



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E
INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE GRADO

Racionalización en la gestión del agua en viveros

ESTUDIANTES:

JUAN PABLO DEBONE
JUAN IGNACIO PAIS

TUTORES:

ANGELA GORGOGNONE
FEDERICO VILASECA
RAFAEL TERRA

28 de febrero de 2021

Índice:

1	Resumen.....	5
2	Marco general.....	5
3	Parte I: Altman Plants (<i>California, EE. UU.</i>)	6
3.1	Objetivo	8
3.2	Información disponible	8
3.3	Descripción general del Sistema	9
3.4	Riego.....	11
3.4.1	Fuentes de agua.....	11
3.4.2	Sistema de distribución	14
3.5	Drenaje y recolección	19
3.5.1	Agua en el suelo.....	19
3.5.2	Agua en la atmósfera.....	23
3.5.3	Sistema de drenaje	25
3.5.4	Recuperación de la escorrentía superficial	26
3.6	Conceptualización e implementación de SWMM	28
3.6.1	Cuenca.....	28
3.6.2	Irrigación	38
3.6.3	Drenaje	41
3.7	Modelo y análisis de resultados.....	44
3.8	Racionalización del agua	48
3.9	Conclusiones	52
4	Parte II: La Escobilla (<i>Florida, Uruguay</i>)	53
4.1	Objetivo	54
4.2	Información Disponible	54
4.3	Situación Actual	56
4.3.1	Abastecimiento de agua	56
4.3.2	Infraestructura de riego	56
4.3.3	Uso de agua	61
4.3.4	Gestión del Riego.....	64
4.3.5	Verificación del Funcionamiento.....	64
4.4	Síntesis diagnóstica e implicancias en el rediseño	68
4.4.1	Diagnóstico del sistema actual.....	68
4.4.2	Implicancias para el diseño	70

4.5	Propuestas de diseño.....	72
4.5.1	Equipo de bombeo	72
4.5.2	Red de Riego	74
4.5.3	Alternativa 1	74
4.5.4	Alternativa 2	75
4.5.5	Alternativa 3	76
4.6	Evaluación de alternativas	78
4.6.1	Proyecto de inversión.....	81
	Análisis comparativo	82
4.7	y amortización	82
4.8	Conclusiones	84
5	Conclusiones generales	85
6	ANEXO I	86
6.1	Especificaciones técnicas.....	86
6.2	Fertirrigación.....	87
7	ANEXO II.....	88
7.1	Cálculos de pérdidas de carga	88
7.1.1	Pérdida de carga distribuida	88
7.1.2	Pérdidas de carga localizada.....	88
7.2	Procedimiento de cálculo.....	89
7.2.1	Un invernadero	90
7.2.2	Dos invernaderos	91
7.2.3	Tres invernaderos.....	92
7.2.4	Cuatro invernaderos	93
8	Bibliografía	95

1 RESUMEN

En este proyecto se estudia la temática del riego y sus implicancias en dos viveros ubicados en California, EE. UU. y Florida, Uruguay. Debido a la realidad socioeconómica y la escala de producción de ambos emprendimientos, se aborda la problemática de cada uno desde distintas perspectivas con un objetivo en común: racionalizar la gestión del agua.

Para el primer caso de estudio, se genera información técnica para sustentar la gestión del recurso hídrico frente a escenarios de escasez debido a regulaciones municipales, o de racionalización como política económica de la empresa. En cuanto al segundo, se rediseña el sistema de riego en base a requerimientos agronómicos, atendiendo la demanda de los productores. La solución propuesta, de operativa sencilla y robusta, logra reducir el tiempo de riego y los costos operativos asociados. Para la misma se realizó el proyecto ejecutivo y el análisis de inversión.

2 MARCO GENERAL

La demanda de agua, tanto en el sector urbano como agrícola, se ha intensificado en las últimas décadas además del interés en el destino ambiental de la misma. En Uruguay, así como en otros países, se han producido cambios significativos en el uso del suelo como resultado de la intensificación y expansión de las actividades agropecuarias.

Los factores predominantes que gobiernan el crecimiento de las plantas en sus distintas etapas son: la luz, la temperatura y humedad relativa. Si se trata de un invernadero, otro factor que influye es el dióxido de carbono y la radiación solar.

Independientemente de las condiciones climáticas y ambientales locales y el tipo de cultivo, la producción de plantas, ya sean hortícolas u ornamentales, requieren la aplicación diaria de agua y la disponibilidad continua de nutrientes minerales para mantener la buena calidad de la planta y frutos. De este modo, la práctica de riego cumple un rol fundamental en la producción.

La gestión de esta actividad requiere un sistema de distribución de agua hacia el cultivo con la capacidad de funcionar bajo diferentes condiciones (presión-caudal), dependiendo del sistema productivo (en macetas o en invernaderos sobre el suelo), además de la posibilidad de contar con distintas alternativas que permitan el continuo abastecimiento de agua frente a posibles condiciones de escasez, ya sea por corte de suministro o por sequía. Por otra parte, también requiere conocer las necesidades agronómicas de las plantas para aplicar el volumen de riego diario que las mismas demandan, además de conocer el proceso de fertilización cuando se realiza a través del agua para riego.

3 PARTE I: ALTMAN PLANTS (CALIFORNIA, EE. UU.)

Esta parte del estudio se centra en un vivero comercial de plantas ornamentales, *Altman Plants*, ubicado a 100 km de la ciudad de Los Ángeles, California, EE. UU. (ver Figura 3.1)

Los viveros comerciales son un ejemplo de agricultura intensiva donde, todo el año, se cultivan diferentes especies de plantas. En el mismo, se utilizan diferentes métodos de producción, de los cuales el más común es en macetas o contenedores, en la que se utilizan sustratos inertes¹, sobre superficies de cultivo impermeable, generalmente láminas de geotextil y polietileno para evitar malezas y filtraciones.

Generalmente suelen encontrarse sobre la franja de áreas urbanas, debido a la proximidad con los clientes, y en localizaciones donde los suelos poseen bajo índice de productividad. Las características mencionadas han vuelto comunes debido al bajo costo de implementación, las tasas de crecimiento de plantas y la posibilidad de producción en masa. Es imprescindible para estos emprendimientos tener una economía de escala acorde al mercado disponible.

El riego en este vivero se realiza por medio de aspersión en donde, el volumen de agua para riego de las plantas se esparce en el ambiente precipitando sobre la maceta, hojas y tallos, pero también sobre la superficie impermeable. Debido a esto último es necesario tener presente las “pérdidas” del sistema para suplir la demanda diaria de agua de cada planta. A su vez, la fertirrigación se produce por vía del riego. Estos factores generan un gran consumo de agua, además de un incremento gradual de la carga de nutrientes en la escorrentía, es decir, un deterioro en la calidad del agua, lo que ocasiona problemas contaminación si el vertido es directo sobre un curso de agua.

En California, las regulaciones estatales requieren que los productores colecten y retengan el agua en el sitio si ésta no posee la calidad suficiente para descargar a cuerpos de agua receptores. Cumplir con esta regulación requiere de una inversión en infraestructura para colectar y almacenar el agua. Esto abre la posibilidad de que, en lugar de tratarla previo a su vertido, pueda ser reincorporada al sistema de riego como fuente de agua luego de un tratamiento.

Por lo tanto, escenarios cada vez más restrictivos en cuanto a cantidad (las condiciones locales hacen que la disponibilidad de fuentes de agua externas sea cada vez menor) como calidad (regulaciones cada vez más exigentes para el vertido a cuerpos de agua) amenazan la sostenibilidad de esta industria. Para mitigar estos efectos, el productor requerirá mejorar las prácticas de gestión del recurso agua de modo de racionalizar su uso y controlar su calidad. Para cumplir con este objetivo, puede ser necesario desarrollar herramientas para facilitar la toma de decisiones.

En un reciente estudio, (Yazdi et al., 2019), se demostró que la herramienta de modelación *Storm Water Management Model* (SWMM) simula correctamente el comportamiento hidrológico y la caracterización de calidad de agua de la escorrentía generada en un área reducida de vivero. Esto se debe a que la infraestructura de drenaje es prácticamente impermeable, lo que genera gran similitud con las superficies de colección y conducción de aguas pluviales en áreas urbanas.

¹ Un sustrato inerte es aquel que no aporta ningún nutriente a la planta, solo le aporta estabilidad y retención de agua.

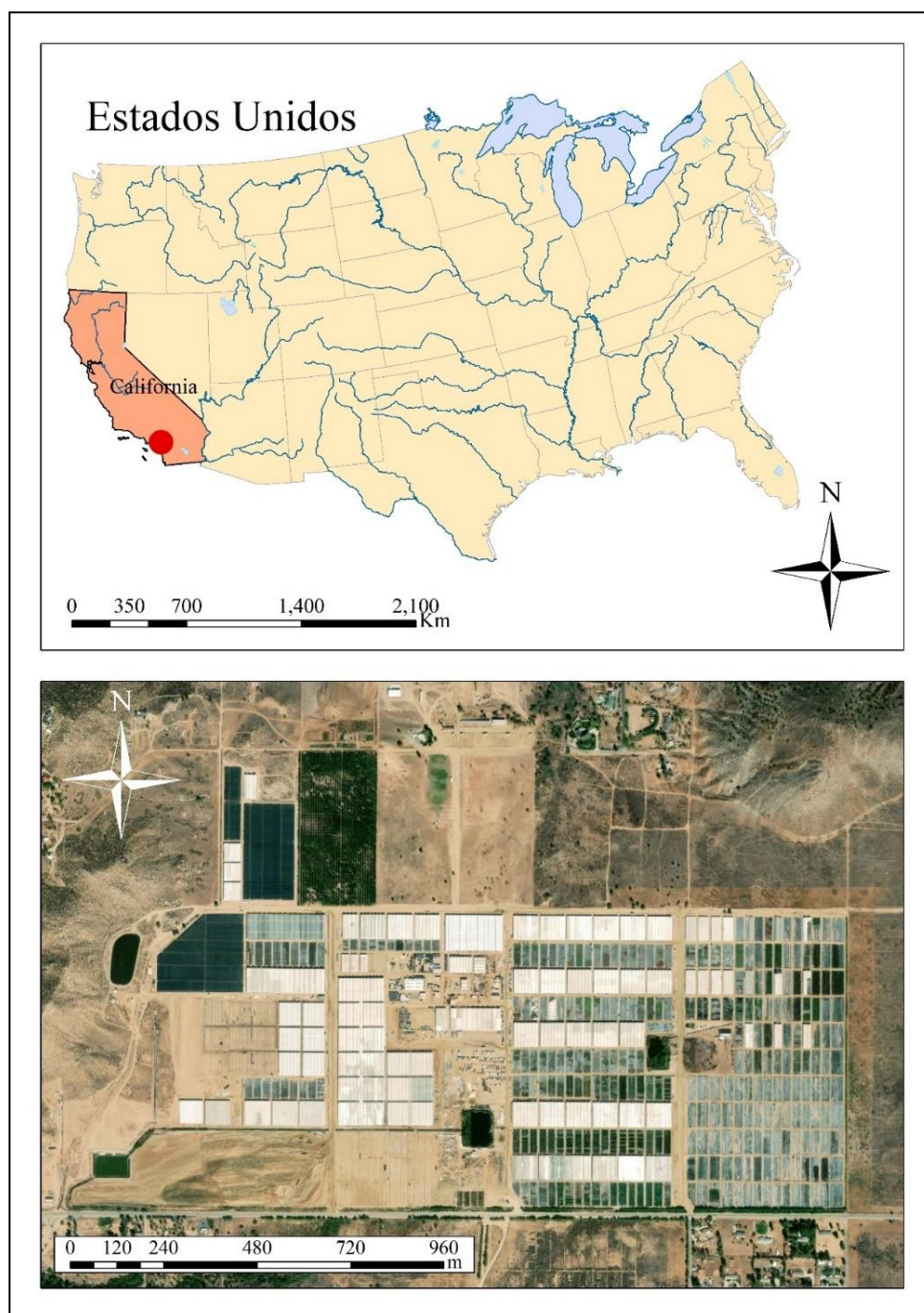


Figura 3.1: Ubicación del vivero Altman Plants.

3.1 OBJETIVO

El objetivo general de esta parte es generar información técnica que sustente el diseño de soluciones para la racionalización del uso del agua en el vivero frente a escenarios de escasez del recurso.

Los objetivos específicos para lograr dicho propósito son:

- Familiarización con la infraestructura del vivero y revisión de los conceptos necesarios que permiten entender su funcionamiento y diagnosticar el uso del agua bajo distintas condiciones, incluyendo la situación actual.
- Modelación y validación hidrológica de la zona de producción de plantas e hidráulica del sistema de drenaje en SWMM.
- Utilizando el modelo como herramienta, evaluar diferentes escenarios de uso del agua, realizar un análisis de sensibilidad de parámetros que permitan determinar las condiciones de operación en cada caso.

3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

- **Información Universidad de California, Davis**

Para llevar a cabo este estudio fue fundamental la información proporcionada por docentes de la Universidad de California, Davis (UCD). Además, se destaca su predisposición para atender a todas las dudas que surgieron durante el análisis de datos.

Los datos de uso de agua del vivero corresponden al verano de 2016 (junio – septiembre), estos consisten en series de mediciones de caudalímetros:

- Serie de consumos de agua para riego discriminado por tipo de fuente de agua (datos cada 1 minuto).
- Serie de caudal total escurrido (datos cada 1 minuto).

- **Tipos de aspersores y fichas técnicas**

También se contó con las características del sistema de aplicación de riego, método de irrigación (aspersores), presión y caudal de funcionamiento.

- **Relevamiento topográfico**

Datos de relevamiento topográfico y puntos claves para el trazado de la red de drenaje. Geometría, recubrimiento y dirección del flujo en los canales.

- **Ensayos de laboratorio**

Ensayos de laboratorio de muestras de sustrato empleados en las macetas.

- **Estación meteorológica**

Datos de evapotranspiración potencial (ET_0): El registro de este parámetro dato es obtenido de dos estaciones del *California Irrigation Management Information System* (CIMIS), #44 y #240, ubicadas a 19 km y 17 km del sitio de vivero, respectivamente.

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

En el período de estudio (verano de 2016), el área destinada a la producción era de 63 hectáreas aproximadamente, donde se diferencian tres sistemas de cultivo: en invernadero (31 %), bajo malla de sombra (11 %) y a cielo abierto (58 %). En la Figura 3.2 se presentan los distintos sistemas mencionados.



Figura 3.2: Cultivo a cielo abierto, bajo malla de sombreo y en invernadero. (Foto: B.Pitton).

El clima local es prácticamente constante durante todo el año: templado y seco, típico de un clima mediterráneo, semiárido. Dentro de los factores climáticos que caracterizan la zona de estudio, se destaca un régimen de precipitación media anual de 315 mm y la evapotranspiración media anual (ET_0) de 1.270 mm. La temperatura diaria varía entre 10 °C mínima y 32 °C máxima, siendo agosto el mes más caluroso.

El agua ingresa al sistema desde diversas fuentes hacia todas las parcelas mediante aspersores, de esa agua que precipita, parte cae en la maceta, quedando almacenada en el sustrato para ser paulatinamente utilizada por la planta, lixiviada o evaporada; otra parte es interceptada por el follaje y, por último, en la superficie impermeable. Tanto esta última como el agua lixiviada escurren a través de las conducciones del drenaje. El agua conducida en el drenaje del vivero, que se compone de canales impermeables de geometría definida, atraviesa el sistema hasta llegar a una laguna final de descarga. Alcanzado ese punto, en el que durante todo este proceso se incorpora a la escorrentía una gran cantidad de nutrientes, sedimentos, sales y microorganismos, el agua es bombeada a una etapa de tratamiento que acondiciona el líquido para reincorporarlo a la irrigación, de modo de mantener la presión necesaria en la red de distribución, además de disminuir significativamente la demanda sobre las fuentes externas.

Cada una de estas etapas posee cierta complejidad considerándose algunas como un subsistema, por lo tanto, resulta necesario describirlas en mayor profundidad.

Además, para facilitar este análisis se divide el vivero en 5 áreas (ver Figura 3.3), cuya superficie de cultivo se detalla en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Superficie total disponible para cultivo de cada área de estudio del vivero Altman Plants.

Área de Riego	Superficie (ha)
1	4
2	12
3	3
4	22
5	21
Total	62

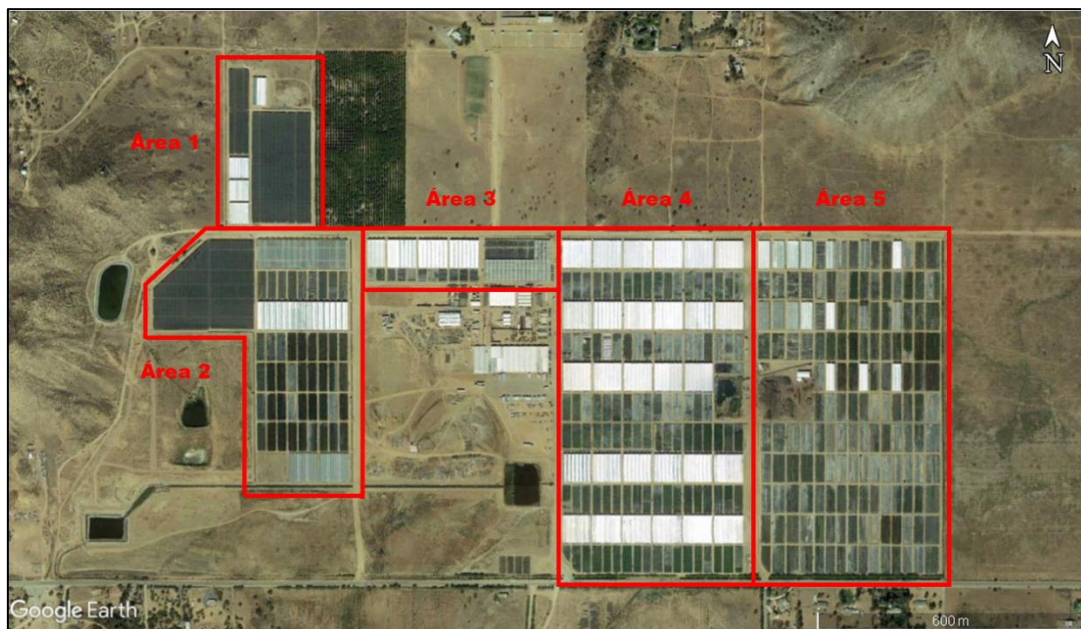


Figura 3.3: Imagen satelital del vivero con las áreas designadas para el estudio (oct-2016). Fuente: Google Earth.

3.4 RIEGO

Los sistemas de producción de plantas en macetas normalmente requieren una frecuente irrigación para mantener la buena calidad de la planta, ya que la misma se encuentra limitada al agua disponible en el sustrato de la maceta que tiene el potencial para ser utilizada diariamente. Además de la frecuencia, otro factor a tener en cuenta es la cantidad de agua aplicada, la cual se realiza en exceso para el lavado de sales y evitar las consecuencias negativas del estrés hídrico. Por lo tanto, el riego en exceso es una práctica habitual en zonas de producción de climas áridos, como es el caso del objeto de este estudio, en que existe una alta tasa de evapotranspiración.

Cabe destacar que este tipo de práctica trae consecuencias adversas, como por ejemplo la producción de hongos. Además de aumentar el consumo de agua, también resulta en una mayor escorrentía y pérdidas de nutrientes a través de la lixiviación que, al ser quitada del sistema mediante el vertido a un cuerpo de agua receptor, genera el deterioro de la calidad de agua de este o dificulta el tratamiento del agua para su posterior reúso.

3.4.1 Fuentes de agua

Para cumplir con la demanda de agua que la producción requiere, el vivero cuenta con diferentes fuentes de agua de distinta procedencia. La principal fuente de riego es el agua municipal del embalse “Lake Mathews”, ubicado en el Río Colorado a 5 kilómetros del vivero y, además, cubre otro tipo de demandas como abastecimiento de agua potable municipal. Esta fuente, en adelante WMWD (Western Municipal Water District), no requiere tratamiento previo e ingresa al vivero en dos puntos diferentes denominados WMWD west y WMWD east. Existe otra fuente de agua externa denominada OMNI cuyo origen se desconoce.

Por otro lado, el vivero cuenta con un sistema de recuperación del agua excedente del riego captada por el sistema de drenaje. El agua recirculada se mezcla con el agua municipal (WMWD) y OMNI para mantener la presión necesaria en la red de modo de obtener un correcto funcionamiento los aspersores. Si bien los puntos de ingreso de las fuentes externas al vivero están definidos espacialmente, el trazado y demás características de la red de riego se desconoce. Ante la falta de esta información, se asume que la totalidad del volumen de riego se aplica uniformemente, es decir, una única lámina para todo el vivero.

Independientemente de lo anterior, se sabe que el Área 5 en el período de estudio fue regado en la mayoría de los casos exclusivamente con agua recirculada. En base a esto, es posible cuantificar el volumen de agua aportada al sistema de irrigación por cada fuente y el volumen total. Se debe tener en cuenta que, aunque el agua recirculada se cuantifica dentro del riego, no es un aporte externo al vivero.

Tabla 3.2: Volumen de agua mensual aportado por cada fuente en el período de estudio (año 2016).

Fuente	Volumen mensual (m ³)			
	Junio	Julio	Agosto	Setiembre
OMNI	71	8.219	14.052	5.978
WMWD East	59.569	64.653	48.650	28.547
WMWD West	33.155	45.445	48.756	39.388
Recirculada	112.911	91.375	99.008	95.683

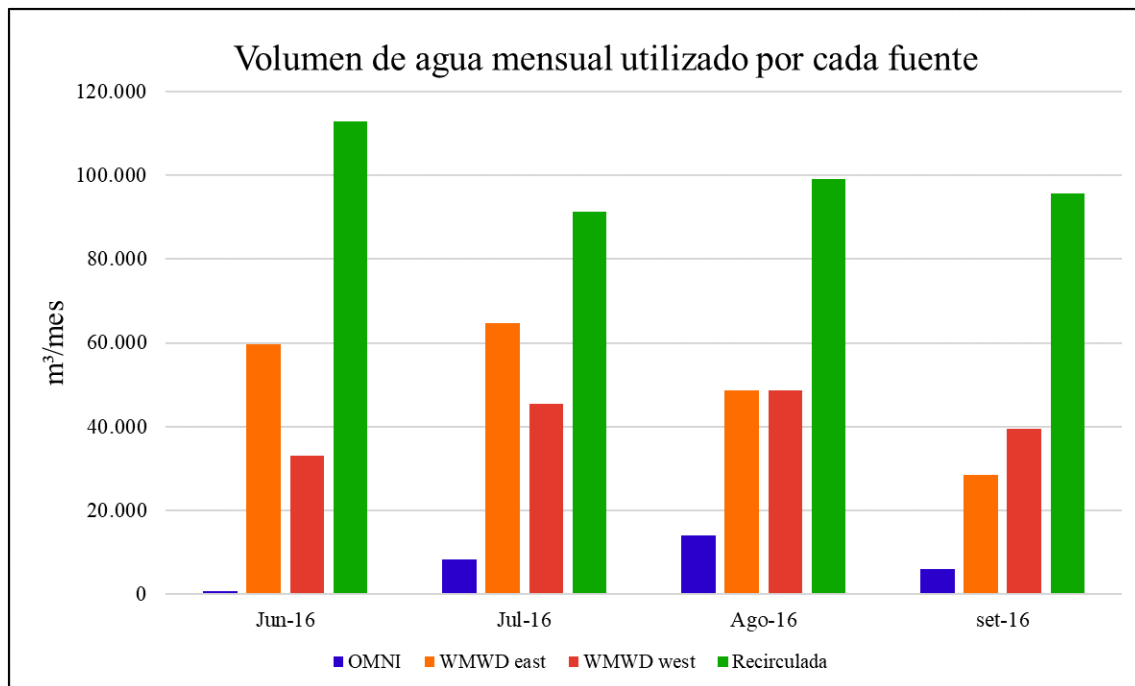


Figura 3.4: Volumen de agua mensual aportado al sistema por cada fuente en el período de estudio.

En la Tabla 3.2 y Figura 3.4 se presentan los volúmenes aportados mensualmente por cada fuente durante el período de estudio. De forma esquemática, en la Tabla 3.3 y Figura 3.5 se presentan en fuentes externas e internas.

Tabla 3.3: Volumen de agua mensual utilizado para riego.

