forall r \in R, \forall t \in T, \forall d \in D \\
I_{ntd} &\geq 0, \quad \forall n \in N, \forall t \in T, \forall d \in D \\
V_{rnd} &\in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall n \in N, \forall r \in R, \forall d \in D \\
V_{rnd}^- &\in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall n \in N, \forall r \in R, \forall d \in D \\
W_{ntd} &\geq 0, \quad \forall n \in N, \forall t \in T, \forall d \in D \\
G_{ntd} &\in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, \forall t \in T, \forall d \in D
\end{aligned}$$

b.5. Función objetivo

$$\min \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \left(\sum_{r \in R} V_{rnd} C_r + V_{rnd}^- S_r + Y_{rnd} E_r + \sum_{t \in T} X_{rntd} K + Z_{rntd} H_{rn} \right) + \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} W_{ntd} Carea_n \quad (1)$$

b.6. Restricciones del modelo

$$I_{ntd} \geq Amin_n - W_{ntd}, \forall t \in T, n \in N, d \in D \quad (2)$$

Balance de regado: cantidad disponible de agua respecto al mínimo

$$I_{ntd} \leq Amax_n + W_{ntd}, \forall t \in T, n \in N, d \in D \quad (3)$$

Balance de regado: cantidad disponible de agua respecto al máximo

$$I_{ntd} = \left(\sum_{r \in R} X_{nrtd} \beta_r \right) + I_{n(t-1)d} - J_n, \forall t \in \{1, \dots, 23\}, n \in N, d \in D \quad (4)$$

Balance hídrico: actualiza el agua disponible según riego, agua residual y consumo.

$$I_{n00} = \left(\sum_{r \in R} X_{nr00} \beta_r \right) - J_n + Q_n, \forall n \in N \quad (5)$$

Cantidad de agua inicial en cada zona.

$$I_{n0d} = \left(\sum_{r \in R} X_{nr23(d-1)} \beta_r \right) + I_{n23(d-1)} - J_n, \forall d \in \{1, \dots, H\}, n \in N \quad (6)$$

Cantidad inicial de agua al pasar de día.

$$Z_{nrtd} \leq Y_{nrd}, \forall n \in N, r \in R, t \in T, d \in D \quad (7)$$

Relación Z con Y.

$$M_{big} Z_{nrtd} \geq X_{nrtd}, \forall t \in T, n \in N, r \in R, d \in D \quad (8)$$

Activa la variable binaria Z_{rnt} si se utiliza el riego r en la zona n en el momento t.

$$Y_{rnd} = Y_{rn(d-1)} + V_{rn(d-U)} - V_{rn(d-U-)}^-, \forall d \in \{U, \dots, D\}, n \in N, r \in R \quad (9)$$

Controla el inventario de regadores, incorporando compras y remociones.

$$Y_{rnd} = Y_{rn(d-1)} - V_{rn(d-U-)}^-, \forall d \in \{U^-, \dots, U-1\}, n \in N, r \in R \quad (10)$$

Controla el inventario de regadores, incorporando compras y remociones.

$$Y_{rnd'} = R_{rn}, \forall n \in N, r \in R, \forall d' \in \{0, \dots, U^- - 1\} \quad (11)$$

Establece el inventario inicial de regadores por zona y tipo.

$$\sum_{r \in R} \sum_{n \in N} Z_{nrtd} = 0, \forall t \in T_h, d \in D \quad (12)$$

Prohíbe el riego durante horas específicas T_h .

$$Y_{rnd} Cant_r \geq X_{nrtd}, \forall t \in T, n \in N, r \in R, d \in D \quad (13)$$

Relación entre la existencia de regadores y la capacidad de regar a través de ellos.

$$\sum_{r \in R} Z_{nrtd} \leq M_{big} G_{ntd}, \forall t \in T, n \in N, d \in D \quad (14)$$

Define la variable G.

$$\sum_{r' \in R} Y_{r'nd} F_{r'} \geq A_n G_{ntd}, \forall t \in T, n \in N, d \in D \quad (15)$$

