



Título del Trabajo Fin de Máster:

***ESTRATEGIA PARA LA EVALUACIÓN  
AGRONÓMICA, HIDRÁULICA Y  
ENERGÉTICA EN JARDINERÍA.  
APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE  
JARDINES PÚBLICOS***

Intensificación:

***ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS***

Autor:

***MARTÍNEZ GIMENO, M<sup>a</sup> AMPARO***

Director/es:

***DR. GARCÍA-SERRA GARCÍA, JORGE***

***DR. MANZANO JUÁREZ, JUAN***

Fecha: **SEPTIEMBRE, 2014**

Título del Trabajo Fin de Máster:

***Estrategia para la evaluación agronómica, hidráulica y energética en jardinería. Aplicación a la gestión de jardines públicos.***

Autor: **MARTÍNEZ GIMENO, M<sup>a</sup> AMPARO**

|             |  |                      |                |
|-------------|--|----------------------|----------------|
| Tipo        | A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> | Lugar de Realización | VALENCIA       |
| Director    | <b>JORGE GARCÍA-SERRA GARCÍA</b>                                 | Fecha de Lectura     | <b>09/2014</b> |
| Codirector1 | <b>JUAN MANZANO JUÁREZ</b>                                       |                      |                |
| Codirector2 |  |                      |                |
| Tutor       |  |                      |                |

**Resumen:**

*Los ecosistemas del sur de Europa hacen un uso intensivo de los recursos hídricos debido a las necesidades de riego que requieren, no compensadas por las escasas precipitaciones de un clima semiárido como el de España. En este contexto se halla la gestión del riego de los jardines públicos urbanos que pueden llegar a requerir un volumen de recursos hídricos del orden de un 20% del volumen total destinado a zonas urbanas y generar un importante consumo energético del riego que puede oscilar entre valores de 0.95 – 1.18 kWh/m<sup>3</sup>, con las consecuencias medio ambientales y económicas que ello comporta. En base al escenario planteado, el estudio pretende aportar soluciones en el ámbito de la gestión de recursos hídricos y energéticos en jardinería, buscando minimizar los consumos derivados de su manejo. El objetivo principal es minimizar el binomio agua-energía vinculado a toda red de riego.*

*En el trabajo se definen los aspectos más importantes para una metodología de evaluación para las redes de riego de zonas verdes, y se describen las herramientas para mejorar los resultados asociados al manejo que se alejan de los óptimos recomendables. El estudio responde a la necesidad, no satisfecha, de tratar la gestión de jardines desde un triple punto de vista que relacione los requerimientos de las especies con la red de suministro y su consumo energético asociados, imprescindible para alcanzar un resultado viable y realista. Por todo ello, el presente trabajo propone una EVALUACIÓN AGRONÓMICA – HIDRÁULICA – ENERGÉTICA combinada y secuencial. Los procedimientos propuestos de evaluación de la bondad del riego y de la instalación hidráulica, permiten obtener información oportuna para diagnosticar el estado de la instalación y ayudar en la toma de decisiones. Tras testar el protocolo sobre un caso de estudio real, queda patente el margen de mejora que tiene la instalación, en lo que al consumo de recursos se refiere, hasta llegar a valores idóneos.*

**Resum:**

*Els ecosistemes del sud d'Europa fan un ús intensiu del recursos hídrics degut a les necessitats de reg que requerixen , no compensades per les escasses precipitacions d'un clima semiàrid como el d'Espanya. En aquest context es troba la gestió del reg dels jardins públics urbans, que poden arribar a requerir un volum de recursos hídrics de l'ordre del 20% del volum total destinat a zones urbanes i generar un important consum energètic del reg. Aquest pot oscil·lar entre valor de 0.95 – 1.18 kWh/m<sup>3</sup>, amb les conseqüències mediambientals i econòmiques que això comporta. Basant-se en l'escenari plantejat, l'estudi pretén aportar solucions en l'àmbit de la gestió de recursos hídrics i*

**energètics en jardineria, buscant minimitzar els consums derivats del seu ús. L'objectiu principal és optimitzar el binomi aigua – energia vinculat a tota xarxa de reg.**

**En el treball es definixen els aspectes més importants per a una metodologia d'avaluació per a les xarxes de reg de zones verds, i es descriuen les ferramentes per millorar els resultats associats a l'ús que se n'allunyen dels òptims recomanables. L'estudi respon a la necessitat, no satisfeta, de tractar la gestió de jardins des de un triple punt de vista que relacione els requeriments de les espècies amb la xarxa de subministrament i el seu consum energètic associat, imprescindible per aconseguir un resultat viable i realista. Per conseqüència, el present treball proposa una AVALUACIÓ AGRONÒMICA – HIDRÀULICA – ENERGÈTICA combinada i seqüencial. Els procediments proposats d'avaluació de la bondat del reg i de la instal·lació hidràulica, permeten obtenir informació oportuna per diagnosticar l'estat de la instal·lació i ajudar a la presa de decisions. Després de testar el protocol en un cas d'estudi real, el marge per a millorar el consum de recursos fins arribar a valor idonis es fa evident.**

**Abstract:**

**Southern Europe ecosystems make an intensive use of water resources due to the irrigation needs required, which are not compensated by the scarce rainfall typical from a semiarid country like Spain. Urban landscapes management can be found in this context. The irrigation needs can reach a volume around a 20% of the total amount of water resources used in urban areas and lead to an important energetic irrigation consumption ranging between 0.95 – 1.18 kWh/m<sup>3</sup>, with the environmental and economic impact that this involves. Based on the stated scenario, the study is focused on providing solutions for the management of hydric and energetic resources with the intention of minimizing consumptions originated by their use. So the main goal is to optimize the “water–energy nexus” linked to all irrigation networks.**

**In this work the most important aspects for an evaluation methodology for parkland irrigation networks are defined, and are also described the tools to improve outcomes associated with managing which are far from those recommended as best. The research responds to the necessity not satisfied of handling landscapes management from a triple point of view relating requirements of the species with irrigation network and its associated energy consumption. This is essential to reach a realistic and feasible result. For this reason, this work proposes a combined and sequential AGRONOMIC – HYDRAULIC – ENERGETIC ASSESSMENT. The proposed methodology to evaluate the irrigation quality and the hydraulic system behavior permits to obtain appropriate information to diagnose system performance and to help decision making. After testing the protocol in a real case study, the margin for improvement in resources consumption becomes clear.**

**Palabras clave:**

**Jardines públicos, eficiencia del riego, evaluación, optimización, toma de decisiones**

# Agradecimientos

La opción de realizar este trabajo me llegó en unos de los momentos en los que buscaba una oportunidad para cambiar de camino. Cambié y acerté. Y espero que sólo haya sido el inicio de un trayecto aun muy largo, intenso y apasionante. Gracias Álvaro Royuela por haberme recordado en el momento exacto.

Mi más sincero agradecimiento a mis tutores. Jorge García-Serra, gracias por ponerle tanta ilusión a cada una de las explicaciones magistrales que me has regalado. Juan Manzano, tienes el arte de saber enseñar y de saber valorar al que aprende. Gracias por tu atención constante y paciente.

No hubiera podido realizar este trabajo sin la confianza que depositó en mi Salvador López Galarza. Me reconforta saber que el esfuerzo ha valido la pena y el resultado ha sido satisfactorio también para Universidad Politécnica de Valencia.

El agradecimiento más cordial es para Álvaro Muñoz. Hemos formado un gran equipo. Gracias por tu capacidad de empatía a la hora de trabajar y tu voluntad de aprender. Yo ya te considero todo un experto en riego. No puedo olvidar tampoco a los manitas Iban Balbastre y Luis Hipólito. He disfrutado mucho aprendiendo con vosotros. Gracias siempre por vuestra buena voluntad y disposición. Y mi absoluto reconocimiento a Miguel Ángel Jiménez por toda la ayuda prestada. Siempre tienes una buena respuesta para mis preguntas. Y los últimos en llegar al equipo, Fernando Calleja, Héctor Campos y David Sanes. Muchas gracias por vuestras aportaciones.

E non potrei terminare i miei ringraziamenti senza citare la mia amica Antonella. Certamente saprai che sei stata essenziale in questi due anni. Senza te probabilmente non sarei arrivata fin qui. Y aunque no tan cerca como antes, imprescindibles siempre: Laura, Adrián y Andrea. Mi último reconocimiento a mis padres y a Luismi. Sois la base para que el resto de cosas funcionen.



**A la iaia Chelo**



# Índice de contenidos

|  |    |
|--|----|
| Agradecimientos.....   | 1  |
| Índice de figuras.....   | 6  |
| Índice de tablas.....  | 8  |
| Índice de símbolos.....  | 9  |
| Capítulo 1. Introducción.....  | 15 |
| Capítulo 2. Antecedentes y objetivo.....   | 19 |
| Capítulo 3. Metodología de evaluación.....                                       | 23 |
| 3.1. Inventariado de la instalación hidráulica.....                              | 24 |
| 3.2. Inventariado de las especies vegetales.....                                 | 24 |
| 3.3. Cálculo de las necesidades de riego.....                                    | 25 |
| 3.4. Medida de la uniformidad del riego.....                                     | 32 |
| 3.5. Elaboración del modelo hidráulico de la red.....                            | 39 |
| 3.6. Ajuste del modelo hidráulico de la red.....                                 | 40 |
| 3.7. Caracterización de los grupos de bombeo.....                                | 44 |
| 3.8. Optimización de turnos de riego.....  | 51 |
| Capítulo 4. Aplicación al caso de estudio.....                                   | 55 |
| 4.1. Inventariado de la instalación hidráulica de la red de riego de la UPV..... | 55 |
| 4.2. Inventariado de las especies vegetales del jardín de la UPV.....            | 56 |
| 4.3. Cálculo de las necesidades de riego de las especies de la UPV.....          | 56 |
| 4.4. Medida de la pluviometría en parcelas de la UPV.....                        | 65 |
| 4.5. Elaboración del modelo hidráulico de la red de la UPV.....                  | 76 |
| 4.6. Ajuste del modelo hidráulico de la red de la UPV.....                       | 78 |
| 4.7. Caracterización de los grupos de bombeo de la subred de la UPV.....         | 82 |
| 4.8. Optimización de turnos de riego del jardín de la UPV.....                   | 86 |
| Capítulo 5. Conclusión.....  | 91 |
| Bibliografía.....  | 93 |
| Anejos.....  | 99 |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de las fases de evaluación del protocolo.....   | 23 |
| Figura 2. Esquema de la simplificación en el cálculo del coeficiente emisor.....  | 43 |
| Figura 3. Zona útil de funcionamiento de una bomba.....   | 51 |
| Figura 4. Imagen aérea del campus de Vera. Fuente: Google Earth.....  | 55 |
| Figura 5. Plano del jardín del campus de Vera.....  | 64 |
| Figura 6. Detalle de las parcelas estudiadas del sector del pozo dos.....   | 65 |
| Figura 7. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, disposición de los vasos pluviométricos y aspersores de las parcelas V.J6.0.011, V.J8.0.027, V.J8.A.001, V.J6.0.009, V.J6.0.038.....      | 66 |
| Figura 8. Riego durante los ensayos con detalle de aspersores y pluviómetros  | 67 |
| Figura 9. Izquierda, disposición de recipientes previa medida. Derecha, pesado tras el riego.....   | 67 |
| Figura 10. Alturas de agua interpoladas de la parcela V.J6.0.011. Izquierda, área correspondiente a la electroválvula PCm610p2. Derecha, área correspondiente a la electroválvula PCm617p2..... | 68 |
| Figura 11. Pluviometría (mm/min) interpolada para la parcela V.J6.0.011.....  | 69 |
| Figura 12. Detalle de la zona encharcada en el margen inferior de la parcela....  | 70 |
| Figura 13. Pluviometría (mm/min) para las parcelas V.J8.0.027, V.J8.A.001.....  | 70 |
| Figura 14. Detalle de la escorrentía generada durante el riego en la parcela V.J8.A.001.....  | 71 |
| Figura 15. Pluviometría (mm/min) para las parcelas V.J6.0.038.....  | 72 |
| Figura 16. Detalle de zonas encharcadas de la parcela.....  | 72 |
| Figura 17. Pluviometría (mm/min) para las parcelas V.J6.0.009.....  | 73 |
| Figura 18. Detalle de intercepción y mal funcionamiento de un aspersor.....   | 73 |
| Figura 19. Representación de las alturas de agua registradas (mm). De izquierda a derecha y de arriba a abajo, parcelas V.J6.0.011, V.J8.0.027, V.J8.A.001, V.J6.0.009, V.J6.0.038.....         | 75 |
| Figura 20. Modelo de la red hidráulica con detalle correspondiente al pozo 2.   | 76 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 21. Fichas de un nudo y una tubería de la red.....   | 77 |
| Figura 22. Representación del sistema de bombeo del pozo 2.....                                   | 77 |
| Figura 23. Fichas de una electroválvula.....  | 78 |
| Figura 24. Croquis de la instalación para la medida de caudal y presión.....                      | 79 |
| Figura 25. Caudal y presión medidos para algunos de los nudos medidos.....                        | 80 |
| Figura 26. Curvas características de las bombas.....  | 82 |
| Figura 27. Bombas y variador de frecuencia instalados en el pozo2.....                            | 83 |
| Figura 28. Presión (bar), caudal (l/min) y potencia consumida (W)en bombeo en periodo punta.....  | 84 |
| Figura 29. Diagrama esquemático del proceso de optimización.....                                  | 87 |
| Figura 30. Anomalías detectadas en la red mediante la simulación de la presión en el sistema..... | 89 |

# Índice de tablas

|   |       |
|---|-------|
| Tabla 1. Categorías definidas para el factor de especie ( $K_e$ ).....  | 28    |
| Tabla 2. Categorías definidas para el factor de microclima ( $K_{mc}$ ).....  | 29    |
| Tabla 3. Categorías definidas para el factor de densidad ( $K_d$ ).....   | 29    |
| Tabla 4. Asignación de coeficientes de especie.....   | 57-59 |
| Tabla 5. Coeficientes de especie para la zona de aromáticas.....  | 60    |
| Tabla 6. Coeficientes de especie para la zona central de cespitosas.....  | 60    |
| Tabla 7. Coeficientes de especie para el resto de zonas de cespitosas.....  | 61    |
| Tabla 8. Combinaciones posibles para el cálculo de necesidades.....   | 63    |
| Tabla 9. Necesidades de riego por combinación en el pozo dos.....   | 64    |
| Tabla 10. Parcelas de estudio con sus principales características.....  | 65    |
| Tabla 11. Valores de referencia para los indicadores empleados en la evaluación.....  | 74    |
| Tabla 12. Valores obtenidos para los indicadores empleados en la evaluación. Se destacan en color azul los valores que se consideran aceptables dentro del rango propuesto..... | 74    |
| Tabla 13. Constantes de emisor calculadas y reales.....   | 81    |
| Tabla 14. Presiones de consigna (bar) para el arranque de los variadores de frecuencia.....   | 83    |
| Tabla 15. Rangos y resultados de los índices energéticos.....   | 85    |
| Tabla 16. Consumos (kW) para cada escenario optimizado.....   | 88    |

# Índice de símbolos

|                  |   |
|------------------|---|
| CU               | Coeficiente de uniformidad [%]  |
| DU               | Uniformidad de distribución [%]   |
| DU <sub>LH</sub> | Mitad inferior de la uniformidad de distribución [%]                    |
| E <sub>a</sub>   | Eficiencia en la aplicación del riego [-]                               |
| E <sub>abs</sub> | Energía absorbida [kWh]   |
| EC <sub>e</sub>  | Conductividad eléctrica del extracto de saturación [dS/m]               |
| EC <sub>w</sub>  | Conductividad eléctrica del agua de riego [dS/m]                        |
| EEB              | Eficiencia energética de los bombeos [%]                                |
| ESE              | Eficiencia energética del sistema de suministro a parcela [%]           |
| E <sub>s</sub>   | Eficiencia del riego [%]  |
| E <sub>su</sub>  | Energía suministrada en el bombeo [kWh]                                 |
| ET               | Evapotranspiración de jardín [mm/día]                                   |
| ET <sub>0</sub>  | Evapotranspiración de referencia [mm/día]                               |
| E <sub>wm</sub>  | Eficiencia en el manejo del agua [%]                                    |
| FL               | Fracción de lavado [-]  |
| H <sub>1</sub>   | Presión a la velocidad de giro nominal de la bomba [mca]                |
| H <sub>2</sub>   | Presión a una velocidad de giro distinta a la nominal de la bomba [mca] |
| H <sub>c</sub>   | Presión de consigna [bar]   |
| H <sub>j</sub>   | Altura de bombeo en el turno i [m]                                      |

|                  |  |
|------------------|--|
| $H_{min_j}$      | Altura de bombeo para el nudo más desfavorable del turno j [mca]   |
| $H_{mk}$         | Altura manométrica media medida en el bombeo k [m]                 |
| ICE              | Índice de carga energética del sector hidráulico [m]               |
| $K_d$            | Factor de densidad [-]   |
| $K_e$            | Factor de especie [-]  |
| $k_g$            | Constante simplificada derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ]       |
| $k_i$            | Constante del emisor [ $m^{5/2}/s$ ]                               |
| $K_j$            | Coeficiente de jardín [-]  |
| $K_{mc}$         | Factor de microclima [-]   |
| $k_r$            | Constante real derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ]               |
| $k_r$            | Constante real derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ]               |
| $k_s$            | Constante derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ]                    |
| $\overline{k_g}$ | Constante simplificada derivación en parcela media [ $m^{5/2}/s$ ] |
| $L_e$            | Eficiencia de lixiviación, 0.70. [-]                               |
| $n,m$            | Número de emisores asociados a un nudo [-]                         |
| $NR_n$           | Necesidades de riego netas [mm/día]                                |
| $NR_r$           | Necesidades de riego reales [mm/día]                               |
| $P$              | Precipitación [mm/día]   |
| $P_{ef}$         | Precipitación efectiva [mm/día]                                    |
| $P_i$            | Presión en el emisor [m]   |
| $P_r$            | Presión real derivación en parcela [m]                             |
| $P_s$            | Presión derivación en parcela [m]                                  |
| $P_i/\gamma$     | Presión del agua en el punto de captación [mca]                    |

|              |  |
|--------------|--|
| $P_j/\gamma$ | Presión de diseño demandada por el sistema de riego [m]                      |
| $Q_1$        | Caudal a la velocidad de giro nominal de la bomba [ $m^3/s$ ]                |
| $Q_2$        | Caudal a una velocidad de giro distinta a la nominal de la bomba [ $m^3/s$ ] |
| $Q_i$        | Caudal del emisor [ $m^3/s$ ]  |
| $Q_j$        | Caudal del turno i [ $m^3/s$ ]   |
| $Q_r$        | Caudal real derivación en parcela [ $m^3/s$ ]                                |
| $Q_s$        | Caudal derivación en parcela [ $m^3/s$ ]                                     |
| RTM          | Factor de tiempo de ejecución [-]  |
| SC           | Coeficiente de programación [-]  |
| $S_j$        | Superficie demandante de agua [ $m^2$ ]                                      |
| $S_T$        | Superficie total de la zona de riego [ $m^2$ ]                               |
| $t_i$        | Duración del turno <sub>i</sub> [s]  |
| $V_i$        | Volumen de agua aportado en el punto de captación [ $m^3$ ]                  |
| $V_j$        | Volumen demandante de agua para un turno j [ $m^3$ ]                         |
| $V_k$        | Volumen de agua bombeado por el bombeo k [ $m^3$ ]                           |
| $V_T$        | Volumen total de riego [ $m^3$ ]   |
| WMF          | Factor de manejo del agua [%]  |
| $x_{ae}$     | Altura de agua medida en el área más seca [mm]                               |
| $x_i$        | Altura de agua medida en cada uno de recipientes de la parcela [mm]          |
| $x_{lq}$     | Altura de agua medida en el cuartil inferior [mm]                            |
| $x_m$        | Media de la altura de agua de todos los recipientes [mm]                     |

|               |  |
|---------------|--|
| $z_i$         | Cota del punto de captación de agua [m]                                    |
| $z_j$         | Cota media de la zona de demanda de agua [m]                               |
| $\alpha$      | Exponente del emisor [0.5]   |
| $\Delta E$    | Balance energético del suministro [m]                                      |
| $\eta_1$      | Rendimiento a la velocidad de giro nominal de la bomba [%]                 |
| $\eta_2$      | Rendimiento a una velocidad de giro distinta a la nominal de la bomba [%]  |
| $\eta_{bi}$   | Rendimiento bomba para $Q_i$ , $H_i$ considerando la velocidad de giro [%] |
| $\eta_{def}$  | Rendimiento a una velocidad distinta de la nominal                         |
| $\eta_{mei}$  | Rendimiento del motor eléctrico [%]  |
| $\eta_{vari}$ | Rendimiento del variador [%]   |
| $\gamma$      | Peso específico del agua [9800 N/m <sup>3</sup> ]                          |

#### Índices ANEJO 1

|                        |  |
|------------------------|--|
| $c_p$                  | Calor específico a presión constante, $1.013 \cdot 10^{-3}$ [MJ/kg °C] |
| $e_a$                  | Presión real de vapor [kPa]  |
| $e^o(T_{m\acute{a}x})$ | Presión de vapor de saturación de la temperatura diaria máxima [kPa]   |
| $e^o(T_{m\acute{i}n})$ | Presión de vapor de saturación de la temperatura diaria mínima [kPa]   |
| $e^o(T)$               | Presión de vapor de saturación de la temperatura del aire T [kPa]      |
| $e_s$                  | Presión de vapor de saturación [kPa]                                   |
| $e_s - e_a$            | Déficit de presión de vapor de saturación [kPa]                        |
| $ET_0$                 | Evapotranspiración de referencia [mm/día]                              |
| $RH_{m\acute{a}x}$     | Humedad relativa máxima [%]  |

|              |  |
|--------------|--|
| $RH_{\min}$  | Humedad relativa mínima [%]  |
| $\omega_s$   | Ángulo horario al ocaso [rad]  |
| $\Delta$     | Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]                               |
| $a_s + b_s$  | Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados |
| D            | Día del año de cálculo [-]   |
| $d_r$        | Distancia relativa inversa Tierra-Sol [rad]                                      |
| G            | Flujo de calor del suelo [MJ/m <sup>2</sup> día]                                 |
| $G_{sc}$     | Constante solar, 0.0820 [MJ/m <sup>2</sup> min]                                  |
| J            | Número del día en el año [-]   |
| M            | Mes del año de cálculo [-]   |
| N            | Duración máxima de la insolación [horas]   |
| n            | Duración real de la insolación [horas]   |
| n/N          | Duración relativa de la insolación [-]   |
| P            | Presión atmosférica [kPa]  |
| $R_a$        | Radiación extraterrestre [MJ/m <sup>2</sup> día]                                 |
| $R_n$        | Radiación neta [MJ/m <sup>2</sup> día]   |
| $R_n$        | Radiación neta sobre la superficie del cultivo [MJ/m <sup>2</sup> día]           |
| $R_{nl}$     | Radiación neta de onda larga [MJ/m <sup>2</sup> día]                             |
| $R_{ns}$     | Radiación solar neta [MJ/m <sup>2</sup> día]                                     |
| $R_s$        | Radiación solar [MJ/m <sup>2</sup> día]  |
| $R_{so}$     | Radiación solar en un día despejado [MJ/m <sup>2</sup> día]                      |
| T            | Temperatura del aire [°C]  |
| $T_{\max}$   | Temperatura máxima diaria [°C]   |
| $T_{\max,K}$ | Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [K]                   |

|               |   |
|---------------|---|
| $T_{media}$   | Temperatura media diaria [ $^{\circ}\text{C}$ ]   |
| $T_{mín}$     | Temperatura mínima diaria [ $^{\circ}\text{C}$ ]  |
| $T_{mín,K}$   | Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [K]                              |
| $u_2$         | Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m/s]  |
| $u_z$         | Velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [m/s]                                 |
| $z$           | Altura de la medida sobre la superficie del suelo [m]                                       |
| $\gamma$      | Constante psicrométrica [kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ]  |
| $\delta$      | Declinación solar [rad]   |
| $\varepsilon$ | Ratio del peso molecular de vapor de agua/aire seco, 0.622 [-]                              |
| $\lambda$     | Calor latente de vaporización, 2.45 [MJ/kg]   |
| $\sigma$      | Constante de Stefan-Boltzmann, $4.903 \cdot 10^{-9}$ [MJ/K <sup>4</sup> m <sup>2</sup> día] |
| $\varphi$     | Latitud [rad]   |
| $\alpha$      | Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo hipotético de referencia, 0.23 [-]            |

# Capítulo 1

## *Introducción*

---

En los países mediterráneos el modelo de jardín más común es el basado en la combinación de césped y especies arbóreas típicas de climas templados y húmedos. La principal desventaja de este patrón son las altas necesidades de riego que requiere, las cuales no pueden ser compensadas por las escasas precipitaciones de un clima semiárido como el de España. Se produce, por tanto, la necesidad de aplicar riegos que suponen un consumo adicional sobre los limitados recursos de las cuencas hídricas españolas.

La jardinería urbana, y el riego de espacios verdes en general, no han de ser ajenos a la necesidad de ahorro de recursos. Actualmente se manejan gran variedad de datos que ponen de relieve la magnitud de los consumos y la importancia de racionalizarlos. Según datos del Instituto Nacional de Estadística para el año 2011, sobre volúmenes de agua suministrados a redes públicas, descontando los usos agrícolas, el consumo municipal de agua en España ronda el 9% del total, siendo buena parte de este volumen destinado a jardinería urbana. Por otro lado, la Asociación Española de Parques y Jardines (Vicente, 2001), cuantificando el uso de agua en jardinería, constató consumos muy dispares, desde 2 hasta 17 l/m<sup>2</sup>/día en la época de máximas necesidades; y como dato significativo de carácter orientativo, son 6.6 l/m<sup>2</sup>/día de media, en época de máximas necesidades.

En jardinería privada las dosis aplicadas pueden llegar a valores de hasta 30 l/m<sup>2</sup>/día (Pares et al., 2004). Y como cifra de referencia para unas necesidades hídricas medias anuales correspondientes a especies con necesidades moderadas en el sureste de España, el consumo de agua se aproxima a 600 l/m<sup>2</sup> (Contreras, 2006). Merece especial mención el hecho de que en la mayoría de jardines privados (más del 76%)

(Vicente, 2001), el agua empleada para riego es agua potable. Como consecuencia, el riego puede generar altos costes económicos. Además, como la gestión del agua en España prioriza el abastecimiento urbano frente a otras demandas (como la industrial o agrícola), es esencial racionalizar el consumo de agua y realizar un manejo sostenible para no penalizar otros usos.

Como cierre a todo estos datos indicar que, en parques y jardines, se está utilizando un 1,5% del consumo de agua total de España. No es una cifra excesivamente alta si se compara con otros usos, pero no por eso deja de ser importante, y dado que el territorio español es xerofítico en un 60% de su superficie, existe una obligación incuestionable de ahorrar agua (Pintado, 2001). Tampoco hay que olvidar que debido al cambio climático, se espera un aumento de la temperatura media que incrementará la evapotranspiración, lo que podría agravar las condiciones de sequía, lo cual justifica en mayor medida la necesidad de manejar los recursos hídricos de manera responsable.

Así mismo, es imprescindible destacar que en gran parte de los sistemas de riego no se dispone de cota suficiente para realizar la distribución del agua por gravedad, por lo que es necesario el empleo de grupos de bombeo que aporten al sistema la presión necesaria para su correcto funcionamiento. En estos casos, el riego no sólo supone consumo de agua, sino que implica un importante consumo energético con las consecuencias económicas y medioambientales que ello comporta.

Se justifica por tanto **la necesidad de optimizar el binomio agua-energía, siendo para ello necesario maximizar la eficiencia del riego**, que puede definirse como el cociente entre el agua empleada por la planta y el agua aplicada (Burt et al, 1997). La mejora de la eficiencia global del sistema se puede abordar desde distintos enfoques, y el que aquí se presenta, se fundamenta en la búsqueda de la eficiencia a través de herramientas y técnicas innovadoras.

En primer lugar, la metodología debe considerar el modelo de gestión basado en el cálculo ajustado de las necesidades de riego del jardín. De forma que, aportando la

cantidad de agua que la planta necesita, se pueda evitar que se produzcan pérdidas por percolación o escorrentía y lograr que la programación de riegos (intervalo, duración y dosis) sea correcta. En segundo lugar, se debe lograr que la instalación hidráulica sea la adecuada para poder ajustar la programación de riegos a los requerimientos del sistema. El riego eficiente en jardinería también debe entenderse como una buena gestión hidráulico-energética de la red de distribución. Por tanto, en base al escenario planteado, **el presente trabajo pretende aportar soluciones en el ámbito de la gestión de recursos hídricos y energéticos en jardinería, buscando minimizar los consumos derivados de su manejo.**



# Capítulo 2

## *Antecedentes y objetivo*

---

Para entender el enfoque e importancia que aporta el presente estudio, es necesario contrastar los dos principales escenarios que se presentan en la gestión y diseño de instalaciones de riego.

Por un lado, se plantean las condiciones de manejo teóricas, siendo sus principales fases: i) cálculo las necesidades hídricas de las especies instaladas; ii) diseño de los sistemas de riego para lograr distribuir el agua de forma eficiente y uniforme sobre el terreno; iii) programación adecuada de riegos; y iiiii) cálculo de los indicadores de calidad del riego para la adecuación y ajuste del sistema (McCabe et al., 2003).

Por otro lado, aparecen las condiciones reales de la gestión de los espacios verdes públicos, sometidos a un uso muy intensivo y cambiante. Con ello, se quiere poner en relieve la importante diferencia entre las condiciones iniciales de proyecto y las que en verdad se producen en el día a día de la gestión. La experiencia demuestra que, habitualmente, esta diferencia se produce debido a la deficiencia asociada tanto al diseño agronómico como al hidráulico, mala ejecución del proyecto y mantenimiento defectuoso. También las labores diarias pueden dar como resultado la alteración de trazado de conducciones o la sustitución indiscriminada de emisores. En otros casos, la programación consiste en el establecimiento de tres o cuatro programas estacionales, con un tiempo de riego fijo durante todo el año y donde sólo varía el intervalo entre riegos mensualmente.