Volumen de cada fuente	Volumen mensual (m³)			
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Externa	93.505	118.317	111.459	73.912
Recirculada	112.911	91.375	99.008	95.683
Total	206.416	209.692	210.467	169.595

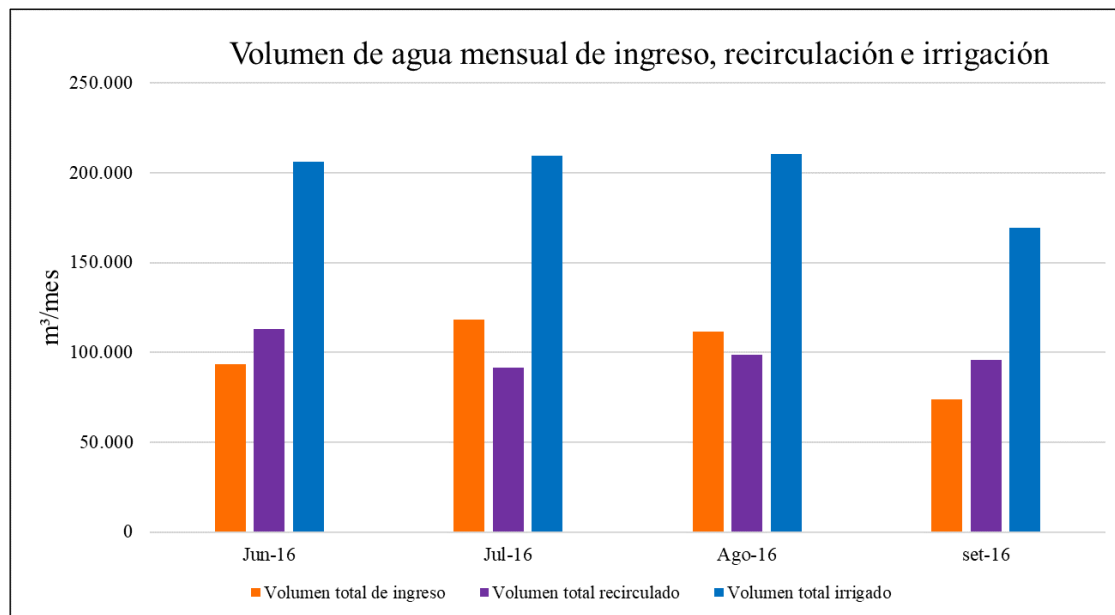


Figura 3.5: Volumen de agua mensual utilizado para riego.

De la Figura 3.5 se observa que el volumen recirculado compone entre el 40 y 60 % del total del volumen irrigado mensualmente. En la Figura 3.6 se muestra la variación temporal del riego aplicado al vivero, diferenciando cada una de las fuentes definidas y el total de este. En dicho gráfico, se observa que, en el primer día no hay aporte de la fuente de agua recirculada a la irrigación. Tal como se aprecia a simple vista, el volumen de riego aplicado en ese día disminuye considerablemente comparado con el de un día normal.

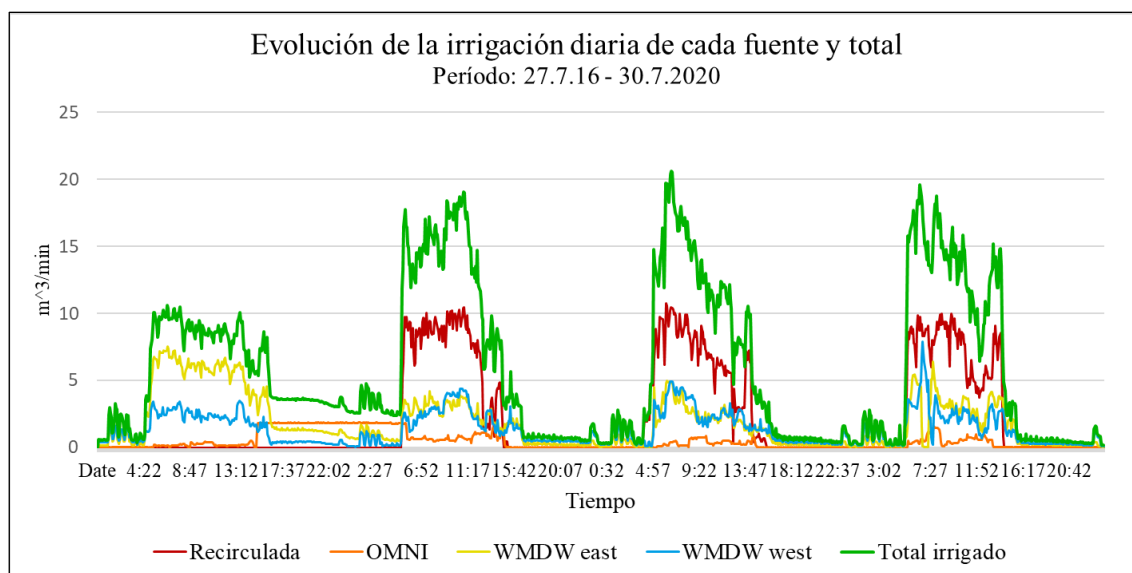


Figura 3.6: Variación temporal del caudal de aporte de cada fuente y total en cuatro días específicos.

Se define el concepto de lámina de riego como el volumen de agua, para dicho fin, sobre la superficie a irrigar. En el vivero, este parámetro puede variar dependiendo de la cantidad de plantas que se estén produciendo en un momento dado. En base a la observación de imágenes del vivero en operación, se determina que cuando una parcela no se encuentra totalmente ocupada por macetas, los aspersores disponibles para el riego de la misma no se activan en su totalidad, por lo que, si bien la lámina de agua aplicada en un momento dado es la misma para toda la superficie regada, el volumen empleado puede ser diferente (ver Figura 3.7).



Figura 3.7: Parcela parcialmente ocupada por macetas durante la irrigación. (Foto: B. Pitton).

3.4.2 Sistema de distribución

El consumo de agua por parte de las plantas ornamentales es variable según la especie y etapa de crecimiento. Además, la técnica de riego se relaciona estrechamente con la de fertilización, pues los fertilizantes se aplican utilizando como vehículo el agua de riego.

Por otro lado, saber el momento justo en que se debe regar resulta un tema de gran complejidad. Los sistemas de medida habituales (tensiómetros, higrómetros, etc.) suelen ser costosos y de poca utilidad en este método de producción y la escala que se maneja, por esto, el conocimiento del horticultor en relación con los requerimientos óptimos y su experiencia en el manejo del cultivo es fundamental.

El riego por aspersión es el sistema más utilizado para este tipo de escala de producción. En la Figura 3.8 se muestran distintos sectores del vivero con sus respectivos tipos de aspersores.

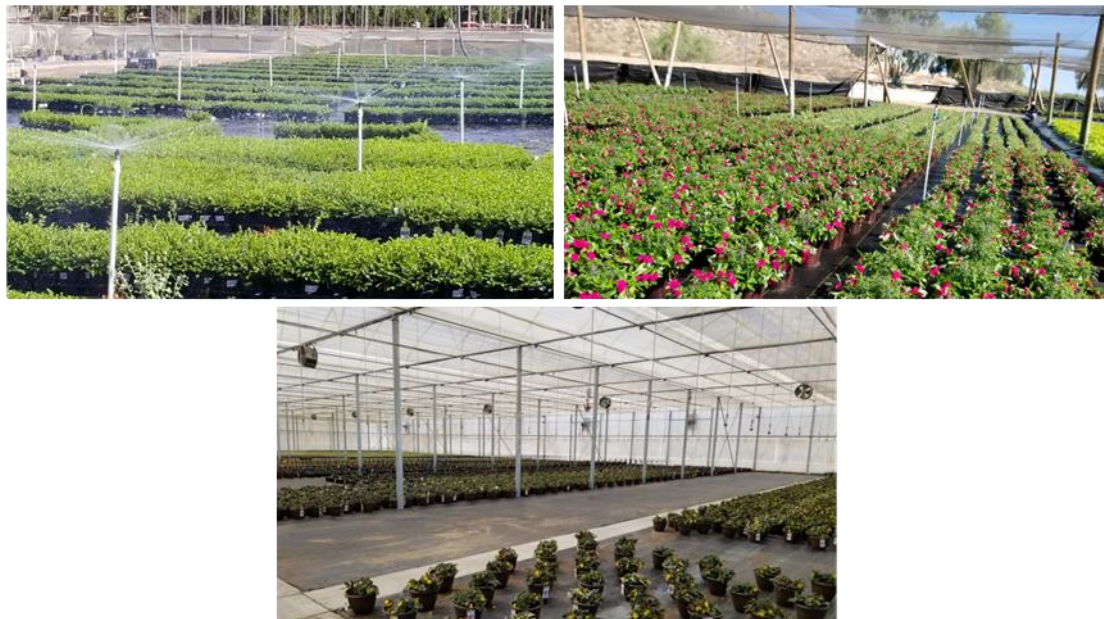


Figura 3.8: Tipos de aspersores según el tipo de cultivo. (Foto: B. Pitton).

La infraestructura del sistema de riego aéreo permite mucha flexibilidad con respecto a la cantidad y el tamaño de las plantas en macetas que se pueden regar dentro de un área específica. Sin embargo, la zona radicular de las plantas limitadas por las macetas requiere la reposición frecuente de agua, afectando la eficiencia de la aplicación de riego de este tipo de sistemas, principalmente a raíz de que el agua irrigada es interceptada por el follaje impidiendo que alcance el sustrato.

En cuanto al espaciamiento entre plantas, el área superficial ocupada por macetas colocadas adyacentes entre sí, sin separación y definiendo un patrón cuadrado, no cubre la totalidad de la superficie del suelo. Por lo tanto, cierto porcentaje del agua de riego por aspersión aérea se pierde entre las macetas.

Para el caso de estudio, el dispositivo de aplicación de riego varía según el sistema de cultivo, es decir, depende si se trata de un invernadero, malla de sombra o cielo abierto. El agua de riego en el vivero se aplica sobre las parcelas con aspersores rotativos (PRN, Toro, Bloomington, MN, EE.UU.) para la producción al aire libre y sombra. El riego de invernadero se aplica por encima con pulverizadores (Netafim, Tel Aviv-Yafo, Israel). En la Figura 3.9 se muestran ambos dispositivos.



Figura 3.9: Aspersores PRN (izquierda) y Netafim (derecha). (Foto: B. Pitton).

Estos dispositivos se distribuyen en las parcelas de una forma geométrica determinada. Conocer su distribución, cantidad y presión de funcionamiento es necesario para estimar el rango de variación de la tasa de precipitación sobre la parcela. Este parámetro, es uno de los más importantes e influyentes en este trabajo, determina el tiempo de riego de cada área en función del volumen de agua a irrigar en cada una, por ende, influye en la forma, volumen de escurrimiento y duración del hidrograma de salida del sistema de drenaje.

A continuación, en la Figura 3.10 y Figura 3.11, se describe cómo se distribuyen los aspersores en cada uno de los tipos de cultivo.

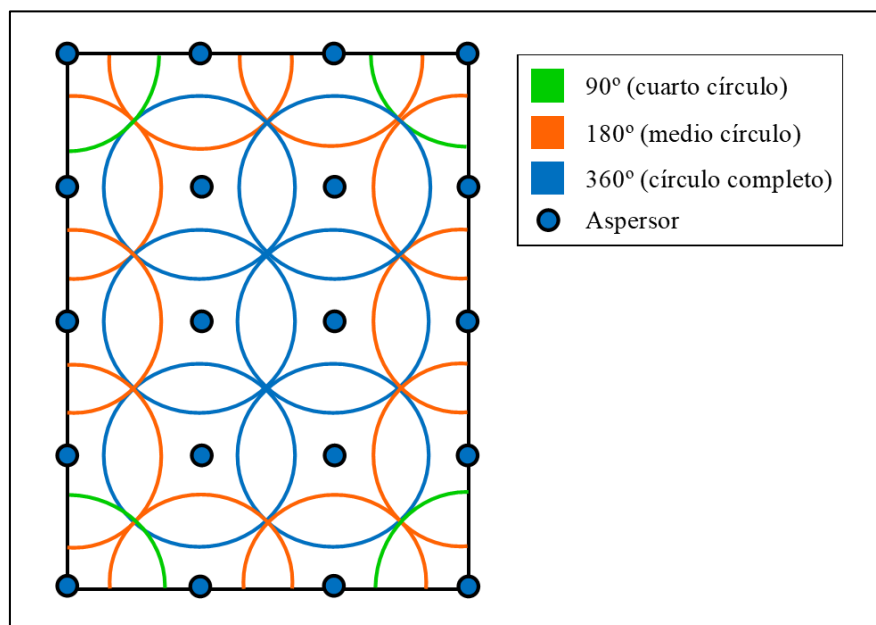


Figura 3.10: Vista en planta del arreglo geométrico de aspersores PRN, aplicado el riego al aire libre y sombra.

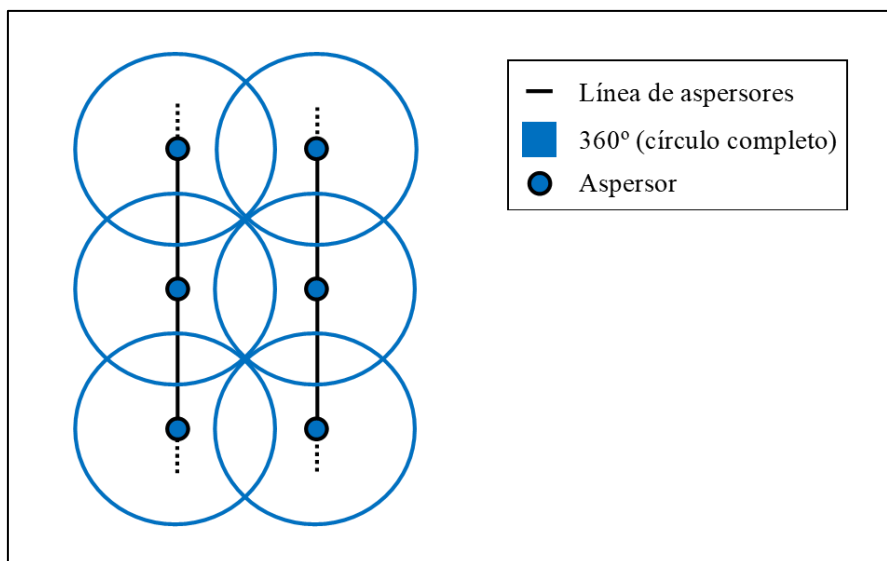


Figura 3.11: Vista en planta del arreglo geométrico de aspersores Netafim, aplicado en invernaderos.

Las figuras anteriores son un ejemplo genérico de la distribución geométrica de los dos tipos de aspersores en sus respectivas superficies de riego. Tal como se observa en las mismas, existe una superposición del área de influencia del rociador en la aspersión que disminuye la uniformidad del riego, lo que eventualmente puede afectar negativamente sobre el cultivo o uso del agua. Por otro lado, para el caso de los rociadores PRN, se configura el ángulo de aspersión de forma tal que precipite sólo en la superficie de cultivo y no en zonas circundantes.

3.4.2.1 TASAS DE RIEGO

Se sabe que para el caso de estudio el rango de presión de funcionamiento de los aspersores varía entre los 40 *psi* (2,7 *bar*). La tasa de precipitación de cada aspersor también varía, pero no solo depende de la presión, sino que también depende del número de aspersores, su radio de influencia y separación entre los mismos. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos parámetros geométricos y los datos de fabricante, se calculan las tasas de precipitación para cada tipo de rociador.

Mediante el relevamiento fotográfico, se logró identificar la cantidad de aspersores de un número considerable de parcelas cuya superficie es conocida. Aunque el área superficial de dos parcelas sea igual, el número de aspersores puede no serlo.

De este modo, se realiza el cálculo de la tasa de precipitación de aspersores PRN para las parcelas de las cuales se tienen todos los datos, tal como se indica en el siguiente procedimiento:

- 1- Se fija la presión de funcionamiento.
- 2- Con el número de aspersores que mojan determinado ángulo según su disposición geométrica (ver Figura 3.10) y el caudal unitario de riego (que varía según dicho ángulo) se halla el caudal total de irrigación.
- 3- Como el área superficial de la parcela es conocida se realiza el cociente entre el caudal total irrigado y dicha área, determinando así la tasa de precipitación de la parcela.
- 4- Una vez calculadas todas las tasas de precipitación de todas las parcelas, se realiza el promedio.

La tasa de precipitación de los aspersores PRN para una presión de funcionamiento de 40 psi es de 14 mm/h.

Por otro lado, la precipitación de los aspersores Netafim (ver Figura 3.11) se estima de forma diferente. Conocido caudal unitario proporcionado por el fabricante, que depende de la presión de funcionamiento, la distancia entre los aspersores de una misma línea y la separación entre líneas solo resta determinar el número de aspersores que se encuentran dentro de un invernadero de dimensiones también conocidas.

Al realizar una revisión fotográfica, se observa que la dirección de las líneas de aspersores en algunos casos es a lo largo del invernadero y en otras a lo ancho, cambiando así el número de aspersores y, por lo tanto, la tasa de precipitación. Su cálculo se realiza como indica el siguiente procedimiento.

- 1- Se fija una presión de funcionamiento.
- 2- Con la distancia entre aspersores de una misma línea y la separación entre las mismas se determina el número de aspersores. Se tiene en cuenta que dichas líneas se ubican en sentido del largo del invernadero, por lo tanto, el número de líneas depende del ancho del mismo.
- 3- Con el número de aspersores y el caudal unitario se halla el caudal total de irrigación. Este último se divide entre el área superficial del invernadero y se determina la tasa de precipitación.
- 4- Se repiten los puntos 2 y 3 pero considerando que las líneas de aspersores se ubican en el sentido del ancho del invernadero.
- 5- Una vez calculadas las tasas de precipitación de todas las parcelas, se realiza el promedio.

La tasa de precipitación de los aspersores Netafim para una presión de funcionamiento de 40 psi es de 12 mm/h.

3.5 DRENAJE Y RECOLECCIÓN

3.5.1 Agua en el suelo

Cada área de estudio está compuesta por distintos sistemas de cultivo. A su vez, se encuentra una gran variedad de macetas, cada una con el sustrato ajustado a las necesidades de la especie que contienen. Las características del sustrato y factores como el ordenamiento de las macetas y uniformidad de riego son determinantes del comportamiento del cultivo durante el riego. Dado que este vivero cuenta con un sistema de captación, drenaje, recolección y tratamiento del agua excedente de riego, resulta importante conocer los factores mencionados para poder representarlos en la modelación.

3.5.1.1 PARCELAS

Se define como “parcela” a la superficie impermeable que cubre un área definida con una geometría determinada en la que las macetas, una vez preparadas con su correspondiente sustrato y especie de cultivo, son dispuestas con cierto espaciamiento entre ellas cubriendo total o parcialmente dicha superficie.

La misma cuenta con un arreglo de aspersores que aportan una tasa de precipitación que se ajusta, mediante reguladores de presión, a las necesidades hídricas de la especie producida.

Las parcelas son rectangulares y sus dimensiones de oscilan entre los 20 y 25 metros de ancho y 55 y 60 metros de largo. En la Figura 3.12, se muestra la vista en planta de algunas de las parcelas descritas. Puede apreciarse que la superficie de las parcelas está cubierta por un geotextil que actúa como barrera anti-hierbas y láminas de polietileno debajo de las mismas para capturar la escorrentía del riego. Las parcelas poseen una pendiente transversal (además de la propia pendiente longitudinal) que conduce el agua excedente del riego hacia un canal central. Dicho canal eroga los caudales generados hacia un canal de recolección, de mayores dimensiones, que conecta la descarga de cada parcela. La Figura 3.13 evidencia lo antes descrito.



Figura 3.12: Imagen satelital en detalle del tipo de parcelas. Fuente: Google Earth.



Figura 3.13: Parcela de cultivo al exterior. (Foto: B.Pitton).

3.5.1.2 MACETAS

El tipo de maceta y sustrato varían atendiendo a las necesidades de cada especie. En la Figura 3.14, se aprecian una gran variedad.



Figura 3.14: Diferentes tipos de macetas. (Foto: B.Pitton).

El sustrato es el soporte de las plantas, en él se da el desarrollo radicular y es donde éstas deben encontrar el agua y los nutrientes necesarios para su desarrollo. Los sustratos que se emplean en el vivero son una mezcla de distintos componentes. Cada uno de estos elementos contribuyen al bienestar de las plantas y a su buen crecimiento. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- **Turba – Fibra de coco:** Tanto la turba como la fibra de coco son empleadas por su gran capacidad de retención de agua.
- **Perlita:** Gracias a la porosidad que posee la perlita, es empleada para brindar una buena oxigenación a las raíces.
- **Corteza de pino – Cáscara de arroz:** La corteza proporciona drenaje y aireación, además de cumplir un rol importante como control anti-hierbas en las macetas, así como la cáscara de arroz.
- **Sustrato universal**
- **Fertilizantes**

En la Figura 3.15, se muestra algunos de estos elementos básicos que componen a la gran variedad de tipos de sustratos que se emplean en el vivero.



Figura 3.15: Componentes básicos de los sustratos.

A partir de los datos de ensayos físicos realizados por el personal del vivero para varias muestras de sustratos utilizados es posible determinar los parámetros característicos que permiten modelar el comportamiento de este durante la aplicación de agua. Estos son:

- **Porosidad (n):** Se define como la fracción del volumen de vacíos sobre el volumen total de la muestra.
- **Capacidad de campo (CC):** Es el contenido de humedad máximo que es capaz de retener el suelo luego de la saturación, medida a las 48-72 horas de saturado. Se define como el contenido de agua retenido a una tensión de 0,1 bar.
- **Punto de marchitez permanente (PMP):** Es el punto de humedad mínima en el cual una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y no puede recuperarse de la pérdida hídrica (aunque la humedad ambiental sea saturada). Se define como el contenido de agua

retenida a una tensión de 15 bar (tensión hasta el cual una planta, adaptada a condiciones medias de humedad, puede extraer agua).

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados de los ensayos realizados por el vivero.

Tabla 3.4: Parámetros característicos de las muestras analizadas.

Muestra	n (%)	CC (%)	PMP (%)
1	80,2	51,7	5,7
2	78,0	54,6	6,0
3	81,3	63,3	7,0
4	78,3	56,2	6,2
5	89,2	48,6	5,4
6	86,2	55,3	6,1

Se destaca los valores altos de porosidad, en el entorno del 80 %, esto remarca la idea de un sustrato bien aireado para garantizar un buen desarrollo radicular. Por otra parte, los valores de capacidad de campo se relacionan con el concepto de *agua fácilmente disponible* (AFD).

El *Agua Disponible* (AD) se define como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Representa la porción de agua que puede ser asimilada por las raíces con la suficiente rapidez para compensar las pérdidas por transpiración de las hojas provocada por la fotosíntesis. Sin embargo, el agua no se encuentra disponible para las plantas en todo este rango, a medida que disminuye el contenido de humedad se requiere de un gasto adicional de energía para poder extraerla, por este motivo surge el concepto de Agua Fácilmente Disponible o *Umbral de Riego* (UR), como el cual la planta puede extraer el agua sin restricción. En la Figura 3.16 se observa una idealización del criterio de riego a partir del decaimiento del contenido de humedad en el suelo, implementando el concepto antes descrito.

El umbral de riego suele definirse para la mitad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez.

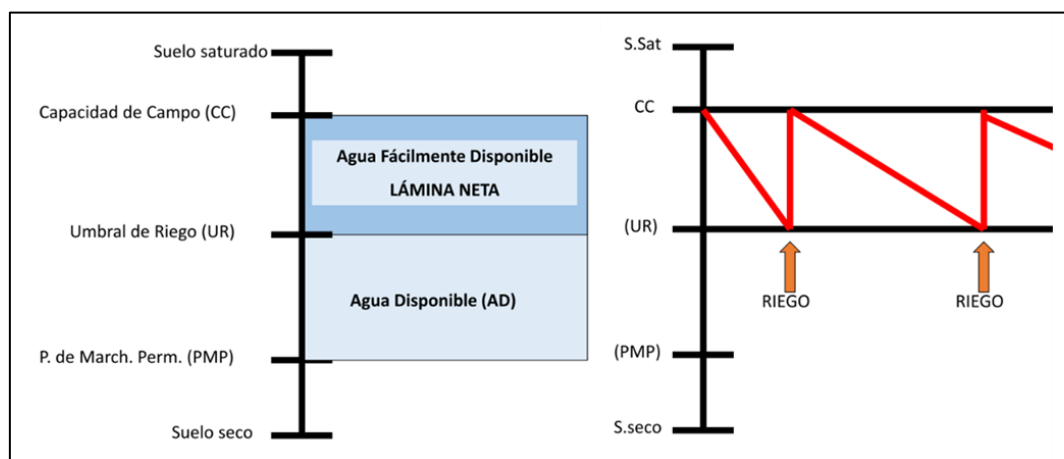


Figura 3.16: Conceptualización del manejo del riego. Extraída del curso de Diseño Hidrológico.