Garantiza que el área regada cubra al menos el área necesaria de la zona.

$$\sum_{k=t}^{t+L_n+1} G_{nkd} \leq L_n, \forall t \in \{0, \dots, 22 - L_n\}, n \in N, d \in D \quad (16)$$

No superar las horas máximas consecutivas que se pueden regar a lo largo de un día.

$$\sum_{k=23-L_n+t}^{23} G_{nkd} + \sum_{k=0}^{t+1} G_{nk(d+1)} \leq L_n, \forall t \in \{0, \dots, L_n\}, n \in N, d \in D \quad (17)$$

No superar las horas máximas consecutivas en las que se pueden regar entre de un día.

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} X_{nrtd} \leq D_t \quad \forall t \in T, d \in D \quad (18)$$

Restringe el uso total de agua simultánea a la capacidad máxima del sistema.

c. Definición de datos

Se construyó una base de datos que contiene los parámetros necesarios para representar un sistema de riego en el horizonte trabajado. Desde esto, la base de datos modela un escenario de operación para 4 zonas. Asimismo, fueron definidos bajo estimaciones de condiciones respecto a la operación del Parque Metropolitano de Santiago, se considera su topografía, biodiversidad y limitaciones hídricas. Desde esto, se consideran las estimaciones del consumo de agua por metro cuadrado, restricciones de acumulación y tiempos de riego, estas fueron fundamentadas a partir de los siguientes documentos:

- El *Manual Técnico de Construcción y Requisitos Mínimos para Parques, Plazas, Áreas Verdes y Deportivas* del MINVU (2019), esta documentación permite establecer superficies que son de referencia, como lo son los tipos de vegetación, requerimientos mínimos de diseño, criterios de operación de riego y límites de intervención en áreas urbanas. [15]
- La *Guía General de Criterios de Sostenibilidad para Proyectos del GORE Santiago* (2023), presenta principios para fomentar la eficiencia hídrica, como también el uso de especies de bajo consumo y otros elementos, como lo puede ser la reducción del césped. [16]
- El *Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling* de la **FAO** (1996), es una guía técnica en lo referente a la programación del riego eficiente, considera factores como la evapotranspiración, la capacidad de retención de los suelos y la periodicidad de aplicación del agua a partir del tipo de cultivo o también la vegetación. [17]
- La *Guía 02: Soluciones Basadas en la Naturaleza – Agua y Vegetación Urbana* de **Infraestructura Verde Santiago** (2024), permite destacar el uso de estrategias de diseño y mantención de áreas verdes en que se promueve la resiliencia climática. [18]

c.0.1. Estructura general del archivo

- **zonas:** Este ítem representa las tantas zonas de vegetación que son representativas, cada una es caracterizada por parámetros que son tanto físicos, como hídricos y económicos respecto a criterios operacionales.
 - **area_m2** (A_n): Área en m^2 , estimada vía herramientas que son satelitales (Google Earth) y se compara con la información de los rangos del MINVU (2019).
 - **litros_prom** (J_n): Requerimiento promedio diario: $J_n = A_n \cdot R_n$, con $R_n \in [2,5,6]$ L/ m^2 /día, según tipo de vegetación (GORE Santiago, 2023) según su consumo hídrico.
 - **agua_min** y **agua_max**: Límites de acumulación diaria permitida. Se fija $A_{\min,n} = 0,75 \cdot J_n$ y $A_{\max,n} = 6 \cdot J_n$. El 75 % del requerimiento diario va a representar el mínimo para evitar estrés hídrico.