Por todo ello, es objetivo principal definir unas herramientas que conduzcan a maximizar la eficiencia del riego con el fin de mejorar tanto el aprovechamiento de agua como del consumo de energía asociado. **En el presente trabajo se definen los**

**aspectos más importantes para una METODOLOGÍA INTEGRAL DE EVALUACIÓN para las redes de riego de zonas verdes** que permita obtener información oportuna para diagnosticar el estado del sistema, **y se describen las herramientas para mejorar los resultados asociados al manejo que se alejan de los óptimos recomendables.** Para ello, se propone una **evaluación que vincule aspectos relacionados con las necesidades hídricas de la vegetación, la instalación de riego en parcela y el consumo energético en la impulsión y distribución de agua,** respondiendo el estudio a la **necesidad no satisfecha de tratar la gestión de jardines desde este triple punto de vista AGRONÓMICO-HIDRÁULICO-ENERGÉTICO imprescindible para alcanzar un resultado viable y realista.** No puede realizarse un estudio completo obviando alguno de estos tres elementos, pues la eficiencia global del sistema está determinada por todos ellos. Así mismo, con el fin de corroborar su eficacia, el protocolo se ha aplicado en los **jardines del campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia.** En el capítulo correspondiente se detallan los importantes ahorros conseguidos con este innovador método de evaluación.

En los últimos años, son diversos los estudios que realizan aproximaciones, desde diferentes puntos de vista, a dicha problemática, centrándose la mayoría de ellos en el estudio hidráulico o energético de los sistemas de riego de jardines. Los trabajos de investigación más importantes desarrollados en este ámbito son los siguientes.

#### Estudios centrados en el ajuste de las necesidades de riego

En primer lugar, para abordar la necesidad de evaluar la eficiencia del riego se han de establecer las necesidades de agua que tiene la vegetación que compone el espacio verde a evaluar. Como primera aproximación al problema, se definió el método del coeficiente de jardín, dentro de las técnicas de xerojardinería (Costello et al., 1999). Es una forma práctica y que ofrece buen resultado mediante obtención a través de un coeficiente, propio de cada zona o jardín, que al multiplicarlo por la evapotranspiración de referencia, proporciona la demanda hídrica en función de las condiciones medioambientales y las características intrínsecas de las especies.

En segundo lugar, para establecer la programación del riego existen también diferentes alternativas. Desde el empleo de modelos agro-hidrológicos para el cálculo de la evapotranspiración (Allen et al. 1998), hasta el empleo directo de sensores de humedad de suelo (Qualls et al., 2001). En esta línea, existen numerosos ejemplos de tecnologías específicas para jardinería, incluyendo controladores climáticos electrónicos, y sistemas de telegestión (*U.S. Bureau of Reclamation, 2012*).

#### Estudios centrados en la determinación de uniformidad del riego

La evaluación de un sistema de riego es un proceso mediante el que se puede saber si la instalación y el manejo que se hace de ella reúnen las condiciones necesarias para aplicar los riegos adecuadamente, esto es, cubriendo las necesidades del jardín y al mismo tiempo minimizando las pérdidas de agua. Una de las formas de averiguarlo es a través del concepto de uniformidad, es decir, del control del reparto equitativo del agua en la superficie regada.

En este sentido, existen diferentes metodologías de diseño que una vez fijada la dosis, proporciona una pluviometría adecuada y optimizan la uniformidad de aplicación. Para ello, consideran el tipo y espaciamiento del emisor, la presión y su variación en la subunidad de riego o la topografía de la parcela (Zhang et al., 2013).

#### Estudios centrados en el control del consumo energético

Además de ajustar las dosis de riego, debe buscarse la eficiencia energética a través del adecuado funcionamiento de los grupos de bombeo que abastecen las redes de distribución. La tendencia en las redes de riego en jardinería es semejante a la agrícola, donde los ahorros de agua han significado consumos energéticos mayores (Corominas, 2010), puesto que el empleo de sistemas más eficientes requiere que estos sean presurizados. Por este motivo se han desarrollado programas por parte de la Administración para reducir el consumo de energía (IDAE, 2005) y son numerosos los trabajos de investigación que han propuesto metodologías de ahorro.

Entre otros, se pueden mencionar metodologías para optimizar la sectorización del sistema (Jiménez et al., 2010; Farmani et al 2007), agrupar la demanda en redes con telecontrol centralizado (Rodríguez et al., 2009), el empleo de reguladores de velocidad de giro en estaciones de bombeo para ajustar su rendimiento (Lamaddalena y Khila, 2007) o metodologías para calcular y mejorar la eficiencia energética en redes hidráulicas (Abadia et. al 2008; Pardo et al., 2013). Así mismo, se han llevado a cabo diversos trabajos de integración de la gestión agronómica con la hidráulica en agricultura que, por concepción, son trasladables a la gestión del riego de zonas verdes. Se han desarrollado herramientas informáticas para el control del riego, muchas en entorno GIS (Corenet, Progar, Irrigest, etc.), llegando hasta aquellas que agrupan módulos de programación de riego según FAO-56, con software de análisis hidráulico y módulos de optimización (HuraGis; Jiménez, 2008; Telegestar, García et al., 2012).

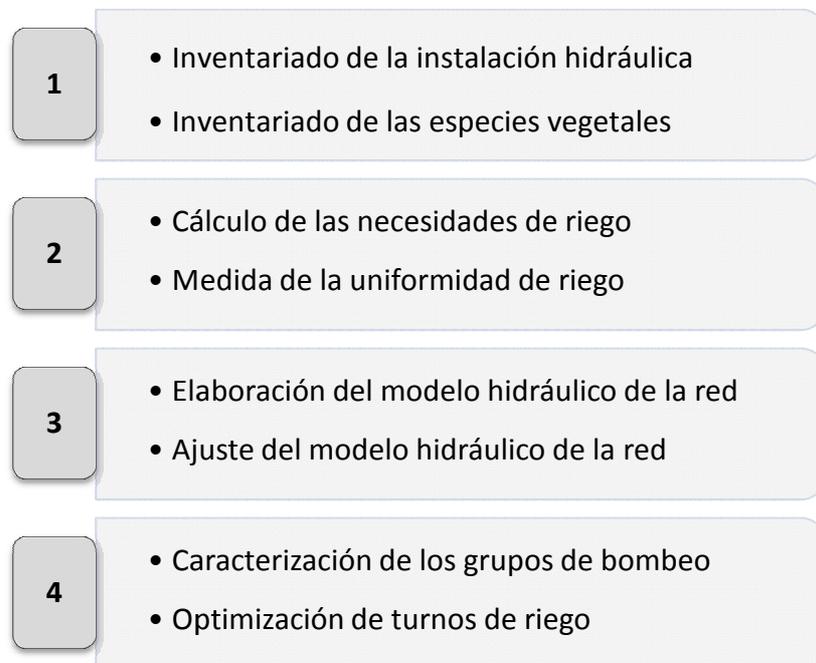
También la preocupación por el problema energético en jardines comienza a aparecer de manera específica en la literatura científica prestándose atención a las repercusiones del diseño de las subunidades (Arbat et al., 2012), a la aplicación de herramientas de análisis hidráulico (Manzano et al., 2011) y al estudio incipiente del conjunto de parámetros hidráulicos y energéticos (Martínez Gimeno et al., 2013).

# Capítulo 3

## *Metodología de evaluación*

---

En el presente capítulo se aborda, desde un punto de vista genérico, el procedimiento propuesto para llevar a cabo la evaluación integral de jardines. En la siguiente figura se presentan los bloques de tareas propuestos con sus correspondientes fases de desarrollo.



**Figura 1.** Esquema de las fases de evaluación del protocolo

Cabe destacar que, aunque algunas de estas fases se pueden llevar a cabo simultáneamente, se recomienda seguir el orden propuesto. A continuación, se detallan para cada una de estas etapas, los métodos y técnicas que se consideran más adecuados para la morfología de los jardines públicos.

### **3.1. Inventariado de la instalación hidráulica**

Las instalaciones de riego que disponen normalmente los espacios verdes se componen de múltiples elementos que les permite obtener y distribuir el agua de riego en diversos puntos a un caudal y presión determinados. Para ello, se emplean grupos de bombeo, que en el mejor de los casos vienen acompañados de programadores y variadores de frecuencia que permiten ajustar con mayor precisión los tiempos de riego; tuberías de distribución; válvulas de diversas tipologías; y emisores (principalmente aspersores y difusores).

Todo este compendio de elementos hidráulicos ha de quedar perfectamente identificado con el fin de poder realizar una abstracción de la realidad, es decir, poder crear un modelo hidráulico que permita simular diferentes situaciones de manejo de la instalación objeto de estudio.

La información fundamental a conocer en las redes de riego es la siguiente:

- Puntos de abastecimiento de la red.
- Aforo y nivel dinámico de los pozos.
- Grupos de bombeo: número, disposición, potencia y curvas características.
- Variadores de frecuencia: número y consignas de funcionamiento.
- Conducciones: trazado, longitud, diámetro, material y presiones de diseño.
- Electroválvulas: disposición y características.
- Válvulas de regulación: reductoras, sostenedoras y limitadoras de caudal.
- Emisores: disposición, número y características.

### **3.2. Inventariado de las especies vegetales**

Los jardines son composiciones vegetales heterogéneas en las que pueden aparecer especies de muy diferentes necesidades hídricas. En la mayoría de espacios verdes suelen predominar las composiciones basadas en praderas de césped con árboles y arbustos. Aun así, en la actualidad, son muy habituales los jardines xerofíticos con bajas exigencias de riego.

El procedimiento de evaluación comienza en primer lugar con la identificación de las especies plantadas siendo importante conocer tanto su disposición como las asociaciones de especies existentes. Para ello, se han de identificar las hidrozonas, es decir, las áreas de requerimientos hídricos similares. A la hora de diseñar un jardín, lo correcto es agrupar las plantas por zonas, atendiendo a sus necesidades hídricas, de manera que las plantas con unas necesidades de agua similares se ubiquen en un mismo sector para que reciba la misma cantidad de agua. De esta manera, no tiene lugar la descompensación en el aporte de agua que se daría si las especies que han sido instaladas en una misma zona poseen muy distintas necesidades, recibiendo así unas plantas más agua de la que requieren mientras que otras no habrían quedado satisfechas. Sin embargo, una vez diseñado el jardín y debido a la evolución del mismo, no siempre se pueden identificar exhaustivamente las hidrozonas de un jardín, pero se puede realizar una buena aproximación que facilite y optimice los cálculos posteriores.

Esta segunda etapa de identificación de especies, es básica para el cálculo de necesidades de riego, y así se abordará en el caso de estudio. Este es un paso imprescindible para el cálculo de los volúmenes de agua a aportar.

### **3.3. Cálculo de las necesidades de riego**

La obtención de la cantidad de agua requerida por las plantas es el primer paso hacia la sostenibilidad medioambiental de los jardines, puesto que el propio ahorro de energía comienza con el ahorro de agua. Este cálculo tiene diversos enfoques respecto al estado que se desee que tenga el jardín. En otras palabras, el volumen de agua aplicado se adecúa un margen de satisfacción de necesidades de riego que permitan la supervivencia de la planta pero con apariencias de la misma diferentes. En base a esto, se establecen tres tipos de riego (Burés, 2000):

- Riego óptimo: se aporta el agua necesaria para que el crecimiento y la calidad puedan ser máximas y la apariencia de las plantas sea excepcional.

- Riego deficitario: es aquel que provee a la planta de suficiente agua para mantener una apariencia adecuada con un menor crecimiento.
- Riego de supervivencia: se aporta a la planta suficiente agua para permitir su supervivencia y mantener el potencial de recuperación de la especie para cuando de nuevo se desee o se pueda suministrar agua. Bajo este tipo de riego, el aspecto y el crecimiento de la planta son visiblemente modificados.

En base a las razones medioambientales y económicas planteadas anteriormente, este documento desarrolla un cálculo basándose en el **riego deficitario**, puesto que los jardines regados a este nivel pueden reducir del 25% al 30% del agua aplicada con un riego óptimo. En todo caso, los tiempos de riego obtenidos a partir del cálculo de necesidades pueden ser revisados y consensuados constantemente por los técnicos encargados del mantenimiento de los jardines para evitar problemas puntuales tanto de déficit como de exceso de riego.

Así mismo, se introduce el concepto de **xerojardinería** aplicado a los cálculos de necesidades. Este término fue acuñado y legalmente registrado por el *Denver Water Department* en 1981 con el fin de convertir la conservación del agua aplicada en jardinería en un concepto fácilmente reconocible. El término se basa en los siguientes principios generales: planificación y diseño, limitación de áreas con césped, selección y zonificación apropiada de plantas, mejora del suelo, utilización de acolchado, riego eficiente, y mantenimiento apropiado.

El principio de riego eficiente se logra utilizando los sistemas de aplicación apropiados y mediante la planificación calculada del riego. Con este último propósito, se ha empleado el denominado **método del Coeficiente de Jardín** (Costello et al., 2000). Este método es básicamente el mismo que el empleado para los cultivos, con la sustitución del coeficiente de cultivo por uno que se adecúa a las características de los jardines.

Por tanto, el cálculo de las necesidades hídricas del jardín se realiza mediante la estimación de un coeficiente, que al multiplicarlo por la evapotranspiración de referencia da lugar a la evapotranspiración del jardín:

$$ET = ET_0 \times K_j$$

Donde

|                 |   |
|-----------------|---|
| ET              | Evapotranspiración de jardín [mm/día]     |
| ET <sub>0</sub> | Evapotranspiración de referencia [mm/día] |
| K <sub>j</sub>  | Coficiente de jardín [-]                  |

La ET<sub>0</sub> se estima a través de una serie de datos climáticos de la zona y diversas ecuaciones basadas el método FAO Penman-Monteith, tal y como se muestra en el Anejo 1. Por su parte, el coeficiente de jardín se compone de los siguientes factores:

$$K_j = K_e \times K_{mc} \times K_d$$

Donde

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| K <sub>j</sub>  | Coficiente de jardín [-] |
| K <sub>e</sub>  | Factor de especie [-]    |
| K <sub>mc</sub> | Factor de microclima [-] |
| K <sub>d</sub>  | Factor de densidad [-]   |

#### Elección del coeficiente de especie (K<sub>e</sub>)

El coeficiente de especie, tal y cómo indica su denominación, es un valor que minora las necesidades de agua en función de la especie en cuestión. El procedimiento a seguir se compone de dos fases. En primer lugar, se debe caracterizar cada una de las especies inventariadas; y en segundo lugar, seleccionar el K<sub>e</sub> que mejor representa a las hidrozonas establecidas en el jardín. Así, aunque hubiera variedad de especies con unas necesidades ligeramente distintas, se tomaría un K<sub>e</sub> medio a partir de los coeficientes de cultivo de cada una de las especies instaladas, o se podría tomar el coeficiente de la especie más exigente como K<sub>e</sub>, puesto que la variación en los coeficientes sería pequeña.

En el presente documento se aconseja que se seleccionen los coeficientes para cada una de las especies en base a los resultados obtenidos en un proyecto iniciado por el Water Use Efficiency Office de California, Department of Water Resources, dirigido por University of California Cooperative Extension (San Francisco y San Mateo County Office). Este estudio denominado WUCOLS (acrónimo utilizado para Water Use Classification of Landscape Species) se elaboró con el fin de establecerse como una guía para racionalizar la asignación de necesidades hídricas a una lista de especies utilizadas en jardinería. Además, se ha tomado en consideración el texto desarrollado por el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario, Clasificación de especies de jardín según sus necesidades hídricas para la región de Murcia (Contreras, 2006) por representar adecuadamente las particularidades de los jardines mediterráneos.

Las categorías hídricas para este coeficiente son las siguientes, tomando como referencia para cada una de las especies los valores mínimos de cada rango, con el objetivo de cumplir los requisitos que plantea el riego deficitario.

| Categoría | Rango $K_e$ | $K_e$ seleccionada |
|-----------|-------------|--------------------|
| Alta      | 0.7 – 0.9   | 0.7                |
| Moderada  | 0.4 – 0.6   | 0.4                |
| Baja      | 0.1 – 0.3   | 0.1                |
| Muy baja  | < 0.1       | 0.05               |

**Tabla 1.** Categorías definidas para el factor de especie ( $K_e$ )

#### Elección del coeficiente de microclima ( $K_{mc}$ )

Los microclimas existen en todos los jardines y se deben tener en cuenta en las estimaciones de la pérdida de agua por las plantas. Elementos propios del paisaje urbano, tales como edificios y zonas pavimentadas, influyen en la temperatura, la velocidad del viento, la intensidad de la luz y la humedad de las plantaciones, que a su vez afectan a la tasa de evapotranspiración. El coeficiente de microclima se emplea para tener en cuenta estas diferencias, y varía entre 0.5 y 1.4, quedando separado en las siguientes categorías.

| Categoría | Rango $K_{mc}$ |
|-----------|----------------|
| Alta      | 1.1 – 1.4      |
| Media     | 1.0            |
| Baja      | 0.5 – 0.9      |

**Tabla 2.** Categorías definidas para el factor de microclima ( $K_{mc}$ )

El valor de  $K_d = 0.5$  se establecería para zonas muy sombreadas por edificaciones anexas. Un valor de  $K_d = 1.4$  sería para un jardín soleado en el que pueda incidir una radiación extra procedente de superficies reflejantes de edificaciones cercanas que aumenten la temperatura de la parcela.

#### Elección del coeficiente de densidad ( $K_d$ )

El factor de densidad se utiliza en la fórmula del coeficiente de jardín para tener en cuenta las diferentes densidades de vegetación del jardín, puesto que las diversas concentraciones de plantas generan variaciones sustanciales en cuanto a pérdidas de agua, y por consiguiente, a variaciones de la tasa de evapotranspiración. El coeficiente de densidad varía entre 0.5 y 1.3, quedando separado en las siguientes categorías.

| Categoría | Rango $K_d$ |
|-----------|-------------|
| Alta      | 1.1 – 1.3   |
| Media     | 1.0         |
| Baja      | 0.5 – 0.9   |

**Tabla 3.** Categorías definidas para el factor de densidad ( $K_d$ )

El valor de  $K_d = 0.5$  se establecería para jardines con mucho suelo descubierto y poca densidad de plantación, como pueden ser jardines inmaduros y con plantaciones espaciadas. Un valor de  $K_d = 1.3$  sería para un jardín con alta densidad de árboles, arbustos y tapizantes.

Una vez obtenida la ET mediante la  $ET_0$  y el  $K_j$ , se le descuenta la precipitación efectiva, es decir, la cantidad de agua de lluvia que realmente queda a disposición de las especies vegetales, para obtener las necesidades de riego netas:

$$NR_n = ET - P_{ef}$$

Donde

- $NR_n$  Necesidades de riego netas [mm/día]
- ET Evapotranspiración de jardín [mm/día]
- $P_{ef}$  Precipitación efectiva [mm/día]

La precipitación efectiva depende de la cantidad, intensidad y duración de cada evento de lluvia; del tipo de suelo y su capacidad de almacenamiento de agua; del tipo de planta y de la profundidad de raíces; y de la humedad previa existente en la zona radical. En este caso, el cálculo de la  $P_{ef}$  sigue el criterio de la FAO que recomienda para climas secos que sólo el 75% de las lluvias superiores a 5 mm se pueden considerar como una adición de humedad en el suelo.

$$P_{ef} = 0.75 (P - 5)$$

Donde

- $P_{ef}$  Precipitación efectiva [mm/día]
- P Precipitación [mm/día]

Finalmente, para obtener las necesidades de riego totales, es decir, el agua a aplicar, se deben tener en cuenta dos factores más:

- La eficiencia del sistema de riego adoptado. Durante el proceso de riego se produce una pérdida considerable de agua por evaporación, infiltración, percolación, etc. La cantidad pérdida depende del sistema de riego empleado; y los valores recomendados por diversos autores (Keller et al., 1980; Phocaidis, A., 2000 y Hoffman, G.J., 2007) son los siguientes:

|                |                    |
|----------------|--------------------|
| Aspersión..... | 0.75 – <u>0.80</u> |
| Goteo.....     | 0.8 – <u>0.90</u>  |

Se tomarán los valores máximos de cada umbral con el fin de ajustarse a los requerimientos del riego deficitario, y por considerar suficientes el resto de mayoraciones aplicadas.

- La salinidad del agua de riego. Esta consideración se introduce con el fin de contemplar la posible necesidad de aplicar una dosis de lavado extra con el riego, para evitar la acumulación de sales. Esta mayoración se hace a través de la fracción de lavado, factor que representa la cantidad mínima de la lámina neta a aportar que debe drenar a través de la rizosfera para regular la salinidad. Para su cálculo se debe tomar en consideración tanto la salinidad del agua empleada como la tolerancia de las especies del jardín.

Para el cálculo de la fracción de lavado normalmente se toma como umbral de tolerancia la salinidad de las cespitosas por ser éstas las más sensibles de las especies instaladas. Concretamente, y en función de las recomendaciones (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1987), se empleará los umbrales referentes a la especie Festuca (por ser la más común en jardines) para un rendimiento potencial del 70%, puesto que en los cálculos que se desarrollan no prima la productividad de las especies sino la supervivencia de las mismas. La fracción de lavado queda como sigue.

$$FL_{\text{POZO}} = \frac{EC_w}{5 \times EC_e - EC_w} \times \frac{1}{Le}$$

Donde

|                 |   |
|-----------------|---|
| FL              | Fracción de lavado [-]                                    |
| EC <sub>w</sub> | Conductividad eléctrica del agua de riego [dS/m]          |
| EC <sub>e</sub> | Conductividad eléctrica del extracto de saturación [dS/m] |
| Le              | Eficiencia de lixiviación, 0.70. [-]                      |

Finalmente, se determina la cantidad de agua necesaria para mantener una calidad visual adecuada en el jardín a razón del volumen de agua diario.

$$NR_r = \frac{NR_n}{E_a \times (1 - FL)}$$

Donde

$NR_r$  Necesidades de riego reales [mm/día]

$NR_n$  Necesidades de riego netas [mm/día]

$E_a$  Eficiencia en la aplicación del riego [-]

$FL$  Fracción de lavado [-]

### **3.4. Medida de la uniformidad del riego**

Teniendo en cuenta la importancia que tiene minimizar los consumos energéticos e hídricos asociados al manejo de jardines, una de las principales medidas que se plantea, es optimizar la eficiencia del riego a través de la uniformidad en la aplicación.

La eficiencia del riego es un parámetro difícil de cuantificar, y a menudo se obtiene indirectamente mediante la distribución de la uniformidad, como un indicador de la eficiencia potencial de las áreas regadas por aspersión. Debido a una deficiente gestión, el riego puede ser uniforme pero ineficiente, es decir, que se produzca un exceso de riego. Esta situación supone que en determinadas zonas del jardín se esté empleado injustificadamente recursos que impliquen un consumo extra de agua y energía. Sin embargo, el riego no puede ser no uniforme y eficiente. Por ello, la uniformidad de riego puede ser una buena indicación de la eficiencia de riego.

Esta parte de la evaluación tiene como objetivo determinar una serie de coeficientes de distribución y eficiencia de la unidad de riego que permitan detectar posibles deficiencias y ayuden a ajustar al máximo el riego en base a las necesidades de las especies establecidas en jardín. Para ello, como paso previo, se deben realizar una serie de medias in situ que abastezcan de datos suficientes al cálculo de los coeficientes. El procedimiento es el que sigue.

### Análisis espacial de la pluviometría

La metodología propuesta para la medida de la uniformidad del riego es la **cuantificación directa de la pluviometría** de los aspersores dispuestos en las parcelas. El método de evaluación procede de la *American Society for Agricultural Engineers* y la *National Resources Conservation Service* (NRCS) (Micker, 1996 y ASAE, 2000). El procedimiento empleado puede ser ligeramente modificado con el fin de ajustarlo a las peculiaridades de los jardines caso de estudio.

Básicamente se debe establecer una matriz de vasos pluviométricos adaptada a las dimensiones de la parcela. Es imprescindible que estos colectores tengan un borde fino de modo que el área de captura se defina por las dimensiones de la superficie del colector, y el agua no fluya por un borde plano. Así mismo, la profundidad de los colectores debe ser suficiente para evitar que el agua salpique; y la proyección de la abertura del colector debe ser horizontal de manera que el agua recogida coincida exactamente con la profundidad aplicada a la superficie.

Tras disponer los recipientes, se ha de realizar un riego de una duración determinada y conocida. Posteriormente se recogen los recipientes con el agua que ha precipitado en orden estricto de disposición, y se pesan con el fin de cuantificar el agua de una forma rápida, evitando que se evapore y se introduzca un error en las medidas. Finalmente, tras transformar las masas de agua en alturas o valores de pluviometría, se recomienda emplear programas basados en Sistemas de Información Geográfica para la representación espacial de los resultados obtenidos en los ensayos. Finalmente, con los datos obtenidos de estos ensayos, se alimenta el cálculo de los coeficientes que presentan a continuación.

### Evaluación de la distribución y eficiencia mediante indicadores

El objetivo del riego uniforme de jardines es suministrar el agua de la manera más homogénea posible. La mayoría de las programaciones de riego están condicionadas por las áreas que reciben la menor cantidad de agua (zonas secas). Sin embargo, si se aplica más agua en estas áreas secas, se sobre riega el resto del jardín. Es por ello, que

el objetivo de la aplicación de agua de forma uniforme es reducir la diferencia entre las zonas más y menos regadas (Zoldoske et al., 1994). Para determinar estas diferencias, y conocer la calidad real del riego, se propone el uso de los siguientes indicadores.

### **Indicadores de uniformidad de la distribución**

La uniformidad de la distribución de agua es una medida de la variabilidad de la altura de agua aplicada sobre un área dada. Los indicadores y métodos empleados para cuantificar la uniformidad, son los que se presentan a continuación.

#### **COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (CU)**

Este indicador definido por Christiansen (1942) es uno de los más empleados en la evaluación de jardines con sistemas de riego por aspersión. Se define como:

$$CU = 100 \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{\sum_{i=1}^n x_i} \right)$$

Donde

- CU      Coeficiente de uniformidad [%]
- $x_i$     Altura de agua medida en cada uno de recipientes de la parcela [mm]
- $x_m$     Media de la altura de agua de todos los recipientes [mm]

Existen diversas consideraciones de este indicador que han de tomarse en cuenta cuando se interpretan sus valores. Por un lado, el valor absoluto que se introduce en la ecuación implica que se da la misma consideración al exceso de riego como al defecto del mismo. Es decir, las desviaciones por encima o por debajo de la media se valoran con una variación que no considera su signo, no sabiendo si se representa un exceso o un defecto de agua en el riego. Por otro lado, el CU aporta una medida que compara la desviación absoluta de la medida con la media de la aplicación. Es por ello, que este indicador muestra en promedio cómo es de uniforme el patrón de aplicación. No indica en qué zonas concretas hay problemas y la intensidad del problema.

En todo caso, valores bajos de CU indican una incorrecta combinación de número y tamaño de boquilla, presión de trabajo o de distribución espacial de aspersores (Tarjuelo et al. 1992). Sin restarle importancia a este indicador, pero por todo lo expuesto anteriormente, se emplearán otros coeficientes que completen los resultados obtenidos.

#### UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN (DU)

La uniformidad por superficie de sistema de riego se puede evaluar también con este coeficiente (Merriam y Keller, 1978), definido como la media de la altura de agua del cuartil inferior, es decir, la altura de agua del 25% de los recipientes que menos agua reciben en un muestreo, dividida por la media de la altura de agua de la parcela muestreada. Se define como:

$$DU = 100 \left( \frac{x_{1q}}{x_m} \right)$$

Donde

|          |  |
|----------|--|
| DU       | Uniformidad de distribución [%]                          |
| $x_{1q}$ | Altura de agua medida en el cuartil inferior [mm]        |
| $x_m$    | Media de la altura de agua de todos los recipientes [mm] |

Este método se centra en evaluar la magnitud de las áreas que menos cantidad de agua reciben. Sin embargo, este indicador no tiene en cuenta la localización de los menores valores de aplicación. El cuartil inferior de alturas de agua puede estar distribuido en un área relativamente grande o puede proceder de un foco concreto y aislado. Por tanto, los resultados que aporten esta medida se acompañarán de análisis gráficos de la pluviometría anteriormente descritos.

Tanto el DU como el CU son parámetros que se ven muy afectados por las condiciones de ensayo. Es importante evaluar la uniformidad del riego dentro de las condiciones normales de la programación del riego. Por ello, los ensayos se deben intercalar entre la programación de riego de las parcelas para no alterar los patrones del riego.

#### COEFICIENTE DE PROGRAMACIÓN (SC)

Este coeficiente, a diferencia de los dos anteriores, no proporciona valores medios de la uniformidad. Es una medida directa del grado de aridez de las zonas más secas del jardín. Se denomina coeficiente de programación porque juega un papel importante en el establecimiento de los tiempos de riego, puesto que es común en el manejo de jardines, regar hasta que las áreas más secas están suficientemente húmedas. Para calcular el coeficiente se ha de determinar el área que menos cantidad de agua está recibiendo. La cantidad de agua aplicada en esta zona se divide por la media del agua aplicada en parcela. Se define como:

$$SC = \frac{x_m}{x_{ae}}$$

Donde

|          |  |
|----------|--|
| SC       | Coeficiente de programación [-]                          |
| $x_{ae}$ | Altura de agua medida en el área más seca [mm]           |
| $x_m$    | Media de la altura de agua de todos los recipientes [mm] |

El valor obtenido es igual o superior a la unidad, indicando la cantidad extra de agua que se necesita aplicar para cumplir las exigencias del área más seca.