3.5.2 Agua en la atmósfera

Los principales procesos hidrológicos que ocurren en la atmósfera son la precipitación y la evaporación. Dado que para el período en el que se realiza este estudio no se registraron precipitaciones, este fenómeno natural no se tendrá en cuenta, aunque se habla de precipitación en referencia al agua aportada por los rociadores durante la irrigación.

En cuanto a la *evaporación*, proceso físico del agua en que se da el cambio de estado líquido a gaseoso, los principales factores que influyen en este proceso desde una superficie abierta son:

- Suministro de energía por radiación solar y temperatura del aire.
- Transporte del vapor fuera de la superficie evaporante, velocidad del viento y gradiente de humedad específica.

Por otro lado, la *transpiración* consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por este fenómeno y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración directa depende del aporte de energía, del gradiente de presión de vapor y la velocidad del viento.

De este modo, se define la *evapotranspiración* como la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Además de lo ya mencionado, también depende de los siguientes factores:

- Referidos al cultivo: sistema, variedad y etapa de desarrollo, altura de las plantas, rugosidad del cultivo, el reflejo (albedo), la cobertura del suelo y las características radiculares del mismo.
- Referidos al manejo y condiciones ambientales: Condiciones que limiten el desarrollo de la vegetación (salinidad, fertilidad, uso de fertilizantes, enfermedades o parásitos y mal manejo del suelo), densidad del cultivo, prácticas de manejo y contenido de agua en el suelo.

En base a este concepto se definen los siguientes:

- Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) o evapotranspiración potencial (ETP): es la evapotranspiración de una superficie de referencia (superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra en totalmente al suelo) cuando el suministro de agua es ilimitado.
- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_C): es la de cualquier cultivo exento de enfermedades, con buena fertilización y bajo óptimas condiciones de suelo y agua que alcanza su máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas locales.

$$ET_C = K_C ET_0$$

- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{C, aj}$): Es la de cualquier cultivo bajo condiciones ambientales y de manejo no estándar: presencia de plagas, salinidad o baja fertilidad del suelo, limitación o exceso de agua.

En diferentes investigaciones académicas, (Pitton et al, 2018) se determinó la ET_C de numerosas especies ornamentales producidas en viveros distribuidos en distintas zonas de California. Un

estudio inicial determinó que el K_C puede variar de 1,1 a 5,1, dependiendo de las especies y el espaciado. Para mayor densidad de plantas se obtienen valores inferiores. Como continuación de ese trabajo inicial, se estudió el coeficiente mencionado para especies ornamentales adicionales en lugares del norte y sur de California. Encontraron que su valor varía entre 1 y 2,5, dependiendo de la ubicación, las especies y la temporada. Ambos estudios utilizaron para el cálculo del K_C la superficie del contenedor como la zona a la que se aplicó el riego.

Sin embargo, los autores de esos estudios señalaron que los valores calculados del coeficiente K_C pueden no estar correlacionados con el área proyectada del dosel² sobre la superficie (o área ocupada por macetas). Aunque las raíces de las plantas se limitan a extraer agua del sustrato en la maceta, las plantas cultivadas en contenedores suelen tener un dosel que se extiende mucho más allá de la superficie de la maceta. Si el dosel cubre la superficie de riego, la ET de la parcela se asemeja a la ET_0 . En ambos estudios se utilizaron especies de plantas con baja y alta demanda de agua.

Como se verá mas adelante, para la implementación del modelo, es necesario incorporar esta variable. Para este estudio se determina un ciclo medio diario como el promedio de los datos disponibles de las estaciones CIMIS, las cuales coinciden con las del estudio citado. En la Figura 3.17 se presenta el ciclo medio diario de evapotranspiración para el mes de agosto del 2016.

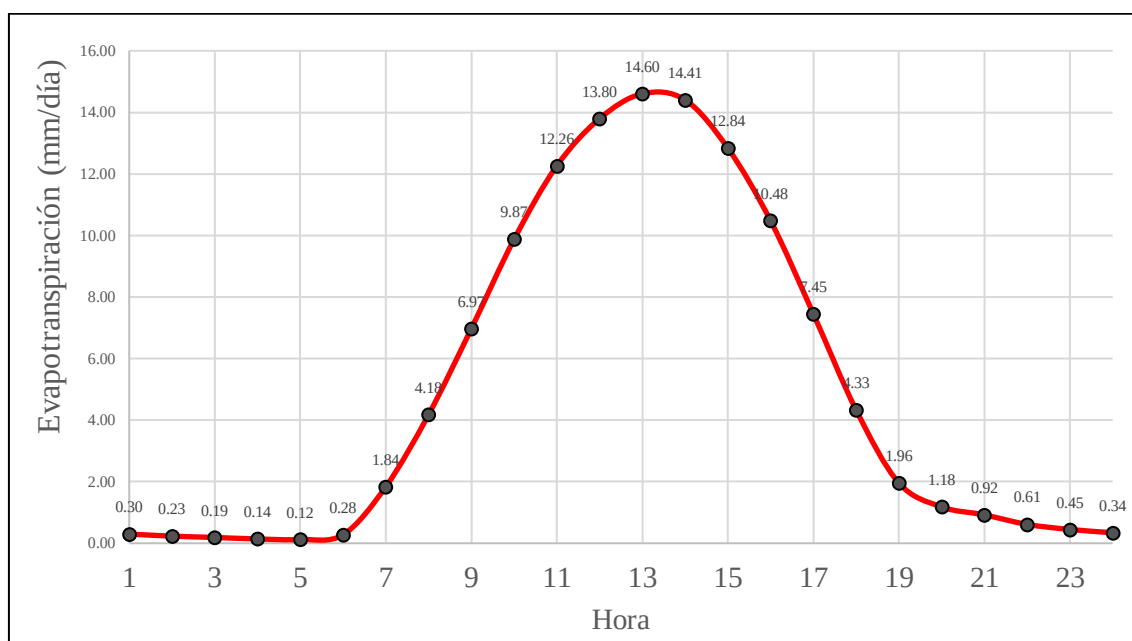


Figura 3.17: Ciclo medio diario de evapotranspiración (agosto 2016).

² Hábitat que comprende la región de las copas y regiones superiores de las plantas en la parcela

3.5.3 Sistema de drenaje

Dado que el agua de escorrentía se colecta para ser tratada y recirculada a la irrigación, resulta lógico que todo el sistema de drenaje sea cubierto con material impermeable, de lo contrario esta práctica sería inviable. En nuestro caso de estudio, la escorrentía generada fluye desde las parcelas hacia canales que transportan el agua, atravesando lagunas intermedias, hasta una laguna de almacenamiento final, denominada *Lower Pond*. Todos los elementos mencionados se encuentran cubiertos con láminas de polietileno y un geotextil que actúa como barrera anti-hierbas. Se asume que esta composición de materiales impermeabiliza la superficie logrando disminuir considerablemente la infiltración al terreno.

3.5.3.1 LAGUNAS INTERMEDIAS

Existen dos lagunas intermedias previas a la disposición final de la escorrentía en la laguna *Lower Pond*. Estas se denominan *Vegetated Pond* y *Remnant Pond* (ver Figura 3.18). La superficie de estas es de 0,50 ha y 0,80 ha respectivamente. Las mismas tienen una profundidad aproximada entre los 1-1,5 metros. La función que cumplen en el sistema es desconocida.

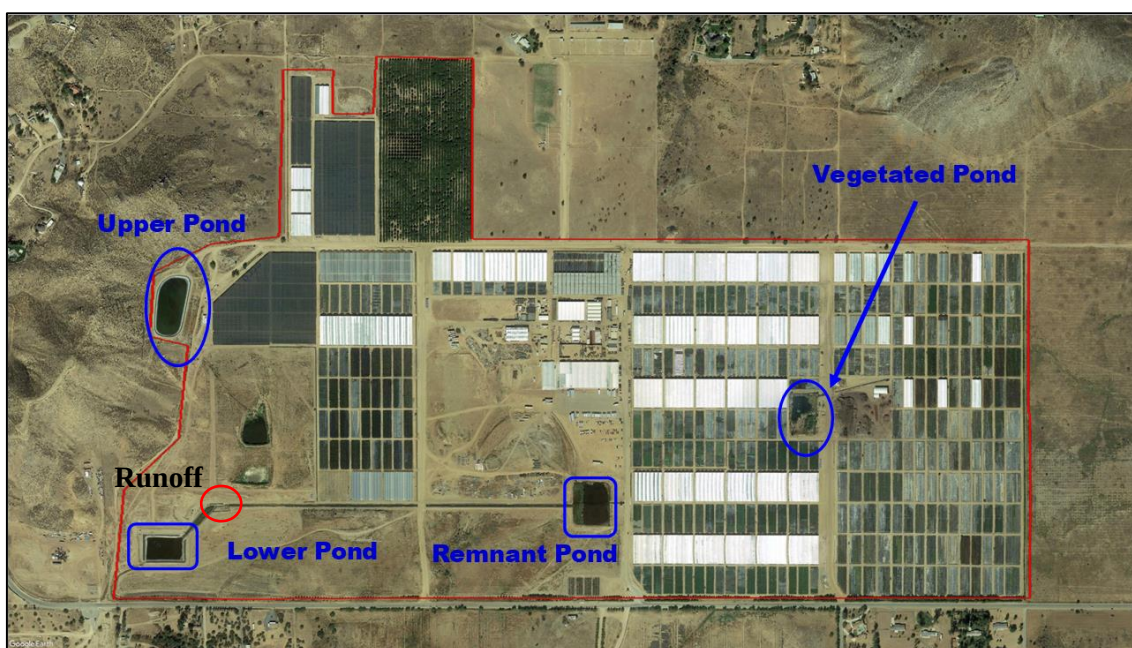


Figura 3.18: Ubicación de las lagunas del vivero.

3.5.3.2 CAUDAL DE ESCORRENTÍA

El punto de medición de escorrentía, denominado *Runoff*, se ubica aproximadamente a 80 metros de la descarga del canal principal hacia la laguna *Lower Pond* (ver Figura 3.18). El período de tiempo en el cual se tienen datos de escorrentía coincide con los de caudales de riego, tanto externas como de recirculación. En dicho período, se sabe que no ocurrieron eventos de precipitación.

Los factores que provocan que el caudal de escorrentía sea significativo son los siguientes:

- Naturaleza de los poros y la poca capacidad de retención de agua del sustrato.
- Espaciado entre macetas.
- Sobreirrigación.
- Superficies de captación y conducción impermeables.

A continuación, se presenta el gráfico de la variación temporal de los caudales de aporte al sistema y escorrentía en tres días normales y consecutivos de funcionamiento del vivero.

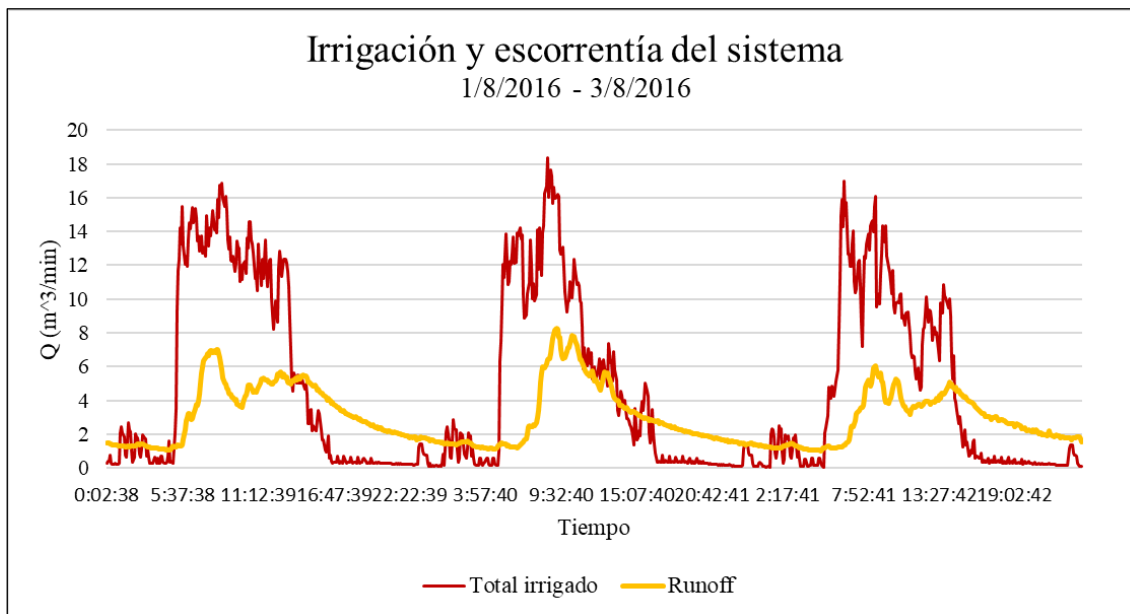


Figura 3.19: Variación temporal de caudales en un día normal de funcionamiento.

En la Figura 3.19 se observa de forma cualitativa que el volumen de escorrentía en comparación con el caudal de aporte es considerable. También se observa la existencia de un flujo base en la descarga de escorrentía a la Lower Pond.

3.5.4 Recuperación de la escorrentía superficial

Dada la escasez del agua local, donde la precipitación promedio en 30 años de serie histórica es de aproximadamente 315 mm anuales y una ETP superior a los 1000 mm, reutilizar el agua de escorrentía con el fin de utilizarla como agua de riego es imprescindible para una producción sostenible, tanto a nivel económico como ambiental. Además, si el vivero no tiene una fuente de agua alternativa, una interrupción en el suministro por parte de fuentes externas de agua podría causar serios problemas en la producción.

En este caso, el agua de escorrentía fluye hacia el estanque inferior, Lower Pond, revestida con polietileno para evitar infiltración al terreno. Su volumen útil estimado es de 12.335 m³. Luego, se pasa a través de filtros rápidos de arena para ser bombeada al estanque superior, Upper Pond. Esto se realiza para reducir la sedimentación y la frecuencia de limpieza en esta última. Una vez allí, el agua bombeada se mantiene en ese sitio hasta ser reutilizada como agua de riego.

Se debe tener en cuenta que introducir el agua de escorrentía al sistema de irrigación representa un peligro para la producción de plantas de vivero, ya que puede acumular patógenos de plantas transmitidas por el agua que aumenta el riesgo de enfermedad de estas u otras especies al ser

regadas, por ende, provocar pérdidas económicas debido a la calidad reducida de la planta. El agua de esorrentía contaminada de la producción de plantas de vivero alberga predominantemente patógenos de plantas de oomicetos, junto con varios patógenos de nematodos fúngicos, bacterianos, virales y parasitarios. La desinfección de agua es, por lo tanto, clave para prácticas sostenibles de vivero. En este caso, el agua de esorrentía se desinfecta mediante la inyección de dióxido de cloro previo a ser reincorporada al sistema de irrigación.

3.6 CONCEPTUALIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE SWMM

El objetivo de la modelación hidrológica/hidráulica es el análisis a nivel macro las distintas componentes del sistema y su repercusión en la escorrentía generada de modo de tener una herramienta técnica para diseñar las soluciones necesarias frente a escenarios de escasez de agua. Para cumplir con este objetivo específico, se adoptó el modelo SWMM, ampliamente utilizado a nivel mundial para simular hidrogramas y polutogramas prevalentemente en cuencas urbanas (Lee et al., 2010; Bisht, 2016; Gorgoglione et al., 2019; Baek et al., 2020).

SWMM es un modelo dinámico de simulación lluvia-escorrentía, tanto de cantidad como calidad (Rossman, 2015). Es de suponer que este modelo representará de forma adecuada el comportamiento general de nuestro caso de estudio debido al alto porcentaje de superficie impermeable que se presenta en el mismo (Yazdi et al., 2018; Yazdi et al., 2019).

La componente hidrológica de este software opera a partir de cuencas que reciben precipitación (en nuestro caso, representada por el riego) generando escorrentía y cargas de contaminantes. La parte hidráulica del programa simula el transporte de dicha escorrentía a través de redes de alcantarillas, canales, unidades de almacenamiento/tratamiento, bombas y reguladores predefinidas.

Al definir los conceptos que forman parte de los procesos que intervienen en el sistema, es posible implementar algunos de los módulos que componen al programa. En este estudio, no se implementa el módulo de calidad por no ser necesario a los objetivos planteados, pero representa un potencial del modelo si fuera necesario.

La disponibilidad de este modelo, aparte de ser una herramienta para estimar la escorrentía en función de los volúmenes de riego, permite realizar el análisis de distintos escenarios (tanto de racionalización como escasez) en donde el productor, o el responsable de las tomas de decisiones, pueda elaborar protocolos para la gestión del recurso agua y evaluar el impacto económico.

3.6.1 Cuenca

El programa utilizado permite subdividir la zona de estudio en la cantidad necesaria de cuencas para representar de la mejor forma posible el efecto que la topografía, las conducciones de drenaje, la cobertura del suelo y como repercuten en la escorrentía del sistema.

Se utiliza un modelo no lineal de embalse para estimar la escorrentía superficial producida por la lluvia sobre una cuenca (Rossman, 2016). El programa conceptualiza una cuenca como una superficie rectangular que tiene una pendiente uniforme (S) y un ancho (W) que drena a un solo canal de salida como se observa en la Figura 3.20.

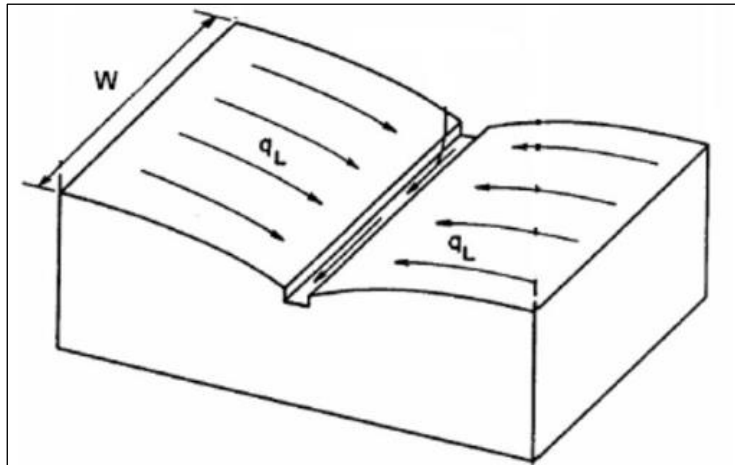


Figura 3.20: Esquematización de una cuenca por SWMM. Extraída de (Rossman, 2016)

El modelo que utiliza SWMM para generar la escorrentía superficial se muestra en la Figura 3.21, en donde se observa que la entrada al sistema (cuenca) es la precipitación y como salida tiene la evaporación y la infiltración. El exceso neto se almacena por encima de la superficie de la cuenca a una profundidad d . El agua estancada por encima de la profundidad de almacenamiento, d_s , puede convertirse en una salida de escorrentía, q . La profundidad de almacenamiento es considerada para la abstracción inicial de la lluvia, se tiene en cuenta los efectos del estancamiento en la superficie, la interceptación por la vegetación y la humectación de la superficie.

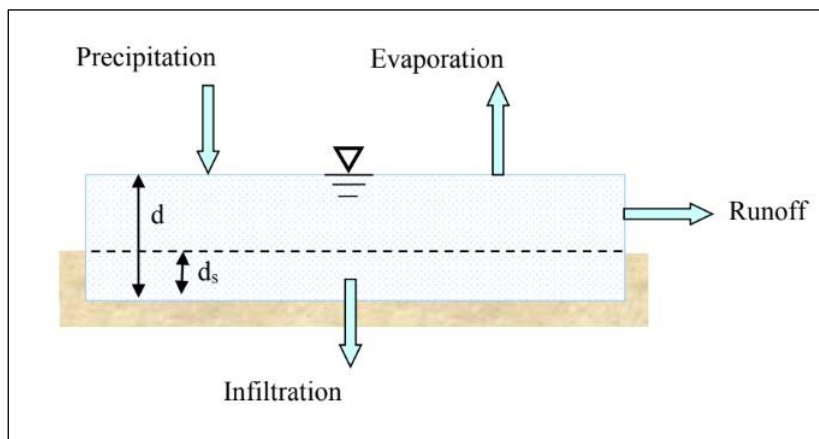


Figura 3.21: Modelo no lineal de embalse de una cuenca. (Manual de Referencia de SWMM, Volumen I).

Por conservación de masa, el cambio neto en profundidad por unidad de tiempo t es la diferencia entre las tasas de entrada y salida sobre la cuenca:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q$$

Siendo:

- i : tasa de precipitación (m/s)
- e : tasa de evaporación (m/s)
- f : tasa de infiltración (m/s)
- q : tasa de escorrentía (m/s)

Al suponer que el flujo a través de la cuenca se comporta como si fuera un flujo uniforme dentro de un canal rectangular de ancho W , altura $d-d_s$ y pendiente S , se puede utilizar la ecuación de *Manning* para expresar el caudal de escorrentía Q :

$$Q = \frac{1}{n} R_x^{2/3} S^{1/2} A_x$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de la superficie, S la pendiente promedio de la cuenca (m/m), A_x el área transversal de la cuenca a través de la cual fluye la escorrentía, y R_x es el radio hidráulico asociado con esta área.

A_x es un área rectangular con ancho W y altura $d-d_s$. Debido a que W siempre es mayor que d , se deduce que $A_x = W(d-d_s)$ y que $R_x = d - d_s$. Al sustituir esta expresión en la ecuación de *Manning* se obtiene:

$$Q = \frac{1}{n} W S^{1/2} (d - d_s)^{5/3}$$

Para obtener el caudal de escorrentía por unidad de superficie, q , se divide la ecuación anterior por el área superficial de la cuenca, A , de lo que resulta:

$$q = \frac{W S^{1/2}}{A n} (d - d_s)^{5/3}$$

Al incluir esta ecuación en el balance de masa original se obtiene:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha (d - d_s)^{5/3}$$

En donde α se define como:

$$\alpha = \frac{W S^{1/2}}{A n}$$

La ecuación anterior se aplica solo cuando d es mayor que d_s . Cuando $d \leq d_s$, la escorrentía es cero y el balance de masa en d se simplifica a:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f$$

Para valores conocidos de i , e , f , d_s , y α puede resolverse numéricamente cada paso temporal para la profundidad d . Una vez conocido este parámetro, el valor de la tasa de escorrentía puede calcularse a partir de la ecuación posterior.

3.6.1.1 REPRESENTACIÓN DE LAS PARCELAS

Se busca implementar las herramientas del modelo que permita representar, de forma adecuada, los procesos que suceden en las parcelas. Si se analiza el recorrido del agua durante el proceso de irrigación (ver Figura 3.22), se podrán identificar aspectos claves que deben ser tenidos en consideración al momento de interpretar los resultados.

En el momento que los aspersores son encendidos, se genera una precipitación en la parcela, donde una porción importante del agua cae sobre la superficie impermeable, generándose así una

primera partida de escurrimiento. La restante porción de agua puede ser interceptada por el follaje o precipitar sobre la superficie del sustrato. Luego, el agua que se encuentra sobre el sustrato infiltra, quedando disponible para la planta o lixiviar a través de los agujeros de drenaje de las macetas y formar parte de la segunda partida de escurrimiento.