- **agua_inicial** (Q_n): Condición inicial estimada como $Q_n = \alpha \cdot J_n$ con $\alpha \in [2, 4]$, representando escenarios húmedos.
 - **max_horas** (L_n): Número máximo de horas diarias de riego por zona ($2 \leq L_n \leq 4$).
 - **costo_replantar** (C_{A_n}): Costo en CLP por m^2 cuando se enfrenta a errores de riego, estos son estimados entre 15 y 35 CLP/ m^2 según precios del mercado local.
- **regadores**: Hay dos tipos de regadores que son utilizados y se consideran sus elementos:
- **tipo**: aspersor y goteo.
 - **cobertura** (S_r): Área efectiva en m^2 .
 - **eficiencia** (η_r): Porcentaje de agua que es aprovechada.
 - **caudal** (q_r): En litros por hora.
 - **costo_instalación/remoción/mantenición**: Costos que son asociados por unidad. Los valores se basan en cotizaciones ajustados al contexto urbano.
- **costos activación**: Este contiene los costos $H_{r,n}$ que están asociados al momento de activar un regador tipo r en zona n , considerando el uso energético y el desgaste. Se calculó como:

$$H_{r,n} = C_{\text{base},r} + \gamma_n,$$

donde $C_{\text{base},r}$ este es el costo base por tipo de regador y γ_n un factor correctivo a partir de la complejidad de la zona por temas logísticos.

- **regadores_iniciales**: Se define el inventario inicial $R_{r,n}$ de regadores tipo r disponibles en zona n . Se estima de manera proporcional al área de cada zona y el tipo de vegetación.
- **capacidad_agua**: Para cada hora t , se define D_t , la capacidad máxima del sistema en litros por hora. Se fija un valor que simula las limitaciones por temas de presión y disponibilidad de agua, este se ajusta al tamaño y topología del parque.
- **horas_no_permitidas**: Intervalos de horarios en donde el riego está prohibido, se considera las recomendaciones del GORE Santiago (2023), en la promoción para evitar horas de alta evaporación.
- **parámetros_globales**: Define constantes operacionales:
 - K : costo del litro de agua (2 CLP),
 - M : valor grande usado para restricciones lógicas
 - $U, U_{\text{menos}}, U_{\text{máx}}$: tiempos para instalación y remoción de regadores.

d. Validación del resultado

d.1. Optimalidad y factibilidad

El resultado obtenido se acercan a los entregados por un análisis del Centro de políticas públicas UC, en el cual se llega a un valor de costo de mantención cercano a los 200 CLP/ m^2 anuales:

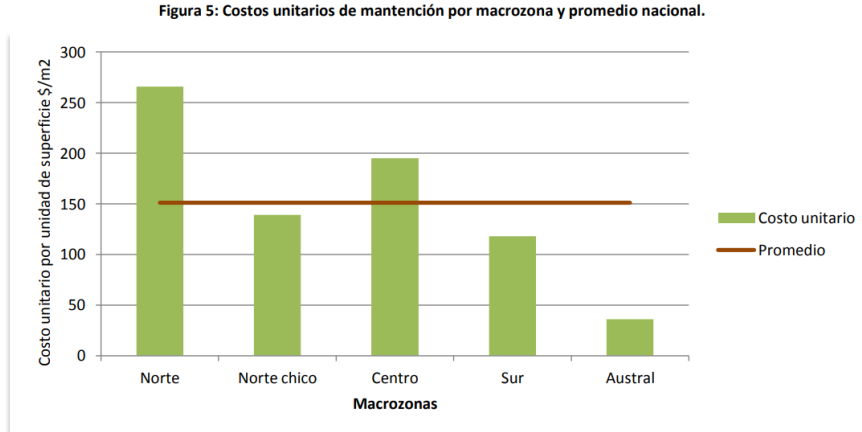


Figura 1: Fuente: Informe de costos de mantención, centro de políticas públicas UC [14]

Asimismo, la solución entregada se alinea con una minimización de agua desperdiciada a través de métodos de regado de mayor cobertura, priorizando la utilización de regado a través de goteo en las zonas en las que esto es posible. Aun así, se observa que la solución incorpora la utilización de distintos métodos de regado en simultáneo, lo que de igual manera es razonable respecto a un esquema óptimo de regado, considerando la superficie que debe ser cubierta. Es relevante considerar al mismo tiempo que la incorporación de errores de regado puntuales, tales como utiliza el modelo en el óptimo, corresponden a decisiones lógicas, siendo que la penalización de replantar o reacondicionar una zona menor no resulta en una penalización monetaria mayor para el modelo. Aún así, se debe considerar que esta opción puede no ser fácilmente accesible para ciertas instancias de implementación, pero se juzga que el Parque Metropolitano de Santiago consta de circunstancias ambientales y de accesibilidad obrera adecuadas para hacer uso de este recurso.