#### Indicadores de eficiencia

En la evaluación del riego, tan importante es conocer cómo se distribuye el agua en parcela, como con qué eficiencia la aprovechan las plantas. Un manejo del agua efectivo se basa optimizar el balance de las necesidades de agua en el jardín sin malgastar agua. Es por ello que se deben manejar términos como *eficiencia total del sistema de riego*, que indica el porcentaje de agua de riego suministrada a la planta que realmente es beneficiosa y aprovechable para la misma. A continuación, se presentan una serie de índices (Ossa, 2005) que permiten valorar la eficiencia del riego en las parcelas objeto de estudio.

#### FACTOR DE TIEMPO DE EJECUCIÓN (RTM)

Este índice se emplea para compensar el déficit debido a la falta de uniformidad de la aplicación de agua en parcela respecto del sistema ideal. Adquiere valores superiores a

1, donde la unidad representa un sistema ideal con una aplicación uniforme del agua.

Se define como:

$$RTM = \frac{100}{DU_{LH}} \quad \text{siendo} \quad DU_{LH} = 38.6 + (0.614 \times DU)$$

Donde

RTM Factor de tiempo de ejecución [-]

DU<sub>LH</sub> Mitad inferior de la uniformidad de distribución [%]

DU Uniformidad de distribución [%]

#### EFICIENCIA EN EL MANEJO DEL AGUA ( $E_{wm}$ )

El correcto manejo del agua viene cuantificado por este factor, es decir,  $E_{wm}$  evalúa cómo la adecuada gestión del agua minimiza la aplicación adicional en el jardín. Se expresa como la relación entre la cantidad de agua suministrada como consecuencia de la no uniformidad del riego, respecto de las necesidades reales del cultivo. Se define como:

$$E_{wm} = \frac{RTM \times NR_n}{NR_r} \times 100$$

Donde

$E_{wm}$  Eficiencia en el manejo del agua [%]

RTM Factor de tiempo de ejecución [-]

NR<sub>n</sub> Necesidades de riego netas [mm/día]

NR<sub>r</sub> Necesidades de riego reales [mm/día]

En este caso, para obtener una buena eficiencia, el objetivo es minimizar las NR<sub>r</sub> en base a la disminución de la cantidad de agua aplicada como consecuencia del manejo del agua. El resultado fundamental de un manejo eficiente es que, el agua aplicada mediante el riego, es almacenada en la zona radical, sin aparición de escorrentía y con tasas mínimas de evaporación y percolación, para su máximo aprovechamiento por parte de las plantas.

#### FACTOR DE MANEJO DEL AGUA (WMF)

El significado de este índice procede de las fuentes que componen las necesidades de riego reales. El agua total que requiere la planta es la suma de las necesidades de agua netas, el agua adicional requerida para mantener los valores de uniformidad de aplicación y el agua adicional aportada por criterios de manejo. WMF expresa el porcentaje de agua, respecto de las  $NR_r$ , atribuibles a la ineficiencia en el manejo del riego. Se define como:

$$WMF = \frac{100}{E_{wm}}$$

Donde

WMF Factor de manejo del agua [%]

$E_{wm}$  Eficiencia en el manejo del agua [%]

#### EFICIENCIA DEL RIEGO ( $E_s$ )

Este clásico indicador muestra el porcentaje del riego que es empleado por la planta para crecer. En otras palabras, es la relación entre las necesidades de riego netas y la cantidad de agua realmente aplicada. Se define mediante cualquiera de las siguientes ecuaciones equivalentes:

$$E_s = 100 \times \left( \frac{NR_n}{NR_r} \right); E_s = \frac{DU_{LH} \times E_{wm}}{100}$$

Donde

$E_s$  Eficiencia del riego [%]

$NR_n$  Necesidades de riego netas [mm/día]

$NR_r$  Necesidades de riego reales [mm/día]

$E_{wm}$  Eficiencia en el manejo del agua [%]

$DU_{LH}$  Mitad inferior de la uniformidad de distribución [%]

En teoría, si la eficiencia del riego es inferior al 100%, entonces se puede ahorrar agua a través de la mejora del sistema o de su manejo. En la práctica, el agua de riego se pierde como consecuencia de la evaporación, la aplicación no uniforme y otras causas que quedan fuera del control del manejo. Los valores de eficiencia real del riego sólo pueden ser mejorados hasta valores del 85 – 90%.

### **3.5. Elaboración del modelo hidráulico de la red**

La realización de un modelo informático que represente de la manera más fiel posible el funcionamiento de la red de riego es imprescindible para evaluar la hidráulica del sistema. Para llevarlo a cabo se ha de emplear la información previamente recogida en el inventario de la instalación hidráulica, y utilizar un programa informático de análisis hidráulico que realice simulaciones.

En el presente trabajo se recomienda el uso del programa **EPANET**, puesto que permite realizar, entre otros, un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías y las presiones en los nudos, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. EPANET contiene un simulador hidráulico muy avanzado que ofrece las siguientes prestaciones (Rossman, 2000):

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.
- Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y sus costes.
- Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- Admite depósitos de geometría variable.
- Permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Permite modelar tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión.
- Admite leyes de control simples, y leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

### **3.6. Ajuste del modelo hidráulico de la red**

Una vez elaborado el modelo hidráulico, se debe comprobar la calidad del mismo y su correspondencia con la realidad. Para poder hacer uso del modelo como herramienta de análisis del funcionamiento de la red ante diferentes situaciones, se debe asegurar que sus respuestas sean lo más parecidas posible a las que tendría la red real. Concretamente, el ajuste que aquí se propone se compone de dos fases que se pueden realizar simultáneamente.

En primer lugar, se han de comparar los valores de presión que simula el programa con los registrados por transductores de presión dispuestos en ciertos puntos de la red. De esta forma, se pueden corregir las posibles variaciones que se produzcan entre la realidad y la simulación modificando adecuadamente los parámetros del modelo. Esta medida se ha de llevar a cabo por medio de transductores de presión asociados a un data-logger que almacene la información para los períodos de prueba. Los puntos de conexión en la red están condicionados por la existencia de elementos para la conexión del aparato. El punto al que se quiera conectar el data-logger debe tener una rosca hembra de  $\frac{1}{2}$ " , y para ello se han de buscar puntos de conexión de, por ejemplo, manómetros que se pudieran extraer.

En segundo lugar se propone realizar una novedosa calibración de los parámetros del modelo, indispensable para las redes de riego de jardines. Considerando que los aspersores y difusores constituyen los emisores más representativos en zonas verdes urbanas, se debe llevar a cabo un ajuste concerniente a los coeficientes de los emisores de la red. Las características de los emisores asociados a cada nudo van cambiando con el tiempo a causa de diversas alteraciones del sistema como variaciones en la ejecución con respecto al proyecto diseñado, sustituciones de emisores y boquillas, cambios en el trazado o diámetros de la subunidad, roturas y averías, y resulta muy complejo conocer el valor la constante  $k_i$  que define su curva caudal-presión ( $Q_i$ - $P_i$ ). Es imprescindible tener en cuenta que éstos son sistemas de riego donde el caudal va directamente ligado a la presión recibida, por lo que cualquier variación de la misma dará lugar a variaciones en la dosis de aplicación, alcance y

tamaño de gota del agua aportada desde los emisores. Por ello, se pone de manifiesto la necesidad de conocer la  $k_i$  a lo largo del tiempo para realizar el correcto ajuste de los caudales y tiempos de riego en el modelo. El procedimiento a seguir se puede dividir en dos metodologías en función de las características del sistema de riego caso de estudio.

#### OPCIÓN 1: MEDICIÓN Y EXTENSIÓN DE COEFICIENTES

La primera opción es la más recomendable en espacios verdes con una gran diversidad de emisores de diferentes tipologías. En este caso, la obtención de las constantes de emisor se puede realizar en dos pasos con el fin de, en sistemas de riego de gran envergadura, minimizar las tareas de medida. La metodología a seguir es la siguiente:

- 1) Obtención experimental de la constante de los nudos que agrupan diversos emisores a través de la medición directa sobre el sistema de riego. Para ello, se ha de emplear un transductor de presión y un caudalímetro de ultrasonidos para determinar las presiones ( $P_r$ ) y los caudales ( $Q_r$ ) de funcionamiento de los diversos puntos de consumo. El valor de la constante en derivación experimental se calcula con la siguiente expresión, siendo  $\alpha = 0.5$  (Montalvo, 2007).

$$Q_r = k_r P_r^\alpha \rightarrow k_r = \frac{Q_r}{P_r^\alpha}$$

Donde

|          |  |
|----------|--|
| $Q_r$    | Caudal real derivación en parcela [ $m^3/s$ ]        |
| $k_r$    | Constante real derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ] |
| $P_r$    | Presión real derivación en parcela [m]               |
| $\alpha$ | Exponente del emisor [0.5]                           |

Esta obtención directa de las constantes reales de derivación en parcela es importante realizarla en puntos característicos del jardín que supongan una buena representación del de totalidad del sistema estudiado para poder llevar a cabo las simplificaciones propuestas en el siguiente paso. Así mismo, es imprescindible realizar el ensayo diferenciando los sistemas de riego existentes (aspersión y difusión).

2) Obtención de la constante de los nudos que agrupan diversos emisores a través del cálculo de una constante promedio de los valores obtenidos en los puntos ensayados. Este cálculo supone una aproximación que permitirá simplificar la carga de trabajo asociada a las medidas directas. El valor de la constante en derivación simplificada se calcula con las siguientes expresiones.

$$k_{g1} = \frac{k_{r1}}{n_1}, \quad k_{g2} = \frac{k_{r2}}{n_2}, \quad \dots, \quad k_{gn} = \frac{k_{rn}}{n_n} \quad \longrightarrow \quad \overline{k_g} = \frac{k_{g1} + k_{g2} + \dots + k_{gn}}{n}$$

$$\text{Quedando para cada nudo: } k_m = \overline{k_g} \cdot m$$

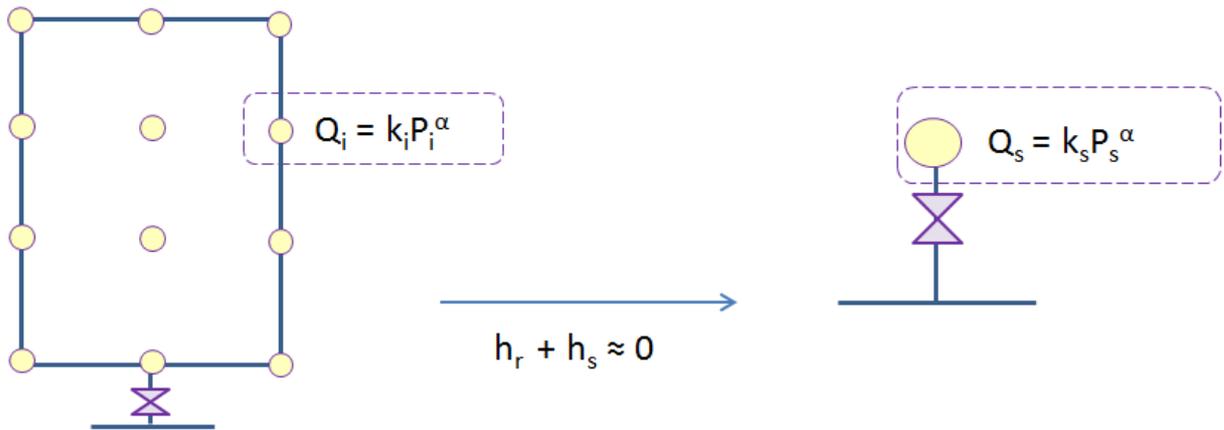
Donde

|                  |  |
|------------------|--|
| $k_r$            | Constante real derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ]               |
| $k_g$            | Constante simplificada derivación en parcela [ $m^{5/2}/s$ ]       |
| $\overline{k_g}$ | Constante simplificada derivación en parcela media [ $m^{5/2}/s$ ] |
| $n, m$           | Número de emisores asociados a un nudo [-]                         |

## OPCIÓN 2: SIMPLIFICACIÓN DE COEFICIENTES

Esta segunda modalidad de cálculo de coeficientes constituye una nueva aproximación de cálculo, que permite simplificar la tarea de evaluación sin descuidar la rigurosidad del cálculo, así como detectar posibles funcionamientos defectuosos de la red. Se podrá emplear esta opción en el caso de aplicar el protocolo de evaluación en jardines con una importante homogeneidad de tipología de emisores.

El fundamento de esta obtención experimental se basa en que, en general, conocido el número de emisores ( $n$ ) y su curva caudal-presión ( $Q_i-P_i$ ), es posible extender esta relación a cada subunidad de riego para introducirla en el modelo matemático, siempre y cuando se desprecien las pérdidas de carga en la subunidad, tanto continuas como localizadas ( $h_r + h_s$ ), por lo que la presión  $P_i$  en cada emisor se aproxima a la presión  $P_s$  a la entrada de la subunidad. Esta suposición puede hacerse siempre que se acepte que el diseño hidráulico de la subunidad es correcto y los diámetros están bien seleccionados.



**Figura 2.** Esquema de la simplificación en el cálculo del coeficiente emisor

Así, para  $n$  emisores agrupados en un mismo nudo de consumo, que representa un hidrante o derivación a parcela, el caudal asociado en parcela viene dado, para una presión en el nudo, por:

$$Q_i = k_i P_i^\alpha \quad \rightarrow \quad Q_s = \sum_n (k_i P_i^\alpha) \approx \sum_n (k_i) P_s^\alpha = k_s P_s^\alpha \quad \rightarrow \quad k_s \approx n k_i$$

Donde

- $Q_i$  Caudal del emisor [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $k_i$  Constante del emisor [ $\text{m}^{5/2}/\text{s}$ ]
- $P_i$  Presión en el emisor [m]
- $\alpha$  Exponente del emisor [0.5]
- $Q_s$  Caudal derivación en parcela [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $k_s$  Constante derivación en parcela [ $\text{m}^{5/2}/\text{s}$ ]
- $P_s$  Presión derivación en parcela [m]

Por tanto, la constante  $k_s$  del conjunto de emisores en derivación a parcela es equivalente al producto del número de emisores por la constante  $k_i$  de cada uno de los emisores individuales proporcionada por el fabricante, siempre que cada uno de ellos sea de la misma tipología y marca.

En definitiva, estos valores del coeficiente de emisor obtenidos por cualquiera de las opciones propuestas, serán los que se introduzcan en el modelo de cálculo que utiliza el programa EPANET, para así poder tener en cuenta que el caudal emitido es función de la presión en la red, quedando totalmente definido el sistema hidráulico.

### **3.7. Caracterización de los grupos de bombeo**

El protocolo de evaluación debe complementarse con una metodología para la optimización de consumos energéticos del sistema de bombeo de la red de riego. Para ello, se debe llevar a cabo una minuciosa caracterización de los sistemas de impulsión empleados en la red objeto, así como definir diversos indicadores energéticos que pongan de manifiesto el nivel de eficiencia energética del sistema.

#### Caracterización de los grupos de bombeo

El objetivo principal es conocer las condiciones de manejo iniciales, y si el sistema de bombeo trabaja en una zona de rendimientos máximos y de consumos energéticos mínimos. Para ello, será necesario definir las curvas de las bombas que relacionen caudal (Q), presión (H) y rendimiento ( $\eta$ ). Pero este paso no es tan directo como pudiera suponerse, puesto que los grupos de bombeo se dimensionan para las máximas necesidades y, como consecuencia, hay muchos períodos en el funcionamiento de las bombas en los que el rendimiento está lejos del máximo. Es por ello que normalmente los sistemas de bombeo disponen de variadores de velocidad de giro de las bombas que permiten adecuar la altura aportada independientemente de las demandas, minimizando así los consumos energéticos. Por esta razón, las curvas características de los bombeos deberán definirse a diversos regímenes de giro ( $\eta_i$ ).

En ocasiones los fabricantes facilitan este tipo de datos, o bien pueden deducirse suponiendo que se cumple la teoría de la semejanza, pero en general no se dispone de datos de los ensayos ni datos de variación del rendimiento de los grupos con la velocidad de giro, de forma que no se considera que el rendimiento de los grupos disminuye conforme disminuye la velocidad de giro de las bombas (Simpson *et al*, 2013). En el presente documento se propone emplear la fórmula de Sarbu y Borza

(1998) para tener en cuenta las variaciones de rendimiento en función de la velocidad de giro de la bomba. Las ecuaciones a definir para caracterizar el sistema de bombeo serán las siguientes:

$$H_1 = f(Q_1) \longrightarrow H_1 = A - BQ^2$$

$$\eta_1 = f(Q_1) \longrightarrow \eta_1 = EQ + FQ^2$$

Por ley de semejanza donde  $\alpha = N/N_0$

$$H_2 = f(Q_2) \longrightarrow H_2 = A \alpha^2 - BQ^2$$

$$\eta_2 = f(Q_2) \longrightarrow \eta_2 = E \frac{Q}{\alpha} + F \frac{Q^2}{\alpha^2}$$

Por Sarbu y Borza, el rendimiento a una velocidad distinta de la nominal es:

$$\eta_{def} = 1 - (1 - \eta_2) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0.1}$$

Donde "1" corresponde a las condiciones de Q, H,  $\eta$  a la velocidad de giro nominal de la bomba, "2" corresponde a las condiciones de Q, H,  $\eta$  a una velocidad de giro distinta a la nominal según las leyes de semejanza, y  $\eta_{def}$  es el rendimiento a una velocidad distinta de la nominal.

Además será necesario detallar las consignas definidas en los variadores de frecuencia, es decir, a partir de qué presiones de consigna comienzan a funcionar los variadores; y, en el caso de disponer de un sistema con asociación de bombas, definir las condiciones de conexión y desconexión de las mismas.

#### Caracterización del rendimiento energético

La evaluación energética del bombeo también implica la medición de parámetros eléctricos en los equipos de bombeo bajo las condiciones de manejo reales de los sistemas de estudio. Además de los indicadores básicos como energía unitaria ( $\text{kWh/m}^3$ ), se propone emplear los coeficientes del Instituto de Diversificación

Energética (IDAE) que permiten establecer la eficiencia energética en redes de riego. Aunque ciertamente mejorables, estos coeficientes están ampliamente generalizados en las auditorías energéticas de redes de riego, y por ello se han seleccionado para la siguiente evaluación. Se propone evaluar los siguientes tres parámetros energéticos.

#### EFICIENCIA ENERGÉTICA GENERAL (EEG)

Este coeficiente representa la eficiencia energética general de la red de distribución de todo el jardín, y se define como la relación entre la energía requerida por los sistemas de riego en parcela y la energía consumida. La EEG puede teóricamente adoptar valores entre 0 y 1, Y se expresará mediante la siguiente ecuación.

$$EEG = EEB \times ESE$$

Donde

EEB Eficiencia energética de los bombeos [%]

ESE Eficiencia energética del sistema de suministro a parcela [%]

A continuación se detalla el cálculo de las variables EEB y ESE.

#### EFICIENCIA ENERGÉTICA BOMBEO (EEB)

Este índice representa el cociente entre la potencia hidráulica suministrada por los bombeos y la potencia absorbida para un período considerado. Esta energía consumida es, en la mayoría de casos, en forma de energía eléctrica. Representa por tanto, el rendimiento de los equipos de bombeo (bombas, motores eléctricos y variadores de frecuencia), y se define como:

$$EEB(\%) = \frac{E_{su}}{E_{abs}} \times 100$$

Donde

EEB Eficiencia energética de los bombeos [%]

$E_{su}$  Energía suministrada en el bombeo [kWh]

$E_{abs}$  Energía absorbida [kWh]

En el cálculo de la energía suministrada  $E_{su}$ , los parámetros  $Q_i$  y  $H_i$  para cada turno de duración  $t_i$ , se obtienen a través de las medidas directas en la red con un transductor de presión y un caudalímetro, y siguiendo la siguiente expresión.

$$E_{su} (kWh) = 3.6 \sum_{i=1}^n \gamma Q_i H_i t_i \text{ para cada turno } i$$

Donde

|          |   |
|----------|---|
| $E_{su}$ | Energía suministrada en el bombeo [kWh]           |
| $\gamma$ | Peso específico del agua [9800 N/m <sup>3</sup> ] |
| $Q_i$    | Caudal del turno $i$ [m <sup>3</sup> /s]          |
| $H_i$    | Altura de bombeo en el turno $i$ [m]              |
| $t_i$    | Duración del turno $i$ [s]                        |

La energía absorbida  $E_{abs}$  se obtiene de la medida directa con un analizador de redes de forma que el resultado constituya un valor de la energía global afectado por el rendimiento de la bomba, del motor eléctrico y del variador. Es por tanto, la energía absorbida, equivalente a la siguiente expresión.

$$E_{abs} (kWh) = 3.6 \sum_{i=1}^n \frac{\gamma Q_i H_i t_i}{\eta_{bi} \eta_{mei} \eta_{vari_i}} \text{ para cada turno } i$$

Donde

|               |  |
|---------------|--|
| $E_{abs}$     | Energía absorbida [kWh]  |
| $\gamma$      | Peso específico del agua [9800 N/m <sup>3</sup> ]                          |
| $Q_i$         | Caudal del turno $i$ [m <sup>3</sup> /s]                                   |
| $H_i$         | Altura de bombeo en el turno $i$ [m]                                       |
| $t_i$         | Duración del turno $i$ [s]   |
| $\eta_{bi}$   | Rendimiento bomba para $Q_i$ , $H_i$ considerando la velocidad de giro [%] |
| $\eta_{mei}$  | Rendimiento del motor eléctrico [%]  |
| $\eta_{vari}$ | Rendimiento del variador [%]   |

## EFICIENCIA SUMINISTRO ENERGETICO (ESE)

La eficiencia energética del suministro es el balance entre la energía necesaria aportar al sistema y la energía real aportada en la estación de bombeo.

Para calcular la ESE se aplica la siguiente ecuación.

$$ESE (\%) = \frac{|\Delta E|}{ICE} \times 100$$

Donde

- ESE Eficiencia energética del sistema de suministro a parcela [%]
- $\Delta E$  Balance energético del suministro [m]
- ICE Índice de carga energética del sector hidráulico [m]

A continuación se detalla el cálculo de ambas variables.

### Balance energético del suministro ( $\Delta E$ )

Para calcular el balance energético del suministro se emplea la siguiente ecuación:

$$|\Delta E| = EI - ED$$

Siendo EI la energía de posición inicial con la que el agua es captada. En el caso de un bombeo único en pozo e inyección directa se puede expresar con la siguiente expresión, donde el subíndice i hace referencia a la posición inicial.

$$EI = \frac{\sum V_i \cdot (z_i + P_i/\gamma)}{V_T} \rightarrow EI = z_i$$

Donde

- EI Energía de posición inicial con la que el agua es captada [m]
- $V_i$  Volumen de agua aportado en el punto de captación [ $m^3$ ]
- $V_T$  Volumen de agua que entra aportado por los puntos de captación [ $m^3$ ]
- $z_i$  Cota del punto de captación de agua [m]
- $P_i/\gamma$  Presión del agua en el punto de captación [mca]

Por su parte, ED es la energía demandada por los sistemas de riego a presión abastecidos por el volumen  $V_T$ . El procedimiento de cálculo que propone el IDAE pondera este indicador teniendo en cuenta las superficies demandantes de agua para cada turno respecto de la superficie total. La ecuación es la siguiente:

$$ED = \frac{\sum_{i=1}^n S_j (z_j + P_j/\gamma)}{S_T}$$

Donde

|              |   |
|--------------|---|
| ED           | Energía demandada por los sistemas de riego a presión [m] |
| $S_j$        | Superficie demandante de agua [m <sup>2</sup> ]           |
| $S_T$        | Superficie total de la zona de riego [m <sup>2</sup> ]    |
| $z_j$        | Cota media de la zona de demanda de agua [m]              |
| $P_j/\gamma$ | Presión de diseño demandada por el sistema de riego [m]   |

Este cálculo se puede afinar si se realiza considerando volúmenes de agua en lugar de superficies, tal y como se muestra la siguiente ecuación:

$$ED = \frac{\sum_{i=1}^n V_j (z_j + P_j/\gamma)}{V_T} \text{ para cada turno } j$$

Donde

|              |  |
|--------------|--|
| ED           | Energía demandada por los sistemas de riego a presión [m]    |
| $V_j$        | Volumen demandante de agua para un turno j [m <sup>3</sup> ] |
| $V_T$        | Volumen total de riego [m <sup>3</sup> ]                     |
| $z_j$        | Cota media de la zona de demanda de agua [mca]               |
| $P_j/\gamma$ | Presión de diseño demandada por el sistema de riego [mca]    |

Para el cálculo de ED de cualquiera de las dos formas planteadas, se debe considerar que la presión de diseño demandada por el sistema de riego debe incluir, además de la presión necesaria en cabeza de parcela para satisfacer las necesidades de presión del sistema de riego en parcela, las pérdidas de carga en el transporte desde el punto de captación y el punto de descarga en la parcela de riego, que el IDAE estiman en 10 m.

Obviado ambos modos de obtener ED, se propone emplear la siguiente ecuación, que proporciona directamente balance energético del suministro  $\Delta E$ . En este caso, se considera para cada turno, una altura de bombeo que incluye las pérdidas de carga, que satisfaga los requerimientos de presión del nudo más desfavorable del turno. La ecuación es la siguiente:

$$|\Delta E| = -(EI - ED) = \frac{\sum_{i=1}^n V_j (Hmin_j)}{V_T}$$

Donde

- $\Delta E$  Balance energético del suministro [m]
- $V_j$  Volumen demandante de agua para un turno j [m<sup>3</sup>]
- $V_T$  Volumen total de riego [m<sup>3</sup>]
- $Hmin_j$  Altura de bombeo para el nudo más desfavorable del turno j [mca]

#### Índice de carga energética del sector hidráulico (ICE)

Para calcular el índice de carga energética del sector hidráulico se emplea la siguiente ecuación. Este índice es equivalente a la altura manométrica suministrada por el bombeo  $H_m$  en el caso de una red con un único punto de bombeo e inyección directa o a la energía específica suministrada ( $E'_{su}$ ).

$$ICE = \frac{\sum V_k \cdot H_{mk}}{V_T}$$

Donde

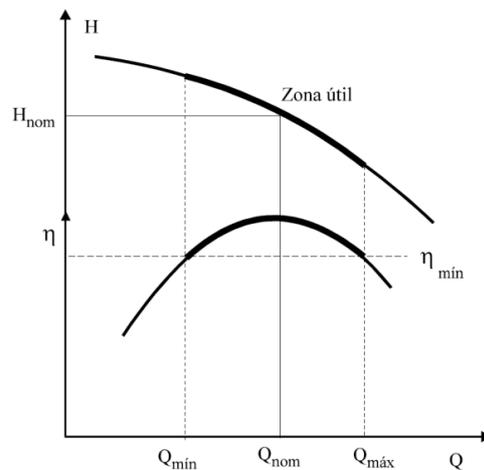
- ICE Índice de carga energética del sector hidráulico [m]
- $V_k$  Volumen de agua bombeado por el bombeo k [m<sup>3</sup>]
- $V_T$  Volumen total de riego [m<sup>3</sup>]
- $H_{mk}$  Altura manométrica media medida en el bombeo k [m]

Tras el cálculo de estos coeficientes, se debe tener en cuenta que valores altos de EEB indican una adecuada selección y funcionamiento de los equipos de bombeo. Y valores altos de ESE indican un diseño general de la red de distribución adecuado. El valor de ESE está limitado en redes de distribución con elevados desniveles. En estos casos se requiere una red sectorizada por cota para conseguir valores de ESE elevados.

### 3.8. Optimización de turnos de riego

Para lograr minimizar los consumos energéticos es imprescindible adaptar las dosis y programaciones de riego existentes con el fin de evitar descompensaciones en el reparto que suponga picos de consumo eléctrico en la red de abastecimiento o insuficiencias de capacidad de transporte en la red de distribución dando lugar a caudales insuficientes. Para llevar a cabo esta tarea, se debe realizar un **ajuste de los turnos de riego** basado en el tratamiento de datos bajo una herramienta que permita obtener recomendaciones de agrupación de caudales aplicados en períodos de tiempos que supongan un consumo energético mínimo en los bombeos.

El objetivo es lograr una apertura agrupada de electroválvulas que demanden un caudal comprendido entre un  $Q_{\min}$  hasta un  $Q_{\max}$  que asegure el funcionamiento del bombeo dentro de la zona útil por encima del umbral de rendimiento mínimo de los equipos de bombeo definido, tal y como se muestra en la figura.



**Figura 3.** Zona útil de funcionamiento de una bomba

En este contexto, los modelos de optimización ofrecen una herramienta efectiva para mejorar la operación de las redes de distribución (Mays, 2002). Para ello es necesario formular el problema de optimización de la red a través de los siguientes componentes (Hillier y Lieberman, 2006):

- Variables de decisión: representan las  $n$  decisiones cuantificables a tomar cuyos valores  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , deben ser calculados.

- **Función objetivo:** determina el grado de ejecución de una combinación de valores representadas de forma matemática.
- **Restricciones:** suponen cualquier limitación de los valores que puede tomar una variable de decisión. Se expresan también matemáticamente. Las restricciones asociadas con el problema consisten en limitaciones físicas del sistema y además requisitos definidos exteriormente. Las restricciones físicas incluyen limitaciones en la potencia, regulación de los grupos de bombeo y de los dispositivos de regulación. Los requisitos externos se refieren a restricciones como las presiones mínimas en toma y rendimientos mínimos de los equipos de bombeo permitidos.

Una vez establecido el problema matemático, se requiere investigar el algoritmo de optimización más adecuado para resolver el problema. La elección debe estar regida por las características del problema a resolver. En este caso la metodología elegida son los **algoritmos genéticos** (en adelante, AG). Un AG es un método metaheurístico basado en los mecanismos de evolución y selección natural (Goldberg 1989). Un AG representa un método de búsqueda de soluciones para problemas de optimización no lineales. Su espacio muestral de soluciones es preferentemente global, reduciéndose de este modo la tendencia a quedar atrapado en un mínimo local y evita la dependencia de la solución del punto de inicio de búsqueda.