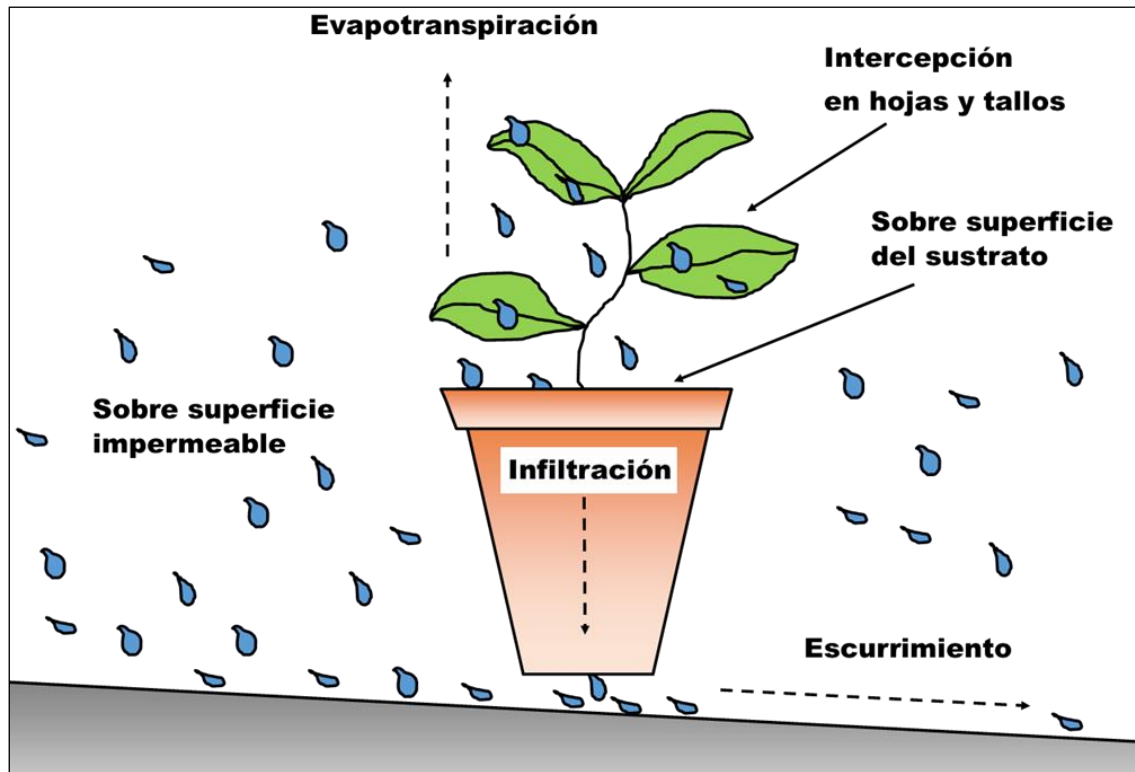


Figura 3.22: Esquema del proceso de irrigación de una maceta.

En el proceso descrito, el aspecto más importante, para el modelo, es poder recolectar las distintas formas de escurrimiento que se generan. Es decir, lograr modelar la escurrimiento superficial sobre la parcela impermeable y la escurrimiento retrasada por la infiltración en la maceta. Este aspecto es fundamental y decisivo; debido a que el SWMM fue desarrollado principalmente para áreas urbanas, la infiltración al terreno es considerado como pérdida del sistema.

Es por ello que se decide por implementar un *Low Impact Development* (LID) para la simulación de las macetas. Un LID se define como una estrategia de diseño que tiene como objetivo el de mantener o reproducir el régimen hidrológico previo al desarrollo urbanístico mediante técnicas de diseño que creen un paisaje hidrológico equivalente al natural.

El SWMM posee en su última versión, un apartado donde incluye ocho tipos de LID's, en la que cada uno presenta ciertas ventajas frente a otros.

3.6.1.2 LID

Como se justificó anteriormente, para la materialización de las macetas en el modelo, se utiliza un LID para poder obtener tanto la escurrimiento que se genera en la superficie impermeable como la que se produce luego de la infiltración en las macetas.

En el modelo, cada LID se compone de distintas capas que interactúan entre sí. Las distintas combinaciones de estas dan lugar a la creación de los 8 tipos distintos de LID's que posee el programa. Cada LID está compuesto por alguna de las siguientes capas:

- Capa de superficie
- Capa de suelo
- Capa de almacenamiento
- Capa de pavimento
- Capa del sistema de drenaje

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede observar el esquema general de capas en el que se compone un LID y la interacción entre las mismas. En la capa superficial se puede encontrar la vegetación, sobre la misma puede precipitar o llegar escorrentía proveniente de las zonas permeables o impermeables de la propia cuenca (*Runon*), se dan los procesos de evapotranspiración e infiltración al suelo, el excedente que no logra infiltrar pasa a ser escurrimiento superficial si se logra sobrepasar una barrera (*Overflow*). El agua que infiltra a la capa de suelo pasa a formar parte del almacenamiento de humedad y percola hacia capas de almacenamiento profundas.

En la capa de almacenamiento, el agua queda retenida ocupando los vacíos que se generan por los materiales que componen dicha capa. Es posible tener infiltración profunda, formando parte de las pérdidas del sistema, o bien, tener un sistema de drenaje que conduzca el agua almacenada hacia un punto de salida.

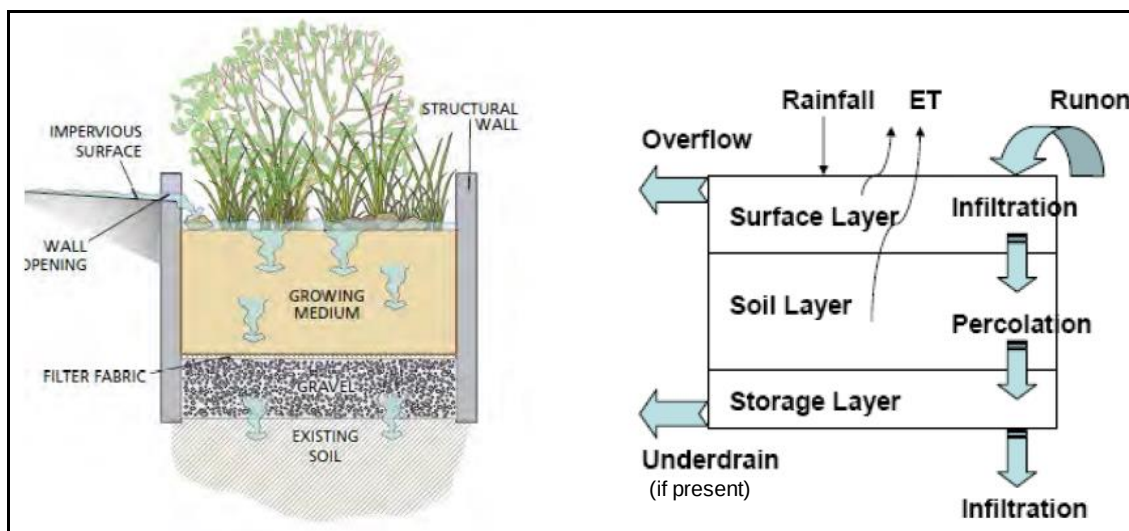


Figura 3.23: Esquema de LID e interacción entre las capas. Extraída del curso de Hidrología Avanzada II (2019).

Para la determinación del sistema a implementar se deben conocer la composición de cada LID en el programa y seleccionar el que representa de la mejor manera los procesos que intervienen en las macetas. Para ello, se presenta en la Tabla 3.5 los distintos sistemas LID's disponibles en el modelo y las capas que los componen.

Tabla 3.5: Composición de los sistemas LID disponibles en el modelo.

	Celda de bioretención	Jardín de lluvia	Techo verde	Zanja de infiltración	Pavimento permeable	Barril de lluvia	Desconexión de azotea	Bio-zanja
Superficie	x	x	x	x	x		x	x
Pavimento					x			
Suelo	x	x	x		x			
Almacenamiento	x			x	x	x		
Sist. de drenaje	x			x	x	x	x	
Base drenante			x					

Puede entenderse fácilmente que los procesos que podrían llegar a representar de forma correcta al comportamiento de las macetas son la celda de biorretención, el jardín de lluvia y el techo verde. Por lo tanto, se descartan las restantes opciones y se procede al análisis de ventajas y desventajas de esas 3 alternativas.

Para ello, se realizaron modelaciones a escala de una cuenca y se observaron los comportamientos de cada LID. Es razonable pensar que un jardín de lluvia sería la mejor opción, sin embargo, se constató que el mismo no sirve para la modelación ya que la infiltración que se produce en éste se pierde del sistema y no cumple con las condiciones que se remarcaron. Por otra parte, el comportamiento de una celda de bioretención y un trecho verde es similar si el primero no cuenta con capa de almacenamiento (espesor nulo) ni restricciones en el sistema de drenaje.

Dada las características de las macetas, no existen elementos reales que representen una capa de almacenamiento. A su vez, se toma como hipótesis que los agujeros de drenaje de las macetas no restringen la salida del agua de esta. Por otro lado, se puede relacionar la base drenante (en el modelo (*Drainage Mat*) con la superficie impermeable que se encuentra debajo de las macetas, que conduce el escurrimiento hacia el punto de salida.

Por lo tanto, analizando las distintas alternativas, se deduce que la mejor opción para representar correctamente el comportamiento de las macetas es el **techo verde**.

Previo a la implementación de este sistema a la totalidad de las cuencas definidas, se busca determinar la efectividad de este y la correcta definición de parámetros en una modelación acotada a la unidad mínima de estudio. A partir de la misma, en la Tabla 3.6 se aprecian los parámetros determinados.

Se pudo constatar que los parámetros de la capa de superficie no intervienen de forma activa de acuerdo con la generación de escorrentía de la cuenca. Por otro lado, los parámetros de la capa de suelo se determinaron a partir de los datos de los ensayos que se realizaron en el vivero a varias muestras de sustrato. Los valores de porosidad, capacidad de campo y punto de marchitez, son un promedio de los resultados de los ensayos.

El valor de la conductividad hidráulica fue obtenido a partir de ensayos a diferentes muestras de sustratos de viveros (Kumar et al., 2010). El parámetro de carga de succión se determinó a partir del valor de conductividad hidráulica mediante la fórmula recomendada por el programa (Rossman, 2016).

$$CS = 3,237K_s^{-0,328}$$

Siendo K_s la conductividad hidráulica saturada.

A su vez, se utilizaron valores recomendados (Rossman, 2016) para la pendiente de la curva de conductividad. Se determinó que este parámetro rige la cola del hidrograma, por lo que, al no conocer fiablemente su valor, se implementará para un análisis de sensibilidad de este en el modelo del vivero.

La principal ventaja de este LID frente a otras opciones radica en la simplicidad de relacionar los procesos que suceden en la maceta con lo que el modelo ofrece.

Tabla 3.6: Parámetros determinados para el LID y comentarios al respecto.

Surface Layer		
Parámetro	Valor	Comentarios
Berm heigth	0	Puede despreciarse
Vegetation volume fraction	0	Puede despreciarse
Surface roughness	0	No influye
Surface slope (%)	0	No influye
Soil layer		
Thickness (mm)	200	Estimado a partir de fotografías
Porosity (volume fraction)	0,822	Calculado a partir de ensayos
Field capacity (volume fraction)	0,550	Calculado a partir de ensayos
Witting point (volume fraction)	0,060	Calculado a partir de ensayos
Conductivity (mm/hr)	1.510	Estimado a partir de bibliografía
Conductivity slope	40	Valores de referencia
Suction head (mm)	21,53	Manual de SWMM
Drainage mat		
Thickness (mm)	10	Espacio entre macetas y apoyo
Void fraction	0,90	volumen sin interferencias
Roughness (Manning's n)	0,01	Rugosidad de superficie impermeable

Como ya se adelantó anteriormente, el área que ocupa el LID dentro de cada cuenca es la que se definió como área ocupada por macetas.

3.6.1.3 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE LA CUENCA

Para la implementación del SWMM, se definen las parcelas descritas en 3.5.1.1 como unidad mínima de cuenca. No se tendrán en cuenta las parcelas vacías.

Los parámetros necesarios que se deben especificar para una cuenca se presentan a continuación.

- **Rain gage – pluviómetro:**
Posee el registro del evento de precipitación (en nuestro caso, irrigación). En función de la ubicación de la parcela, se le asocia un pluviómetro determinado. Cada pluviómetro tiene asociado una serie temporal correspondiente al evento de riego definido para una zona en específico.
- **Outlet – Punto de descarga:**
A cada cuenca se le asocia un punto de descarga (*Outlet*) en el canal que recolecta la escorrentía superficial generada. Si bien se sabe que existen parcelas cuya descarga se realiza a través de una tubería, no se dispone de información suficiente para modelar en detalle cada una de las cuencas. A su vez, no es el objetivo del modelo individualizar el comportamiento de cada cuenca sino el de analizar a nivel macro las distintas componentes del sistema y su repercusión en la escorrentía generada.
- **Área:**
Los encargados del sistema de riego activan o desactivan los aspersores de modo que en las parcelas sólo se esté regando las zonas ocupadas por macetas para minimizar el uso inapropiado del recurso. Por lo que es necesario diferenciar las siguientes dimensiones:
 - **Área total:** es el área superficial impermeable que ocupa la parcela y disponible para colocar las macetas a producir.
 - **Área ocupada por macetas:** se refiere a el área superficial que efectivamente ocupan las macetas en la superficie impermeable y puede incluir la proyección horizontal de la zona radicular de las plantas.
 - **Área regada:** Es el área de influencia de los aspersores encendidos durante el riego. Debido a que no necesariamente se encienden todos los aspersores presentes en la parcela.

En la Figura 3.24, se representan estos conceptos para parcelas de distintas características.

Para determinar cada una de ellas, se cuenta con una imagen satelital extraída de Google Earth correspondiente al mes de octubre de 2016. La misma posee la suficiente resolución para permitir una clasificación de píxeles y es lo suficientemente cercana al período de estudio para tener una aproximación a la ocupación real de la superficie del vivero dentro del período de estudio.

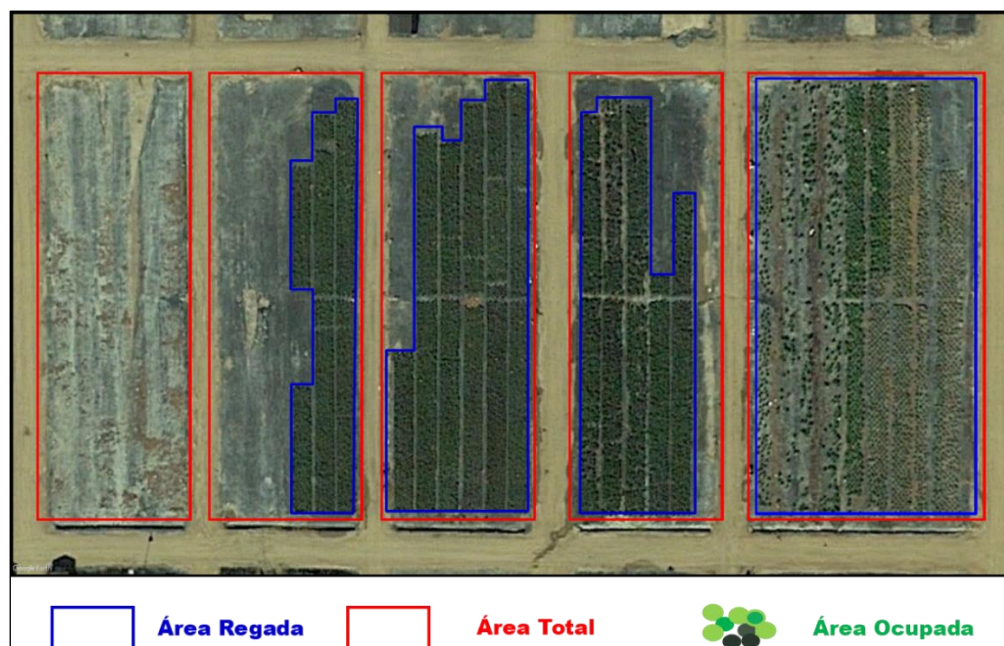


Figura 3.24: Esquemización del área total, regada y ocupada.

Se recurre al Sistema de Información Geográfica ArcGIS. Dicho programa cuenta con una serie de herramientas que permiten determinar el área que ocupa, en dicha imagen, cierto rango de píxeles preseleccionados. El proceso de cálculo se detalla a continuación:

- 1- Se definen las coordenadas de referencia de acuerdo con la ubicación geográfica del vivero en el globo (WGS 1984 - UTM Zone 11N).
- 2- Se carga la imagen satelital (en formato TIFF) y se georreferencia. Esto permite estimar correctamente el valor de cada área.
- 3- Con la herramienta de clasificación, se selecciona el rango de píxeles deseados en función de la precisión y calidad de la imagen.
- 4- Una vez clasificada la imagen en función de los píxeles seleccionados, se procede con la determinación de las áreas para cada parcela.

Como es de esperar, este método de cálculo de área ocupada es útil sólo para el sistema de cultivo a cielo abierto. Para el área ocupada por macetas dentro de los invernaderos o mallas de sombra se estiman como el promedio del área ocupada por macetas de las parcelas, a cielo abierto, del área de estudio correspondiente.

Cabe destacar que el área de la cuenca considerada en el modelo no es el área total de la parcela sino el área regada. Por otra parte, el área ocupada por las macetas se utiliza para determinar la extensión del LID a utilizar en cada cuenca.

En la Figura 3.25, se muestran resultados parciales del procedimiento mencionado. Se puede apreciar como a partir de la clasificación de píxeles es posible determinar de forma precisa el área deseada. En la Tabla 3.7 se muestra el área ocupada por macetas para el total de cada área de estudio.

Tabla 3.7: Área ocupada por macetas para cada sistema de cultivo en las áreas de estudio. Unidad: m².

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
Malla de sombra	19.386	21.251	0	0	0
Invernadero	4.731	15.540	12.743	78.469	11.817
Cielo abierto	0	25.878	2.448	58.805	70.903
Total	24.118	62.670	15.191	137.274	82.720

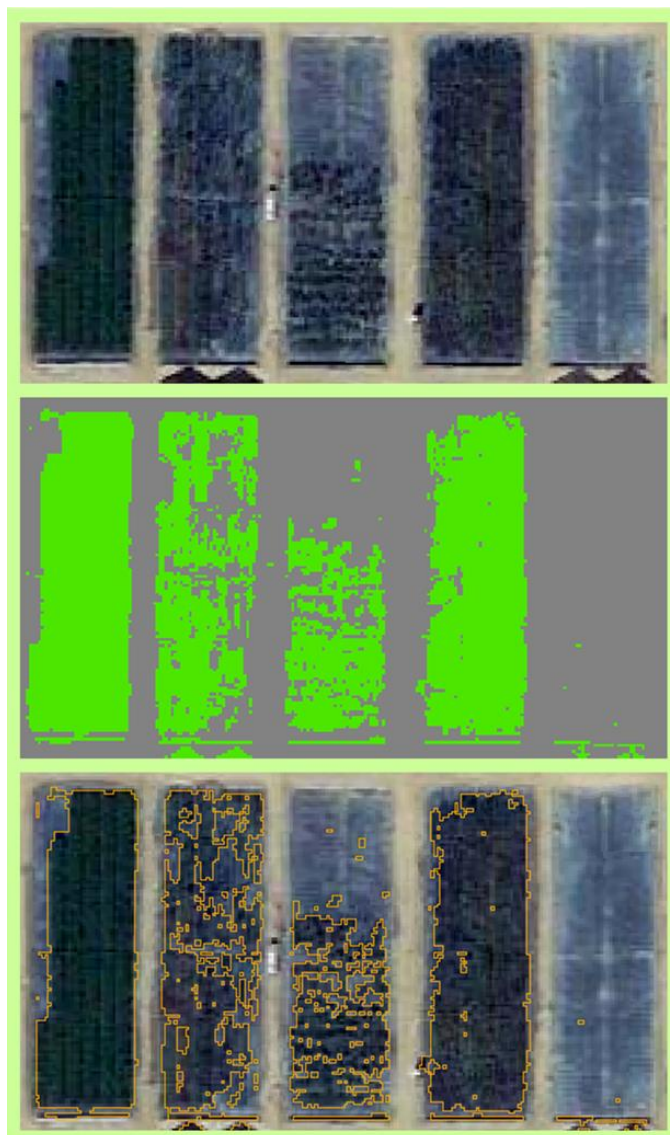


Figura 3.25: Proceso de determinación del área ocupada por macetas de acuerdo con el procedimiento.

- Width – Ancho de escorrentía:

Es un parámetro geométrico y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$W = (2 - S_k)L$$

Siendo:

$$S_k = \frac{|A - B|}{A + B}$$

Donde A y B son la superficie de la cuenca esquematizada en la Figura 3.26, y L la longitud del conducto de drenaje central de la cuenca (Largo de la parcela).

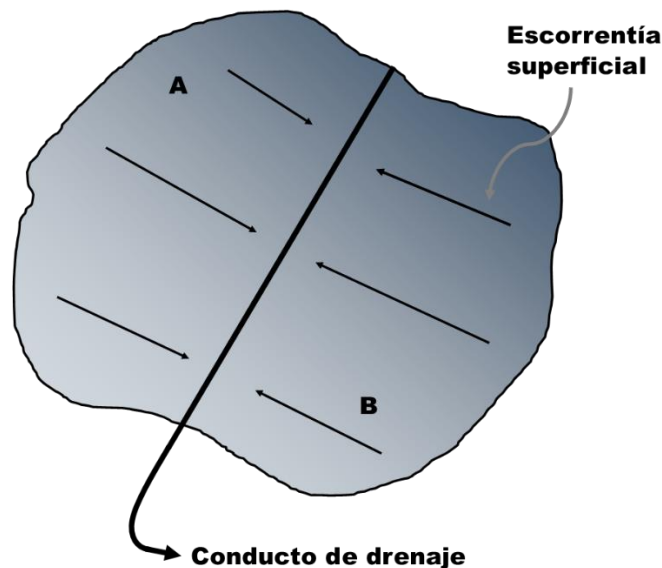


Figura 3.26: Esquematización del ancho de escorrentía.

- % Imperv – Impermeabilidad:

Se modela las cuencas totalmente impermeables considerando que no existen o son mínimas las pérdidas por infiltración.

3.6.2 Irrigación

Como se mencionó anteriormente, la evolución espacial de cómo se distribuye el riego en el vivero es desconocida. Es claro que, por las dimensiones del mismo, no es posible regar toda su superficie en simultáneo. El número de parcelas que pueden ser regadas en simultáneo depende del caudal total que puede ser conducido al sistema en un momento dado. A la superficie total que puede ser regada en simultáneo se le denomina “**Nube de precipitación**”, en adelante nube. Una aproximación a las dimensiones de esta en cada área se realiza de la siguiente forma:

- Se toma la tasa de precipitación promedio de los dos aspersores (PRN y Netafim).
- Conocido el volumen diario de agua para cada área, se determina el caudal de riego para poder regar cada área en su totalidad y en simultáneo.

- Como este último parámetro (hipotético) está limitado por el caudal real (conocido) que el sistema de irrigación puede aportar en un momento dado, es posible conocer cuántas nubes necesita cada área para ser regada en el día.

Por otro lado, como no se cuenta con datos que indiquen la forma en que se aplica el riego en el vivero, se supone una secuencia de riego en base a observaciones de la serie temporal de las fuentes de agua.

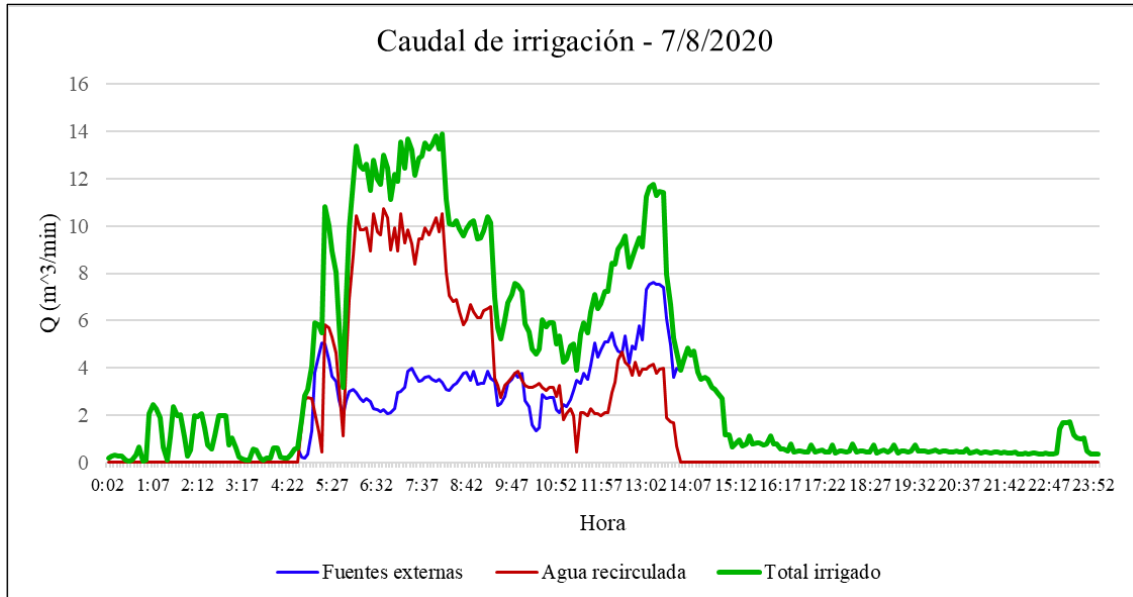


Figura 3.27: Caudal de irrigación del día 7/08/2016.