Otro aspecto que resulta esperable para la solución óptima es la utilización de la cantidad mínima posible de instalaciones y remociones de dispositivos de regado, lo que puede observarse en la solución óptima.

Considerando la estructura presente actualmente en el Parque Metropolitano de Santiago, la cual consta de regadores de surcos, la solución entregada por el modelo, la cual se caracteriza por incorporar distintos tipos de regado al mismo tiempo, al igual que la posibilidad de variar respecto al tempo en la cantidad de ellos que se utiliza, es esperable para una solución óptima del problema. A continuación, se complementa el análisis con una estimación cuantitativa del costo proyectado por el modelo, su comparación con estudios previos y una interpretación detallada de la solución óptima obtenida.

d.2. Análisis cuantitativo del resultado

El modelo entrega una solución óptima con un costo total de **18.135 CLP** para un horizonte de **7 días**, lo que equivale a aproximadamente **2.590,75 CLP diarios**. Considerando una superficie total regada de **1.790 m²** (según los datos utilizados como entrada del modelo), se obtiene un costo diario por metro cuadrado de:

$$\frac{2,590,75 \text{ CLP}}{1,790 \text{ m}^2} \approx 1,45 \text{ CLP/m}^2/\text{día}$$

Llevado a base anual:

$$1,45 \text{ CLP/m}^2/\text{día} \times 365 \text{ días} = 529,25 \text{ CLP/m}^2/\text{año}$$

Este valor supera el rango estimado por el informe del Centro de Políticas Públicas UC, el cual establece un costo de mantención entre 150 y 300 CLP/m²/año para áreas verdes urbanas en Chile [14]. No obstante, dicho informe fue elaborado en el año 2014, por lo que los precios allí reportados no consideran la inflación acumulada en más de una década.

Según el Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE), el IPC acumulado entre enero de 2014 y abril de 2025 fue de 67,2% [19]. Este ajuste inflacionario permite actualizar los valores históricos del informe a un rango estimado de 251–502 CLP/m²/año en valores actuales. Incluso así, el costo proyectado por el modelo es mayor pero no tanto, lo cual se justifica por varias razones:

- El modelo considera decisiones operacionales que van más allá del consumo de agua, como la compra, instalación y remoción de regadores.
- Se penalizan errores de riego y se permite cierta flexibilidad cuando su corrección no justifica un mayor gasto.
- Se emplea una estrategia de riego combinada con tecnologías diferenciadas por tipo de zona, lo que implica costos adicionales asociados a su logística.
- La solución optimizada prioriza eficiencia hídrica y estabilidad operativa, aspectos que no necesariamente están reflejados en los costos promedio de mantención tradicionales.