En este método de optimización, el primer paso consiste en representar una solución válida al problema que se intenta resolver tomando una cadena de genes, donde cada uno de los cuales puede tomar un valor dentro de un rango específico. La cadena de genes que representa una solución, recibe el nombre de cromosoma. Inicialmente se construye aleatoriamente una población de cromosomas. En cada generación la aptitud de cada cromosoma es cuantificada. Los cromosomas que mejor aptitud presentan, son seleccionados para producir la descendencia de la siguiente generación, los cuales heredan las mejores características de ambos progenitores. Después de muchas generaciones seleccionando los cromosomas más aptos, se espera que el resultado muestre mejor aptitud que la población inicial.

Todos los AG siguen los procesos que a continuación se describen (Jiménez Bello, 2008):

1. Codificación del cromosoma: cada cromosoma representa una solución del problema y está compuesta por una cadena de genes.
2. Población inicial: se crea una población inicial que sirve como punto de inicio para el algoritmo genético. Esta población inicial se crea de manera aleatoria. A partir de estudios empíricos realizados sobre un amplio rango de problemas de optimización, se recomienda utilizar una población de entre 30 y 100 cromosomas.
3. Evaluación de aptitud: implica definir una función objetivo a través de la cual cada cromosoma es evaluado para conocer su grado de adaptabilidad en el entorno en consideración.
4. Selección: sobre la población existente de cromosomas se requiere realizar un proceso de selección. Si se tiene una población de tamaño  $2N$  individuos, el proceso de selección escoge dos cromosomas como progenitores, basados en su valor de aptitud, los cuales son usados después en los procesos de cruzamiento y mutación para producir una nueva descendencia para la nueva población. El proceso de selección, cruzamiento, mutación se repite hasta que la población contiene de nuevo  $2N$  cromosomas. Cuanta más alta sea el valor de su aptitud, más alta es la posibilidad que el cromosoma sea seleccionado para la reproducción.
5. Cruzamiento: después de que dos progenitores hayan sido seleccionados, se produce el cruzamiento, que es un operador que une dos progenitores para producir dos generaciones. Los dos cromosomas resultantes pueden ser mejor que sus padres y el proceso de evolución puede continuar. El cruzamiento se lleva a cabo de acuerdo con la probabilidad de cruzamiento.
6. Mutación: es el operador que aleatoriamente cambia uno o más de los genes de los cromosomas. El propósito del operador de mutación es prevenir que la población converja a un mínimo local y de esta manera introducir nuevas posibles soluciones. La mutación se lleva a cabo teniendo en cuenta la probabilidad de mutación.
7. Finalización: este proceso determina cuando el proceso genético termina de evolucionar.

Para llevar a cabo este procedimiento se recomienda emplear el módulo de programación de algoritmos genéticos OptiGA que es un control ActiveX (OCX) para la implementación de algoritmos genéticos que puede ser usado con Visual Basic y con todos los entornos que soportan estos tipos de controles. Las variables de entradas necesarias para realizar la optimización se detallan en el siguiente capítulo con la aplicación a un caso real.

# Capítulo 4

## *Aplicación al caso de estudio*

---

La metodología explicada en el capítulo 3 ha sido aplicada a un caso real. Concretamente, la evaluación se ha realizado en los jardines del campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia (en adelante, UPV), ubicados en la zona Norte de la ciudad de Valencia, junto a la autovía V-21, una de las principales vías de acceso de la ciudad.



*Figura 4. Imagen aérea del campus de Vera. Fuente: Google Earth*

Esta zona ajardinada en la actualidad abarca aproximadamente una superficie de 106.000 m<sup>2</sup>. Su configuración ha ido variando a lo largo de los cerca de cuarenta años de historia del campus y su extensión aumentando. Se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases de evaluación.

### **4.1. Inventariado de la instalación hidráulica de la red de riego de la UPV**

La instalación de riego se abastece desde dos pozos en el mismo campus, con más de 22 km de tuberías, organizadas en dos subredes y ejecutadas en acero galvanizado, PVC y PE. Para el riego en parcela, se emplean principalmente aspersores y difusores emergentes, disponiendo de un sistema de telecontrol centralizado que permite

programar los turnos de riego a través de la apertura y cierre de electroválvulas que alimentan los sistemas de riego en parcela.

La descripción detallada de la instalación aparece en el Proyecto Final de Carrera “Ampliación y mejora de las instalaciones de riego del campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia” (Cremades, 2010) realizada respondiendo al interés del Vicerrectorado de Infraestructuras de la UPV por actualizar y mejorar la instalación de riego de los jardines del Campus de Vera. Este proyecto formaba parte del plan de acción Medioambiental de la oficina de Medioambiente de la UPV. Estos datos han sido actualizados y empleados en el presente documento.

#### **4.2. Inventariado de las especies vegetales del jardín de la UPV**

Destacar que en estos jardines existen composiciones variadas, siendo muy común, la combinación de cespitosas cubriendo todo el terreno con especies arbóreas y arbustivas. Así mismo, existen pequeñas y medianas extensiones de terreno junto a aparcamientos y edificios cubiertas únicamente de césped; y otras zonas con especies de carácter mediterráneo. El conjunto botánico está compuesto por más de 2300 árboles de casi 200 especies diferentes originarias de los cinco continentes.

Las principales fuentes de información empleadas para la realización de este inventario han sido, el mencionado proyecto (Cremades, 2010) y la Guía Botánica de la Universidad Politécnica de Valencia (Esteras y Sanchis, 2012).

#### **4.3. Cálculo de las necesidades de riego de las especies de la UPV**

Como se ha indicado en el apartado correspondiente del capítulo anterior, las necesidades de riego se han obtenido mediante el método de Coeficiente de Jardín. En este apartado se justifican los valores de los coeficientes seleccionados que componen el coeficiente de jardín ( $K_j$ ), es decir, el de especie ( $K_e$ ), el de microclima ( $K_{mc}$ ) y el de densidad ( $K_d$ ) para los jardines de la UPV.

### Elección del coeficiente de especie

Como consecuencia de la adaptación de la metodología expuesta a las condiciones del campus de Vera, se presenta la siguiente clasificación de especies de jardín según sus necesidades hídricas. Para su correcta interpretación se debe tener en cuenta lo expuesto en los apartados anteriores, así como las siguientes premisas:

- Dado que se ofrecen valores de  $K_e$  constantes para todo el año, se debe contemplar la posibilidad de anular o disminuir el riego durante el periodo de reposo invernal, como puede ser el caso de los árboles de hoja caduca.
- La lista tiene un carácter subjetivo, tanto las originales como la presente adaptación. Por tanto, las evaluaciones no son definitivas, y están sujetas a cambios en función de nuevas informaciones técnicas o científicas.

Se muestran en la siguiente tabla los coeficientes de especie de cada una de las especies existentes en los jardines del Campus:

| ESPECIE                        | $K_e$ | ESPECIE                          | $K_e$ |
|--------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| <i>Juglans nigra</i>           | 0,4   | <i>Laurus nobilis</i>            | 0,1   |
| <i>Fagus sylvática</i>         | 0,4   | <i>Ligustrum lucidum</i>         | 0,1   |
| <i>Liquidambar styraciflua</i> | 0,4   | <i>Varieguita</i>                | -     |
| <i>Catalpa bignonioides</i>    | 0,1   | <i>Magnolia grandiflora</i>      | 0,4   |
| <i>Celtis australis</i>        | 0,1   | <i>Parkinsonia aculeata</i>      | 0,05  |
| <i>Cercis siliquastrum</i>     | 0,1   | <i>Taxus baccata</i>             | 0,4   |
| <i>Chorisia speciosa</i>       | 0,1   | <i>Quercus ilex</i>              | 0,1   |
| <i>Crateagus lavalleyi</i>     | -     | <i>Quercus suber</i>             | 0,1   |
| <i>Eleagnus angustifolia</i>   | 0,1   | <i>Schinus molle</i>             | 0,05  |
| <i>Ficus carica</i>            | 0,4   | <i>Tipuana tipu</i>              | 0,1   |
| <i>Forsythia x intermedia</i>  | 0,1   | <i>Arbutus unedo</i>             | 0,1   |
| <i>Fraxinus excelsior</i>      | 0,4   | <i>Eucalyptus gomphocephalus</i> | 0,05  |
| <i>Gleditsia triacanthus</i>   | 0,1   | <i>Eugenia mirtifolia</i>        | -     |
| <i>Jacaranda mimosifolia</i>   | 0,1   | <i>Phytolacca dioica</i>         | 0,1   |
| <i>Juglans regia</i>           | 0,4   | <i>Acacia retinoides</i>         | 0,1   |
| <i>Koelreuteria paniculata</i> | 0,4   | <i>Bauhinia variegata</i>        | 0,4   |
| <i>Melia azederach</i>         | 0,05  | <i>Araucaria excelsa</i>         | 0,4   |

| ESPECIE                                 | K <sub>e</sub> | ESPECIE                            | K <sub>e</sub> |
|---|----------------|------------------------------------|----------------|
| <i>Morus alba</i>                       | 0,4            | <i>Casuarina cunninghamiana</i>    | 0,1            |
| <i>Paulownia imperialis</i>             | 0,4            | <i>Cupressus arizónica</i>         | 0,1            |
| <i>Platanus x hispánica</i>             | 0,4            | <i>Cupressus macrocarpa</i>        | 0,4            |
| <i>Populus alba nívea</i>               | 0,4            | <i>Cupressus sempervirens</i>      | 0,1            |
| <i>Populus nigra</i>                    | 0,4            | <i>Pinus canariensis</i>           | 0,1            |
| <i>Populus simonii</i>                  | 0,4            | <i>Pinus halepensis</i>            | 0,1            |
| <i>Prunus cerasifera "Atropurpurea"</i> | 0,4            | <i>Pinus pinea</i>                 | 0,1            |
| <i>Robinia pseudoacacia</i>             | 0,1            | <i>Pinus silvestris</i>            | 0,4            |
| <i>Salix alba</i>                       | 0,7            | <i>Thuja occidentalis</i>          | 0,4            |
| <i>Salix babilónica</i>                 | 0,7            | <i>Juniperus thurifera</i>         | 0,1            |
| <i>Salix matsudana</i>                  | 0,7            | <i>Tetraclinis articulata</i>      | 0,05           |
| <i>Sophora japónica</i>                 | 0,1            | <i>Pinus pinaster</i>              | 0,4            |
| <i>Sorbus intermedia</i>                | 0,4            | <i>Berberis thunbergii</i>         | 0,1            |
| <i>Tamarix gallica</i>                  | 0,05           | <i>Bougainvillea glabra</i>        | 0,1            |
| <i>Tilia platyphyllos</i>               | 0,5            | <i>Cortaderia selloana</i>         | 0,4            |
| <i>Ulmus pumila</i>                     | 0,1            | <i>Hibiscus rosa sinensis</i>      | 0,1            |
| <i>Eritrina crista-galli</i>            | 0,1            | <i>Lavándula angustifolia</i>      | 0,1            |
| <i>Acer buergerianum</i>                | 0,4            | <i>Medicago citrina</i>            | -              |
| <i>Acer palmatum</i>                    | 0,4            | <i>Myrtus comunnis</i>             | 0,1            |
| <i>Wisteria sinensis</i>                | 0,4            | <i>Nerium oleander</i>             | 0,1            |
| <i>Ulmus resista</i>                    | 0,4            | <i>Phyllirea angustifolia</i>      | -              |
| <i>Fraxinus angustifolia</i>            | 0,4            | <i>Pyracanta coccínea</i>          | 0,1            |
| <i>Fraxinus ornus</i>                   | 0,4            | <i>Pistacia lentiscus</i>          | 0,05           |
| <i>Acer monspessulanum</i>              | 0,4            | <i>Polígala myrtifolia</i>         | -              |
| <i>Quercus robur</i>                    | 0,4            | <i>Rhamnus alaternus</i>           | 0,1            |
| <i>Quercus pirenaica</i>                | 0,4            | <i>Rosmarinus officinalis</i>      | 0,1            |
| <i>Quercus petraea</i>                  | 0,4            | <i>Santolina chamaecyparissus</i>  | 0,1            |
| <i>Firmiana simplex</i>                 | -              | <i>Thymus vulgaris</i>             | 0,4            |
| <i>Broussonetia papyrifera</i>          | -              | <i>Tecomaria capensis</i>          | 0,4            |
| <i>Populus x canadiensis</i>            | 0,7            | <i>Parthenocissus quinquefolia</i> | 0,4            |
| <i>Acer negundo</i>                     | 0,1            | <i>Cestrum nocturnum</i>           | 0,4            |
| <i>Morus kagallamae</i>                 | 0,4            | <i>Pittosporum tobira</i>          | 0,1            |
| <i>Annona cherimolia</i>                | 0,4            | <i>Parthenocissus tricuspidata</i> | 0,4            |
| <i>Tilia tomentosa</i>                  | 0,4            | <i>Arecastrum romazoffianum</i>    | 0,4            |
| <i>Acacia cyanophilla</i>               | 0,1            | <i>Chamaerops humilis</i>          | 0,05           |
| <i>Acacia dealbata</i>                  | 0,1            | <i>Cyca revoluta</i>               | 0,4            |
| <i>Acacia myrtifolia</i>                | 0,1            | <i>Phoenix canariensis</i>         | 0,1            |
| <i>Grevillea robusta</i>                | 0,1            | <i>Phoenix dactylifera</i>         | 0,1            |
| <i>Brachychiton acerifolium</i>         | 0,1            | <i>Trachycarpus fortunei</i>       | 0,1            |

| ESPECIE                         | $K_e$ | ESPECIE                        | $K_e$ |
|---------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| <i>Brachychiton populneus</i>   | 0,1   | <i>Washingtonia filifera</i>   | 0,1   |
| <i>Ceratonia siliqua</i>        | 0,05  | <i>Washingtonia robusta</i>    | 0,1   |
| <i>Citrus aurantium</i>         | 0,4   | <i>Phoenix robelenii</i>       | 0,1   |
| <i>Eriobotrya japonica</i>      | -     | <i>Butia capitata</i>          | 0,1   |
| <i>Eucaliptus camaldulensis</i> | 0,05  | <i>Strelitzia nicolai</i>      | 0,4   |
| <i>Eucaliptus globulus</i>      | 0,05  | <i>Musa</i>                    | 0,7   |
| <i>Ficus benjamina</i>          | 0,4   | <i>Cordyline australis</i>     | 0,1   |
| <i>Ficus elástica</i>           | 0,4   | <i>Festuca arundinacea</i>     | 0,4   |
| <i>Ficus macrophylla</i>        | 0,1   | <i>Pennisetum clandestinum</i> | 0,1   |
| <i>Ficus microcarpa</i>         | 0,1   | <i>Poa annua</i>               | 0,6   |
| <i>Quercus faginea</i>          | 0,4   | <i>Púnica granatum</i>         | 0,1   |

**Tabla 4.** Asignación de coeficientes de especie

Respecto a la definición de hidrozonas, indicar que, en el caso de los jardines del campus de Vera, no son fácilmente definibles y las necesidades de agua de las plantas no son similares, por lo que la especie con mayor necesidad de agua determina el valor de  $K_e$ . Esto es necesario si se desea mantener todas las plantas sin daños por estrés hídrico. Desafortunadamente, significa que las plantas en las categorías inferiores reciben más agua de la necesaria y pueden sufrir daños. Es por ello que, considerando que las plantaciones con necesidades mixtas de agua no son tan eficientes en el uso del agua, es importante considerar que si se desea mantener todas las plantas, pero se acepta un nivel de aspecto visual un poco inferior al óptimo (como supone el riego deficitario), entonces se debería seleccionar un  $K_e$  de valor inferior. A la vista de los valores y apreciaciones anteriores se opta por tomar distintos valores de  $K_e$  en función de lo siguiente:

- Para las zonas en que no haya cespitosas (zonas de aromáticas regadas por goteo) se tomará el valor de  $K_e$  igual al de la especie más exigente en agua, que en este caso, es el mismo para todas las especies.

Las especies más comunes en dicha zona así como sus  $K_e$ , son las siguientes:

| ESPECIE                       | $K_e$ |
|-------------------------------|-------|
| <i>Lavándula angustifolia</i> | 0.1   |
| <i>Nerium oleander</i>        | 0.1   |
| <i>Rosmarinus officinalis</i> | 0.1   |
| <i>Pittosporum tobira</i>     | 0.1   |

**Zona aromáticas:**  
 $K_e = 0.1$

**Tabla 5.** Coeficientes de especie para la zona de aromáticas

- Para las zonas con cespitosas exclusivamente o acompañadas de otras especies, que supone la mayor parte de la zona ajardinada, se siguen los siguiente criterios:

Se toma un valor de  $K_e$  de 0.6 para toda la zona central del campus (Ágora desde rectorado y pradera central hasta la ETSID), siendo esta la  $K_e$  de la especie cespitosa más exigente en agua. Esta zona es de mucho tránsito y ocio, en que la gente acostumbra a hacer uso de la zona ajardinada como lugar de esparcimiento. Las especies más comunes en dicha zona así como sus  $K_e$ , son las siguientes:

| ESPECIE                                 | $K_e$ |
|---|-------|
| <i>Cordyline australis</i>              | 0.1   |
| <i>Festuca arundinacea</i>              | 0.4   |
| <i>Pennisetum clandestinum</i>          | 0.2   |
| <i>Poa annua</i>                        | 0.6   |
| <i>Robinia pseudoacacia</i>             | 0.1   |
| <i>Phoenix dactylifera</i>              | 0.1   |
| <i>Acer buergerianum</i>                | 0.4   |
| <i>Jacaranda mimosifolia</i>            | 0.1   |
| <i>Tamarix gallica</i>                  | 0.05  |
| <i>Thuja occidentalis</i>               | 0.4   |
| <i>Prunus cerasifera</i> "Atropurpurea" | 0.4   |
| <i>Morus alba</i>                       | 0.4   |
| <i>Pinus pinea</i>                      | 0.1   |

**Zona cespitosa central:**  
 $K_e = 0.6$

**Tabla 6.** Coeficientes de especie para la zona central de cespitosas

En el resto de zonas con césped, se tomará una  $K_e$  menor, por valor de 0.4, cubriéndose así las necesidades de las especies que acompañan a las cespitosas y manteniendo a éstas en un estado relativamente aceptable. En este caso, aparecen plantas con categoría elevada, moderada y baja en la misma zona de riego, seleccionándose un valor de  $K_e$  en el margen moderado en base a lo definido en las consideraciones iniciales.

Las especies más comunes en dicha zona, así como sus  $K_e$ , son las siguientes:

| ESPECIE                         | $K_e$ |
|---------------------------------|-------|
| <i>Cordyline australis</i>      | 0.1   |
| <i>Festuca arundinacea</i>      | 0.4   |
| <i>Pennisetum clandestinum</i>  | 0.2   |
| <i>Poa annua</i>                | 0.6   |
| <i>Ulmus pumila</i>             | 0.1   |
| <i>Quercus robur</i>            | 0.4   |
| <i>Populus nigra</i>            | 0.4   |
| <i>Casuarina cunninghamiana</i> | 0.1   |
| <i>Ligustrum lucidum</i>        | 0.1   |
| <i>Nerium oleander</i>          | 0.1   |
| <i>Pinus halepensis</i>         | 0.1   |
| <i>Hibiscus rosa sinensis</i>   | 0.1   |
| <i>Tilia tomentosa</i>          | 0.4   |

**Zona cespitosas:**  
 $K_e = 0.4$

**Tabla 7.** Coeficientes de especie para el resto de zonas de cespitosas

#### Elección del coeficiente de microclima

En base a las categorías definidas para este coeficiente en el capítulo correspondiente de la metodología, para el caso de los jardines del campus, existen dos zonas bastante diferenciadas en el campus.

- Una zona sombreada, protegida de los vientos por los edificios colindantes y orientados hacia el norte, a la que se le asigna un valor bajo.

Por tanto, las plantaciones localizadas en patios que están sombreados la mayor parte del día y protegidos de los vientos pueden tener un valor de:

**Zona protegida:  $K_{mc} = 0.6$**

- Una zona que no se ve influida por construcciones o estructuras anejas y por lo tanto, no se ve modificado su microclima por ninguna condición especial, se le asignará un valor de:

**Zona media:  $K_{mc} = 1.0$**

#### Elección del coeficiente de densidad

Finalmente, respecto al coeficiente que tiene en cuenta las variaciones de densidad de plantación, se puede decir que existe una capa de tapizantes en la práctica totalidad de las zonas, pero la densidad de plantación de árboles y arbustos es por lo general baja. Se opta por asignar:

**$K_d = 0.8$**

A estos coeficientes, hay que añadirle el cálculo de la fracción de lavado a partir de las características del agua extraída de los dos pozos de los que se abastecen los jardines. Por ello, con el fin de conocer la conductividad eléctrica del agua de riego, se realizaron análisis de las aguas de los pozos 1 y 2 sobre muestras tomadas el día 2 de Octubre de 2008 (Cremades, 2010). Los valores obtenidos en el agua de riego son los siguientes:

POZO 1.....1.53 dS/m  
POZO 2.....1.44 dS/m

Quedando la fracción de lavado como sigue.

$$FL_{\text{POZO 1}} = \frac{EC_w}{5 \times EC_e - EC_w} \times \frac{1}{Le} = \frac{1.53 \text{ dS/m}}{5 \times 7.8 \text{ dS/m} - 1.53 \text{ dS/m}} \times \frac{1}{0.7} = 0.0583$$

$$FL_{\text{POZO 2}} = \frac{EC_w}{5 \times EC_e - EC_w} \times \frac{1}{Le} = \frac{1.44 \text{ dS/m}}{5 \times 7.8 \text{ dS/m} - 1.44 \text{ dS/m}} \times \frac{1}{0.7} = 0.0548$$

Finalmente, se considera también los coeficientes derivados de la eficiencia del sistema de riego: aspersión 0.80 y goteo 0.90.

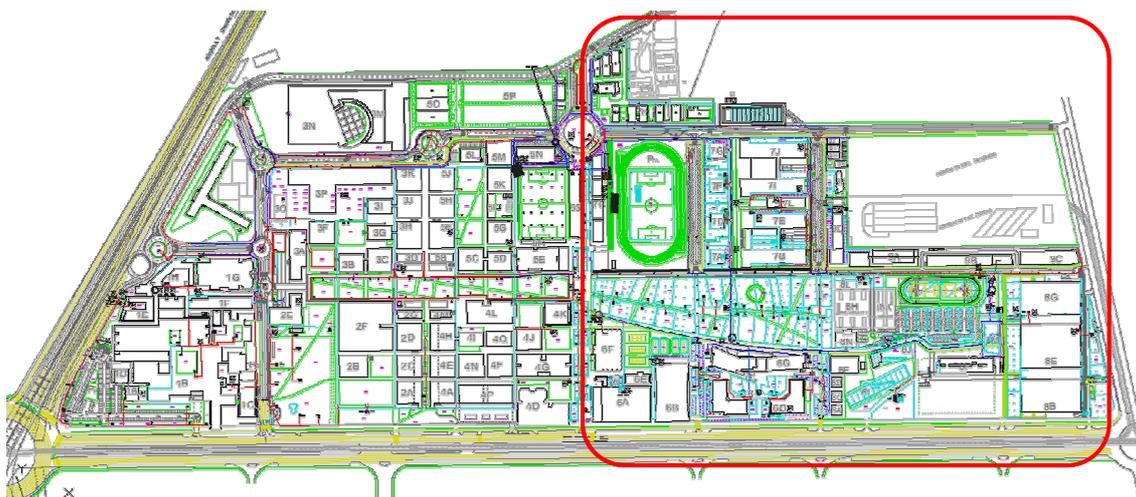
Por tanto, teniendo en cuenta todos los valores de coeficientes propuestos, así como el coeficiente derivado de la eficiencia del sistema de riego y la fracción de lavado, se obtienen un total de doce posibles combinaciones para el cálculo de las necesidades de riego:

| COMBINACIÓN |   | $K_e$ | $K_d$ | $K_{mc}$ | $E_a$ | FL     |
|-------------|---|-------|-------|----------|-------|--------|
| 1           | Aromáticas + Goteo + Pozo1 + No sombreado             | 0.1   | 0.8   | 1.0      | 0.9   | 0.0583 |
| 2           | Cespitosas central + Aspersión + Pozo1 + No sombreado | 0.6   | 0.8   | 1.0      | 0.8   | 0.0583 |
| 3           | Cespitosas + Aspersión + Pozo1 + No sombreado         | 0.4   | 0.8   | 1.0      | 0.8   | 0.0583 |
| 4           | Aromáticas + Goteo + Pozo1 + Sombreado                | 0.1   | 0.8   | 0.6      | 0.9   | 0.0583 |
| 5           | Cespitosas central + Aspersión + Pozo1 + Sombreado    | 0.6   | 0.8   | 0.6      | 0.8   | 0.0583 |
| 6           | Cespitosas + Aspersión + Pozo1 + Sombreado            | 0.4   | 0.8   | 0.6      | 0.8   | 0.0583 |
| 7           | Aromáticas + Goteo + Pozo2 + No sombreado             | 0.1   | 0.8   | 1.0      | 0.9   | 0.0548 |
| 8           | Cespitosas central + Aspersión + Pozo2 + No sombreado | 0.6   | 0.8   | 1.0      | 0.8   | 0.0548 |
| 9           | Cespitosas + Aspersión + Pozo2 + No sombreado         | 0.4   | 0.8   | 1.0      | 0.8   | 0.0548 |
| 10          | Aromáticas + Goteo + Pozo2 + Sombreado                | 0.1   | 0.8   | 0.6      | 0.9   | 0.0548 |
| 11          | Cespitosas central + Aspersión + Pozo2 + Sombreado    | 0.6   | 0.8   | 0.6      | 0.8   | 0.0548 |
| 12          | Cespitosas + Aspersión + Pozo2 + Sombreado            | 0.4   | 0.8   | 0.6      | 0.8   | 0.0548 |

**Tabla 8.** Combinaciones posibles para el cálculo de necesidades

Siempre alguna de estas combinaciones, que de forma simplificada reflejan la realidad, se puede asociar a cada una de las parcelas de los jardines del campus. De esta forma, el cálculo de las necesidades de riego se adecúa a las condiciones concretas de cada parcela en cada momento del año.

Debe destacarse que los estudios de evaluación se han centrado en la **subred correspondiente al pozo 2** por ser ambas equivalentes constituyendo una buena representación de todos los jardines del campus, tanto por las especies presentes como por las características de la red de abastecimiento. Es por ello que los resultados aportados en el presente capítulo se ceñirán a esta zona.



**Figura 5.** Plano del jardín del campus de Vera

Los valores de las necesidades de riego brutas y netas anuales obtenidos en base a la metodología propuesta, para los valores climáticos recogidos durante 2013 en la estación meteorológica del campus, junto con los consumos reales de la pasada campaña para el campus de Vera, vienen detalladas en la siguiente tabla.

| Combinación                  | Área/combinación | Representatividad | NR <sub>n</sub> | NR <sub>r</sub>   | NR <sub>r</sub> ponderada |
|------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|---------------------------|
|                              | m <sup>2</sup>   | %                 | mm/año          | mm/año            | mm/año                    |
| 7                            | 45168            | 41,7              | 71              | 84                | 35                        |
| 8                            | 21771            | 20,1              | 429             | 568               | 114                       |
| 9                            | 17442            | 16,1              | 286             | 378               | 61                        |
| 10                           | 20997            | 19,4              | 43              | 50                | 10                        |
| 11                           | -                | 0,0               | 257             | 340               | 0                         |
| 12                           | 2871             | 2,7               | 286             | 378               | 10                        |
| TOTAL MEDIANTE METODOLOGÍA   |                  |                   |                 | <b>568 (-43%)</b> | <b>230 (-77%)</b>         |
| TOTAL CONSUMIDO EN EL CAMPUS |                  |                   |                 | <b>998</b>        |                           |

**Tabla 9.** Necesidades de riego por combinación en el pozo dos

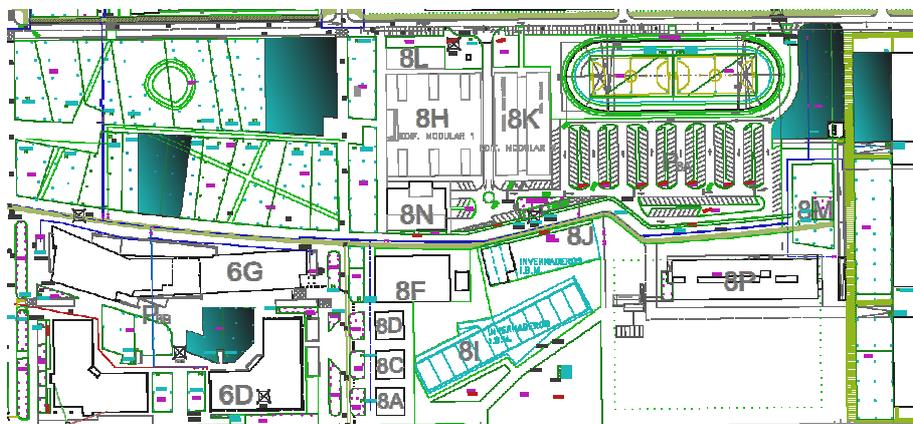
Los valores anteriores ponen de manifiesto la importancia de ajustar las dosis de riego a las necesidades estrictas de las especies plantadas en función del microclima en el cual estén instaladas. La aplicación de la metodología, en lo que al cálculo de dosis se refiere, supondría **un ahorro mínimo del 43% en consumo de agua** si se aplicara a todas las parcelas el volumen de agua de aquellas más exigentes; y un **ahorro máximo del 77%** respecto al volumen aplicado la pasada campaña si se ponderan las necesidades brutas en función de la representatividad de cada una de las diferentes hidrozonas presentes.