En la Figura 3.27, se observa que gran parte del volumen de agua de recirculación es irrigado en la primera mitad del día. Como se mencionó anteriormente, el riego en el Área 5 se asocia a la fuente de agua de recirculación, por lo tanto, se asume como hipótesis que el riego en un día comienza por el Área 5. Luego, se define arbitrariamente un recorrido de la nube de precipitación en el vivero para obtener los primeros resultados de escurrimiento en el modelo.

Se debe tener en cuenta que, considerando los datos con los que se cuentan para este trabajo, existe un gran número de combinaciones de riego posibles, y cada una de ellas generan distintos hidrogramas de salida en el punto de runoff del vivero, que pueden o no coincidir con el hidrograma real. De todos modos, los objetivos buscados no dependen de este aspecto por lo cual cualquier evolución razonable es satisfactoria a los fines de validar el modelo en escala temporal diaria.

De este modo, la secuencia de riego o el traslado de la nube en el vivero es la siguiente:

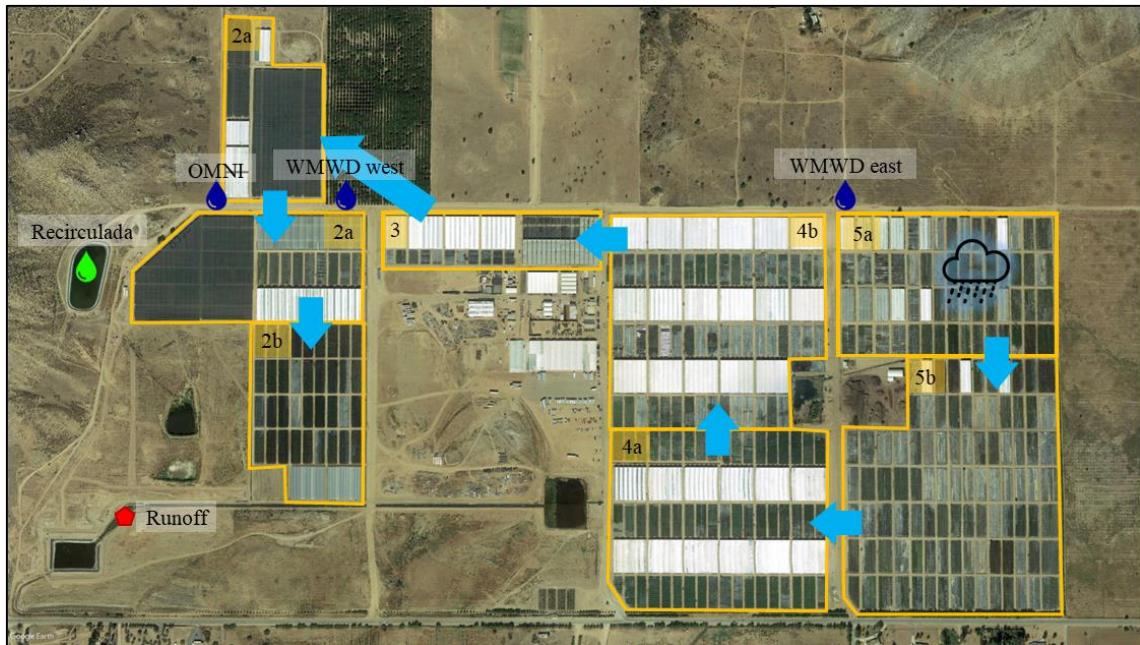


Figura 3.28: Secuencia de irrigación sobre el vivero.

Las áreas marcadas en amarillo son las zonas en las que se desplaza la nube de precipitación. La duración de esta varía según el volumen necesario a irrigar para cada zona y las diferentes tasas de precipitación, la cual depende del sistema de cultivo.

El tiempo de riego de la nube se calcula como el cociente entre el volumen a irrigar en el día y la tasa de irrigación. En consecuencia, para una zona dada hay dos tasas de riego, la correspondiente a aspersores PRN y Netafim. Como la menor tasa es la de Netafim, ésta es la que define el movimiento de la nube de una zona a otra.

Para la modelación se utiliza una misma lamina de riego para todos los días que dura la modelación.

3.6.3 Drenaje

El módulo hidráulico de SWMM utiliza como datos de entrada los datos de salida del módulo hidrológico (escurrimiento superficial), consistente en la evolución temporal de la entrada del agua de escorrentía en la red de alcantarillado a través de los nodos, para modelar el flujo del agua por la red, a través de los conductos, nodos y depósitos (Rossman, 2017).

Se puede elegir el nivel de complejidad del modelo, para este estudio se utilizó la Onda dinámica. Este análisis resuelve la forma completa de las ecuaciones de flujo de St. Venant y, por lo tanto, produce los resultados más precisos teóricamente.

Con este análisis se pueden tener en cuenta el almacenamiento del canal, los efectos de remanso, las pérdidas de entrada/salida, el flujo de alcantarilla, la inversión del flujo y el flujo a presión. Debido a que combina la solución para ambos niveles de agua en los nodos y el flujo en los conductos, se puede aplicar a cualquier diseño de red general, incluso a aquellos que contienen múltiples derivaciones y bucles aguas abajo.

El movimiento del agua a través de una red de transporte de canales y tuberías se rige por las ecuaciones de conservación de masa y momentum para un flujo de superficie libre gradualmente variado. El programa combina las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento en una sola, que resuelve para todos los conductos en cada intervalo de tiempo. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \frac{\partial H}{\partial x} - gAS_f$$

En donde:

- x = distancia
- t = tiempo
- Q = caudal
- A = sección transversal al flujo
- U = velocidad del flujo (Q/A)
- H = carga hidráulica en el conducto
- g = aceleración gravitatoria
- S_f = pendiente de fricción

Por otro lado, se aplica la ecuación de continuidad en los nodos para cada intervalo de tiempo:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum \frac{Q}{A_s}$$

Siendo A_s el área de superficie de ensamblaje de nodos, cada “ensamblaje de nodo” consiste en el nodo en sí y la mitad de la longitud de cada conducto conectado a él.

Las ecuaciones se resuelven de forma secuencial para determinar el flujo en cada conducto y el tirante en cada nodo para cada intervalo de tiempo mediante el método de Euler modificado, en un esquema de diferencias finitas explícito. Este esquema implica operaciones aritméticas sencillas y poco espacio de almacenamiento comparado con los métodos implícitos. Sin embargo, son generalmente menos estables numéricamente y requieren incrementos de tiempo pequeños.

Para finalizar con la implementación del modelo es necesario definir los nodos y conductos que conforman la red de drenaje del vivero

Los canales que conforman la red de drenaje se encuentran relevados en cuanto a su geometría y trazados en un archivo *kml*. Se destacan dos posibles geometrías para los mismos, trapezoidal o rectangular.

En cada cruce de los canales con la caminería interna, se utilizan alcantarillas de sección circular. Las dimensiones y cantidad empleadas en cada cruce son conocidas, sin embargo, no se tiene conocimiento de la obra de aproximación de cada alcantarilla, con excepción de las más importantes en donde se tiene relevamiento fotográfico.

Por otra parte, se dispone de un relevamiento por GPS de la cota de zampeado en puntos pertinentes de los canales que permiten determinar su pendiente por extremos. Se asume que la pendiente entre cada punto relevado es uniforme y por tanto es posible interpolar (o extrapolar) su valor para determinar la cota de puntos relevantes como los son las descargas de las parcelas, necesarios para la implementación del modelo. Aun así, existen zonas del vivero en las que no se realizó el relevamiento topográfico. Para resolver este problema se recurre a tomar como hipótesis de que las pendientes conocidas en canales paralelos cercanos son las mismas.

Los canales están cubiertos por láminas de polietileno y un geotextil para controlar el crecimiento de hierbas. Se percató a partir de fotografías que los canales tienen sedimentos en sus lechos. Debido a que en este estudio no se modela el transporte de sedimentos ni se tiene conocimiento de que en algún momento haya sucedido un colapso o saturación del canal, se suponen constantes las geometrías de estos y se penaliza este efecto en el coeficiente de rugosidad de Manning. Para el mismo se siguieron recomendaciones del programa para canales a cielo abierto.

Cabe destacar que los canales de sección rectangular tienen una cantidad de sedimentos sensiblemente mayor que los canales trapezoidales y por ello se penalizó aún más el coeficiente de rugosidad. En la Tabla 3.8 se muestran los valores de dichos coeficientes utilizados en el modelo.

Tabla 3.8: Valores recomendados y utilizados para el coeficiente de Manning de los canales.

Descripción	Rango recomendado	Utilizado
Canal de tierra, recto y uniforme	0,020 – 0,030	0,025
Canal de hormigón	0,011 – 0,018	0,018

En el modelo solo se materializan las alcantarillas más importantes, en donde se dispone de información suficiente para poder evaluar el código de alcantarilla (*Culvert Code*) necesario para la identificación como tal. Este código depende del material, la geometría y la obra de aproximación a la misma, y se determina a partir de las recomendaciones del programa.

El modelo rescata las ecuaciones presentadas por la *Federal Highway Administration* en su *Hydraulic Design of Highway Culverts manual* (FHWA, 2012). Las alcantarillas se suelen analizar bajo la condición de flujo de diseño estacionario para determinar si la profundidad de entrada de agua resultante será aceptable. Sin embargo, para análisis de onda dinámica, se analizan para encontrar el flujo correspondiente a profundidades de entrada y salida conocidos.

En cualquier momento dado de una simulación, el flujo a través de la alcantarilla se determina primero utilizando el procedimiento de onda dinámica habitual de SWMM. Este flujo representa la condición de control en la salida. Luego, se calcula un flujo controlado de entrada para ver si se convierte en la tasa de flujo limitante.



Figura 3.29: Alcantarilla tipo considerada en el modelo. (Foto: B.Pitton).

Al analizar la Figura 3.29 y comparar con las recomendaciones del programa, los parámetros que se implementan en el modelo para las alcantarillas modeladas se corresponden con la característica, *Mitered to slope* correspondiente a la alcantarilla tipo *Circular Corrugated Metal Pipe*. Con respecto a los coeficientes de pérdida de carga a la entrada de la alcantarilla se opta por utilizar el correspondiente a *Mitered to conform to fill slope*. El coeficiente de pérdida de carga a la salida se considera como 1.

Tabla 3.9: Valores utilizados para el modelo de las alcantarillas.

Culvert code	Entry loss coeficcent	Exit loss coeficcent
5	0,7	1,0

3.7 MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez definidos y cuantificados los principales elementos que componen al vivero, tanto a nivel de producción de las macetas como de gestión del recurso hídrico, además de los procesos físicos que le dan dinámica al ciclo que este estudio aborda, se procede a implementar el modelo en SWMM.

Para este trabajo, se analizó el mes de agosto del 2016 ya que no tuvo problemas de registro de datos. Sin embargo, se modeló un periodo mayor para independizar los resultados de las condiciones de borde del modelo (humedad inicial en el LID).

En la Figura 3.30, se muestra el esquema del modelo implementado, en el que se observan las parcelas y las conducciones de drenaje.

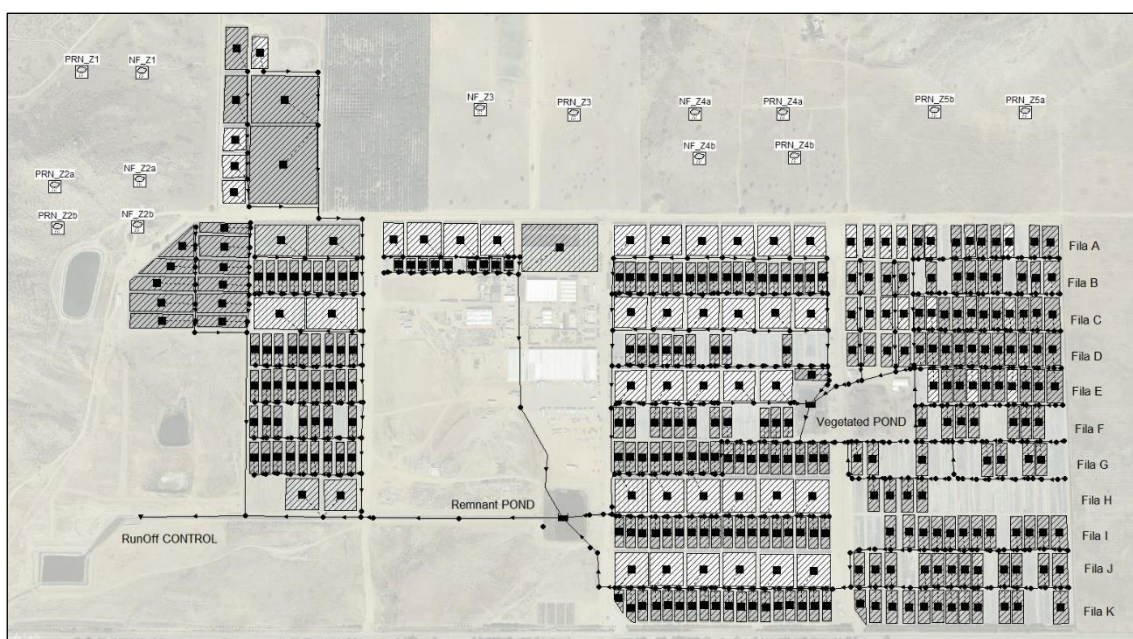


Figura 3.30: Modelo del vivero Altman Plants implementado en SWMM.

Puesto en marcha el modelo, lo primero que resulta interesante observar es el comportamiento del hidrograma de escorrentía en el punto de Runoff. Dado que se aplica una misma lámina diaria de riego y un único ciclo medio diario de evapotranspiración a todo el vivero, es esperable que el hidrograma diario de escorrentía modelado inter-día sea idéntico para todos los días. En la Figura 3.31, se observa el gráfico comparativo del caudal de escorrentía obtenido en el modelo y el observado.

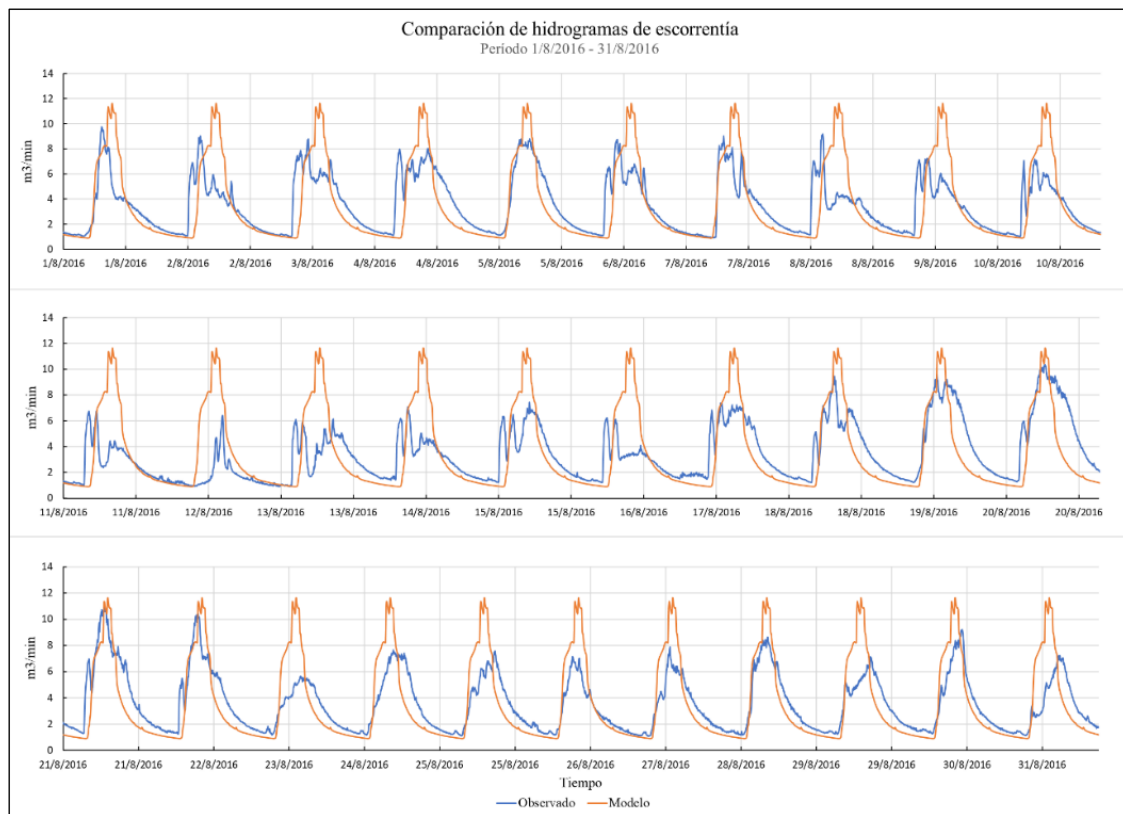


Figura 3.31: Comparación de hidrogramas de escorrentía real y modelado.

Como puede observarse, el modelo logra simular correctamente el flujo base existente. Además, se observan diferencias en las pendientes de las curvas, tanto en el incremento como disminución del caudal de escorrentía, el factor predominante que incide en esta diferencia es protocolo de riego propuesto, en cuanto al inicio, secuencia de riego y lámina diaria aplicada.

En cuanto al tiempo de respuesta³, no se aprecian grandes diferencias a pesar de que el inicio del riego modelado no coincide exactamente con el real.

A pesar de las similitudes que existen entre ambas series, se debe tener presente que es una aproximación en base a los datos disponibles, hipótesis y estimaciones realizadas. Como se indicó anteriormente, la simulación no puede ser valorada en escala temporal menor al tiempo total de riego en cada día, pues se desconoce el protocolo de riego. Solo se quiere capturar acumulados diarios y comportamiento cualitativo semejante, como por ejemplo el flujo base. No es foco de este estudio replicar el comportamiento hidráulico del sistema a los datos observados, sino que, mediante el planteo de diferentes escenarios tanto de racionalización como escasez, realizar balances de agua que faciliten la toma de decisiones para la gestión del recurso.

El balance hídrico aplicado para este análisis consiste en cuantificar los volúmenes riego, escorrentía y evaporación que arroja el modelo. El volumen de escorrentía se compone de la suma

³ Tiempo que tarda en observarse cambios en el hidrograma debido al riego.

del drenaje de las macetas (LIDs) y la escorrentía superficial de la parcela que se recoge en el punto de runoff. De lo anterior resulta:

$$\text{Riego} - \text{Escorrentía} - \text{ETP} = \Delta$$

Siendo Δ el término que corresponde al almacenamiento interno de los LIDs y en el sistema de drenaje. A continuación, se presentan los resultados de los obtenidos para la situación actual modelada.

Tabla 3.10: Comparación de resultados obtenidos del modelo. Volúmenes en m^3 .

	Observado	Modelo
Volumen irrigado	210.467	210.470
Escorrentía de parcelas	s/d	71.760
Escorrentía de macetas	s/d	76.920
Volumen de runoff	134.276	144.257
Volumen evaporado	s/d	66.726

Como puede apreciarse, el volumen de ingreso al modelo se diferencia del observado debido a pequeñas aproximaciones que se realizaron para implementar las series de pluviómetros en 5 minutos, así mismo, la diferencia es insignificante en comparación con los volúmenes totales. Por otra parte, el volumen de runoff, es decir, el que escurre hasta el punto de runoff, tiene una diferencia del 7 % lo cual se considera aceptable teniendo en cuenta las aproximaciones realizadas.

Una ventaja que se obtiene con la implementación del modelo es la distinción entre escurrimiento de macetas y parcelas. Lamentablemente, no es posible comparar estos resultados con la situación real observada. La relación entre las mismas depende, en mayor medida, de su porcentaje de ocupación.

Otro resultado interesante para analizar es el de la humedad en las macetas en cuanto a su evolución diaria, como se mencionó previamente, la serie de evapotranspiración que se emplea en el modelo es un ciclo diario. En la Figura 3.32 se observa la evolución de la humedad en un LID correspondiente a una parcela a cielo abierto en el Área 4. Puede observarse que se mantiene por encima de la capacidad de campo, lo cual tiene como consecuencia la continua lixiviación. Esto explica, en parte, la presencia de un caudal base en el hidrograma de salida del vivero.

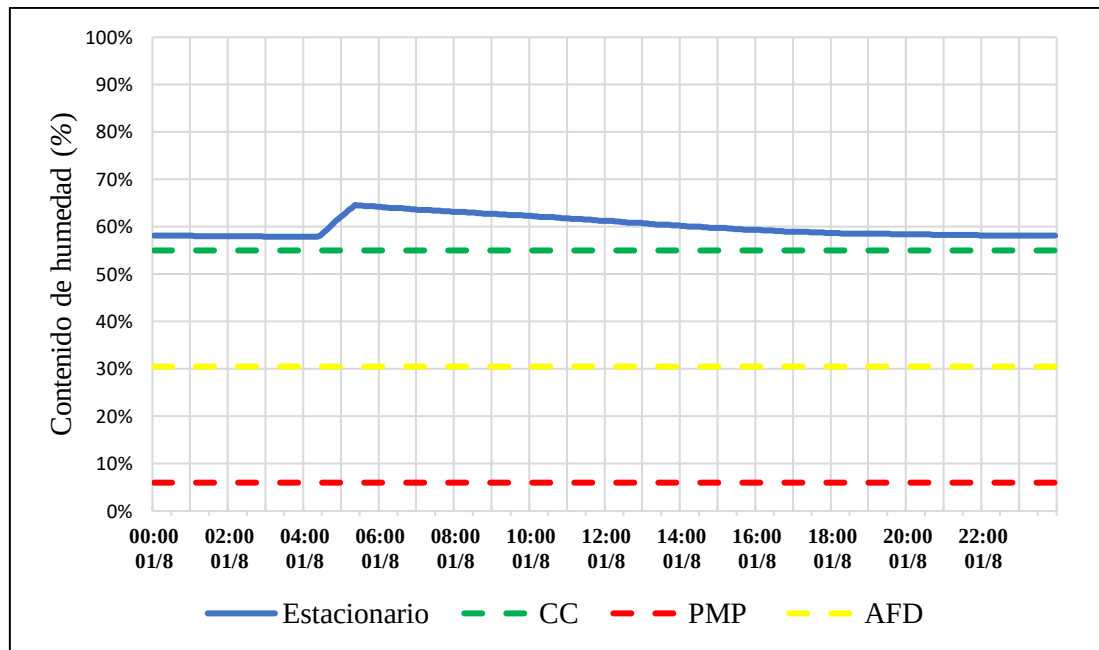


Figura 3.32: Variación diaria del contenido de humedad en el LID.

3.8 RACIONALIZACIÓN DEL AGUA

Debido a diversas razones (como, por ejemplo, regulaciones del estado, incentivos económicos, medidas eco-ambientales, etc.), el estudio de la racionalización del agua toma mayor peso a la hora de la toma de decisiones en este tipo de industrias productoras.

Para este estudio se analizan una serie de escenarios de reducción sucesiva en el volumen de riego total, sin discriminar la fuente. Mediante la implementación del modelo, es posible analizar estas situaciones hipotéticas y determinar qué consecuencias son inherentes a estas.

En cada caso se requiere determinar las condiciones hidrológicas en las macetas y la cantidad y origen del escurrimiento, lo cual condicionará la posibilidad y costo de la recirculación.

Las reducciones que se presentan corresponden a un 20, 40, 50, 55 y 60 % de reducción del volumen de riego. En la Tabla 3.11, se muestran los valores de lámina de riego empleadas en el modelo y, en la Tabla 3.12, los resultados obtenidos de las distintas modelaciones realizadas.

Tabla 3.11: Láminas de riego para cada escenario evaluado.