e. Referencias

- [1] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2020). *Informe a las Naciones: Megasequía 2010–2020, una lección para el futuro*. Universidad de Chile. Recuperado de <https://www.cr2.cl/megasequia/>
- [2] CNN Chile. (2021, 29 de diciembre). *Por crisis hídrica: Parque Metropolitano retirará 53 mil metros cuadrados de pasto para ahorrar agua*. Recuperado de https://www.cnnchile.com/pais/parque-metropolitano-53mil-metros-pasto-ahorrar-agua_20211229/
- [3] Cox, R. (2022, 27 de marzo). *La estrategia de la red de Parquemel para enfrentar la crisis hídrica*. Radio Pauta. Recuperado de <https://www.pauta.cl/ciudad/2022/03/27/parque-metropolitano-sequia-crisis.html>
- [4] FAO & ONU-Agua. (2022). *Progreso del cambio en la eficiencia del uso del agua: Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.4.1 de los ODS, 2021*. Roma: FAO. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/items/7401009e-fa54-4941-9df0-1073f2614415>
- [5] Grupo Medioambiental del Sistema de las Naciones Unidas en Chile (FAO, PNUMA, PNUD, PMA, & UNESCO). (2021). *Escasez hídrica en Chile: Desafíos pendientes*. Recuperado de https://chile.un.org/sites/default/files/2021-03/PB%20Recursos%20H%C3%ADricos_FINAL_17%20de%20marzo.pdf
- [6] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2017). *Eficiencia de aplicación de agua en riego por surcos y riego por goteo* (Boletín Técnico N.º 190). Recuperado de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7272/NR36474.pdf>
- [7] Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2021). *Recursos hídricos en Chile: Recomendaciones para una gestión sostenible*. Gobierno de Chile. Recuperado de https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/ea/54/ea54f567-9919-43ad-9b66-221f0f433b11/recursos_hidricos_en_chile.pdf
- [8] Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017–2030*. Gobierno de Chile. Recuperado de https://estrategia-aves.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/03/MMA_2017_Estrategia_Nacional_Biodiversidad_2017-2030.pdf

- [9] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (s.f.). *Parque Metropolitano de Santiago*. Recuperado de <https://www.minvu.gob.cl/sobre-minvu/parque-metropolitano/>
- [10] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), & Parque Metropolitano de Santiago (Parquem). (2023). *Plan de desarrollo sostenible 2030: Parquem y Red de Parques Urbanos*. Recuperado de <https://parquem.cl/wp-content/uploads/2023/02/Plan-de-desarrollo-sostenible-2030-Parquem.pdf>
- [11] Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://sdgs.un.org/goals>
- [12] Portal Agro Chile. (2022, julio 25). *Agricultores pueden ahorrar hasta un 40 % el consumo hídrico y un 20 % de energía con nuevas técnicas de riego*. Recuperado de <https://www.portalagrochile.cl/2022/07/25/agricultores-pueden-ahorrar-hasta-un-40-el-consumo-hidrico-y-un-20-de-energia-con-nuevas-tecnicas-de-riego>
- [13] Superintendencia de Seguridad Social (SUSESO). (2016). *Parque Metropolitano de Santiago*. Recuperado de https://www.suseso.cl/601/articles-41186_recurso_06.pdf
- [14] Reyes-Päcke, S., De la Barrera, F., Dobbs, C., Spotorno, A., & Pavez, C. (2014). Costos de mantención de las áreas verdes urbanas en Chile: Informe final. Centro de Políticas Públicas UC; Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Pontificia Universidad Católica de Chile. https://www.cedeus.cl/wp-content/uploads/2017/07/Informe_Costos_Mantencion-AVU_22012015-FINAL.pdf
- [15] MINVU. (2019). *Manual Técnico de Construcción y Requisitos Mínimos para Parques, Plazas, Áreas Verdes y Áreas Deportivas*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Recuperado de: <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/MANUAL-TECNICO-DE-CONSTRUCCION-Y-REQUISITOS.pdf>
- [16] Gobierno Regional de Santiago. (2023). *Guía General de Criterios de Sostenibilidad para Proyectos Financiados por el GORE Santiago*. Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. Recuperado de: <https://www.gobiernosantiago.cl/wp-content/uploads/2023/05/0.-GUIA-GRAL-CRITERIOS-SOSTENIBILIDAD.pdf>
- [17] FAO. (1996). *Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling*. Training Manual No. 4. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado de: <https://www.fao.org/4/t7202e/t7202e00.htm>
- [18] Infraestructura Verde Santiago. (2024). *Guía 02: Soluciones Basadas en la Naturaleza – Agua y Vegetación Urbana*. Red de Infraestructura Verde, Región Metropolitana. Recuperado de: https://infraestructuraverdesantiago.cl/wp-content/uploads/2024/06/GUIA-02_SbN-Agua-y-Vegetacion-Urbana.pdf
- [19] Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). *Calculadora IPC*. <https://calculadoraipc.ine.cl>