#### **4.4. Medida de la pluviometría en parcelas de la UPV**

La metodología de evaluación correspondiente a este apartado, en el caso de los jardines del campus de la UPV, se aplicó a las parcelas que se consideraron más representativas del jardín en cuanto a características de los aspersores, especies plantadas y en las que, además, se destacan las importantes necesidades de riego que requieren. También se ha elegido zonas con problemas señalados por los gestores del jardín. Concretamente se estudiaron las siguientes parcelas:

| Parcela    | Combinación | Electroválvula      | Área<br>m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|---------------------|------------------------|
| V.J6.0.009 | 8           | PCm628p2 y PCm637p2 | 1797                   |
| V.J6.0.011 | 8           | PCm610p2 y PCm617p2 | 1897                   |
| V.J6.0.038 | 9           | 00m656p2 y 00m652p2 | 809                    |
| V.J8.0.027 | 9           | 00r813p2            | 1724                   |
| V.J8.A.001 | 9           | 00r805p2 y 00r811p2 | 1092                   |

**Tabla 10.** Parcelas de estudio con sus principales características



**Figura 6.** Detalle de las parcelas estudiadas del sector del pozo dos

### Análisis espacial de la pluviometría

Para la medida de la pluviometría, el primer paso a realizar, antes de comenzar el riego, fue colocar una red de vasos pluviométricos sobre el césped formando una malla que se adaptara a la forma de cada una de las parcelas. Se dispusieron diversas filas de recipientes fuera de los límites de la parcela con el fin de evaluar también si había pérdidas en estas zonas. De una forma esquemática, y a través de la herramienta informática ArcGIS 10.1, se puede ver la disposición de los pluviómetros así como los aspersores en cada una de las parcelas.



**Figura 7.** De izquierda a derecha y de arriba a abajo, disposición de los vasos pluviométricos y aspersores de las parcelas V.J6.0.011, V.J8.0.027, V.J8.A.001, V.J6.0.009, V.J6.0.038

Se emplearon respectivamente 451, 243, 207, 171, 194 recipientes para las parcelas V.J6.0.011, V.J8.0.027, V.J8.A.001, V.J6.0.009, V.J6.0.038. En base a las especificaciones, los vasos empleados fueron recipientes de plástico transparente de 109.6 mm de diámetro y 100 mm de alto. Los marcos de pluviómetros empleados en cada parcela fueron los siguientes: parcela V.J6.0.011: 2.45 m x 2.45 m; y parcelas V.J8.0.027, V.J8.A.001, V.J6.0.009, V.J6.0.038: 2.50 m x 2.50 m.

Se realizó un riego de veinte minutos en cada una de las parcelas estudiadas. Finalmente se recogieron los recipientes y se pesaron con la mayor brevedad posible para evitar pérdidas por evaporación. Los datos obtenidos en campo se procesaron mediante hoja de Excel y el asistente de información geográfica ArcGis 10.1.



**Figura 8.** Riego durante los ensayos con detalle de aspersores y pluviómetros

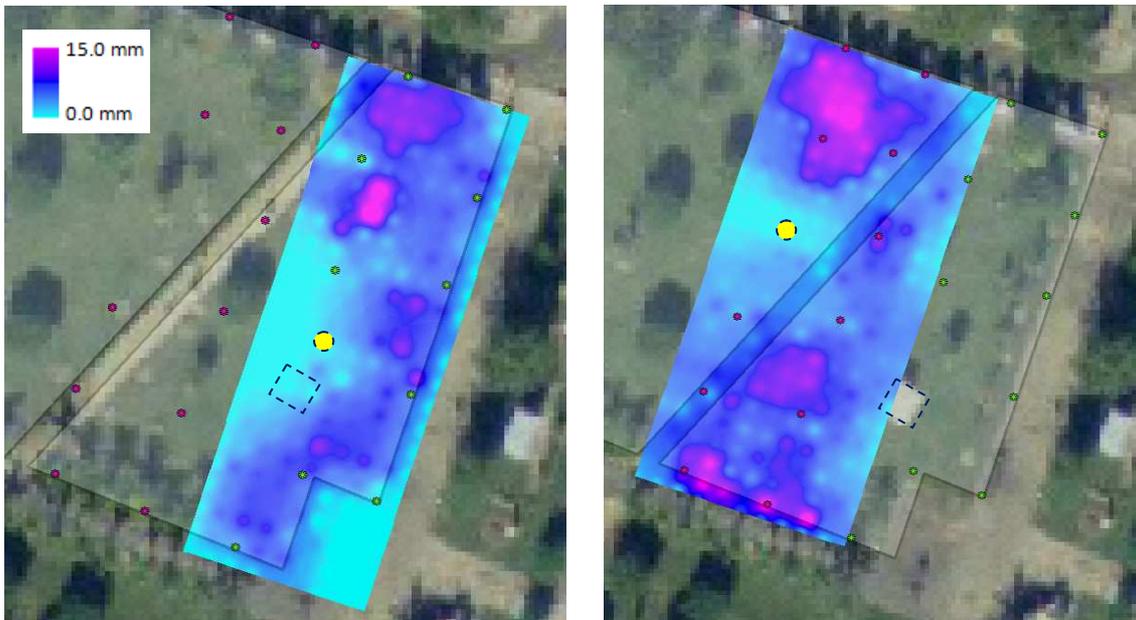


**Figura 9.** Izquierda, disposición de recipientes previa medida. Derecha, pesado tras el riego

A continuación se abordan los resultados gráficos obtenidos en los ensayos. El análisis de los datos se ha realizado a través de la interpolación de los mismos mediante una herramienta disponible en el mencionado programa de gestión cartográfica. Concretamente se ha empleado la herramienta IDW (Manual ArcGIS 10.1) que interpola, una superficie ráster a partir de puntos, utilizando la técnica de distancia inversa ponderada.

#### *Parcela V.J6.0.011*

El análisis gráfico de estas parcelas se realiza conjuntamente al ser dos áreas contiguas en las que parte del riego se solapa. Se presentan en la siguiente imagen las alturas de agua obtenidas.

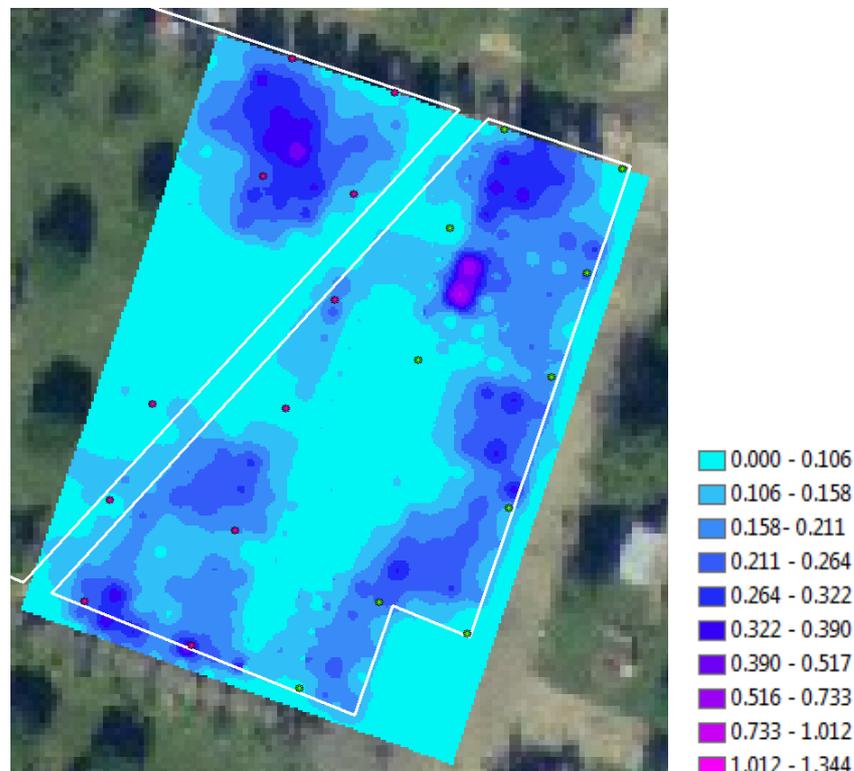


**Figura 10.** Alturas de agua interpoladas parcela V.J6.0.011. Izquierda, área correspondiente a la electroválvula PCm610p2. Derecha, área correspondiente a la electroválvula PCm617p2

Se diferencian zonas con gran cobertura y otras con un importante déficit de agua. Concretamente, en las imágenes aparecen dos grandes superficies con una pluviometría muy baja, o incluso nula. Si se considera la distribución de los aspersores, estas áreas secas coinciden con la ausencia de los mismos. En la parcela correspondiente a la electroválvula PCm610p2 se ha retirado un aspersor debido a la

disposición de una escultura, que además intercepta parte de la aspersión adyacente. En el caso del área correspondiente a la electroválvula PCm617p2, se detecta la ausencia de un aspersor necesario para completar la matriz regular que asegurara una mínima cobertura de la zona. Se ha destacado en la imagen los puntos donde se debería disponer los aspersores ausentes y donde se dispone la escultura.

Todas estas características de la pluviometría registrada se pueden ver también en la interpolación realizada para ambas parcelas. Se observa que el solape del riego entre ambas no supone una mejora de las zonas que mantienen un déficit de cobertura.



**Figura 11.** Pluviometría (mm/min) interpolada para la parcela V.J6.0.011

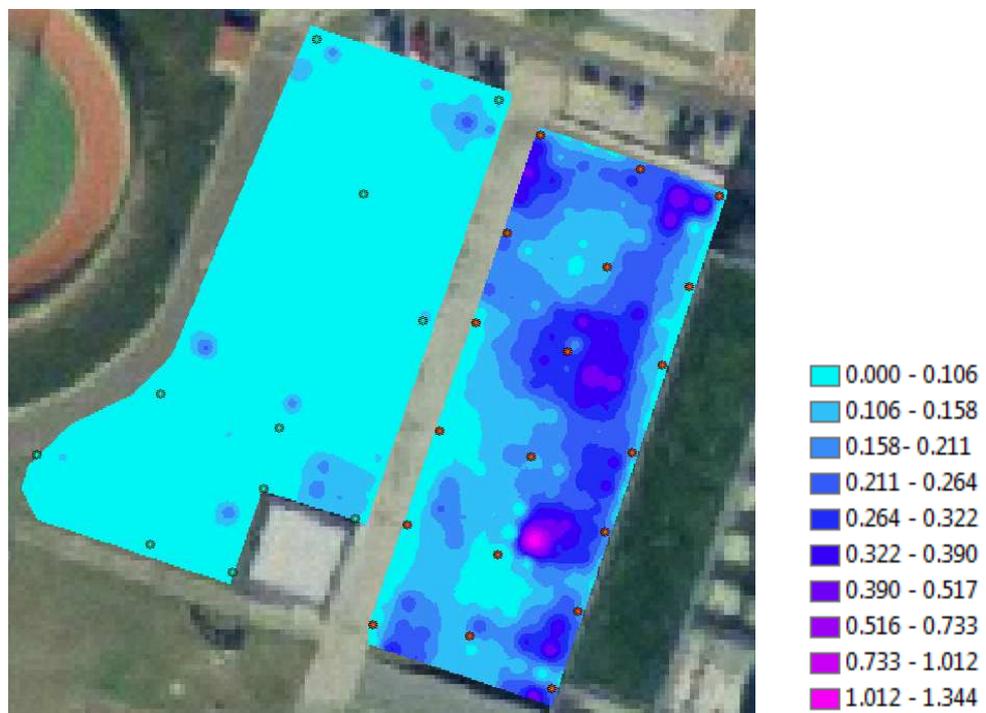
Otro elemento llamativo es la alta pluviometría detectada en el margen inferior de la parcela. En esta zona existe una línea de árboles que interceptan el trayecto del agua distribuida por los aspersores. En la siguiente imagen se puede comprobar cómo se genera una importante zona anegada que alcanza incluso los límites externos del jardín.



**Figura 12.** Detalle de la zona encharcada en el margen inferior de la parcela

*Parcelas V.J8.0.027, V.J8.A.001*

Se presentan en la siguiente imagen los resultados de pluviometría obtenidos para estas parcelas contiguas.



**Figura 13.** Pluviometría (mm/min) para las parcelas V.J8.0.027, V.J8.A.001

De estos resultados se puede destacar la disparidad de los mismos. En el caso de la parcela V.J8.0.027 la pluviometría registrada es muy baja, llegando a ser nula en algunas zonas. Esto es debido a la baja densidad de aspersores que hay dispuestos en parcela. Claramente se puede afirmar que el diseño es deficiente tanto por la falta de aspersores como por el inexistente solape de los mismos.

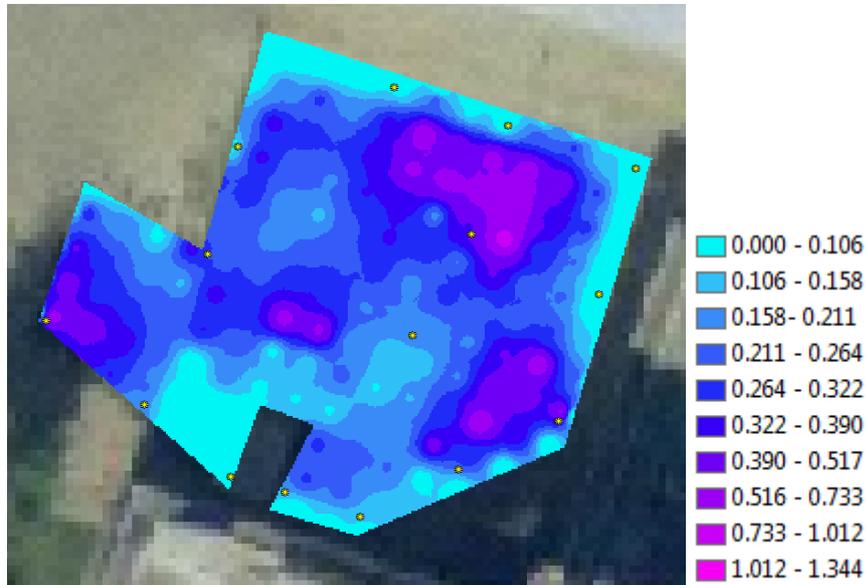
En la parcela contigua, la V.J8.A.001, ocurre totalmente lo contrario. Se obtienen pluviometrías altas aunque distribuidas de forma desigual. Destacar dos principales problemas de esta parcela. En primer lugar, se detecta que el agua de riego alcanza zonas más allá de la propia parcela, con las consecuentes pérdidas que ello conlleva. Y en segundo lugar, destacar que existen muchas pérdidas por escorrentía. Como se muestra en la imagen inferior, la parcela posee cierta pendiente que pone de relieve este problema. Sería recomendable en esta parcela realizar riegos más breves y más frecuentes que los que se realizan actualmente para mantener los niveles de humedad del suelo sin provocar escorrentías que supongan pérdidas innecesarias.



**Figura 14.** Detalle de la escorrentía generada durante el riego en la parcela V.J8.A.001

*Parcela V.J6.0.038*

La siguiente figura muestra las pluviometrías registradas en la parcela V.J6.0.038.



**Figura 15.** Pluviometría (mm/min) para las parcelas V.J6.0.038

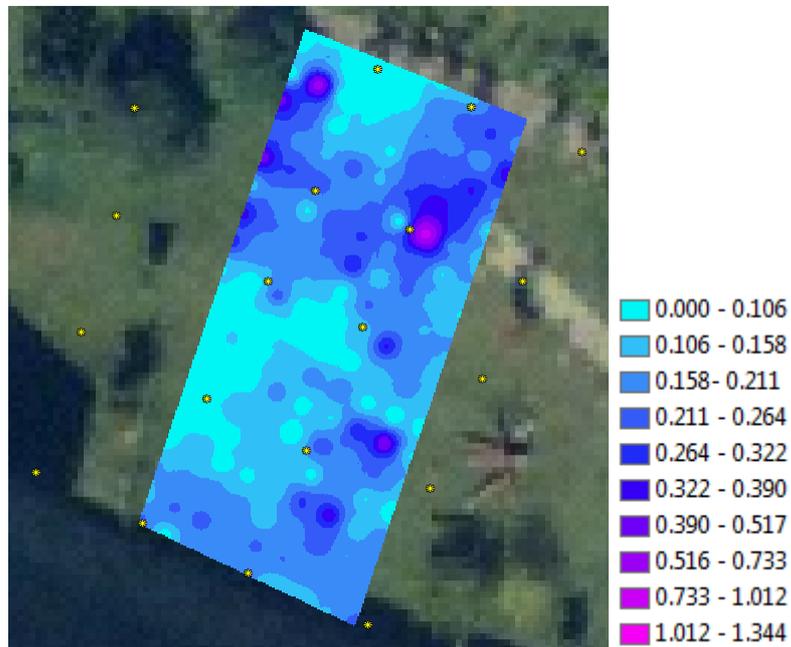
La selección de esta parcela se realizó considerando su buen aspecto visual y esperado obtener unos buenos resultados de uniformidad, pero los inesperados resultados pusieron de relieve la importancia de estas evaluaciones. Exactamente la parcela estaba suficientemente regada en la mayor parte de las zonas, pero lo que se estaba produciendo era un exceso de riego y mal drenaje. En la imagen se observan áreas con altas pluviometrías que en la realidad se convertían en grandes zonas encharcadas con importantes escorrentías hacia los desagües adyacentes a la parcela. Véase algunas de las situaciones indeseables detectadas en el ensayo.



**Figura 16.** Detalle de zonas encharcadas de la parcela

*Parcela V.J6.0.009*

Se presentan en la siguiente imagen los resultados de pluviometría para esta parcela situada en la denominada pradera central del campus.



**Figura 17.** *Pluviometría (mm/min) para las parcelas V.J6.0.009*

En base al análisis cualitativo de los resultados anteriores se puede considerar que esta es una de las parcelas mejor regadas del total de las analizadas. Se observa que la disposición de emisores es regular, pero aun así se detectan algunas áreas con pluviometrías ligeramente inferiores. La causa principal era la presencia de aspersores defectuosos y la intercepción con elementos del mobiliario del jardín. Veáse algunos de estos problemas en las siguientes imágenes.



**Figura 18.** *Detalle de intercepción y mal funcionamiento de un aspersor*

## Evaluación de la distribución y eficiencia

En base a los resultados de las evaluaciones anteriormente descritas, y tal como indica la metodología del capítulo preliminar, se han obtenido una serie de indicadores, que no hacen más que ratificar los resultados que la representación cartográfica de las alturas de agua ha proporcionado. Se presentan los valores de referencia obtenidos de bibliografía y los resultados de los ensayos realizados.

| Calidad del sistema | DU        | CU        | RTM                | E <sub>wm</sub> | WFM                | E <sub>s</sub>      |
|---------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------------|--------------------|---------------------|
|                     | %         | %         | -                  | %               | -                  | %                   |
| Excepcional         | -         | -         | < 1.11             | -               | -                  | -                   |
| Excelente           | 80        | -         | 1.11 - 1.18        | > 95            | < 1.05             | -                   |
| Muy bueno           | 70        | -         | 1.19 - 1.22        | 90 - 94         | 1.06 - 1.11        | -                   |
| <b>Bueno</b>        | <b>65</b> | <b>84</b> | <b>1.23 - 1.32</b> | <b>85 - 89</b>  | <b>1.12 - 1.18</b> | <b>&gt; 85 - 90</b> |
| Razonable           | 60        | -         | 1.33 - 1.43        | -               | -                  | -                   |
| Malo                | 50        | -         | 1.44 - 1.56        | -               | -                  | -                   |
| Fallo               | -         | -         | > 1.56             | 80 - 84         | 1.19 - 1.25        | -                   |

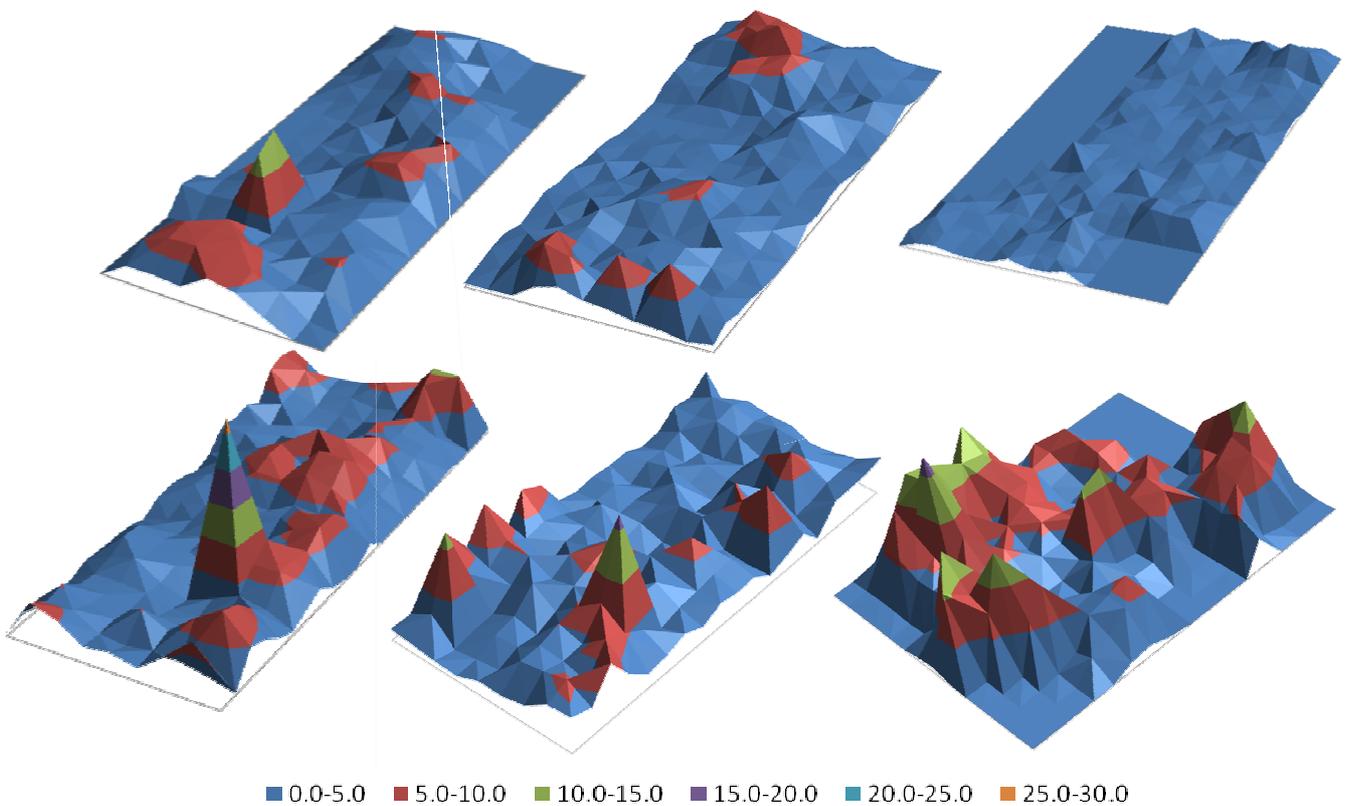
**Tabla 11.** Valores de referencia para los indicadores empleados en la evaluación

| DISTRIBUCIÓN | Parcela    | DU    | CU    | SC    |
|--------------|------------|-------|-------|-------|
|              |            | %     | %     | %     |
|              | V.J6.0.009 | 56,91 | 56,19 | 21,44 |
|              | V.J6.0.011 | 62,48 | 31,27 | 8,13  |
|              | V.J6.0.038 | 55,53 | 36,89 | 65,48 |
|              | V.J8.0.027 | 39,22 | 32,64 | 12,71 |
|              | V.J8.A.001 | 56,01 | 44,97 | 64,55 |

| EFICIENCIA | Parcela    | DU <sub>LH</sub> | RTM  | E <sub>wm</sub> | WFM  | E <sub>s</sub> |
|------------|------------|------------------|------|-----------------|------|----------------|
|            |            | %                | -    | %               | -    | %              |
|            | V.J6.0.009 | 73,54            | 1,36 | 102,70          | 0,97 | 75,53          |
|            | V.J6.0.011 | 76,96            | 1,30 | 98,14           | 1,02 | 75,53          |
|            | V.J6.0.038 | 72,70            | 1,38 | 104,08          | 0,96 | 75,66          |
|            | V.J8.0.027 | 62,68            | 1,60 | 120,71          | 0,83 | 75,66          |
|            | V.J8.A.001 | 72,99            | 1,37 | 103,66          | 0,96 | 75,66          |

**Tabla 12.** Valores obtenidos para los indicadores empleados en la evaluación. Se destacan en color azul los valores que se consideran aceptables dentro del rango propuesto

Estos valores revelan una distribución deficiente, tanto DU como CU (excepto DU en parcela V.J6.0.011), están por debajo de los límites recomendados. Esta irregularidad quedaba confirmada mediante la representación gráfica de la pluviometría que se ha realizado anteriormente. Respecto al factor SC, debería incrementarse el riego en todas las parcelas, y de manera muy considerable en la V.J6.0.038 hasta aproximadamente un 65% para satisfacer las zonas menos regadas lo cual supondría regar en exceso otras zonas. Sería imprescindible en este caso solucionar los problemas asociados a la distribución de emisores antes de incrementar los tiempos de riego.



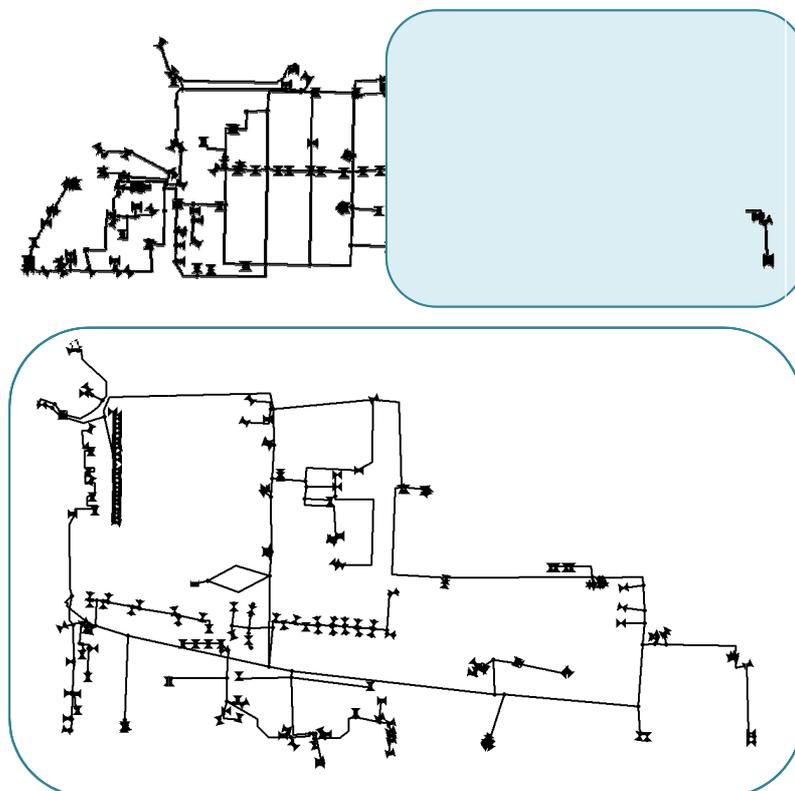
**Figura 19.** Representación de las alturas de agua registradas (mm). De izquierda a derecha y de arriba a abajo, parcelas V.J6.0.011, V.J8.0.027, V.J8.A.001, V.J6.0.009, V.J6.0.038

Respecto a los índices de eficiencia, el promedio de RTM se puede considerar relativamente razonable en la mayoría de parcelas, excepto en la V.J8.0.027. Este resultado supone que el tiempo de funcionamiento del sistema de riego para

compensar la distribución deficiente no es excesivo pero es necesario. El valor del factor  $E_{wm}$ , indica que en promedio existe un correcto manejo del riego como consecuencia de la no uniformidad. Por último, los resultados para la eficiencia de riego del sistema  $E_s$ , están por debajo del rango recomendable. En general, y a la vista de los datos numéricos y las representaciones gráficas, se puede decir que el riego no es uniforme, y por lo tanto, se puede considerar ineficiente en la mayoría de las parcelas estudiadas.

#### **4.5. Elaboración del modelo hidráulico de la red de la UPV**

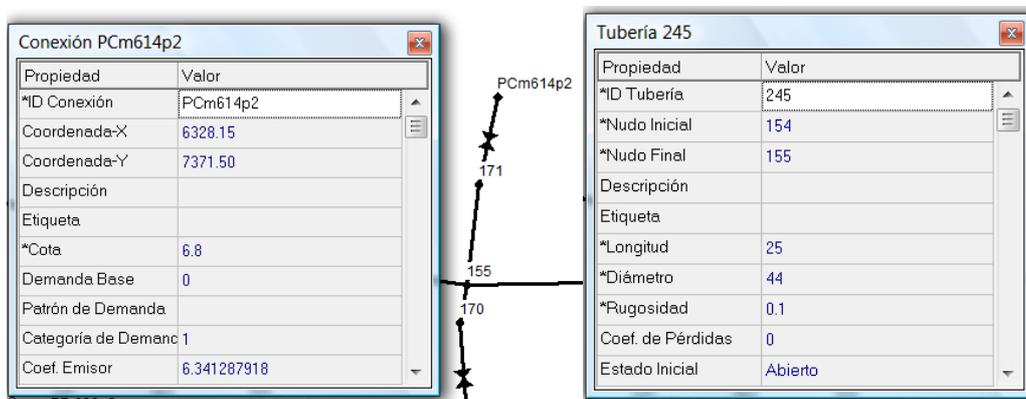
El modelo hidráulico de la red del campus de Vera empleado en el presente trabajo se ha basado en el modelo de EPANET\_ desarrollado por el mencionado proyecto final de carrera (Cremades, 2010). A éste se le han introducido las nuevas redes que alimentan las parcelas de jardín de la zona central del campus, la zona de la Ciudad Politécnica de la Innovación así como los sistemas de riego de las pistas de pádel y del velódromo. Este modelo ha constituido la base para realizar el proceso de optimización de turnos de riego que minimice los consumos energéticos.