	Estacionario	20 %	40 %	50 %	55 %	60 %
Lámina (mm)	13,78	11,03	8,27	6,89	6,02	5,51

Tabla 3.12: Resumen de resultados del modelo.

Escenarios	Volumen irrigado (m ³)	Esc. de parcelas (m ³)	Esc. de macetas (m ³)	Volumen runoff (m ³)	Volumen evaporado (m ³)
Observado	210.467	s/d	s/d	134.276	s/d
Modelo estacionario	210.470	71.760	76.920	144.257	66.726
20 %	169.790	58.800	48.760	103.165	67.285
40 %	126.290	43.880	19.870	59.401	67.428
50 %	105.230	36.660	5.950	38.372	67.347
55 %	94.720	33.180	0	29.757	66.571
60 %	84.190	29.530	0	26.132	66.561

En la Figura 3.33, se muestran de forma gráfica los resultados de la tabla anterior. En la misma es posible observar cómo incide la reducción de volumen irrigado en el resto de las variables consideradas, con excepción de la evapotranspiración que se mantiene constante a pesar de la reducción del riego.

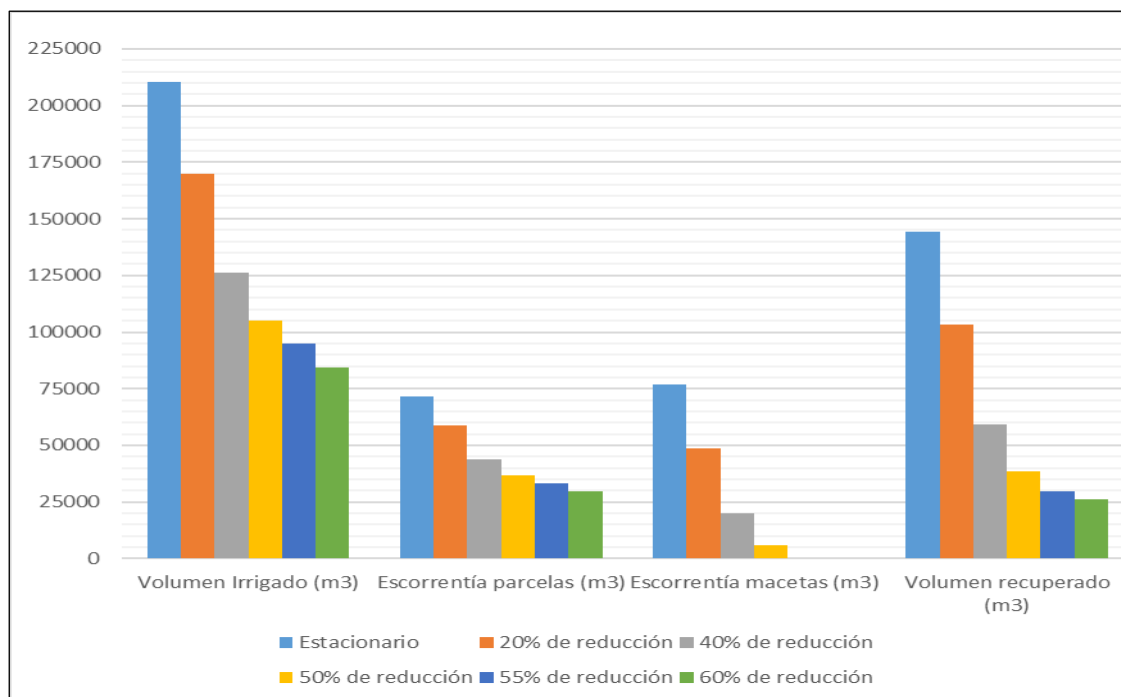


Figura 3.33: Comparación de resultados del modelo.

Como puede observarse, existe una reducción significativa en el volumen de escorrentía de las macetas a medida que disminuye la lámina de riego, siendo nula a partir del 55 % de reducción. Si se analiza el contenido de humedad en el LID, en la Figura 3.34, puede observarse que a partir de una reducción del 50 % por momentos se encuentra debajo de capacidad de campo y esto conlleva el cese de la lixiviación de agua, por ende, la baja de la escorrentía de macetas total. En la Tabla 3.13, se puede apreciar el momento en el cual la humedad se encuentra por debajo de la capacidad de campo y sucede lo antes descrito.

Al intentar reducir aún más el porcentaje de volumen de riego aplicado, se observa que el modelo se encuentra limitado en cuanto a los balances que realiza. Ya que las ecuaciones que gobiernan el modelo no tienen en cuenta el estrés hídrico de las plantas. Esto limita el rango de aplicación del modelo y su validez cuando las láminas de riego son bajas en comparación con la lámina de evapotranspiración.

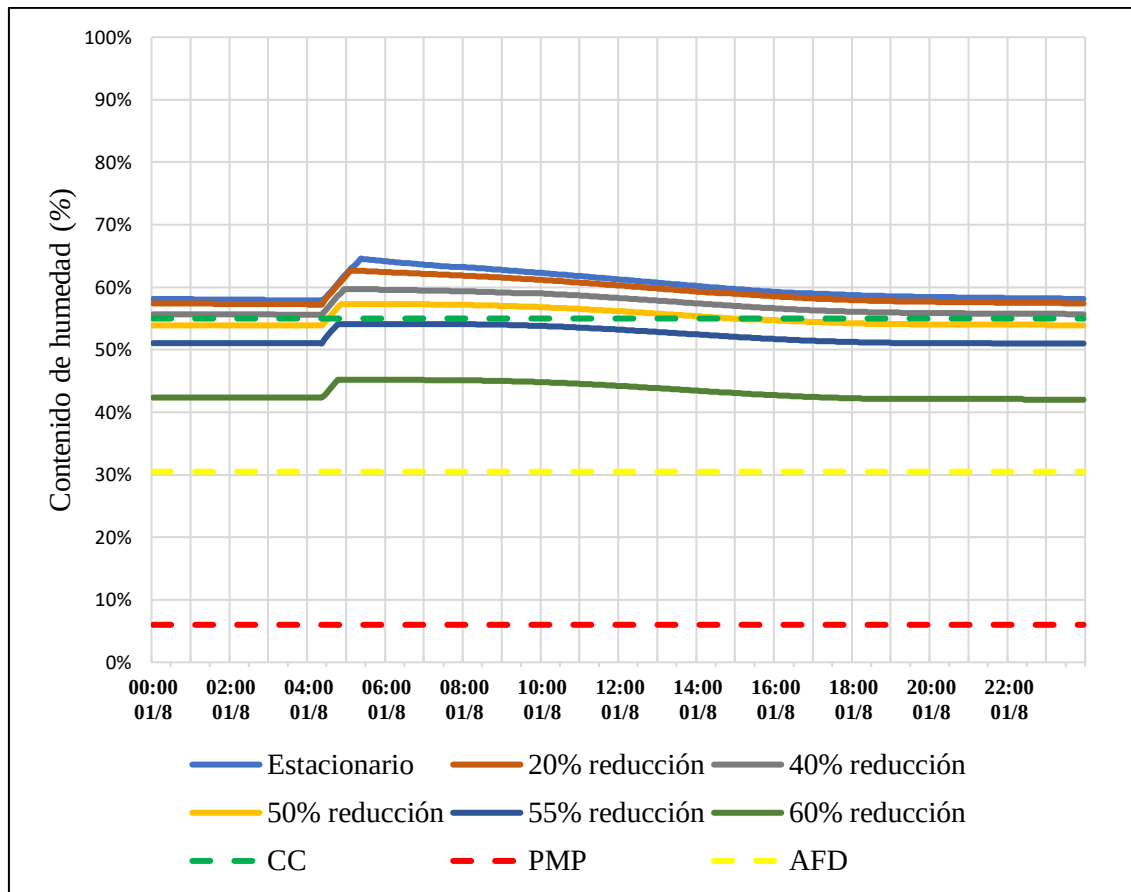


Figura 3.34: Variación diaria del contenido de humedad en el LID para las reducciones.

Tabla 3.13: Extracto de resultados de láminas obtenidos del LID para 50% de reducción.

Tiempo	Riego (mm)	Evaporación (mm)	Lixiviación (mm)	Humedad (%)
01/08/16 14:05	0.000	0.063	0.003	0.554
01/08/16 14:10	0.000	0.063	0.003	0.553
01/08/16 14:15	0.000	0.063	0.003	0.553
01/08/16 14:20	0.000	0.063	0.003	0.553
01/08/16 14:25	0.000	0.063	0.003	0.552
01/08/16 14:30	0.000	0.063	0.003	0.552
01/08/16 14:35	0.000	0.063	0.003	0.552
01/08/16 14:40	0.000	0.063	0.003	0.551
01/08/16 14:45	0.000	0.063	0.003	0.551
01/08/16 14:50	0.000	0.063	0.003	0.551
01/08/16 14:55	0.000	0.063	0.002	0.550
01/08/16 15:00	0.000	0.063	0.000	0.550
01/08/16 15:05	0.000	0.056	0.000	0.550
01/08/16 15:10	0.000	0.056	0.000	0.549
01/08/16 15:15	0.000	0.056	0.000	0.549

De la Figura 3.33, se deduce que la disminución en el volumen de escorrentía en las parcelas es lineal con la reducción del volumen irrigado total. Esto es un resultado esperado ya que los procesos que intervienen en el modelo son los mismos para cada escenario y son lineales.

Este volumen de agua que no es aprovechado por la planta forma parte la escorrentía que recorre el drenaje del vivero hasta almacenarse en alguna de las lagunas existentes, hasta su reuso. Esta lámina podría ser utilizable si las macetas se ubicaran más cercanas entre sí.

De esto se deduce que una posible mejora, desde el punto de vista operativo, es el reacomodo de macetas. Esta práctica consiste en optimizar el espacio reduciendo al mínimo posible la separación entre las plantas y así evitar dicho gasto.

El modelo implementado es capaz de simular esta situación modificando el área ocupada por los LID's de cada parcela. Este ajuste consiste en reducir el área de riego al área ocupada por las macetas (simulando un reacomodo) y de esta forma se redefine la lámina aplicada, L_R , ya que hay un volumen de agua determinado a aplicar en una superficie de riego menor.

Sin embargo, si el objetivo es aprovechar la lámina original, L_i , que cae en la superficie impermeable (para un escenario sin reducciones previstas), el volumen ajustado, V_R , para que se igualen las láminas se corresponde con la siguiente relación:

$$L_i = \frac{V_{Total}}{A_{regada}} = \frac{V_R}{A_{macetas}} = L_R \rightarrow V_R = V_{Total} \frac{A_{macetas}}{A_{regada}} = \frac{321.972 \text{ m}^2}{492.548 \text{ m}^2} V_{Total} = 0,65 V_{Total}$$

Es decir, reacomodando las macetas y aplicando la misma lámina de riego, implica una reducción del 35 % en el volumen de riego total. Este resultado es meramente teórico, ya que, en la realidad, la geometría de las macetas y el área foliar de las plantas hacen dificultoso disminuir el espacio vacío a cero.

Los resultados del modelo, a partir de la relación expuesta anteriormente, se muestran en la Tabla 3.14. Puede observarse que la reducción del volumen de riego aplicado es de un 34,6 % debido a que se utiliza el área de riego igual al área de macetas. Por consiguiente, la escorrentía proveniente de las parcelas es cero, ya que el LID ocupa la totalidad de la superficie. En cuanto la escorrentía recolectada en el punto de Runoff, se observa una reducción aproximada del 50 % debido a la escorrentía de parcelas nula.

Tabla 3.14: Comparación de resultados del modelo para el reacomodo de macetas.

	Simulación sin restricción	Reacomodo	% de reducción
Volumen irrigado	210.470	137.580	34,6
Escorrentía de parcelas	71.760	0	100
Escorrentía de macetas	76.920	75.120	2,3
Volumen de runoff	144.257	66.752	53,7
Volumen evaporado	66.726	60.334	9,6

El comportamiento de la evolución de la humedad diaria en la maceta es análoga a la presentada en la Figura 3.32.

3.9 CONCLUSIONES

A raíz del esfuerzo que implicó la familiarización de la infraestructura del vivero y los conceptos que intervienen en la producción de plantas en contenedores, se logró desarrollar un modelo con grandes prestaciones. La principal característica es su robustez, dadas las bases de funcionamiento del sistema de riego y condiciones climáticas durante un período determinado de tiempo, es posible determinar balances de masa con una diferencia inferior al 10 % a lo observado en cuanto a la escorrentía generada.

A pesar de que no se conoce en detalle los factores climáticos particulares que intervienen en cada sistema de producción (por ejemplo, la evapotranspiración en los invernaderos), los resultados son del orden al observado. Una medida a implementar en el futuro sería la instalación de una estación meteorológica para obtener mediciones del clima local para incorporarlos al modelo y mejorar su precisión.

A pesar de la falta de información específica del sistema y las hipótesis que fueron realizadas, el modelo logra reproducir posibles escenarios en los que la escasez del agua es determinante para la producción futura. Esto implica que es posible cuantificar las variables necesarias para la gestión propia del vivero, tales como, la variación de humedad en la maceta, el volumen de agua de escorrentía y la relación entre escorrentía de la parcela y la de las macetas como medida indirecta de la efectividad del riego.

Como resultado del análisis de las variables que intervienen en los balances del modelo, surge una propuesta desde el punto de vista operativo, el reacomodo de macetas, que lograría reducir aproximadamente un 35 % el volumen de riego. A pesar de que este cambio, debido a su escala conlleva movilizar una gran cantidad de personal, desde el punto de la gestión del agua es fundamental.

En términos generales, el modelo desarrollado en este estudio resulta clave para la política de gestión del vivero, a la hora de generar protocolos de uso del agua ante escenarios cada vez más restrictivos.

4 PARTE II: LA ESCOBILLA (*FLORIDA, URUGUAY*)

La segunda parte de este proyecto se enfoca en el estudio del sistema de riego de un vivero local, ubicado a pocos kilómetros de la ciudad de Fray Marcos, Florida, Uruguay. El mismo se encuentra compartido entre dos productores, donde a cada uno de ellos le corresponde una cantidad determinada de invernaderos que gestionan de forma independiente. En la Figura 4.1 se muestra el vivero de estudio.



Figura 4.1: Vivero "La Escobilla", Fray Marcos, Uruguay.

En dicho vivero, de escala familiar, se cultivan diferentes tipos de hortalizas (principalmente tomate y morrón) para su posterior venta en la Unidad Agroalimentaria Metropolitana (UAM), Montevideo. La producción se realiza en invernaderos cuyo sistema de riego es mediante bombeo, a través de cintas goteo que se disponen a lo largo de los mismos.

Se realizaron una serie de visitas al lugar, donde los productores aportaron su experiencia e información clave para realizar el estudio de la línea de base y motivaron los objetivos de este estudio.

Actualmente, cada productor tiene sistemas de producción diferentes. El primer productor, en adelante Productor 1, se caracteriza por tener 8 surcos de cultivo en cada invernadero, mientras que el Productor 2 tiene 12, debido a que reduce la separación entre surcos intensificando la producción.

El riego se realiza de forma manual mediante llaves de paso al ingreso de cada invernadero, donde el volumen de agua suministrado depende de la época del año y su producción.

A su vez, este vivero forma parte de un grupo de 7 productores de similares características, cuya subsistencia es posible gracias a una obra de toma que se encuentra en las márgenes del Arroyo Chamizo Grande. Este último tiene una extensión superior a 30 km aguas arriba del punto de cierre, con una superficie de cuenca de 197 km² y un caudal de estiaje superior a 79 L/s.⁴

4.1 OBJETIVO

El objetivo general es rediseñar el sistema de riego atendiendo a las demandas de los productores. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Relevar la visión de los productores respecto de la operativa del sistema y definir con precisión la demanda de los mismos en base a variables cuantificables y priorizadas.
- Evaluar el funcionamiento actual del sistema en base a mediciones en el sitio y cálculos teóricos a partir del relevamiento de la infraestructura y los requerimientos agronómicos.
- Diseñar una secuencia de alternativas que cumplan con los requisitos operativos y atiendan incrementalmente la demanda de los productores: prioritariamente la disminución del tiempo de riego, buscando, adicionalmente, una reducción del costo energético y manteniendo una operativa sencilla y robusta.
- Definir una solución óptima, realizar proyecto ejecutivo y análisis de costo-beneficio.

4.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

1- Documentos del establecimiento

Se realiza un acercamiento al caso mediante la información proporcionada por el Ingeniero Agrónomo del vivero y los mismos productores. La misma consiste en documentos que describen las especies cultivadas en cada invernadero, se identifica que invernaderos le pertenecen a cada productor, cálculos de volumen de demanda según la especie y época del año y costos energéticos (facturas de UTE). Además, se explicita una serie de problemáticas identificadas por los mismos productores, de las cuales, en este proyecto, se intentará resolver alguna de ellas.

2- Relevamiento de campo

Se realizaron tres visitas al vivero. En cada una se realizaron diversas mediciones de campo que consistieron en:

- Relevamiento con GPS diferencial:

Se utilizó este instrumento para determinar las coordenadas (x,y,z) de puntos clave de la red riego para definir su correcto trazado y la cota de ingreso de agua a cada invernadero, los vértices de cada uno y las dimensiones de la laguna de almacenamiento de agua. Los datos (x,y) fueron determinados correctamente, aunque debido a que no se pudo establecer vínculo con ninguna de las antenas cercanas del IGM (Instituto Geográfico Militar), no se pudo determinar la cota altimétrica de cada punto relevado (z).

⁴ Datos extraídos de anteproyecto “La Escobilla”.

- Aforo de caudales y presiones de funcionamiento:

Durante la jornada de trabajo normal de los productores se realizaron aforos de caudal de las cintas de goteo y sus respectivas presiones de funcionamiento. Estos valores permitieron validar el método de cálculo utilizado. Los mismos se presentan en la Tabla 4.1.

- Tareas varias:

Se cuantificó la cantidad de cintas que posee cada invernadero y sus longitudes. Se verificaron tramos de la tubería de distribución y sus respectivos diámetros.

Tabla 4.1: Resultados de los ensayos realizados.

Medición	Invernaderos	Presión (bar)	Q gotero promedio (L/h)	Q demanda estimada (L/min)
1	1-L	0,90	0,91	145
2	1-R	1,00	1,04	118
3	2-R	1,10	1,04	112
4	N-1	-	-	-
	1-R	0,62	0,72	82
5	5-R	0,45	0,87	70
	6-R	0,45	0,88	58
6	7-R	0,45	0,76	60
	5-R	-	-	-

3- Modelo digital del terreno

Debido a los inconvenientes del relevamiento con GPS se acudió al Modelo digital del terreno proveniente del IDE (Instituto de Datos Espaciales del Uruguay).

4- Fichas técnicas

Se cuenta con la curva característica de la bomba de riego y la relación presión-caudal de las cintas de goteros.

4.3 SITUACIÓN ACTUAL

En esta sección, se describen las características generales del vivero profundizando en el sistema de riego y su gestión, lo que corresponde a su infraestructura, el volumen de agua utilizado, protocolo de riego y los costos asociados al mismo.

4.3.1 Abastecimiento de agua

La obra de toma de la cual se abastecen de agua para riego los viveros pertenecientes al grupo “*La Escobilla*” fue construida en el año 1994 mediante un proyecto presentado al “Programa de manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego-PRENADER” impulsado por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP), Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y el Banco Mundial.

Este sistema cuenta actualmente con dos bombas, una sumergible de 4 HP de potencia que extrae el agua del arroyo a través de una tubería de succión de 5 metros de longitud y lo eleva hacia una casilla donde se encuentra una segunda bomba centrífuga de 15 HP de potencia que envía el agua hacia los reservorios prediales de cada vivero mediante una línea de impulsión. La tubería principal cuenta con 3580 m de longitud y una secundaria de 1395 m.

De acuerdo con los datos brindados por el Ing. Agrónomo, los productores y lo observado en las visitas de campo, se identifican una serie de problemas de funcionamiento de esta:

- Las válvulas de aire y desagüe han sido eliminadas debido a las reparaciones del camino vecinal que se encuentra paralelo a la línea principal.
- La válvula de retención instalada se encuentra subdimensionada para el sistema, de modo que no soporta la carga de retroceso del flujo una vez se apaga la bomba, lo que provoca que dicha tubería se vacíe luego de su uso. Esto implica un gran consumo energético cada vez que se utiliza el sistema (frecuencia mínima: 3 veces a la semana).
- El sistema no cuenta con elementos de seguridad contra el golpe de ariete.
- Las reparaciones de bombas, tuberías, tablero eléctrico, entre otros, que se han realizado a lo largo del tiempo, fueron con el fin de solucionar el problema a corto plazo, de modo que la calidad de la instalación ha disminuido considerablemente.
- La succión no cuenta con una reja para evitar el ingreso de peces o sólidos groseros. Esto produce esporádicamente atascos o daños, particularmente, en la bomba de impulsión.

La solución a esta problemática escapa al alcance de este proyecto.

4.3.2 Infraestructura de riego

4.3.2.1 ALMACENAMIENTO DE AGUA

El reservorio de agua del vivero consiste en una laguna cuyas dimensiones son 15 m de ancho, 27 m de largo, y una profundidad útil estimada de 3,5 m, de modo que su capacidad es de 1000 m³ aproximadamente (ver Figura 4.2). La misma fue excavada en tierra y cuenta con taludes perimetrales que desvían las pluviales de la zona. Según el testimonio de los productores tiene pérdidas por infiltración.

Dicho reservorio no solo es utilizado por el vivero en estudio, sino que es compartido con otro vivero lindero. Tanto las pérdidas por infiltración y evaporación como el volumen de agua utilizado por el vivero lindero no han sido cuantificados para este estudio, en el que se asume que se cuenta con el volumen total de demanda.



Figura 4.2: Laguna de almacenamiento del vivero.

4.3.2.2 EQUIPO DE BOMBEO Y RED DE DISTRIBUCIÓN

Durante uno de los relevamientos realizados en el vivero, se identificó el modelo de bomba instalada para el riego. Se trata de una bomba de 2 HP de potencia de la marca Pedrollo, ubicada en una casilla adyacente a la laguna. Su caudal de trabajo se encuentra en el rango de los 1,2 a 8,4 m³/h.

Conocer las características de esta bomba es fundamental a la hora de realizar la verificación del funcionamiento del sistema actual, las mismas se presentan en la Figura 4.10.

En la salida de la bomba se destacan dos accesorios hidráulicos importantes para el riego que son un filtro de arena y un Venturi que se utiliza para el fertirriego.

Filtro de arena

Algunas partículas como arena, limo, arcilla, algas, entre otros, pueden obstruir los sistemas de riego por goteo, de modo que es necesario contar con filtros que retienen este tipo de partículas.

Durante el riego se debe tener especial cuidado ya que a medida que los filtros se colmatan, la pérdida de carga aumenta, lo que disminuye la eficiencia de aplicación de riego. Este elemento posee una frecuencia diaria de limpieza. En la Figura 4.3 se muestra el filtro de arena junto con la bomba mencionada.

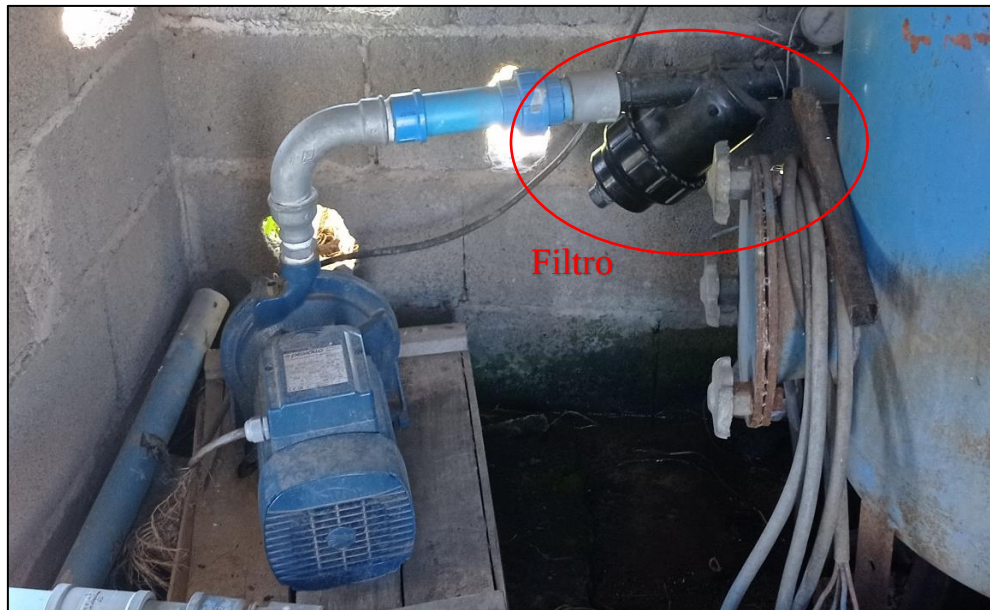


Figura 4.3: Bomba de riego y filtro de arena.

Venturi para fertirriego

La fertirrigación consiste en mezclar fertilizante con el agua de riego, con la ventaja de conseguir una uniformidad en la aplicación del fertilizante. Existen varios tipos de inyectores para la distribución de fertilizante dependiendo del sistema de riego donde se vaya a utilizar. En este caso, se trata de un inyector Venturi de tipo bypass. Su funcionamiento consiste en instalar en la tubería principal de riego una tubería bypass que, cuando se genera un efecto de succión mediante la estrangulación de la tubería a través de una válvula compuerta, se produce una diferencia de presión negativa haciendo que la solución fertilizante ingrese a la línea de riego y se mezcle uniformemente. En la Figura 4.4 se muestra el dispositivo instalado en el vivero.

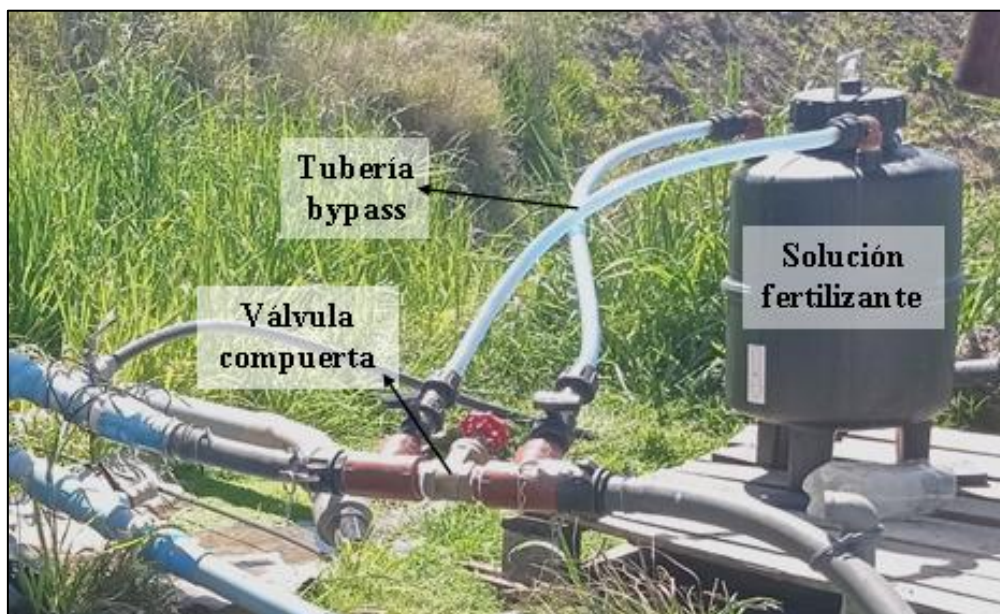


Figura 4.4: Inyector Venturi tipo bypass.

Este dispositivo *no* se utiliza cada vez que se riega, sino que en momentos específicos durante el crecimiento y fructificación del cultivo.

Red de distribución

La red que distribuye el agua a los invernaderos se compone de tuberías de PEAD de diferentes diámetros y accesorios hidráulicos. Una parte de esta se encuentra enterrada y otra sobre el terreno. En la siguiente Figura 4.5, se muestra el trazado actual, los diámetros de las tuberías y la identificación de cada invernadero.



Figura 4.5: Red de tuberías, diámetros e identificación de los viveros.

Para facilitar las explicaciones, en la Figura 4.6 se divide la tubería de distribución en diferentes tramos y se los identifica:



Figura 4.6: Identificación de tramos de tubería.

Cintas de goteros

En el relevamiento realizado en el vivero, aparte de los diámetros de las tuberías que componen la red, fue determinada la cantidad de cintas de goteros que contiene cada invernadero. Este dato resulta clave a la hora de determinar cuál es el caudal de demanda de cada invernadero.

La separación entre goteros es de 20 cm y la longitud de las cintas es aproximadamente la misma que el largo del invernadero (determinado), de este modo, conociendo el número cintas por invernadero es posible determinar el número de goteros.

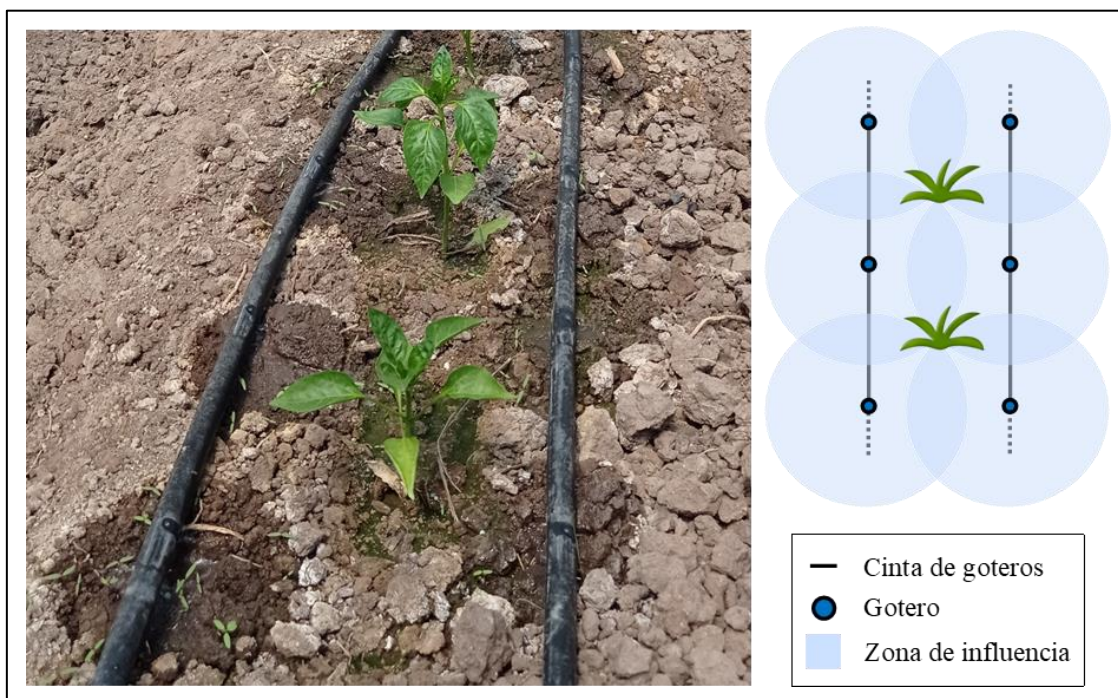


Figura 4.7: Cintas de goteros en cultivo de morrones y esquema de distribución.

En base a las estimaciones agronómicas y observaciones *in situ*, se considera que el volumen de demanda de cada planta será aportado por 2 goteros, como se muestra en la Figura 4.7.

Las cintas son un elemento sensible del sistema, por lo que su vida útil es reducida en comparación con los demás elementos de la red. Según lo conversado con los productores en el relevamiento de campo, las cintas que se utilizan dependen del stock del proveedor en el momento de su visita periódica al vivero, de modo que no hay forma de asegurar que todas las cintas del invernadero poseen las mismas características.

Además, existen otros factores que pueden incidir sobre esta relación:

- Obstrucción en los goteros debido a la acumulación de sales y/o sedimentos.
- Pérdidas de carga debido a la variación de caudal o cota a lo largo de la cinta.
- Estrangulaciones o roturas.

El rango de variación de la presión de trabajo de estas cintas se encuentra entre 0,25 y 1,25 *bar*. Según los documentos disponibles del anteproyecto del vivero, se utilizan las cintas de la marca AZUD SPRINT. De acuerdo a los datos del fabricante, estas cintas poseen una relación presión (P) – caudal (Q) que depende del modelo seleccionado.

La Figura 4.8 muestra, para la presión medida en campo a determinados invernaderos, la comparación entre el respectivo caudal medido y el caudal teórico de las cintas AZUD SPRINT modelo 1-L para la misma presión. La curva fue parametrizada utilizando una función polinómica de 2do grado presentada en el gráfico.

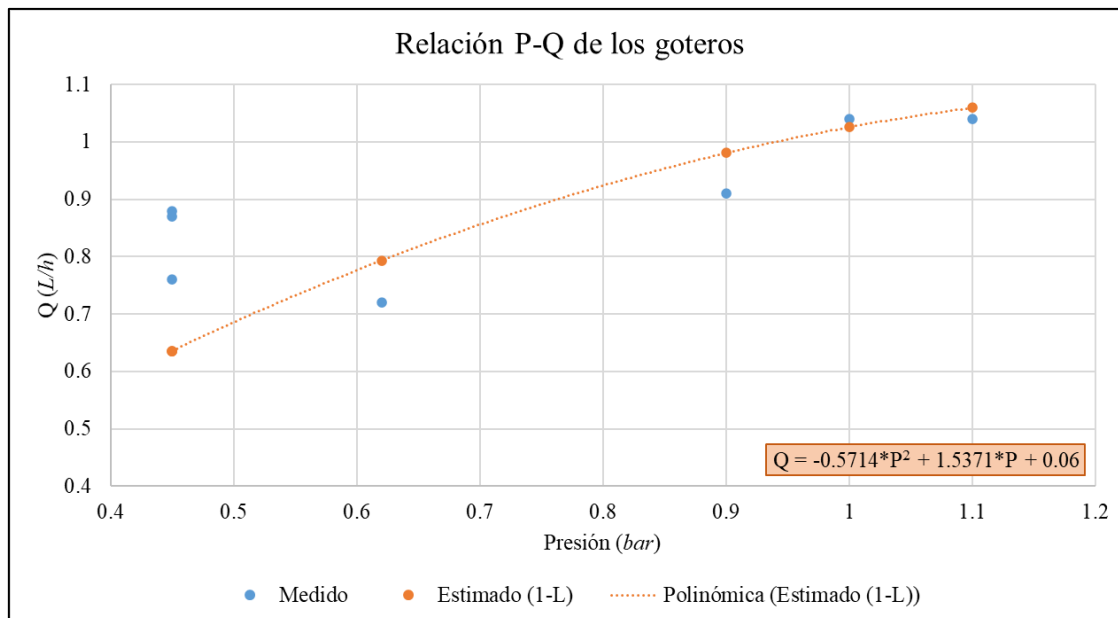


Figura 4.8: Relación presión-caudal de los goteros teórica y comparación con datos de campo.

Como la cantidad de datos no es suficiente para realizar un análisis estadístico del comportamiento de esta relación, aproximarla a la curva parametrizada se considera aceptable.

4.3.3 Uso de agua

4.3.3.1 VOLUMEN DE DEMANDA DEL VIVERO

A continuación, se determina el volumen de agua diario que consume una planta promedio del vivero. Para esto se parte de la información proporcionada por el Ingeniero Agrónomo del vivero, el cual partiendo de la lámina de evapotranspiración potencial (ET_0) en mm/día, el coeficiente de cultivo K_c para tomate y morrón (valores recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO) y tomando los coeficientes de uniformidad (CU) y de eficiencia de riego (ER) de 0,9 y 0,85 respectivamente, se calcula el volumen diario de demanda mediante la siguiente fórmula:

$$V_{dem} = \frac{ET_0 * K_c}{CU * ER}$$

Luego, se estima la superficie total asignada a cada uno de los cultivos dependiendo del invierno, tal como se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Superficie de cada invernadero y la especie predominante en el mismo.

Invernadero	Superficie (m ²)	Cultivo Actual
1 M	448	Tomate
2 M	448	Morrón
1 R	1344	Tomate
2 R	1280	Morrón
3 R	960	Tomate
4 R	960	Tomate
5 R	960	Morrón
6 R	768	Morrón
7 R	960	Tomate
1 L	1280	Tomate
2 L	960	Tomate
3 L	960	Morrón
4 L	960	Morrón
5 L	960	Tomate
6 L	960	Morrón
7 L	960	Tomate
8 L	960	Tomate

Considerando la hipótesis del agrónomo de que hay 2 plantas por metro cuadrado de invernadero, se calcula la superficie total de cultivo para cada especie, los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Superficie total para cada especie y número de plantas.

Especie	Superficie total (m ²)	n° de plantas
Tomate	9792	19584
Morrón	6336	12672

Por otro lado, a partir de la ecuación presentada anteriormente, mediante la cual es posible determinar los volúmenes de demanda mensuales, se determina el volumen total diario por planta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Volumen total mensual y volumen diario por planta.

Mes	Demanda total de agua (m ³ /mes)		Demanda diaria (L/planta/día)		
	Tomate	Morrón	Tomate	Morrón	Promedio
Julio	0	0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0	0	0,0	0,0	0,0
Septiembre	372	0	0,6	0,0	0,3
Octubre	874	565	1,4	1,4	1,4
Noviembre	1419	826	2,4	2,2	2,3
Diciembre	1768	1144	2,9	2,9	2,9
Enero	0	1224	0,0	3,2	1,6
Febrero	1287	925	2,3	2,6	2,5
Marzo	1216	787	2,0	2,0	2,0
Abril	766	446	1,3	1,2	1,2
Mayo	507	295	0,8	0,8	0,8
Junio	338	175	0,6	0,5	0,5

Dado que las especies cultivadas en cada invernadero varían por temporada (rotación de cultivos) se toma una demanda promedio para realizar los cálculos pertinentes. La misma se presenta en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Volumen de demanda diario de cada planta promediada anualmente.

	Demanda diaria (L/planta/día)
Promedio anual	1,3

Durante el relevamiento realizado, se determinó que, para dos invernaderos de la misma superficie, el número de cintas puede ser diferente. Tomando en consideración que cada planta le corresponden 2 goteros, la hipótesis de 2 plantas por metro cuadrado de invernadero es descartada, de modo que se calcula el volumen de demanda de cada invernadero de acuerdo a esta nueva condición. Los volúmenes de demanda por invernadero calculados se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Volumen diario de demanda de cada invernadero según el número de cintas.

Invernaderos	n° de cintas	n° de goteros	n° de plantas	Volumen diario de demanda (m³)
1-R	16	6800	3400	4,42
2-R	16	6400	3200	4,16
3-R	16	4800	2400	3,12
4-R	16	4800	2400	3,12
5-R	16	4800	2400	3,12
6-R	16	4000	2000	2,60
7-R	16	4800	2400	3,12
1-L	24	9600	4800	6,24
2-L	24	7200	3600	4,68
3-L	24	7200	3600	4,68
4-L	24	7200	3600	4,68
5-L	24	7200	3600	4,68
6-L	24	7200	3600	4,68
7-L	24	7200	3600	4,68
8-L	24	7200	3600	4,68
1-M	16	2240	1120	1,46
2-M	16	2240	1120	1,46
N-1	16	3200	1600	2,08
N-2	24	3600	1800	2,34

4.3.4

4.3.4 Gestión del Riego

El protocolo de riego implementado en el momento del relevamiento se ha definido de acuerdo a la experiencia de los productores en la operación ajustándose a las características de la bomba y de la red actual. La secuencia de riego de cada productor se explicita en la Tabla 4.7. El riego se realiza todos los días exceptuando períodos de grandes lluvias. El Productor 2 riega en la mañana, mientras que el Productor 1 en la tarde.

Dadas las características del equipo de bombeo, se pudo constatar durante el relevamiento, que las presiones que se tienen en los invernaderos son excesivas, llegando en determinados casos al punto en que se desconectan las cintas de la tubería de alimentación. Los productores solucionan este problema modificando la apertura de las válvulas hasta considerar una presión adecuada. En el vivero no se cuenta con elementos para cuantificar el ajuste realizado.

Tabla 4.7: Protocolo de riego de cada productor.

Productor	Combinación	Invernadero 1	Invernadero 2
1	1	2-R	-
	2	1-R	N-1
	3	3-R	2-M
	4	4-R	1-M
	5	5-R	6-R
	6	7-R	N-2
2	7	1-L	-
	8	2-L	-
	9	3-L	-
	10	4-L	-
	11	5-L	-
	12	6-L	-
	13	7-L	-
	14	8-L	-

4.3.5 Verificación del Funcionamiento

Conocidos los elementos básicos que componen el sistema de riego actual, se procede a su verificación, la cual consiste en determinar el punto de funcionamiento de la bomba para cada invernadero de acuerdo al protocolo de riego actual. Con ello, es posible determinar la presión de trabajo y caudal consumido de cada invernadero y en función del volumen de demanda a cubrir por cada uno, se determina el tiempo de riego y su costo asociado. El procedimiento de cálculo para la determinación de los puntos de funcionamiento se explicita en 7.2 del ANEXO II.

Se calculan las condiciones de funcionamiento del sistema sujeto a las mediciones realizadas en campo que indican que la presión de trabajo, cuando se riegan dos invernaderos en simultáneo, se encuentra en torno a 0,5 bar, mientras que cuando se riega uno solo está en el orden de 1 bar. Con estos valores y la relación P-Q de los goteros, se estima el caudal de funcionamiento de cada invernadero y por ende, del sistema. Conocido el volumen promedio de cada uno, se estima el tiempo de riego y su monto anual asociado. Los resultados se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Tiempo de riego de cada invernadero y costo operativo anual para cada combinación.

Comb.	Inv.	Presión (bar)	Q bomba (L/min)	Tiempo de Riego (min/día)	Costo anual por combinación
1	2-R	1,0	135	38	\$ 1.324
2	1-R	0,5	114	57	\$ 1.980
	N-1	0,5		57	
3	3-R	0,5	128	57	\$ 1.980
	2-M	0,5		57	
4	4-R	0,5	127	57	\$ 1.980
	1-M	0,5		57	
5	5-R	0,5	128	57	\$ 1.980
	6-R	0,5		57	
6	7-R	0,5	96	57	\$ 1.980
	N-2	0,5		57	
7	1-L	1,0	164	38	\$ 1.324
8	2-L	1,0	128	38	\$ 1.614
9	3-L	1,0	131	38	\$ 1.614
10	4-L	1,0	133	38	\$ 1.324
11	5-L	1,0	139	38	\$ 1.324
12	6-L	1,0	128	38	\$ 1.253
13	7-L	1,0	124	38	\$ 1.324
14	8-L	1,0	131	38	\$ 1.535

El tiempo de riego promedio diario es de **10 horas**. Este se calcula partiendo de la demanda diaria promedio de cada planta, por lo que, dependiendo de la época del año, el tiempo de riego varía considerablemente. Este tiempo es muy cercano al reportado por los productores, lo cual valida los cálculos.

El costo energético anual estimado en base al relevamiento de campo ronda en el entorno de los **\$22.550**. Este costo no incluye el cargo fijo de las facturas de UTE ni se consideran otros equipos en el vivero que puedan consumir energía como, por ejemplo, luminarias. La información brindada por los productores a partir del monto de las facturas de UTE para el período de octubre 2019 a octubre de 2020 se presenta en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Costo mensual de operación del vivero.

Año	Mes	Costo factura
2019	Oct	\$ 1.156
	Nov	\$ 2.730
	Dic	\$ 4.540
2020	Ene	\$ 5.270
	Feb	\$ 5.315
	Mar	\$ 4.140
	Abr	\$ 3.980
	May	\$ 2.390
	Jun	\$ 2.150
	Jul	\$ 3.680
	Ago	\$ 4.081
	Set	\$ 5.010
	Oct	\$ 1.943
Total		\$ 46,385

El mismo incluye: cargo fijo, el cual ronda en los \$8.500 anual, multas y recargos con lo cual el costo por la energía se reduce aproximadamente a \$36.00 anuales que igual es notoriamente mayor al cálculo previo. Se observa, por ejemplo, un consumo energético elevado en los meses de julio y agosto, en los cuales, en el cálculo previo, se consideró, de acuerdo con la información brindada por el Ing. Agrónomo, que no hay riego. Tampoco se sabe si asociado a este costo mensual existen consumos energéticos adicionales al equipo de bombeo.

Características de la red de riego

Definido el trazado de la red de riego actual (ver Figura 4.5) y una combinación determinada de invernaderos, se divide la línea de tuberías que los abastece en diferentes tramos de acuerdo al caudal de circulación o el diámetro de la tubería, identificando para cada uno su longitud, diámetro, pérdidas de carga localizadas y distribuidas y la diferencia topográfica entre el invernadero y la laguna. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 4.9 el trazado para la combinación 5.



Figura 4.9: Ejemplo: Línea de tuberías que abastece los invernaderos 5-R y 6-R.

Una vez caracterizada la línea que abastece la combinación, se procede a realizar el cálculo mencionado, teniendo en cuenta que el caudal de cada invernadero será en función de la relación presión-caudal de los goteros. Es importante destacar que para los cálculos se considera que las llaves de paso a los invernaderos se encuentran totalmente abiertas.

Características de la bomba

Las características de la bomba actual se muestran en la Figura 4.10:

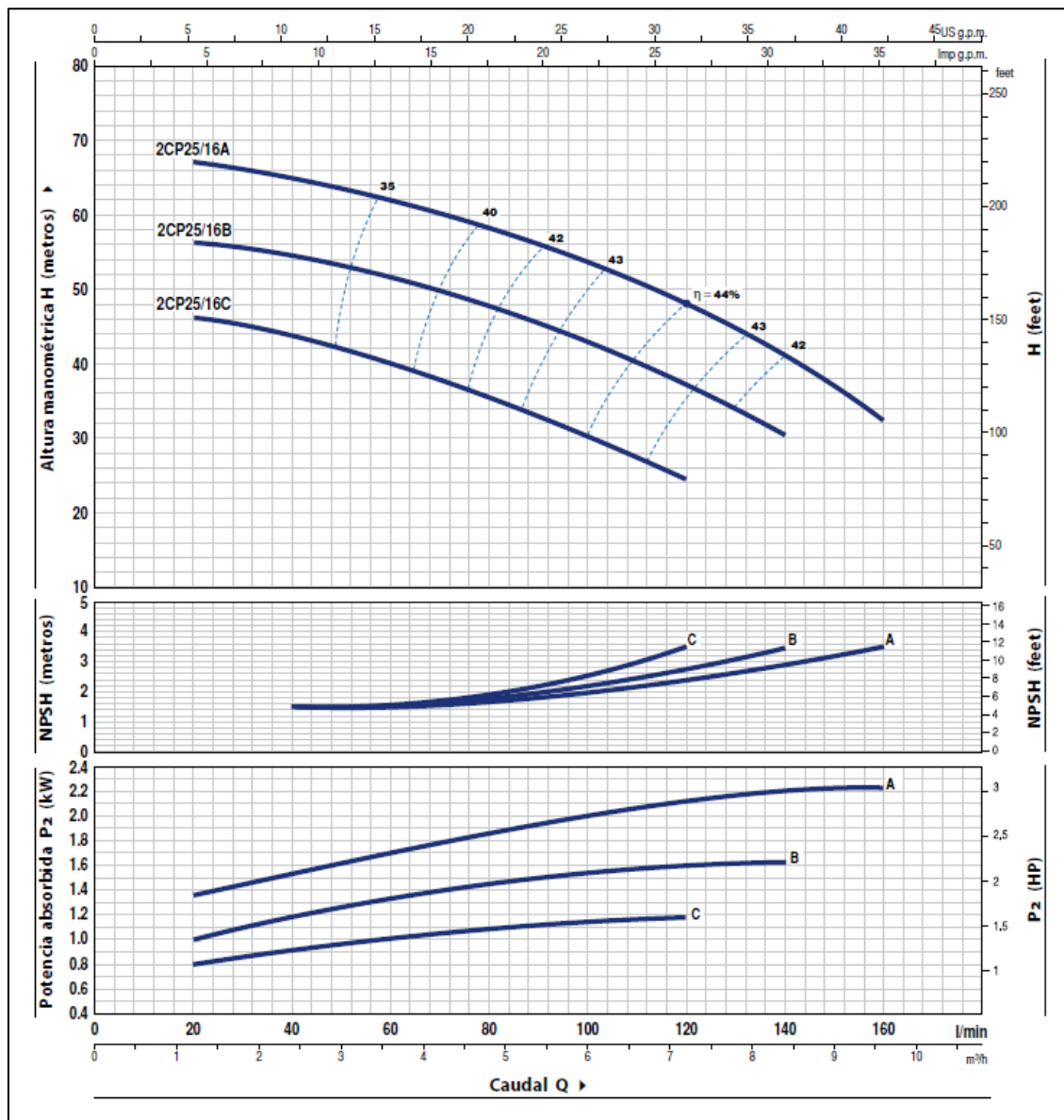


Figura 4.10: Características de la bomba actual. Modelo: 2CP25/16B.