**Figura 20.** Modelo de la red hidráulica con detalle correspondiente al pozo 2

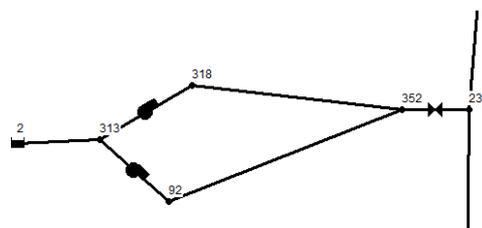
En el modelo de la red se ha configurado cada uno de los siguientes elementos con los parámetros los caracterizan:

- Nudos: en la red se han presentado tanto nudos que consumen caudal, conocidos como nudos de servicio, como nudos que simplemente representan una derivación en la conducción. En general los nudos son caracterizados en este modelo por su cota y su demanda base.
- Tuberías: el trazado de la red ha sido proporcionado por el Vicerrectorado de Infraestructuras de la UPV. Así mismo, cada una de las tuberías ha sido definida por su longitud, diámetro interior y rugosidad.



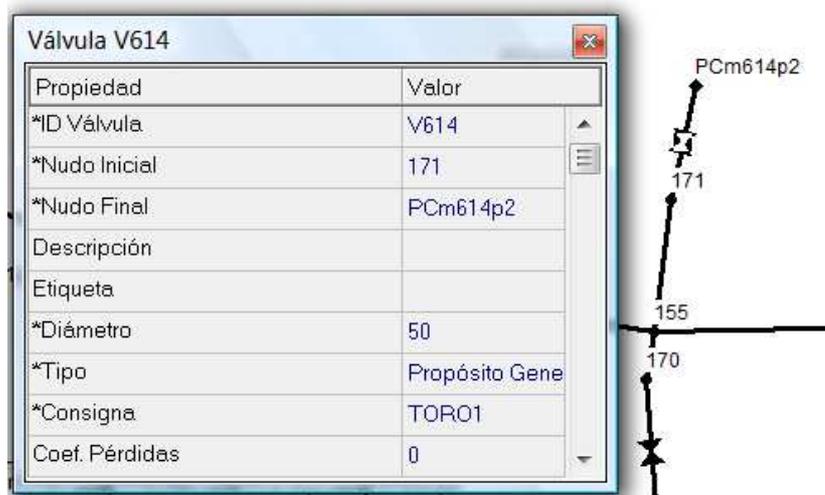
**Figura 21.** Fichas de un nudo y una tubería de la red

- Bombas: en la subred del pozo dos hay instaladas 2 bombas, funcionando normalmente una, quedando otra de reserva por averías o exceso de demanda. Para la inclusión de las bombas en el modelo se ha atendido a la curva característica suministrada por el fabricante y las cotas a las que se encuentran ambas bombas.



**Figura 22.** Representación del sistema de bombeo del pozo 2

- Pozos: los pozos en la instalación se han modelizado en EPANET como si fueran un embalse cuya altura máxima es la cota de la lámina libre de agua del pozo.
- Válvulas: en el modelo se han incluido una electroválvula que controla la apertura y cierre de los grupos de aspersores, difusores y goteo aguas abajo de los mismos. Cada una de estas válvulas se ha codificado con el mismo número de nudo final. Véase el ejemplo de la imagen.



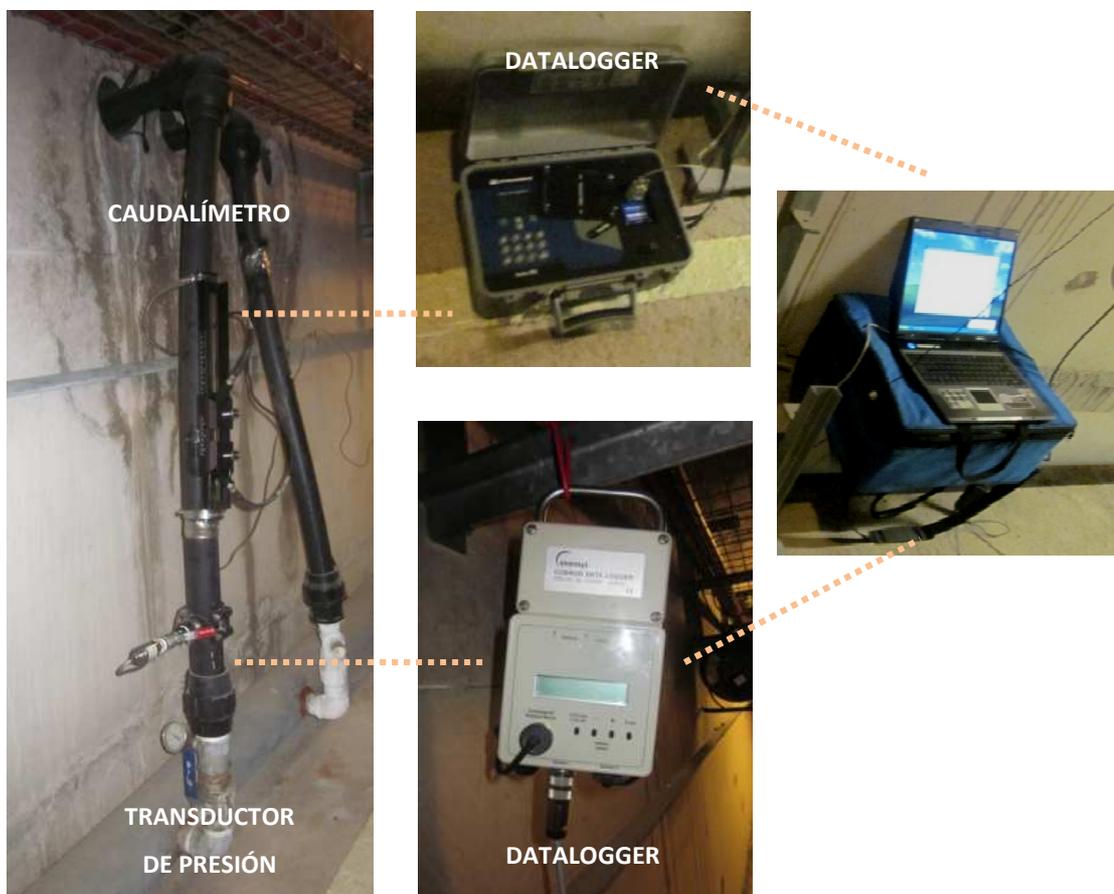
**Figura 23.** Fichas de una electroválvula

#### **4.6. Ajuste del modelo hidráulico de la red de la UPV**

De las opciones expuestas para la calibración del modelo, se ha elegido la opción de medida directa de coeficientes y aplicación generalizada de los mismos, debido a la amplia heterogeneidad de los emisores instalados en el jardín. El procedimiento seguido fue el siguiente:

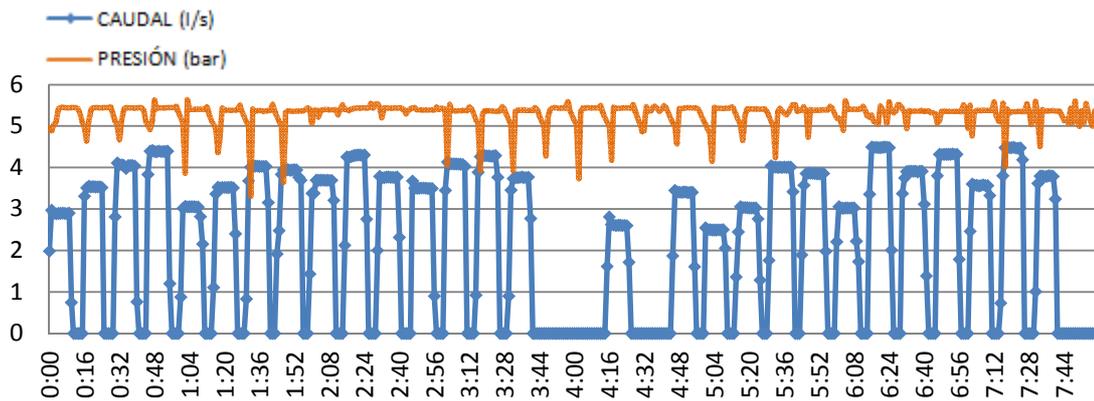
1. Se seleccionaron las parcelas que se consideraron más representativas del jardín, eligiéndose de este modo, gran parte de la denominada pradera central del campus que se ve sometido a un uso intensivo durante todo el año.

2. Se programó un riego con la apertura secuencial de cada una de las electroválvulas de estudio. Este riego, ideado para la calibración, quedaba totalmente aislado de otras demandas asociadas a la red que pudieran interferir en las medidas.
3. Se instaló, en el punto de la red de abastecimiento que se consideró más representativo y cercano al punto de distribución, un caudalímetro de ultrasonidos y un transductor de presión que registraran el caudal ( $Q_r$ ) y la presión ( $P_r$ ) demandados por cada uno de los nudos de consumo de las parcelas.



**Figura 24.** Croquis de la instalación para la medida de caudal y presión.

Con los valores anteriormente medidos, y a partir de la relación  $Q_r = k_r P_r^\alpha$ , se obtuvo el valor de la constante  $k_r$  para cada grupo de emisores controlados por una electroválvula.



**Figura 25.** Caudal y presión medidos para algunos de los nudos medidos

4. Así mismo, se obtuvo la constante media  $\overline{k_g}$  mediante el cálculo simplificado teniendo en cuenta el número de emisores por parcela y la constante  $k_r$  de cada uno de los nudos de demanda. Finalmente, se estimó la variación entre el valor inicial de proyecto ( $k_{proy}$ ) considerando las especificaciones que aparecían inicialmente en proyecto del jardín, y el valor real ( $k_r$ ) de la constante para cada una de las agrupaciones de emisores por electroválvula.

Se puede ver que en la tabla siguiente los resultados de las mediciones anteriores. La variación al comparar la constante de proyecto  $k_{proy}$  respecto de  $k_r$  es importante, lo cual supone que los elementos que inicialmente se definieron en proyecto ya no son los mismos y la sustitución de emisores con el tiempo no ha respetado las especificaciones iniciales. Queda patente que a menudo se realiza una renovación indiscriminada de emisores en función del precio y disponibilidad en el momento de la compra, y no en función de las especificaciones iniciales de proyecto. Este resultado pone de relieve la necesidad de calibrar los modelos respecto de esta variable para poder realizar simulaciones lo más ajustadas a la realidad.

Un extracto de los resultados obtenidos es el siguiente:

| EV       | Emisores proyecto | Tipo emisor proyecto           | K <sub>proy</sub> | Emisores actuales | Parcela          | q <sub>EV</sub> (CAUDALÍMETRO) | P <sub>EV</sub> (TRANSDUCTOR) | Kr    | Δ% proyecto |
|----------|-------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|-------------|
| -        | -                 | -                              | -                 | -                 | -                | l/min                          | kPa                           | -     | %           |
| PCm602p2 | 9                 | TORO/S700                      | 6,20              | 12                | V.J6.0.001       | 174,0                          | 530                           | 7,56  | 22%         |
| PCm603p2 | 11                | HUNTER/PGP                     | 11,70             | 11                | V.J6.0.001       | 210,6                          | 526                           | 9,18  | -22%        |
| PCm604p2 | 12                | HUNTER/PGP                     | 12,70             | 12                | V.J6.0.003/01    | 243,0                          | 528                           | 10,58 | -17%        |
| PCm605p2 | 12                | HUNTER/PGP                     | 12,70             | 14                | V.J6.0.003       | 263,4                          | 529                           | 11,45 | -10%        |
| PCm606p2 | 7                 | HUNTER/PGP (5) +TORO/S700 (2)  | 6,70              | 9                 | V.J6.0.005       | 171,6                          | 522                           | 7,51  | 12%         |
| PCm607p2 | 10                | HUNTER/PGP (7) + TORO/S700 (3) | 9,40              | 9                 | V.J6.0.008/05    | 210,0                          | 518                           | 9,23  | -2%         |
| PCm608p2 | 12                | HUNTER/PGP (11) + KRAIN/K2 (1) | 12,30             | 13                | V.J6.0.008       | 241,8                          | 509                           | 10,72 | -13%        |
| PCm609p2 | 12                | HUNTER/PGP                     | 12,70             | 12                | V.J6.0.008       | 234,6                          | 513                           | 10,36 | -18%        |
| PCm610p2 | 9                 | HUNTER/PGP (8) + KRAIN/K2 (1)  | 9,10              | 9                 | V.J6.0.011       | 217,8                          | 536                           | 9,41  | 3%          |
| PCm612p2 | 9                 | HUNTER/PGP (8) + KRAIN/K2 (1)  | 9,10              | 10                | V.J6.0.002       | 256,8                          | 536                           | 11,09 | 22%         |
| PCm613p2 | 12                | HUNTER/PGP                     | 12,70             | 13                | V.J6.0.003       | 226,2                          | 540                           | 9,73  | -23%        |
| PCm614p2 | 7                 | HUNTER/PGP (6) + KRAIN/K2 (1)  | 7,00              | 9                 | V.J6.0.005       | 225,0                          | 534                           | 9,74  | 39%         |
| PCm615p2 | 12                | HUNTER/PGP (9) +TORO/S700 (3)  | 11,60             | 10                | V.J6.0.008       | 244,8                          | 522                           | 10,71 | -8%         |
| PCm616p2 | 12                | HUNTER/PGP                     | 12,70             | 12                | V.J6.0.008       | 256,8                          | 510                           | 11,37 | -10%        |
| PCm617p2 | 12                | HUNTER/PGP (11) + KRAIN/K2 (1) | 12,30             | 11                | V.J6.0.011/08    | 223,8                          | 511                           | 9,90  | -20%        |
| PCm621p2 | 14                | HUNTER/PGP                     | 14,80             | 12                | V.J6.0.004       | 157,8                          | 525                           | 6,89  | -53%        |
| PCm624p2 | 12                | HUNTER/PGP (9) + KRAIN/K2 (3)  | 11,50             | 12                | V.J6.0.004       | 150,0                          | 506                           | 6,67  | -42%        |
| PCm625p2 | 8                 | HUNTER/PGP (6) + KRAIN/K2 (2)  | 7,70              | 9                 | V.J6.0.006/09    | 146,4                          | 533                           | 6,34  | -18%        |
| PCm628p2 | 10                | HUNTER/PGP (9) + KRAIN/K2 (1)  | 10,20             | 10                | V.J6.0.009/10    | 254,4                          | 534                           | 11,01 | 8%          |
| PCm629p2 | 9                 | HUNTER/PGP (8) + KRAIN/K2 (1)  | 9,10              | 9                 | V.J6.0.006       | 199,2                          | 535                           | 8,61  | -5%         |
| PCm630p2 | 10                | HUNTER/PGP (7) + KRAIN/K2 (3)  | 9,40              | 10                | V.J6.0.009/10    | 243,0                          | 534                           | 10,52 | 12%         |
| PCm631p2 | 10                | HUNTER/PGP (9) +TORO/S700 (1)  | 10,20             | 10                | V.J6.0.012/13    | 207,6                          | 535                           | 8,98  | -12%        |
| PCm632p2 | 10                | HUNTER/PGP (9) + KRAIN/K2 (1)  | 10,20             | 10                | V.J6.0.009       | 258,0                          | 534                           | 11,16 | 9%          |
| PCm633p2 | 10                | HUNTER/PGP                     | 10,60             | 11                | V.J6.0.012/13    | 168,0                          | 534                           | 7,27  | -31%        |
| PCm637p2 | 10                | HUNTER/PGP                     | 10,60             | 10                | V.J6.0.009/10    | 262,8                          | 517                           | 11,56 | 9%          |
| PCm638p2 | 10                | HUNTER/PGP (9) + KRAIN/K2 (1)  | 10,20             | 10                | V.J6.0.012/13/10 | 210,0                          | 534                           | 9,09  | -11%        |

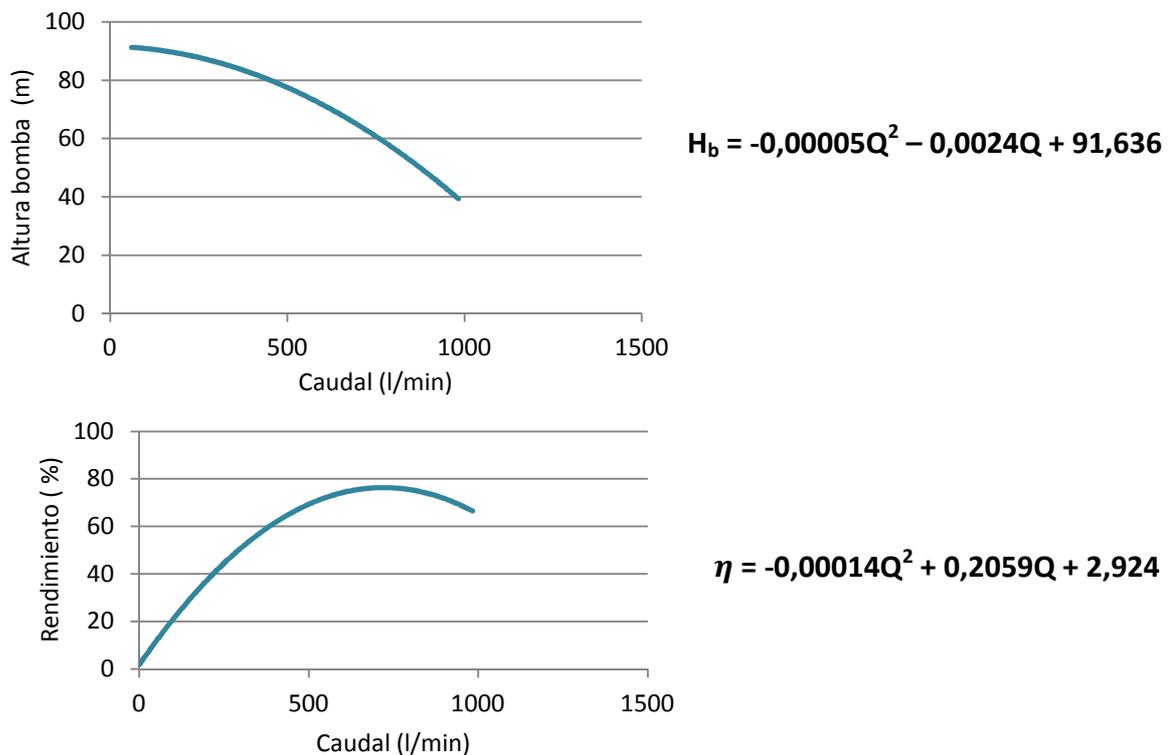
**Tabla 13.** Constantes de emisor calculadas y reales

#### **4.7. Caracterización de los grupos de bombeo de la subred de la UPV**

##### Caracterización de los grupos de bombeo

El grupo de bombeo objeto de estudio se localiza en el denominado pozo 2, localizado en la zona subterránea del edificio Nexus (6G), el cual tiene un aforo de 1.100 l/min y un nivel dinámico de -5.10 m. La elevación de agua se efectúa por medio de dos bombas de 15 CV en paralelo. Ambas son de la marca GRUNDFOS, modelo SP 46/7. En cada pozo, hay una bomba principal y otra complementaria. La principal debe mantener la presión en cabeza por encima de 5 bares y dar servicio a toda la subred. En el momento en que la demanda es tal que esta bomba no puede mantener la presión y ésta cae por debajo de 4 bares, entra en funcionamiento la bomba complementaria para aportar el caudal necesario y ayudar a mantener la presión por encima de la presión marcada.

Las curvas características de las bombas son las siguientes:



**Figura 26.** Curvas características de las bombas con  $H_b(m)$ ,  $Q(l/min)$  y  $\eta$  (%)

Ambas bombas están asociadas a selector de consignas que determina el funcionamiento de una bomba principal y una secundaria en función de la demanda en cada momento. Además existe un variador de frecuencia para cada una de las bombas. Los variadores son de la marca Schneider Electric, modelo Microdrive ME 22,5 con una potencia de salida limitada a 11 kW a 50°C y 15 kW a 40°C. Así mismo, cada una de las bombas tiene un transductor de presión conectado (0-10 bar, 4-20mA) que es el que comunica las presiones al variador.



**Figura 27.** Bombas y variador de frecuencia instalados en el pozo2

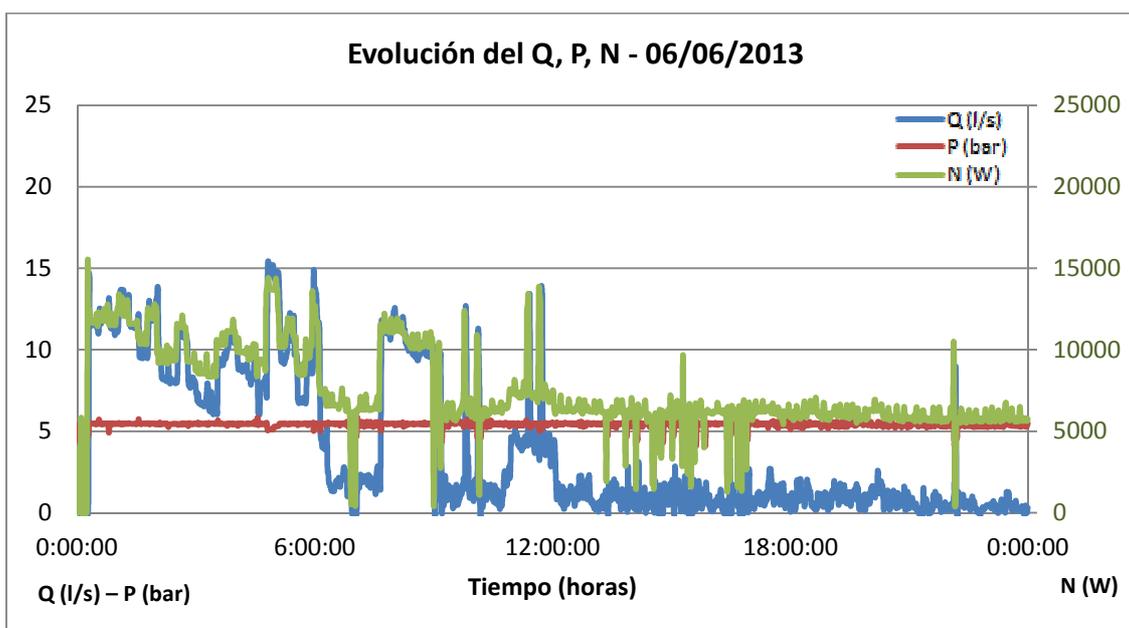
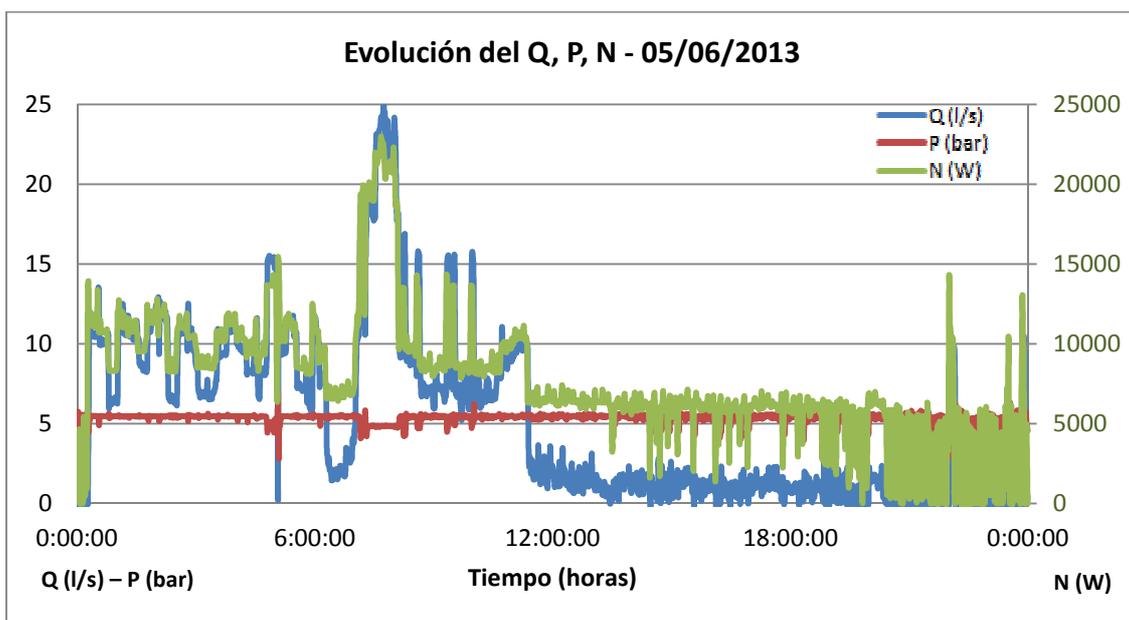
Actualmente el sistema de bombeo funciona en base a dos consignas de trabajo en cada uno de los variadores. La frecuencia mínima de paro es del 62%, debiéndose mantener este valor (o inferior) durante al menos 30 segundos. Las presiones consigna ( $H_c$ ) para producir el arranque de los variadores quedan resumidas en la siguiente tabla. Se puede consultar una explicación más extensa en el anejo 2.

| Variador, Bomba, Consigna | $H_c$ (bar)               | Arranque variador |
|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| V1, B1, C1                | $5.0 \pm 0.7 = 4.3 - 5.7$ | $H_c < 4.3$       |
| V1, B1, C2                | $5.7 \pm 0.7 = 5.0 - 6.4$ | $H_c < 5.0$       |
| V2, B2, C1                | $5.7 \pm 0.7 = 5.0 - 6.4$ | $H_c < 5.0$       |
| V2, B2, C2                | $4.9 \pm 0.7 = 4.2 - 5.6$ | $H_c < 4.2$       |

**Tabla 14.** Presiones de consigna (bar) para el arranque de los variadores de frecuencia

### Caracterización del rendimiento energético

Se presenta el resultado de la evaluación energética realizada sobre la subred estudiada, habiéndose realizado mediciones de caudal (Q) y presión (P) en distintos puntos así como el registro de la potencia demandada (N) mediante un analizador de redes instalado. Para realizar el análisis se ha seleccionado dos días consecutivos en época de altas necesidades de riego (5 y 6 de junio de 2013). En la siguiente gráficas se muestra dicha evolución.



**Figura 28.** Presión (bar), caudal (l/s) y potencia consumida (W) en bombeo en periodo punta

De los registros realizados se pudo obtener que la energía consumida en el periodo de medición, por m<sup>3</sup> de agua inyectada, fue de 0.59 kWh/m<sup>3</sup>. Adicionalmente se ha realizado la estimación de pérdidas en forma de fugas. De las mediciones se obtiene que el volumen de agua perdido en la red principal constituye solo el 4.95% del volumen inyectado. Se ha determinado a partir de la medición del caudal en periodos en los que no existe riego, suponiendo que este caudal de fugas se mantiene constante las 24 horas del día.

Así mismo, se aplicaron los cálculos correspondientes al los índices de eficiencia energética del bombeo (EEB) y eficiencia energética general (EEG) descritos anteriormente. Los resultados para la subred estudiada y los rangos de clasificación proporcionados por el IDAE, quedan resumidos en la siguiente tabla.

| Eficiencia   | EEB     | EEG     | 05/06/2013 |      | 06/06/2013 |      |
|--------------|---------|---------|------------|------|------------|------|
|              | %       | %       | EEB        | EEG  | EEB        | EEG  |
| Excelente    | > 65    | > 50    | 47.9       | 23.9 | 42.6       | 21.0 |
| Buena        | 60 - 65 | 40 - 50 |            |      |            |      |
| Normal       | 50 - 60 | 30 - 40 |            |      |            |      |
| Aceptable    | 45 - 50 | 25 - 30 |            |      |            |      |
| No aceptable | < 45    | < 25    |            |      |            |      |

**Tabla 15.** Rangos y resultados de los índices energéticos

Los resultados muestran que la programación del miércoles 5 tiene una EEB aceptable y una EEG no aceptable. En cambio la programación del jueves 6 tiene tanto una EEB como una EEG no aceptables. Estos valores indican que el sistema no está siendo manejado correctamente y su diseño inicial probablemente no esté cumpliendo los requerimientos actuales de demanda. En todo caso, esta evaluación será completada mediante las simulaciones del funcionamiento del sistema en el programa de análisis hidráulico EPANET, lo que permitirá, entre otras cosas, determinar si hay conducciones mal dimensionadas o nudos del sistema con problemas de abastecimiento.

#### **4.8. Optimización de turnos de riego del jardín de la UPV**

El ajuste de los turnos de riego correspondientes a la subred estudiada se ha realizado mediante la optimización con AG. El tratamiento de datos se ha llevado a cabo desde dos puntos de vista que permitirán al lector conocer dos opciones de ajuste a emplear en función del nivel de automatización de los bombeos. Por un lado, se han establecido la secuencia de apertura de electroválvulas considerando la presión de consigna ( $H_c$ ) constante, de forma que la máxima registrada en la secuencia diaria sea la establecida para toda la programación. Por otro lado, se ha calculado la sucesión de turnos con una presión de consigna variable para cada instante de apertura. La primera opción ha sido la elegida para la instalación de la UPV, al disponer de un selector de consignas no variable automáticamente a lo largo del tiempo. Para ambos planteamientos, en la formulación del problema de optimización a resolver, se han definido las siguientes componentes:

- Variables de decisión: Intervalo de inicio de funcionamiento de cada una de las tomas de la red.
- Función objetivo: Minimizar a lo largo de la jornada de riego la presión de consigna requerida para el funcionamiento del sistema, lo que supone reducir al máximo el consumo energético (kWh).
- Restricciones: Presión mínima en los nudos de consumo de 40 mca, rendimiento mínimo para las bombas de velocidad variable de 10% y -5.1 m de altura dinámica de la captación.

Una vez establecidos estos parámetros se lleva a cabo el proceso de optimización. El primer paso ha sido definir el intervalo de apertura de electroválvulas (10 minutos) y número de turnos. Estos han sido calculados en base a dos duraciones de la jornada de riego. Por un lado, se ha tomado el tiempo empleado por los gestores del riego del jardín que es de 14.5 horas, siendo el número de intervalos en este caso de 87. Por otro lado, se ha propuesto reducir la jornada a 12 horas quedando 72 turnos. El proceso de optimización permitirá establecer qué nudo entra en funcionamiento en cada uno de estos turnos.

El proceso de optimización llevado a cabo queda resumido en la siguiente figura.

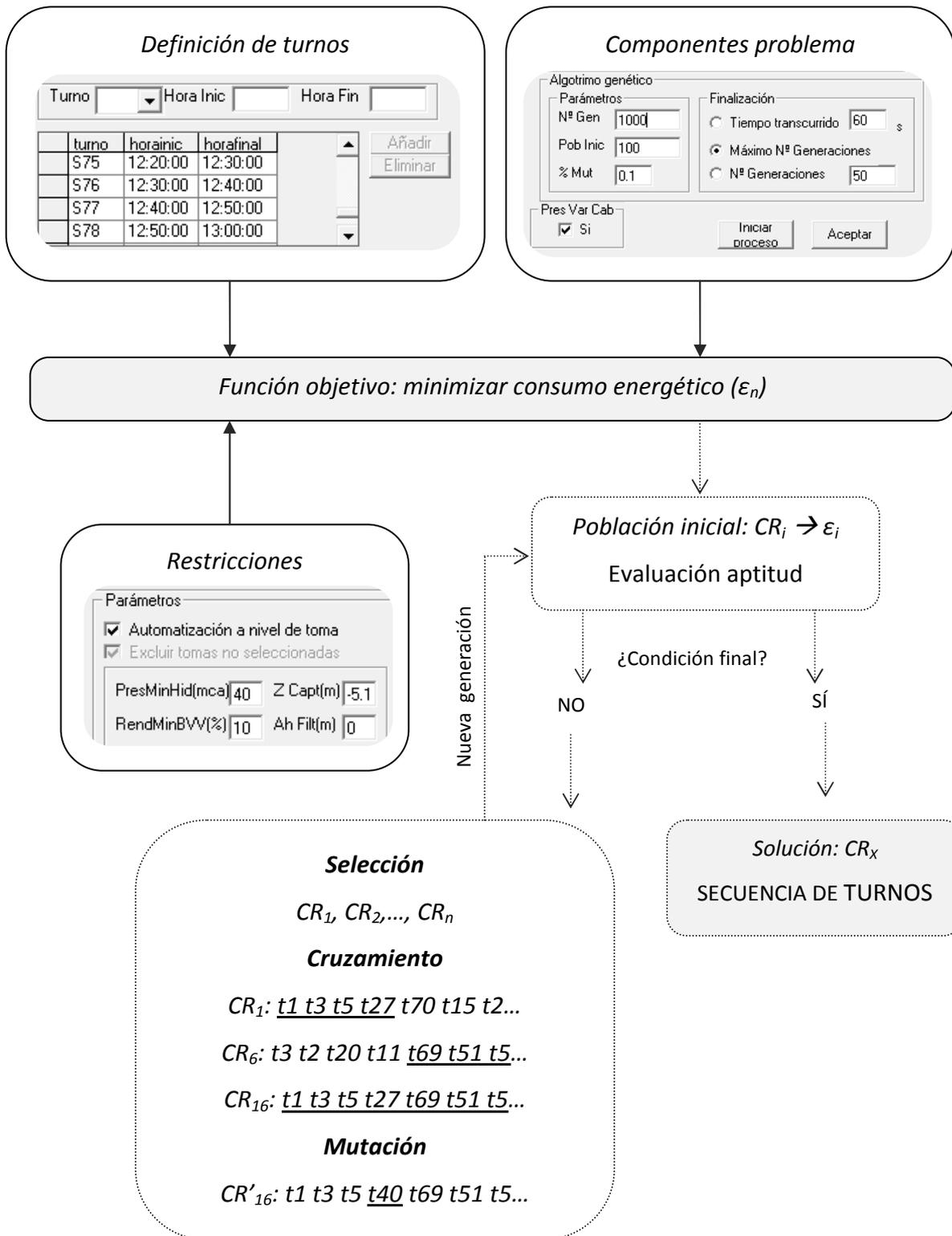


Figura 29. Diagrama esquemático del proceso de optimización

Como se puede ver en la imagen, el proceso de optimización parte de una serie de posibles soluciones denominadas cromosomas ( $CR_i$ ) que están formadas por genes. Cada uno de estos genes representa un turno, quedando establecida de forma aleatoria una secuencia de turnos en cada uno de los cromosomas. El proceso de optimización comienza con una combinación de 100 posibles soluciones que son evaluadas independientemente. Tras analizar la aptitud de cada una, se produce un proceso de selección de las mejores soluciones y un posterior cruzamiento entre los mejores cromosomas. Finalmente, el proceso se completa mutando algunos de estos genes, es decir, alterando aleatoriamente el orden de alguno de los turnos de la secuencia. En este caso, la probabilidad de mutación elegida ha sido del 10%, puesto que probabilidades superiores pueden ralentizar el proceso de búsqueda del óptimo. La nueva generación es evaluada de nuevo, repitiéndose el proceso hasta llegar a un valor favorable. La finalización del proceso se puede establecer de diversas formas, en el presente análisis se ha definido por un número máximo de generaciones, es decir, un número definido de evaluaciones que aseguren alcanzar el óptimo en un período de tiempo de procesado concreto.

En función de los escenarios planteados se obtuvieron cuatro secuencias de apertura de electroválvulas a realizar durante la jornada de riego. Los resultados se pueden consultar en el anejo 3. Los consumos asociados a cada una de ellas quedan resumidos en la siguiente tabla.

| Opción analizada                           | kWh          | kWh/m <sup>3</sup> |
|--|--------------|--------------------|
| 12 h - $H_C$ constante                     | 150,2        | 0,42               |
| 12 h - $H_C$ variable                      | 104,9        | 0,29               |
| <b>14.5 h - <math>H_C</math> constante</b> | <b>121,5</b> | <b>0,39</b>        |
| 14.5 h - $H_C$ variable                    | 114,3        | 0,32               |

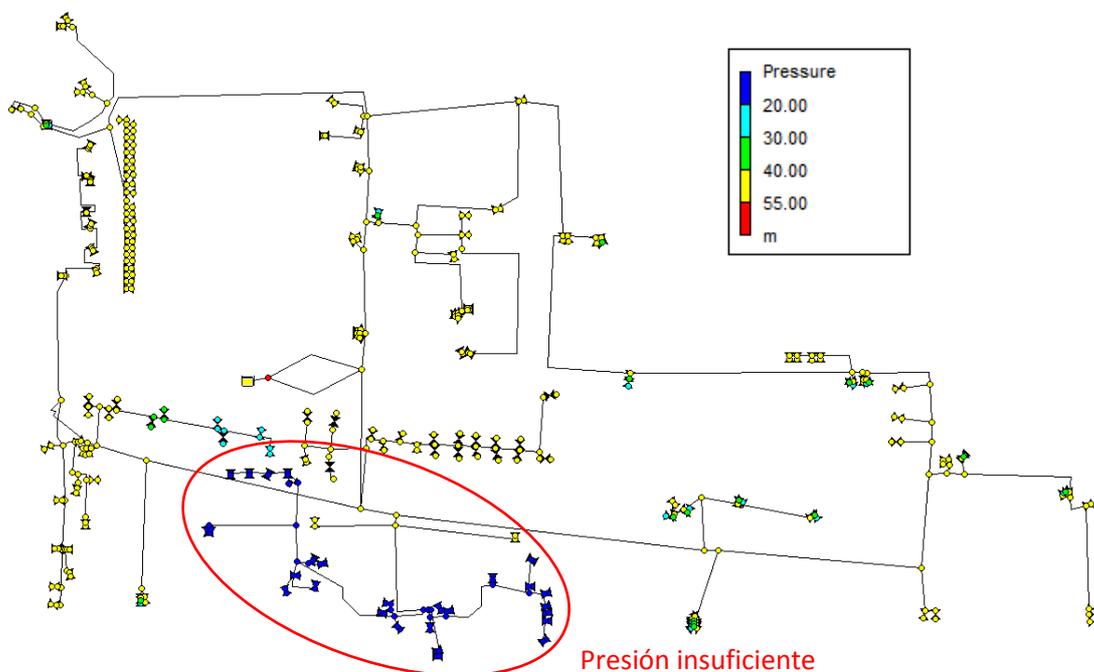
**Tabla 16.** Consumos para cada escenario optimizado

De estas cuatro posibilidades, únicamente la opción de 14.5 horas de duración de la jornada y presión de consigna constante se adecuaba a las características del bombeo de la UPV. Como se ha indicado, el nivel de automatización del bombeo no permite la opción de  $H_C$  variable para cada turno; y la opción de reducir la jornada de riego a 12

horas no es viable puesto que en ciertos momentos la potencia de las bombas es insuficiente.

El objetivo principal de realizar la reordenación de turnos es disminuir el consumo energético asociado del sistema de riego. Para conocer la magnitud de la mejora se ha comparado el consumo energético estimado con la optimización, con el que se produciría simulando mediante la herramienta EPANET la jornada de riego tipo empleada por los gestores del riego. Este balance se realiza de este modo, y no midiendo directamente con un analizador de redes sobre el bombeo, porque el sistema de riego está asociado al suministro de la piscina del campus y al sistema de urinarios de algunos edificios. **El valor obtenido de la simulación es de 154,06 kWh, frente a 121,5 kWh de la secuencia optimizada, lo que supone un ahorro energético del 26,8%.**

La simulación del estado actual de las secuencias de riego empleadas por la UPV ha permitido adicionalmente detectar puntos anómalos de la red a partir de puntos con presión insuficiente. Todas estas disfunciones quedan reflejadas en la siguiente imagen y serán objeto de mejora.



**Figura 30.** Anomalías detectadas en la red mediante la simulación de la presión en el sistema



# Capítulo 5

## *Conclusión*

---

Como ya se ha puesto de manifiesto, para climas con marcado déficit hídrico y en el escenario actual de precios de la energía, es necesario gestionar eficientemente las instalaciones de riego. La metodología presentada aborda el ahorro de agua y energía ajustando modelos y técnicas que contemplan la especificidad de la jardinería en ambiente mediterráneo. Se estudia un problema actual que, para una tendencia de mayor aridez en nuestras condiciones climáticas, tendrá cada vez más restricciones. El estudio busca mejorar la programación de riegos con resultados prácticos que ayuden a los gestores de jardines en su toma de decisiones.

Otro aspecto importante específico de las instalaciones de riego de jardinería, es que habitualmente están sometidas a un uso intenso, por ello deben ser evaluadas con periodicidad para evitar funcionamientos anómalos. Además en los sistemas de riego de espacios verdes, las variaciones en la presión de funcionamiento de los nudos de consumo, afectan enormemente a la uniformidad del riego, a la dosis aplicada y al consumo energético derivado. Por ello es imprescindible conocer y adaptar el manejo y la instalación a los requerimientos del jardín.

En el presente documento se ha propuesto una **metodología de evaluación secuencial** que tiene en cuenta los tres componentes principales de un jardín: **el componente agronómico asociado a las especies instaladas, el aspecto hidráulico de la red de distribución y el consumo energético asociado a la misma**. Éste es un procedimiento de evaluación que debe ser realizado periódicamente, lo que incluye evaluar las mejoras introducidas en análisis previos del sistema, para lograr de esta forma, una mejora continua que se adapte a los posibles cambios que sufra el jardín.

La metodología propuesta se ha puesto en práctica sobre los jardines de la UPV, pudiéndose comprobar su versatilidad. De las tres principales fases de evaluación se puede concluir lo siguiente:

#### **Análisis de la uniformidad del riego:**

Las evaluaciones permitieron detectar emisores defectuosos y disposiciones erróneas de de los mismos. Su subsanación mejoraría la eficiencia y uniformidad del riego sobre parcela.

#### **Ajuste de dosis de riego:**

La programación de riego propuesta en base al cálculo de necesidades de riego, muestra que su implementación, comparando el volumen total consumido durante 2013 en el campus, habría supuesto un **ahorro mínimo del 43% en el consumo de agua**. Este valor se obtendría aun en el caso más desfavorable, empleando en la comparativa la combinación que más exigencias de riego requiere. Lo cual significa que, realizando una ponderación sobre la representatividad de las diversas hidrozonas en el campus, el ahorro es superior al expuesto.

#### **Ajuste de los turnos de riego:**

Mediante la optimización de la secuencia del riego para una jornada tipo, **se estima que es factible un ahorro de energía del 27%**, lo que supone minimizar considerablemente el consumo de recursos en las futuras campañas de riego. En todo caso, cuando la Unidad de Medio Ambiente de la UPV haga efectiva la secuencia de turnos propuesta, el funcionamiento del sistema será evaluado nuevamente bajo los coeficientes propuestos basados en el protocolo del IDAE.

Por tanto, se puede concluir que en el caso de estudio de los jardines de la UPV, después de la evaluación y a la vista de los resultados obtenidos, queda patente el margen de mejora que tiene la instalación hasta llegar a valores idóneos.

## Bibliografía

---

- Abadía, R., Rocamora, C., Ruiz, A., Puerto, H. 2008. Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory. *Journal of Agricultural Biosystems Engineering*. Elsevier, 101. 21–27.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration; Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. United Nations. Roma.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 2000. Testing procedures for determining uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. ASCE-S436.1, 48th Ed., St. Joseph, Mich.
- Arbat, G. Pujol, J. Plegri, M. Pug-Barges, J. Durna-Ros, M. Ramirez de Cartagena, F. 2012. Efecto del diseño hidráulico en el consumo de energía y el coste en jardines domésticos. XXX Congreso Nacional de Riegos. Albacete.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1987. Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Bureau of Reclamation. 2012. Soil Moisture-Based Landscape Irrigation Scheduling Devices. U.S. Department of The Interior.
- Burés, S., 2000. Avances en xerojardinería. Ediciones Horticultura, S.L. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, K. H. 1997. *Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 423–442.
- Contreras, F. 2006. Clasificación de especies de Jardín según sus necesidades hídricas para la Región de Murcia. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario.
- Corominas, J. 2010. Agua y energía en el riego en la época de la sostenibilidad. I Jornadas Ingeniería Agua. Madrid. España

- Costello, L. R., Jones, K. S. 1999. *A guide to estimating irrigation water needs of landscape plantings in California*. University of California CE. California Dep. of Water Resources.
- Costello, L.R., Jones, K.S., Matheny, N.P., y Clark, J.R., 2000. A guide to estimating irrigation water needs of landscape plantings in California. The landscape coefficient method & WUCOLS III. University of California Cooperative Extension, California Department of Water Resources, U.S. Bureau of Reclamation California.
- Cremades, R., 2010. Ampliación y mejora de las instalaciones de riego del campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia. Proyecto final de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Christiansen, J. E. 1942. Irrigation by sprinkling. Univ. Calif. Agr. Exp. Sta. Bull. 670.
- Esteras, F. J., Sanchis, E. 2012. Campus Botànic UPV. Vera. Universidad Politécnica de Valencia.
- Farmani, R., Abadia, R., Savic, D. 2007 Optimum Design and Management of Pressurized Branched Irrigation Networks. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. November/December, 2007 pp 528-537.
- Garcia Asín, S. Paño, J., Aliod, R., Faci, E. 2012. Telegestar: integración de herramientas de simulación hidráulica y ahorro energético para redes de riego a presión en los sistemas de riego a presión. XXX Congreso Nacional de Riegos. Albacete.
- Goldberg, D.E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning., Addison-Wesley, Reading, MA.
- Hillier, F.y Lieberman, G. (2006). Introduction to Operation Research. McGraw-Hill. New York. HortScience 43:2081-2092.
- Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L., Elliott, R.L. 2007. Design and Operation of Farm Irrigation Systems. 2<sup>nd</sup> edition. American Society of Agricultural and Biological Engineers. United States of America.
- Instituto Nacional de Estadística. *Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua. Año 2011*. 2013. <http://www.ine.es> (consulta: agosto 2014).

- IDAE. 2005. Ahorro y eficiencia energética en agricultura de regadío. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía. ISBN: 84-86850-94-0. Madrid.
- Jimenez Bello, M.A. 2008. Integración de los procesos agronómicos e hidráulicos del riego a presión en un entorno SIG para la gestión eficiente de Comunidades de Regantes. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Jimenez Bello, M.A., Martínez, F., Bou V. and Ayala, H. 2010. Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. *Journal of Agricultural Biosystems Engineering*. Elsevier, 105.429 – 438.
- Keller, J., Corey, F., Walker, W. R., and Vavra, M. E. 1980. Evaluation of irrigation systems. In *Irrigation: Challenges of the 80's*. Proc. Second Nat'l Irrigation Symp., 95-105. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Lamaddalena, N. and Khila, S. 2011. Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems *Journal of irrigation science*. Springer-Verlag, DOI: 10.1007/s00271-011-0271-7.
- Manzano, J., García-Serra, J., Palau, C. V., Cremades, R., Morente, J. 2011. *Análisis y mejoras de la instalación de riego del Campus de la UPV*. II Jornadas de Ingeniería del Agua. Barcelona
- Martínez Gimeno, M.A., Manzano, J., Balbastre, I., García-Serra, J. 2013. Evaluación hídrica y energética en jardinería. Aplicación a los jardines de la UPV. III Jornadas de Ingeniería del Agua. La protección contra los riesgos hídricos. Volumen 1. 393-400. Marcombo S.A., ISBN 978-84-267-2070-2.
- Mays L.W. (2002). *Manual de sistemas de distribución del agua*. Departamento de Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Universidad del estado de Arizona. Ed.I McGraw-Hill
- McCabe, J., Ossa, J., Allen, R. G., Carleton, B., Carruthers, B., Corcos, C., Howell, T.A., Marlow, R. B., Mecham, and Spofford, T.L. 2003. *Landscape Irrigation Scheduling and Water Management: Practices Guidelines*. Water Management Committee. The Irrigation Association.
- Merriam, J.L., Keller, J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. CEE Department, Utah State University, Logan

- Micker, J. 1996. Mobile irrigation laboratory urban irrigation evaluation training manual, USDA, Natural Resources Conservation Service, Gainesville, Fla.
- Montalvo, T. *Riego localizado. Diseño de instalaciones*. 2ª Edición. Ediciones V.J. ISBN: 978-84-96741-88-1.
- Pardo, M.A., Manzano, J., Cabrera, E., García-Serra, J. 2013. *Energy audit of irrigation networks*. Biosystems Engineering. 115. 89-101
- Pares, M, Domene, E., Sauri, D. 2004. Gestión del agua en la jardinería Pública y privada en la región metropolitana de Barcelona. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. Nº 37. 233-237
- Phocaides, A. 2000. Technical Handbook on Pressurized Irrigation Techniques. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Pintado, M.J. 2001. *Problemática de los Jardines de Bajo Consumo de Agua en las Grandes Urbes*. Jornadas Internacionales de Xerojardineria mediterránea. Madrid.
- Ossa, J., McCabe, J., Allen, R., Carleton, B., Carruthers, B., Corcos., Howell, T.A., , T.L. 2005. *Landscape Irrigation Scheduling and Water Management*. WMC of The Irrigation Association.
- Qualls, R.J., Scott, J.M., De Oreo, W.B. 2001. *Soil moisture sensors for urban landscape irrigation. Effectiveness and reliability*. Journal of the American Water Resources Association. 37(3) 547-559
- Rodríguez, J.A., López, R., Carrillo, M.T., Montesinos, P., Camacho, E. 2009. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. Journal of Agricultural Engineering Biosystems.104. pp 552-561.
- Rossman, L.A. 2000. EPANET 2. Users manual. Water Supply and Water Resources Division. National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Oh 45268
- Sârbu, I., and Borza, I. (1998) "Energetic optimization of water pumping in distribution systems," Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng., vol. 42, no. 2, 1998, pp. 141-152.
- Simpson, A. and Marchi, A. (2013). "Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps." Journal of Hydraulic Engineering., 139(12), 1314–1317.

- Tarjuelo, J.M., Valiente, M., Lozoya, J. 1992 *Working condition of sprinkler to optimize application of water*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 118(6):895–913
- Vicente, J. 2001. *Xerojardinería y utilización de aguas no potables para riego de parques y jardines*. Jornadas Internacionales de Xerojardinería mediterránea. Madrid.
- Zhang, L., Merkley, G.P., Pinthong, K. 2013. *Assessing whole-field sprinkler irrigation application uniformity* Irrigation. Irrigation Science. 31:87–105
- Zoldoske, D.F., Solomon, K.H., and Norum, E.M. 1994. Uniformity measurements for turfgrass: What's best? Center for Irrigation Technology, California State University, Fresno, CA.

**Direcciones web (29/08/2014):**

Módulo de programación de algoritmos genéticos OptiGA:

<http://www.optiwater.com/optiga.html>

Manual ArcGIS 10.1:

<http://resources.arcgis.com/en/home/>



## ANEJO 1: Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>)

Se conoce como evapotranspiración la combinación de dos procesos separados por los que el agua, disponible para la planta tras el riego, se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte, mediante transpiración del cultivo. Ambos procesos ocurren simultáneamente y no es fácil distinguirlos.

El concepto de evapotranspiración de referencia se introduce para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera para una localización y momento del año determinados independientemente del tipo de cultivo, del desarrollo del mismo y de las prácticas culturales. Los únicos factores que afectan la ET<sub>0</sub> son parámetros climáticos y son los que permiten establecerla a partir de una serie de cálculos. El método empleado para el cálculo de la ET<sub>0</sub> es el denominado FAO Penman-Monteith, y la ecuación a emplear es la siguiente.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Donde

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| ET <sub>0</sub>                 | Evapotranspiración de referencia [mm/día]                              |
| R <sub>n</sub>                  | Radiación neta sobre la superficie del cultivo [MJ/m <sup>2</sup> día] |
| G                               | Flujo de calor del suelo [MJ/m <sup>2</sup> día]                       |
| T                               | Temperatura diaria media a 2 m de altura [°C]                          |
| u <sub>2</sub>                  | Velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]                             |
| e <sub>s</sub>                  | Presión de vapor de saturación [kPa]                                   |
| e <sub>a</sub>                  | Presión real de vapor [kPa]  |
| e <sub>s</sub> - e <sub>a</sub> | Déficit de presión de vapor de saturación [kPa]                        |
| Δ                               | Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]                     |
| γ                               | Constante psicrométrica [kPa/°C]                                       |

Este método emplea de una serie de fórmulas que se basan en los siguientes parámetros climáticos:

Temperatura del aire. La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire; y por ello el calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo, ejerciendo un cierto control en la tasa de evapotranspiración. Por ello, en un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco. Para el cálculo de la  $ET_o$  se requiere la medida de la temperatura diaria del aire mínima y máxima en grados Celsius. No se emplea directamente la temperatura media del día puesto que se estimaría una  $ET_o$  inferior a la real.

Humedad del aire. La diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la eliminación de vapor. Es por ello, que en áreas bien regadas en regiones áridas y cálidas, se consume grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. Para el cálculo de la  $ET_o$ , se emplea la humedad relativa máxima y mínima en tanto por cien con el fin de estimar la presión de vapor.

Radiación. El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. Esta influencia se puede estimar a través de las horas de sol diarias que permiten establecer la radiación diaria neta.

Velocidad del viento. Durante la evaporación, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se sustituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de eliminación de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye. Por tanto, el proceso de remoción de vapor depende, además de la humedad del aire, del viento y de la turbulencia del aire, y se estimará

esta influencia a través del promedio de la velocidad diaria del viento en metros por segundo.

A continuación se aborda el cálculo de cada uno de los parámetros utilizados. Las fórmulas empleadas están enfocadas hacia un cálculo diario de la  $ET_o$ .

### **Cálculo de parámetros auxiliares**

#### Presión atmosférica (P)

La presión atmosférica es la presión ejercida por el peso de la atmósfera sobre la superficie terrestre. La evaporación a grandes altitudes se origina debido a la baja presión atmosférica; este efecto se incluye en el cálculo de la  $ET_o$  para una ubicación concreta con la siguiente expresión, que es una simplificación de la ley de los gases ideales, suponiendo 20 ° C para una atmósfera estándar.

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26}$$

Donde

- P Presión atmosférica [kPa]
- z Elevación sobre el nivel del mar [m]

#### Temperatura del aire ( $T_{media}$ )

La temperatura diaria media se emplea en la ecuación FAO Penman-Monteith para calcular la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ ). El cálculo estandarizado se basa en la media de la temperatura diaria máxima y mínima. Estas temperaturas son, respectivamente, la máxima y la mínima temperatura del aire observadas durante un período de 24 horas, desde la medianoche.

$$T_{media} = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2}$$

Donde

- $T_{media}$  Temperatura media diaria [°C]
- $T_{m\acute{a}x}$  Temperatura máxima diaria [°C]
- $T_{m\acute{i}n}$  Temperatura mínima diaria [°C]

### Cálculo de la velocidad del viento

La velocidad de viento empleada en la ecuación FAO Penman-Monteith es la medida a dos metros de altura sobre el nivel del suelo. Es importante esta consideración puesto que las medidas a distintas alturas sobre la superficie del suelo son diferentes. Esto se debe a que la superficie de fricción del suelo tiende a reducir la velocidad de paso del viento por ella, por tanto la velocidad del viento es la más lenta en la superficie y aumenta con la altura. Para ajustar la velocidad del viento obtenida a partir de instrumentos colocados a alturas distintas de la altura estándar indicada, se emplea la siguiente ecuación.

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

Donde

- $u_2$  Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m/s]
- $u_z$  Velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [m/s]
- $z$  Altura de la medida sobre la superficie del suelo [m]

### Cálculo de la constante psicrométrica

La constante psicrométrica se calcula considerando que el calor específico a presión constante es la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de una unidad de masa de aire un grado a presión constante, y por tanto, su valor depende de la composición del aire, y concretamente, de la humedad. La ecuación a emplear es la siguiente.

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

Donde

- $\gamma$  Constante psicrométrica [kPa/°C]
- $P$  Presión atmosférica [kPa]
- $\lambda$  Calor latente de vaporización, 2.45 [MJ/kg]
- $c_p$  Calor específico a presión constante,  $1.013 \times 10^{-3}$  [MJ/kg °C]
- $\varepsilon$  Ratio del peso molecular de vapor de agua/aire seco, 0.622 [-]

### Cálculo de la pendiente de la curva de presión de vapor

Para el cálculo de la evapotranspiración se requiere el valor de la pendiente de la relación presión de vapor y temperatura. La pendiente de la curva en función de la temperatura viene dada por la siguiente ecuación.

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 T_{\text{media}}}{T + 237.3} \right) \right]}{(T_{\text{media}} + 237.3)^2}$$

Donde

$\Delta$  Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor [kPa/°C]

$T_{\text{media}}$  Temperatura media diaria [°C]

### Cálculo de déficit de presión de vapor

La obtención del déficit de presión de vapor requiere una serie de cálculos intermedios que se exponen a continuación.

#### Presión de vapor de saturación ( $e_s$ )

Este parámetro se calcula a partir de la temperatura del aire, tanto mínima como máxima, tal y como indican las ecuaciones siguientes.

$$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27 T}{T + 237.3} \right] \rightarrow e_s = \frac{e^o(T_{\text{máx}}) + e^o(T_{\text{mín}})}{2}$$

Donde

$e^o(T)$  Presión de vapor de saturación de la temperatura del aire T [kPa]

$e_s$  Presión de vapor de saturación [kPa]

T Temperatura del aire [°C]

$e^o(T_{\text{máx}})$  Presión de vapor de saturación de la temperatura diaria máxima [kPa]

$e^o(T_{\text{mín}})$  Presión de vapor de saturación de la temperatura diaria mínima [kPa]

### Presión de vapor real ( $e_a$ )

La presión de vapor real se calcula a partir de la humedad relativa a través de la siguiente ecuación.

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^{\circ}(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}$$

Donde

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $e_a$                          | Presión real de vapor [kPa]  |
| $e^{\circ}(T_{\max})$<br>[kPa] | Presión de vapor de saturación de la temperatura diaria máxima [kPa] |
| $e^{\circ}(T_{\min})$<br>[kPa] | Presión de vapor de saturación de la temperatura diaria mínima [kPa] |
| $RH_{\max}$                    | Humedad relativa máxima [%]  |
| $RH_{\min}$                    | Humedad relativa mínima [%]  |

### Déficit de presión de vapor ( $e_s - e_a$ )

El déficit de presión de vapor es la diferencia entre la presión de vapor saturada y la real para un período de tiempo dado.

### **Cálculo de la radiación**

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente grandes de energía, bien en forma de calor sensible o de energía radiante. Además es importante resaltar que el proceso de evapotranspiración se rige por intercambio de energía en la superficie de vegetación y está limitada por la cantidad de energía disponible.

En base a estas consideraciones, a continuación se presentan las ecuaciones a emplear.

### Parámetros auxiliares

*Latitud.* La latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho

punto. Este parámetro se emplea en el cálculo de la radiación extraterrestre y expresado en radianes es positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur. La conversión de grados decimales a radianes viene dada por:

$$\varphi[\text{Radianes}] = \frac{\pi}{180} [\text{grados decimales}]$$

Donde

$\varphi$  Latitud [rad]

*Número del día en el año.* Este factor expresa el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 o 366 (31 de diciembre). Los valores de J para todos los días del año se pueden obtener a través de la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} J = \text{Entero} (275 M/9 - 30 + D) \text{ si } (M < 3) & \quad \text{entonces } J = J + 2 \\ & \quad \text{si } (M > 2 \text{ y año bisiesto)} \quad \text{entonces } J = J + 1 \end{aligned}$$

Donde

J Número del día en el año [-]  
M Mes del año de cálculo  
D Día del año de cálculo

*Distancia relativa inversa Tierra-Sol.* Este parámetro se emplea en el cálculo de la radiación extraterrestre y se expresa como sigue.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

Donde

$d_r$  Distancia relativa inversa Tierra-Sol [rad]  
J Número del día en el año [-]

*Declinación solar.* Este parámetro se emplea en el cálculo de la radiación extraterrestre y expresa el ángulo entre la línea Sol-Tierra y el plano ecuatorial celeste (proyección del ecuador terrestre), y se expresa como sigue.

$$\delta = 0.409 \operatorname{seno}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

Donde

- $\delta$  Declinación solar [rad]
- J Número del día en el año [-]

*Ángulo horario al ocaso.* Este parámetro se emplea en el cálculo de la radiación extraterrestre y se expresa como sigue.

$$\omega_s = \operatorname{arccos}[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

Donde

- $\omega_s$  Ángulo horario al ocaso [rad]
- $\delta$  Declinación solar [rad]
- $\varphi$  Latitud [rad]

### Radiación extraterrestre ( $R_a$ )

La radiación solar recibida en la parte superior de la atmósfera terrestre sobre una superficie horizontal es la denominada radiación extraterrestre. Se puede estimar para cada día del año y para diferentes latitudes a través de la siguiente ecuación.

$$R_a = \frac{24 (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \operatorname{seno}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \operatorname{seno}(\omega_s)]$$

Donde

- $R_a$  Radiación extraterrestre [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]
- $G_{sc}$  Constante solar, 0.0820 [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  min]
- $d_r$  Distancia relativa inversa Tierra-Sol [rad]
- $\omega_s$  Ángulo horario al ocaso [rad]
- $\varphi$  Latitud [rad]
- $\delta$  Declinación solar [rad]

### Duración máxima de la insolación (N)

Duración máxima de la insolación durante el día viene dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Donde

- N      Duración máxima de la insolación [horas]  
 $\omega_s$     Ángulo horario al ocaso [rad]

### Radiación solar ( $R_s$ )

Cuando la radiación atraviesa la atmósfera para llegar a la superficie terrestre, parte de ella se dispersa, refleja o absorbe por los gases, las nubes y el polvo atmosférico. La cantidad de radiación que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre se conoce como radiación solar. Como el sol emite energía por medio de ondas electromagnéticas caracterizadas por longitudes de onda cortas, la radiación solar también se conoce como radiación de onda corta.

La radiación solar se calcula a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que la relaciona con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación. En casos en que no disponga de datos reales de radiación solar y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de  $a_s = 0,25$  y de  $b_s = 0,50$ .

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

Donde

- $R_s$       Radiación solar [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]  
n      Duración real de la insolación [horas]  
N      Duración máxima de la insolación [horas]  
n/N      Duración relativa de la insolación [-]  
 $R_a$       Radiación extraterrestre [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]  
 $a_s + b_s$     Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados

### Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ )

Este parámetro, cuando  $n = N$  y los valores calibrados de  $a_s$  y  $b_s$  no estén disponibles, puede ser calculado de la siguiente forma.

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

Donde

$R_{so}$  Radiación solar en un día despejado [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]

$z$  Elevación sobre el nivel del mar [m]

$R_a$  Radiación extraterrestre [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]

### Radiación relativa de onda corta ( $R_s/R_{so}$ )

La radiación relativa de onda corta es el cociente de la radiación solar y de la radiación solar de un día despejado. La radiación relativa de onda corta es una manera de expresar la nubosidad de la atmósfera; cuanto más nublado este el cielo, más pequeño será su valor. El cociente varía aproximadamente entre 0,33 (nubosidad elevada) y 1 (cielo despejado).

### Radiación solar neta ( $R_{ns}$ )

La radiación solar neta es la fracción de la radiación solar que no se refleja en la superficie y viene dada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

Donde

$R_{ns}$  Radiación solar neta [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]

$R_s$  Radiación solar entrante [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]

$\alpha$  Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo hipotético de referencia, 0.23 [-]

### Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

La superficie terrestre emite y recibe radiación de onda larga. La diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente se llama radiación neta de onda larga. Como la radiación saliente de onda larga es casi siempre mayor que la radiación

entrante,  $R_{nl}$  representa una pérdida de energía. La emisión de energía de onda larga está relacionada con la temperatura absoluta de la superficie, la nubosidad y la humedad. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann.

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{m\acute{a}x,K}^4 + T_{m\acute{i}n,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right)$$

Donde

- $R_{nl}$  Radiación neta de onda larga [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]
- $\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann,  $4.903 \cdot 10^{-9}$  [ $\text{MJ}/\text{K}^4 \text{ m}^2$  día]
- $T_{m\acute{a}x,K}$  Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [K]
- $T_{m\acute{i}n,K}$  Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [K]

### Radiación neta ( $R_n$ )

La radiación neta es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas, en otras palabras, es la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta y la radiación de onda larga saliente neta.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Donde

- $R_n$  Radiación neta [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]
- $R_{nl}$  Radiación neta de onda larga [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]
- $R_{ns}$  Radiación solar neta [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día]

### Flujo de calor del suelo (G)

Este parámetro expresa la energía que se utiliza para calentar el suelo. G tiene valores positivos cuando el suelo se calienta y negativos cuando el suelo se enfría.

## **ANEJO 2: Regulación de velocidad en el grupo de bombeo.**

Se expone la relación de presiones de consigna que regulan los variadores en el sistema de bombeo que suministra el riego en la UPV desde el pozo 2:

*Variador 1, correspondiente a Bomba 1. (IP 20)*

### CONSIGNA 1 DEL VARIADOR NÚMERO 1. PRESIÓN DE CONSIGNA: 5 BAR

- Parada del Variador:

Presión que tiene que mantenerse con frecuencia igual o inferior a la mínima de paro:  $H_c \pm 7\%$ . Como el transductor es de 10 bar de fondo de escala, ello implica  $0.07 \cdot 10 = 0.7$  bar, por lo que el rango en este caso de  $H_c \pm 0.7$  bar. Para la consigna actual la franja será de 4.3 a 5.7 bar.

- Arranque del Variador:

Cuando estando el variador parado, la presión caiga por debajo de  $H_c - 7\%$  fondo escala, o lo que es lo mismo, cuando la presión caiga de  $5 - 0.7 = 4.3$  bar. Para que arranque, esta situación se debe de mantener durante 3 segundos. A partir del arranque, se pone a actuar el regulador PID.

### CONSIGNA 2 DEL VARIADOR NÚMERO 1. PRESIÓN DE CONSIGNA: 5.7 BAR

- Parada del Variador:

Presión que tiene que mantenerse con frecuencia igual o inferior a la mínima de paro:  $H_c \pm 7\%$ . Como el transductor es de 10 bar de fondo de escala, ello implica  $0.07 \cdot 10 = 0.7$  bar, por lo que el rango en este caso de  $H_c \pm 0.7$  bar. Para la consigna actual la franja será de 5.0 a 6.4 bar.

- Arranque del Variador:

Cuando estando el variador parado, la presión caiga por debajo de  $H_c - 7\%$  fondo escala, o lo que es lo mismo, cuando la presión caiga de  $5.7 - 0.7 = 5.0$  bar. Para que arranque, esta situación se debe de mantener durante 3 segundos. A partir del arranque, se pone a actuar el regulador PID.

*Variador 2, correspondiente a Bomba 2. (IP 54)*

CONSIGNA 1 DEL VARIADOR NÚMERO 2. PRESIÓN DE CONSIGNA: 5.7 BAR

▪ Parada del Variador

Presión que tiene que mantenerse con frecuencia igual o inferior a la mínima de paro:  $H_c \pm 7\%$ . Como el transductor es de 10 bar de fondo de escala, ello implica  $0.07 \cdot 10 = 0.7$  bar, por lo que el rango en este caso de  $H_c \pm 0.7$  bar. Para la consigna actual la franja será de 5.0 a 6.4 bar.

▪ Arranque del Variador:

Cuando estando el variador parado, la presión caiga por debajo de  $H_c - 7\%$  fondo escala, o lo que es lo mismo, cuando la presión caiga de  $5.7 - 0.7 = 5.0$  bar. Para que arranque, esta situación se debe de mantener durante 3 segundos. A partir del arranque, se pone a actuar el regulador PID.

CONSIGNA 2 DEL VARIADOR NÚMERO 2. PRESIÓN DE CONSIGNA: 4.9 BAR

▪ Parada del Variador

Presión que tiene que mantenerse con frecuencia igual o inferior a la mínima de paro:  $H_c \pm 7\%$ . Como el transductor es de 10 bar de fondo de escala, ello implica  $0.07 \cdot 10 = 0.7$  bar, por lo que el rango en este caso de  $H_c \pm 0.7$  bar. Para la consigna actual la franja será de 4.2 a 5.6 bar.

▪ Arranque del Variador:

Cuando estando el variador parado, la presión caiga por debajo de  $H_c - 7\%$  fondo escala, o lo que es lo mismo, cuando la presión caiga de  $4.9 - 0.7 = 4.2$  bar. Para que arranque, esta situación se debe de mantener durante 3 segundos. A partir del arranque, se pone a actuar el regulador PID.

**ANEJO 3: Secuencias de turnos de riego para los distintos escenarios del análisis de optimización.**

Relación genérica de turnos

| TURNO | HoraInicio | HoraFinal | TURNO | HoraInicio | HoraFinal | TURNO | HoraInicio | HoraFinal |
|-------|------------|-----------|-------|------------|-----------|-------|------------|-----------|
| S1    | 0:00       | 0:10      | S30   | 4:50       | 5:00      | S59   | 9:40       | 9:50      |
| S2    | 0:10       | 0:20      | S31   | 5:00       | 5:10      | S60   | 9:50       | 10:00     |
| S3    | 0:20       | 0:30      | S32   | 5:10       | 5:20      | S61   | 10:00      | 10:10     |
| S4    | 0:30       | 0:40      | S33   | 5:20       | 5:30      | S62   | 10:10      | 10:20     |
| S5    | 0:40       | 0:50      | S34   | 5:30       | 5:40      | S63   | 10:20      | 10:30     |
| S6    | 0:50       | 1:00      | S35   | 5:40       | 5:50      | S64   | 10:30      | 10:40     |
| S7    | 1:00       | 1:10      | S36   | 5:50       | 6:00      | S65   | 10:40      | 10:50     |
| S8    | 1:10       | 1:20      | S37   | 6:00       | 6:10      | S66   | 10:50      | 11:00     |
| S9    | 1:20       | 1:30      | S38   | 6:10       | 6:20      | S67   | 11:00      | 11:10     |
| S10   | 1:30       | 1:40      | S39   | 6:20       | 6:30      | S68   | 11:10      | 11:20     |
| S11   | 1:40       | 1:50      | S40   | 6:30       | 6:40      | S69   | 11:20      | 11:30     |
| S12   | 1:50       | 2:00      | S41   | 6:40       | 6:50      | S70   | 11:30      | 11:40     |
| S13   | 2:00       | 2:10      | S42   | 6:50       | 7:00      | S71   | 11:40      | 11:50     |
| S14   | 2:10       | 2:20      | S43   | 7:00       | 7:10      | S72   | 11:50      | 12:00     |
| S15   | 2:20       | 2:30      | S44   | 7:10       | 7:20      | S73   | 12:00      | 12:10     |
| S16   | 2:30       | 2:40      | S45   | 7:20       | 7:30      | S74   | 12:10      | 12:20     |
| S17   | 2:40       | 2:50      | S46   | 7:30       | 7:40      | S75   | 12:20      | 12:30     |
| S18   | 2:50       | 3:00      | S47   | 7:40       | 7:50      | S76   | 12:30      | 12:40     |
| S19   | 3:00       | 3:10      | S48   | 7:50       | 8:00      | S77   | 12:40      | 12:50     |
| S20   | 3:10       | 3:20      | S49   | 8:00       | 8:10      | S78   | 12:50      | 13:00     |
| S21   | 3:20       | 3:30      | S50   | 8:10       | 8:20      | S79   | 13:00      | 13:10     |
| S22   | 3:30       | 3:40      | S51   | 8:20       | 8:30      | S80   | 13:10      | 13:20     |
| S23   | 3:40       | 3:50      | S52   | 8:30       | 8:40      | S81   | 13:20      | 13:30     |
| S24   | 3:50       | 4:00      | S53   | 8:40       | 8:50      | S82   | 13:30      | 13:40     |
| S25   | 4:00       | 4:10      | S54   | 8:50       | 9:00      | S83   | 13:40      | 13:50     |
| S26   | 4:10       | 4:20      | S55   | 9:00       | 9:10      | S84   | 13:50      | 14:00     |
| S27   | 4:20       | 4:30      | S56   | 9:10       | 9:20      | S85   | 14:00      | 14:10     |
| S28   | 4:30       | 4:40      | S57   | 9:20       | 9:30      | S86   | 14:10      | 14:20     |
| S29   | 4:40       | 4:50      | S58   | 9:30       | 9:40      | S87   | 14:20      | 14:30     |

### Relación turnos por escenario

| Hc cte - 12 horas |          | Hc cte - 14.5 horas |          | Hc variable - 12 horas |          | Hc variable - 14.5 horas |          |
|-------------------|----------|---------------------|----------|------------------------|----------|--------------------------|----------|
| Turno             | Toma     | Turno               | Toma     | Turno                  | Toma     | Turno                    | Toma     |
| S39               | 00m643p2 | S22                 | 00m643p2 | S37                    | 00m643p2 | S77                      | 00m643p2 |
| S10               | 00m644p2 | S15                 | 00m644p2 | S63                    | 00m644p2 | S29                      | 00m644p2 |
| S59               | 00m647p2 | S56                 | 00m647p2 | S59                    | 00m647p2 | S86                      | 00m647p2 |
| S19               | 00m650p2 | S51                 | 00m650p2 | S25                    | 00m650p2 | S28                      | 00m650p2 |
| S11               | 00m651p2 | S17                 | 00m651p2 | S69                    | 00m651p2 | S20                      | 00m651p2 |
| S43               | 00m652p2 | S20                 | 00m652p2 | S52                    | 00m652p2 | S77                      | 00m652p2 |
| S4                | 00m655p2 | S5                  | 00m655p2 | S54                    | 00m655p2 | S29                      | 00m655p2 |
| S41               | 00m656p2 | S41                 | 00m656p2 | S44                    | 00m656p2 | S75                      | 00m656p2 |
| S61               | 00m659p2 | S70                 | 00m659p2 | S33                    | 00m659p2 | S13                      | 00m659p2 |
| S40               | 00m660p2 | S66                 | 00m660p2 | S13                    | 00m660p2 | S36                      | 00m660p2 |
| S65               | 00m661p2 | S2                  | 00m661p2 | S14                    | 00m661p2 | S32                      | 00m661p2 |
| S22               | 00m663p2 | S73                 | 00m663p2 | S1                     | 00m663p2 | S45                      | 00m663p2 |
| S35               | 00m703p2 | S17                 | 00m703p2 | S15                    | 00m703p2 | S84                      | 00m703p2 |
| S16               | 00m704p2 | S84                 | 00m704p2 | S24                    | 00m704p2 | S27                      | 00m704p2 |
| S11               | 00m707p2 | S66                 | 00m707p2 | S16                    | 00m707p2 | S76                      | 00m707p2 |
| S67               | 00m712p2 | S12                 | 00m712p2 | S50                    | 00m712p2 | S54                      | 00m712p2 |
| S41               | 00m713p2 | S64                 | 00m713p2 | S18                    | 00m713p2 | S39                      | 00m713p2 |
| S72               | 00m721p2 | S52                 | 00m721p2 | S71                    | 00m721p2 | S1                       | 00m721p2 |
| S25               | 00m725p2 | S44                 | 00m725p2 | S4                     | 00m725p2 | S43                      | 00m725p2 |
| S18               | 00m733p2 | S26                 | 00m733p2 | S27                    | 00m733p2 | S34                      | 00m733p2 |
| S69               | 00m734p2 | S21                 | 00m734p2 | S2                     | 00m734p2 | S12                      | 00m734p2 |
| S16               | 00m735p2 | S8                  | 00m735p2 | S70                    | 00m735p2 | S62                      | 00m735p2 |
| S33               | 00m738p2 | S81                 | 00m738p2 | S6                     | 00m738p2 | S35                      | 00m738p2 |
| S48               | 00m739p2 | S37                 | 00m739p2 | S48                    | 00m739p2 | S56                      | 00m739p2 |
| S4                | 00m740p2 | S55                 | 00m740p2 | S23                    | 00m740p2 | S74                      | 00m740p2 |
| S30               | 00m742p2 | S36                 | 00m742p2 | S8                     | 00m742p2 | S37                      | 00m742p2 |
| S40               | 00m747p2 | S9                  | 00m747p2 | S66                    | 00m747p2 | S25                      | 00m747p2 |
| S32               | 00m748p2 | S6                  | 00m748p2 | S24                    | 00m748p2 | S40                      | 00m748p2 |
| S61               | 00m749p2 | S87                 | 00m749p2 | S61                    | 00m749p2 | S16                      | 00m749p2 |
| S23               | 00m750p2 | S11                 | 00m750p2 | S59                    | 00m750p2 | S85                      | 00m750p2 |
| S16               | 00m805p2 | S56                 | 00m805p2 | S70                    | 00m805p2 | S52                      | 00m805p2 |
| S3                | 00m808p2 | S78                 | 00m808p2 | S29                    | 00m808p2 | S48                      | 00m808p2 |

|     |          |     |          |     |          |     |          |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| S45 | 00m810p2 | S38 | 00m810p2 | S50 | 00m810p2 | S44 | 00m810p2 |
| S65 | 00m811p2 | S3  | 00m811p2 | S24 | 00m811p2 | S38 | 00m811p2 |
| S46 | 00m815p2 | S56 | 00m815p2 | S26 | 00m815p2 | S15 | 00m815p2 |
| S67 | 00m816p2 | S63 | 00m816p2 | S38 | 00m816p2 | S48 | 00m816p2 |
| S46 | 00m818p2 | S9  | 00m818p2 | S3  | 00m818p2 | S55 | 00m818p2 |
| S36 | 00m819p2 | S21 | 00m819p2 | S22 | 00m819p2 | S60 | 00m819p2 |
| S54 | 00m820p2 | S79 | 00m820p2 | S62 | 00m820p2 | S55 | 00m820p2 |
| S22 | 00m821p2 | S59 | 00m821p2 | S52 | 00m821p2 | S82 | 00m821p2 |
| S13 | 00m826p2 | S34 | 00m826p2 | S34 | 00m826p2 | S41 | 00m826p2 |
| S51 | 00m827p2 | S62 | 00m827p2 | S57 | 00m827p2 | S27 | 00m827p2 |
| S14 | 00m832p2 | S32 | 00m832p2 | S20 | 00m832p2 | S12 | 00m832p2 |
| S35 | 00m833p2 | S56 | 00m833p2 | S59 | 00m833p2 | S64 | 00m833p2 |
| S18 | 00m838p2 | S37 | 00m838p2 | S8  | 00m838p2 | S65 | 00m838p2 |
| S17 | 00r665p2 | S76 | 00r665p2 | S18 | 00r665p2 | S62 | 00r665p2 |
| S27 | 00r666p2 | S54 | 00r666p2 | S6  | 00r666p2 | S10 | 00r666p2 |
| S43 | 00r722p2 | S5  | 00r722p2 | S41 | 00r722p2 | S19 | 00r722p2 |
| S58 | 00r801p2 | S28 | 00r801p2 | S20 | 00r801p2 | S40 | 00r801p2 |
| S52 | 00r813p2 | S14 | 00r813p2 | S33 | 00r813p2 | S21 | 00r813p2 |
| S55 | 00r824p2 | S8  | 00r824p2 | S49 | 00r824p2 | S25 | 00r824p2 |
| S69 | 00r835p2 | S42 | 00r835p2 | S25 | 00r835p2 | S58 | 00r835p2 |
| S53 | 00r837p2 | S81 | 00r837p2 | S58 | 00r837p2 | S51 | 00r837p2 |
| S10 | 00r901p2 | S29 | 00r901p2 | S53 | 00r901p2 | S66 | 00r901p2 |
| S60 | 00r903p2 | S25 | 00r903p2 | S38 | 00r903p2 | S62 | 00r903p2 |
| S17 | 00r904p2 | S32 | 00r904p2 | S16 | 00r904p2 | S31 | 00r904p2 |
| S65 | C2m701p2 | S85 | C2m701p2 | S51 | C2m701p2 | S82 | C2m701p2 |
| S20 | C2m702p2 | S58 | C2m702p2 | S41 | C2m702p2 | S64 | C2m702p2 |
| S22 | C2m705p2 | S69 | C2m705p2 | S46 | C2m705p2 | S48 | C2m705p2 |
| S6  | C2m706p2 | S19 | C2m706p2 | S30 | C2m706p2 | S5  | C2m706p2 |
| S62 | C2m709p2 | S74 | C2m709p2 | S50 | C2m709p2 | S10 | C2m709p2 |
| S38 | C2m710p2 | S58 | C2m710p2 | S23 | C2m710p2 | S44 | C2m710p2 |
| S13 | C2m711p2 | S5  | C2m711p2 | S21 | C2m711p2 | S63 | C2m711p2 |
| S52 | C2m715p2 | S2  | C2m715p2 | S33 | C2m715p2 | S66 | C2m715p2 |
| S56 | C2m716p2 | S66 | C2m716p2 | S4  | C2m716p2 | S45 | C2m716p2 |
| S24 | C2m717p2 | S60 | C2m717p2 | S27 | C2m717p2 | S36 | C2m717p2 |
| S70 | C2m718p2 | S48 | C2m718p2 | S13 | C2m718p2 | S33 | C2m718p2 |
| S63 | C2m719p2 | S36 | C2m719p2 | S41 | C2m719p2 | S85 | C2m719p2 |

|     |          |     |          |     |          |     |          |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| S23 | C2m720p2 | S5  | C2m720p2 | S34 | C2m720p2 | S22 | C2m720p2 |
| S10 | C2m724p2 | S52 | C2m724p2 | S46 | C2m724p2 | S69 | C2m724p2 |
| S62 | C2m727p2 | S78 | C2m727p2 | S7  | C2m727p2 | S49 | C2m727p2 |
| S16 | C2m728p2 | S77 | C2m728p2 | S26 | C2m728p2 | S32 | C2m728p2 |
| S29 | C2m730p2 | S34 | C2m730p2 | S45 | C2m730p2 | S70 | C2m730p2 |
| S18 | C2m731p2 | S17 | C2m731p2 | S55 | C2m731p2 | S37 | C2m731p2 |
| S18 | C2m732p2 | S75 | C2m732p2 | S7  | C2m732p2 | S64 | C2m732p2 |
| S32 | C2m736p2 | S50 | C2m736p2 | S59 | C2m736p2 | S64 | C2m736p2 |
| S69 | C2m737p2 | S60 | C2m737p2 | S49 | C2m737p2 | S21 | C2m737p2 |
| S69 | PCm602p2 | S2  | PCm602p2 | S14 | PCm602p2 | S67 | PCm602p2 |
| S50 | PCm603p2 | S39 | PCm603p2 | S13 | PCm603p2 | S21 | PCm603p2 |
| S38 | PCm604p2 | S23 | PCm604p2 | S52 | PCm604p2 | S16 | PCm604p2 |
| S33 | PCm605p2 | S60 | PCm605p2 | S20 | PCm605p2 | S34 | PCm605p2 |
| S65 | PCm606p2 | S16 | PCm606p2 | S21 | PCm606p2 | S76 | PCm606p2 |
| S9  | PCm607p2 | S79 | PCm607p2 | S12 | PCm607p2 | S47 | PCm607p2 |
| S29 | PCm608p2 | S68 | PCm608p2 | S28 | PCm608p2 | S57 | PCm608p2 |
| S20 | PCm609p2 | S33 | PCm609p2 | S31 | PCm609p2 | S19 | PCm609p2 |
| S13 | PCm610p2 | S50 | PCm610p2 | S25 | PCm610p2 | S69 | PCm610p2 |
| S12 | PCm612p2 | S18 | PCm612p2 | S17 | PCm612p2 | S13 | PCm612p2 |
| S43 | PCm613p2 | S76 | PCm613p2 | S35 | PCm613p2 | S48 | PCm613p2 |
| S41 | PCm614p2 | S38 | PCm614p2 | S66 | PCm614p2 | S80 | PCm614p2 |
| S7  | PCm615p2 | S84 | PCm615p2 | S2  | PCm615p2 | S10 | PCm615p2 |
| S31 | PCm616p2 | S21 | PCm616p2 | S50 | PCm616p2 | S32 | PCm616p2 |
| S51 | PCm617p2 | S74 | PCm617p2 | S36 | PCm617p2 | S30 | PCm617p2 |
| S57 | PCm618p2 | S28 | PCm618p2 | S3  | PCm618p2 | S79 | PCm618p2 |
| S54 | PCm620p2 | S47 | PCm620p2 | S46 | PCm620p2 | S11 | PCm620p2 |
| S60 | PCm621p2 | S49 | PCm621p2 | S61 | PCm621p2 | S31 | PCm621p2 |
| S59 | PCm624p2 | S40 | PCm624p2 | S48 | PCm624p2 | S58 | PCm624p2 |
| S32 | PCm625p2 | S85 | PCm625p2 | S9  | PCm625p2 | S23 | PCm625p2 |
| S36 | PCm628p2 | S9  | PCm628p2 | S44 | PCm628p2 | S53 | PCm628p2 |
| S55 | PCm629p2 | S25 | PCm629p2 | S64 | PCm629p2 | S45 | PCm629p2 |
| S58 | PCm630p2 | S58 | PCm630p2 | S68 | PCm630p2 | S81 | PCm630p2 |
| S71 | PCm631p2 | S27 | PCm631p2 | S57 | PCm631p2 | S49 | PCm631p2 |
| S6  | PCm632p2 | S69 | PCm632p2 | S70 | PCm632p2 | S26 | PCm632p2 |
| S27 | PCm633p2 | S43 | PCm633p2 | S40 | PCm633p2 | S60 | PCm633p2 |
| S49 | PCm637p2 | S7  | PCm637p2 | S6  | PCm637p2 | S45 | PCm637p2 |

|     |          |     |          |     |          |     |          |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| S39 | PCm638p2 | S79 | PCm638p2 | S47 | PCm638p2 | S84 | PCm638p2 |
| S53 | PPr635p2 | S15 | PPr635p2 | S32 | PPr635p2 | S68 | PPr635p2 |
| S25 | PPr636p2 | S9  | PPr636p2 | S19 | PPr636p2 | S43 | PPr636p2 |
| S9  | PPr639p2 | S63 | PPr639p2 | S52 | PPr639p2 | S10 | PPr639p2 |
| S43 | PPr641p2 | S22 | PPr641p2 | S12 | PPr641p2 | S67 | PPr641p2 |
| S31 | PVm803p2 | S86 | PVm803p2 | S6  | PVm803p2 | S49 | PVm803p2 |
| S9  | PVm804p2 | S68 | PVm804p2 | S35 | PVm804p2 | S40 | PVm804p2 |
| S47 | PVm806p2 | S10 | PVm806p2 | S13 | PVm806p2 | S8  | PVm806p2 |
| S47 | PVm807p2 | S32 | PVm807p2 | S41 | PVm807p2 | S47 | PVm807p2 |
| S46 | VKm802p2 | S65 | VKm802p2 | S60 | VKm802p2 | S74 | VKm802p2 |
| S1  | VKm812p2 | S54 | VKm812p2 | S42 | VKm812p2 | S6  | VKm812p2 |
| S18 | VKm823p2 | S60 | VKm823p2 | S19 | VKm823p2 | S4  | VKm823p2 |
| S27 | VKm825p2 | S29 | VKm825p2 | S18 | VKm825p2 | S16 | VKm825p2 |
| S15 | VKm828p2 | S43 | VKm828p2 | S12 | VKm828p2 | S63 | VKm828p2 |
| S46 | VKm830p2 | S29 | VKm830p2 | S40 | VKm830p2 | S12 | VKm830p2 |
| S30 | VKm834p2 | S13 | VKm834p2 | S55 | VKm834p2 | S43 | VKm834p2 |
| S27 | VKm836p2 | S22 | VKm836p2 | S30 | VKm836p2 | S56 | VKm836p2 |
| S3  | VLm645p2 | S23 | VLm645p2 | S48 | VLm645p2 | S26 | VLm645p2 |
| S23 | VLm654p2 | S25 | VLm654p2 | S63 | VLm654p2 | S84 | VLm654p2 |
| S57 | VLm657p2 | S65 | VLm657p2 | S36 | VLm657p2 | S42 | VLm657p2 |
| S9  | VLr664p2 | S19 | VLr664p2 | S8  | VLr664p2 | S72 | VLr664p2 |
| S63 | VMm601p2 | S58 | VMm601p2 | S55 | VMm601p2 | S73 | VMm601p2 |
| S7  | VMm611p2 | S81 | VMm611p2 | S24 | VMm611p2 | S29 | VMm611p2 |
| S47 | VMm619p2 | S75 | VMm619p2 | S53 | VMm619p2 | S36 | VMm619p2 |
| S28 | VMm626p2 | S12 | VMm626p2 | S26 | VMm626p2 | S41 | VMm626p2 |
| S67 | VMm634p2 | S71 | VMm634p2 | S22 | VMm634p2 | S65 | VMm634p2 |
| S19 | VMm640p2 | S16 | VMm640p2 | S65 | VMm640p2 | S77 | VMm640p2 |
| S44 | VMm649p2 | S77 | VMm649p2 | S49 | VMm649p2 | S1  | VMm649p2 |
| S24 | VMm653p2 | S20 | VMm653p2 | S45 | VMm653p2 | S48 | VMm653p2 |
| S57 | VMm658p2 | S46 | VMm658p2 | S16 | VMm658p2 | S85 | VMm658p2 |
| S27 | VMm708p2 | S84 | VMm708p2 | S39 | VMm708p2 | S60 | VMm708p2 |
| S16 | VMm714p2 | S49 | VMm714p2 | S60 | VMm714p2 | S82 | VMm714p2 |
| S55 | VMm723p2 | S67 | VMm723p2 | S64 | VMm723p2 | S50 | VMm723p2 |
| S46 | VMm729p2 | S17 | VMm729p2 | S14 | VMm729p2 | S69 | VMm729p2 |
| S53 | VMm741p2 | S35 | VMm741p2 | S37 | VMm741p2 | S56 | VMm741p2 |
| S63 | VMm743p2 | S78 | VMm743p2 | S69 | VMm743p2 | S5  | VMm743p2 |