Las tres curvas asociadas al modelo de bomba son necesarias, tanto para determinar la presión y caudal a la entrada de cada invernadero como para estimar el costo operativo de acuerdo a la potencia consumida en el punto de funcionamiento y verificar la cavitación. Para realizar los cálculos, estas curvas fueron parametrizadas mediante una función polinómica de 2do grado.

4.4

4.4 SÍNTESIS DIAGNÓSTICA E IMPLICANCIAS EN EL REDISEÑO

4.4.1 Diagnóstico del sistema actual

Se comparan a continuación dos condiciones de funcionamiento con la infraestructura actual (características de la red y demás elementos que componen el sistema) manteniendo la combinación de riego de invernaderos actual (que sí se variarán en el rediseño) y en base a dos condiciones:

- A. Sin pérdidas de carga forzadas (como lo es la apertura parcial de válvulas como medida de control de las condiciones de riego), con el objetivo de conocer como operaría el sistema libre de restricciones, aún si esto implica que el rango de presiones y caudales en los goteros se salgan de las especificaciones.
- B. Imponiendo al sistema libre de la parte A pérdidas de carga en las válvulas de entrada a los invernaderos de tal manera de eliminar aquellas situaciones en que las condiciones de operación de las cintas se encuentran fuera de rango. De este modo, se obtiene el funcionamiento óptimo de la infraestructura actual cumpliendo las especificaciones de las cintas de riego; es el punto de operación que buscan los productores con la operativa actual.

Para todas las condiciones, se calculan además los tiempos de riego y costos anuales energéticos para poder, por un lado, contrastar con la realidad y, por otro, porque serán luego parámetros clave para la selección de alternativas de rediseño.

A. Funcionamiento libre del sistema, sin pérdidas de carga forzadas

Se calcula el punto de funcionamiento sin pérdidas adicionales para regular el caudal y presión, es el que surge de la red de distribución, la curva de funcionamiento de la bomba y la curva presión-caudal de las cintas de goteo. En la práctica del cálculo, se requiere de un proceso iterativo que encuentre el punto de funcionamiento del sistema. En el caso de existir bifurcaciones, se toma la carga en el nodo como variable de iteración.

En la Tabla 4.10, se muestran los puntos de funcionamiento para las combinaciones actuales calculadas en una condición de máximo aprovechamiento de las capacidades del sistema. H es la carga entregada por la bomba.

Tabla 4.10: Condición de funcionamiento de los invernaderos y punto de funcionamiento de la bomba.

Combinación	Invernaderos	Presión (bar)	Q goteros (L/h)	H (m)	Q bomba (L/min)
1	2-R	1,72	1,01	31,9	135
2	1-R	1,13	1,07	20,4	1,67
	N-1	0,88	0,97		
3	3-R	1,34	1,09	34,3	128
	2-M	1,35	1,09		
4	4-R	1,21	1,08	34,7	127
	1-M	1,48	1,08		
5	5-R	0,74	0,88	34,4	128
	6-R	0,71	0,86		
6	7-R	1,03	1,04	27,9	147
	N-2	1,55	1,07		
7	1-L	1,05	1,04	21,1	163
8	2-L	1,17	1,08	34,0	128
9	3-L	1,23	1,09	33,1	131
10	4-L	1,26	1,09	32,6	133
11	5-L	1,39	1,09	30,6	139
12	6-L	1,15	1,07	34,4	128
13	7-L	1,08	1,05	35,7	124
14	8-L	1,21	1,08	33,4	131

Las celdas en rojo corresponden a situaciones en que la variable en cuestión se encuentra fuera de su rango de trabajo.

Estos resultados explican la operativa que han adoptado los productores, abriendo solo parcialmente la válvula de paso para lograr las condiciones adecuadas de funcionamiento. En particular, buscan evitar el exceso de agua o, incluso, la ruptura de las cintas. Naturalmente, el forzar una pérdida de carga con las válvulas ubicadas a la entrada de cada invernadero conlleva a una pérdida de eficiencia y desaprovechamiento del equipo utilizado.

Los resultados permiten, además, visualizar que la bomba funciona en el límite de su capacidad en cuanto al caudal erogado, siendo que la misma puede cubrir la demanda para tan solo uno o dos invernaderos dependiendo de su demanda.

B. Funcionamiento del sistema con pérdidas de carga forzadas mínimas para cumplir con las restricciones

En este caso, se ajustan las pérdidas de carga localizadas hasta que las situaciones en que la presión de las cintas o el caudal de la bomba se encuentren dentro del rango de trabajo. En la práctica de cálculo se impone la presión en la entrada de los invernaderos (y a través de la relación P-Q de las cintas, el caudal) según la Tabla 4.10 pero, en los casos de los casilleros rojos, reduciendo la presión para estar dentro de los rangos de operación recomendados. Con los caudales conocidos se puede calcular la evolución de la carga en todo el sistema que incluirá las

pérdidas localizadas en las válvulas de los invernaderos, las cuales surgen por diferencia de la carga que da el sistema hasta dicha válvula y la carga a la salida dada por el trinomio de Bernoulli, cuyos tres términos son conocidos.

Nuevamente, se evalúan los tiempos de riego y costos operativos en estas condiciones de operación del sistema, que se considera óptima para la infraestructura actual y es contra la cual se van a valorar las alternativas de rediseño. Los resultados se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Tiempo de riego y costo anual operativo para la situación actual en máxima capacidad.

Comb.	Inv.	Presión (bar)	Q bomba (L/min)	Tiempo de riego diario (min)	Costo anual por combinación
1	2-R	1,00	135	38	\$ 1,324
2	1-R	0,68	140	46	\$ 1,614
	N-1	0,68		46	
3	3-R	1,00	128	38	\$ 1,324
	2-M	1,00		38	
4	4-R	1,21	127	36	\$ 1,324
	1-M	1,00		38	
5	5-R	0,74	128	44	\$ 1,573
	6-R	0,71		45	
6	7-R	1,03	140	38	\$ 1,424
	N-2	0,85		41	
7	1-L	0,73	140	44	\$ 1,547
8	2-L	1,17	128	36	\$ 1,262
9	3-L	1,23	131	36	\$ 1,250
10	4-L	1,26	133	36	\$ 1,246
11	5-L	1,00	139	38	\$ 1,324
12	6-L	1,15	128	36	\$ 1,267
13	7-L	1,08	124	37	\$ 1,289
14	8-L	1,21	131	36	\$ 1,253

Bajo estas condiciones, el costo anual operativo se encuentra ronda en el entorno de los \$19.000 y el tiempo total de riego promedio se encuentra en las 9 horas. Por lo tanto, es posible optimizar -aunque levemente- las condiciones de riego actual controlando las variables presentadas.

4.4.2 Implicancias para el diseño

En esta sección se presenta una síntesis conjunta de los resultados obtenidos del relevamiento de las demandas de los productores y el análisis tanto del funcionamiento actual como del potencial de la infraestructura instalada, lo cual permite concluir cuales deben ser los aspectos a ser abordados prioritariamente en el rediseño.

De la interacción con los productores surge que la **reducción del tiempo total de riego** es el objetivo principal de este estudio, pues tiene un impacto decisivo en su calidad de vida. En segundo orden de prioridad, aparece el interés por los gastos energéticos, pero no son una preocupación central ni hay claridad sobre el potencial de reducción de los mismos. La necesidad

de tener una operativa simple y robusta surge con claridad de la interacción con los productores y el análisis del sistema.

Es así que los criterios de diseño son, en orden de prioridad:

- **Tiempo total de riego:** se refiere al tiempo que tardan en regarse la totalidad de los invernaderos (horas/día)
- **Costo operativo anual:** Costo asociado al consumo energético de la bomba, no se tienen en cuenta las horas en que el encargado del riego del vivero realiza esta operación.
- **Simplicidad y robustez** en la operación del sistema

En función de los requerimientos de los productores y del diagnóstico del funcionamiento del sistema se pueden concluir algunos elementos prioritarios a atender en el rediseño.

Cambio de la bomba: Una reducción sustancial en el tiempo total de riego no será posible sin pasar a regar simultáneamente un mayor número de invernaderos, siendo que la bomba actual está trabajando en el límite superior de su rango de caudales para el caso de los invernaderos grandes. Por lo tanto, cualquier rediseño que atienda al requerimiento principal deberá incluir el reemplazo de la bomba que deberá ser elegida con un rango de caudales de funcionamiento adecuado.

Elaboración de un protocolo de riego: El elemento principal del mismo es la selección de invernaderos que se riegan en simultáneo buscando cierta uniformidad en las condiciones de operación (tiempo de riego, presión a la entrada en funcionamiento libre). De lo contrario, para ajustar un adecuado funcionamiento conjunto se debe recurrir a elementos de control (como la apertura parcial de válvulas) que implican pérdidas de carga, lo que conlleva a una pérdida de eficiencia y desaprovechamiento del equipo utilizado además de complejizar la operación. La simetría geométrica en la distribución de los invernaderos que se riegan en simultáneo es una primera aproximación a esta búsqueda de uniformidad.

Cambio del tramo inicial de la tubería de impulsión. El tramo 1 de la red actual (ver Figura 4.6) que alimenta a prácticamente la totalidad de los invernaderos, es de apenas 1 ½'', siendo que hay un tramo posterior (3) de 2''. Ya en la situación de operación actual, en dicho tramo se pierde aproximadamente un 50% de la carga hidráulica aportada por la bomba. Frente al escenario de riego a mayor cantidad de invernaderos en simultáneo este problema se agrava sensiblemente, generando grandes ineficiencias. Además, el tramo es relativamente corto y la inversión asociada a su modificación es bajo. Por ello, todas las alternativas planteadas incluyen un cambio en el diámetro de dicho tramo.

A raíz de lo anterior y con el fin de diagnosticar la condición actual del sistema de riego y evaluar los cambios realizados durante el proceso de diseño, se definen los **indicadores de impacto** para este estudio: Uniformidad de riego⁵, tiempo total de riego y costo operativo.

⁵ Este concepto tiene lugar cuando se riega de a dos o mas invernaderos en simultáneo. El tiempo es uniforme cuando el tiempo que tardan en regarse es el mismo.

4.5 PROPUESTAS DE DISEÑO

Para el diseño de un sistema que mejore las condiciones actuales de funcionamiento de la red, se proponen diferentes alternativas que solucionan incrementalmente las necesidades de los productores. Del diagnóstico realizado en la sección anterior y atendiendo la escala del emprendimiento, se propone un nuevo protocolo de riego aumentando la cantidad de invernaderos que se rieguen en simultáneo. En lo que refiere al Productor 2, cuyos invernaderos son los de mayor demanda de caudal, busca como mínimo que se pueda regar de a dos invernaderos en simultáneo, mientras que el Productor 1 pueda regar de a tres o más.

Se manejan diferentes combinaciones como resultado de un proceso iterativo en el que se busca la uniformidad del tiempo de riego y la cercanía entre invernaderos. Esta última consideración es importante ya que la necesidad de personal para riego aumenta a medida que aumenta el número de invernaderos que se riegan en simultáneo para una combinación. El mismo se muestra en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Propuesta de protocolo de riego para cada productor.

Productor	Combinación	Inv. 1	Inv. 2	Inv. 3	Inv. 4
2	1	1-L	8-L	-	-
	2	2-L	7-L	-	-
	3	3-L	6-L	-	-
	4	4-L	5-L	-	-
1	5	N-1	N-2	1-R	2-R
	6	1-M	2-M	3-R	7-R
	7	5-R	6-R	4-R	-

Un cambio en el protocolo de riego como el planteado implica eventualmente un cambio en el método de cálculo para la determinación de las nuevas condiciones de funcionamiento (ver ANEXO II), cambio en la infraestructura del sistema como por ejemplo diámetros de tubería, trazado, entre otros e incidiendo directamente sobre los indicadores de impacto.

4.5.1 Equipo de bombeo

Independientemente de la alternativa propuesta, es ineludible el cambio del equipo de bombeo actual debido a las ineficiencias que presenta, ya que tiene un rango acotado de caudal y una carga excesiva para la instalación. Puede ser que esta medida sea la más costosa, aunque también la más necesaria.

Para determinar equipos que se adapten satisfactoriamente al nuevo protocolo, se tiene en cuenta el rango de caudales para cada combinación y estimaciones de pérdida de carga del sistema teniendo en cuenta los rangos de funcionamiento de los diferentes elementos que componen la red de riego.

Se manejaron dos equipos de bombeo a los cuales se evaluará el desempeño para las distintas alternativas de diseño. Aunque ambos equipos son del mismo modelo, debido a la diferencia el tamaño del rotor, la carga entregada por uno de ellos es mayor. La marca elegida es **KSB** Megabloc modelo 050-032-125, los tamaños de rotor son $\phi 120$ y $\phi 130$. En la Figura 4.11 se presentan las características de las mismas.

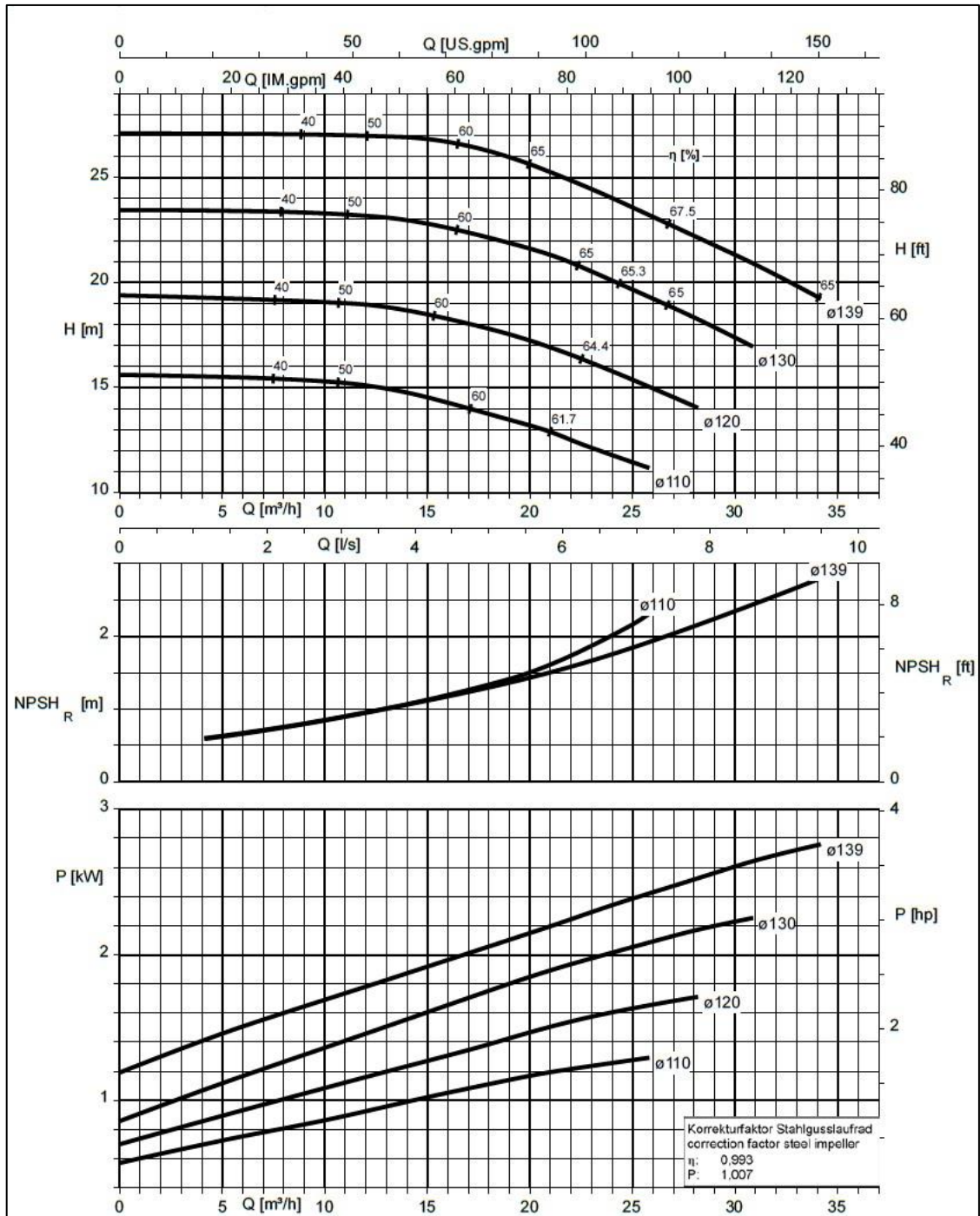


Figura 4.11: Características de la bomba. Modelo: Megabloc 050-032-125.

4.5.2 Red de Riego

Se calcula la pérdida de carga distribuida por unidad de longitud para diferentes diámetros en función del rango de caudales estimado. Los resultados de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** indican que, para el rango de caudales de funcionamiento estimados, en la tubería existente de 1 ½" (40 mm), la pérdida de carga distribuida llega a tomar valores entre 10 al 50 % del largo de la tubería. Particularmente, para el tramo 1 (ver Figura 4.6) de 100 metros de longitud aproximadamente, se tendrían pérdidas de carga del orden de 30 a 50 metros, por lo que para implementar la bomba seleccionada para el diseño es indispensable cambiar el diámetro de la tubería de este tramo. Se propone utilizar DN 75 mm. Esto se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

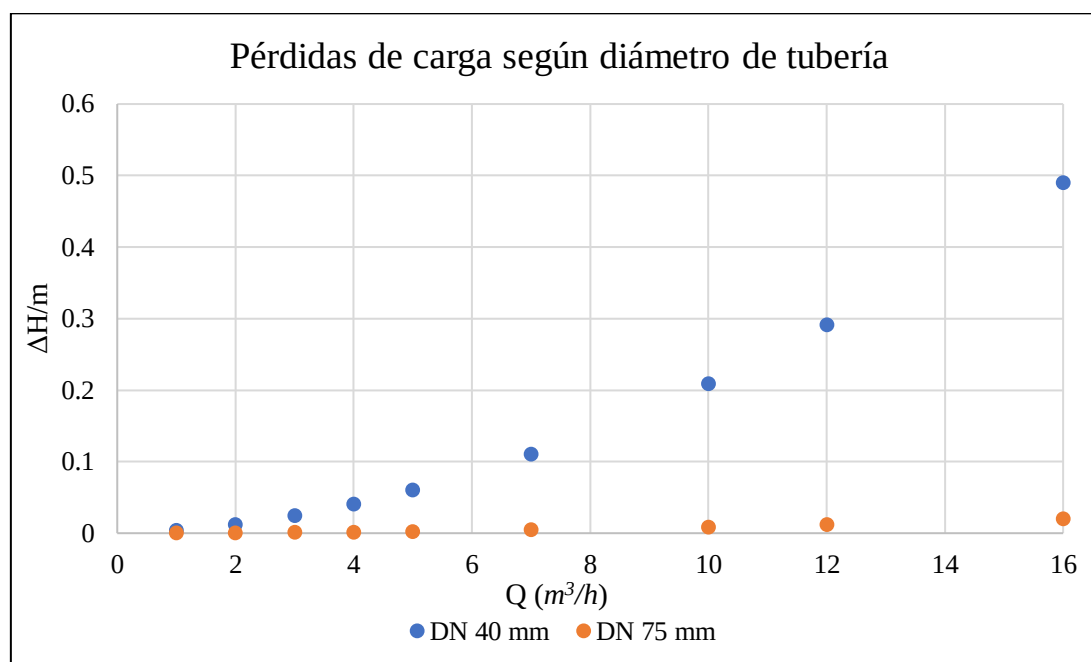


Figura 4.12: Comparación de pérdidas de carga por unidad de longitud de tubería.

De este modo, resulta que el cambio del equipo de bombeo debe acompañarse con la sustitución de la tubería principal. Las alternativas que se presentan a continuación plantean la sustitución incremental de los tramos críticos identificados.

4.5.3 Alternativa 1

La alternativa 1 plantea el cambio del tramo 1 (evidenciado en Figura 4.13). Para la totalidad de las combinaciones del protocolo, dicho tramo estará en uso con dos o más caudales de demanda, evidenciado por las pérdidas de carga excesivas en la situación actual, la tubería principal está subdimensionada. De mantenerla se agravaría la situación aún más en un esquema de riego de múltiples invernaderos en simultáneo.

Esta alternativa propone el cambio del trazado y diámetro del tramo 1 y las conexiones con los invernaderos de los cuales se abastecen. La tubería principal se realiza en 75 mm y las conexiones a los invernaderos en 40 mm. El resto de la red existente se mantiene. En la Figura 4.13 se observa el cambio planteado.

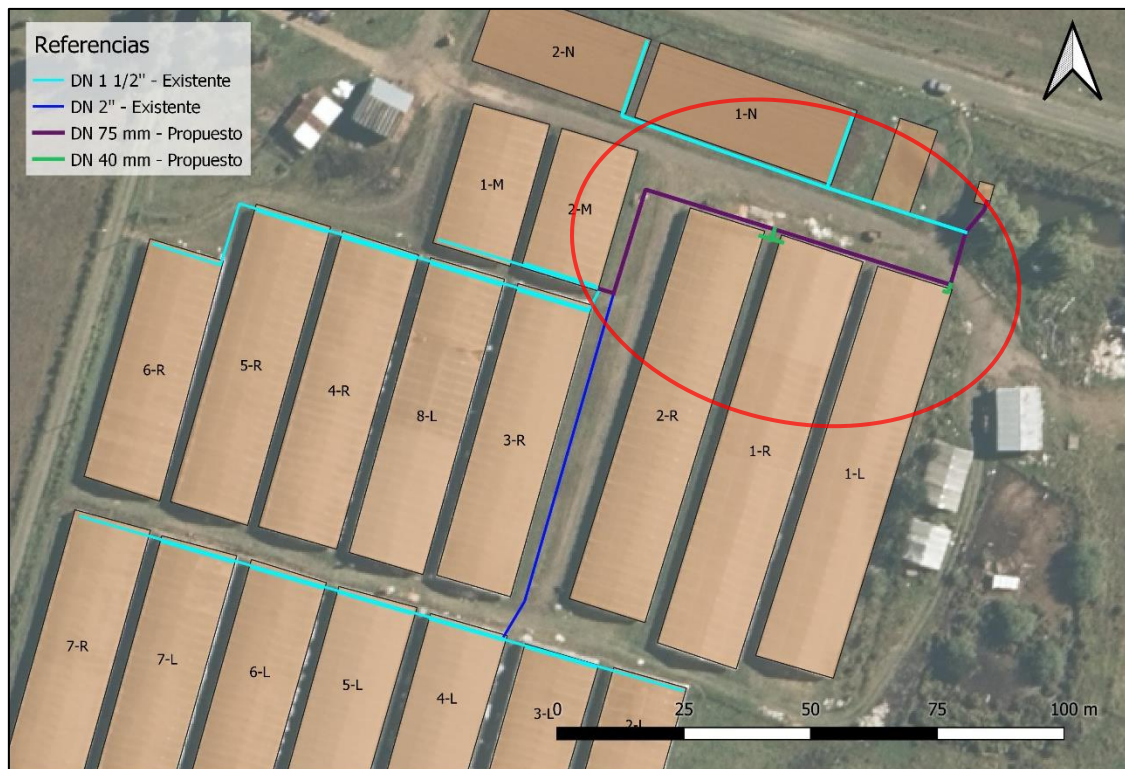


Figura 4.13: Propuesta de alternativa 1.

4.5.4 Alternativa 2

Si bien la alternativa 1 mejora de forma general el funcionamiento del sistema, existen zonas en las cuales se sigue teniendo problemas de cargas excesivas y esto conlleva a tiempos de riego mayores y ocasionalmente baja uniformidad.

Adicionalmente a los cambios propuestos de la alternativa 1, la segunda alternativa busca mejorar el funcionamiento del sector lateral (60 % de las combinaciones). Para ello se sustituye la tubería 4 (evidenciada en Figura 4.14) por una tubería principal de 75 mm y se cambia el trazado de las conexiones a los invernaderos por 40 mm. En la Figura 4.14 se plantea el cambio propuesto.

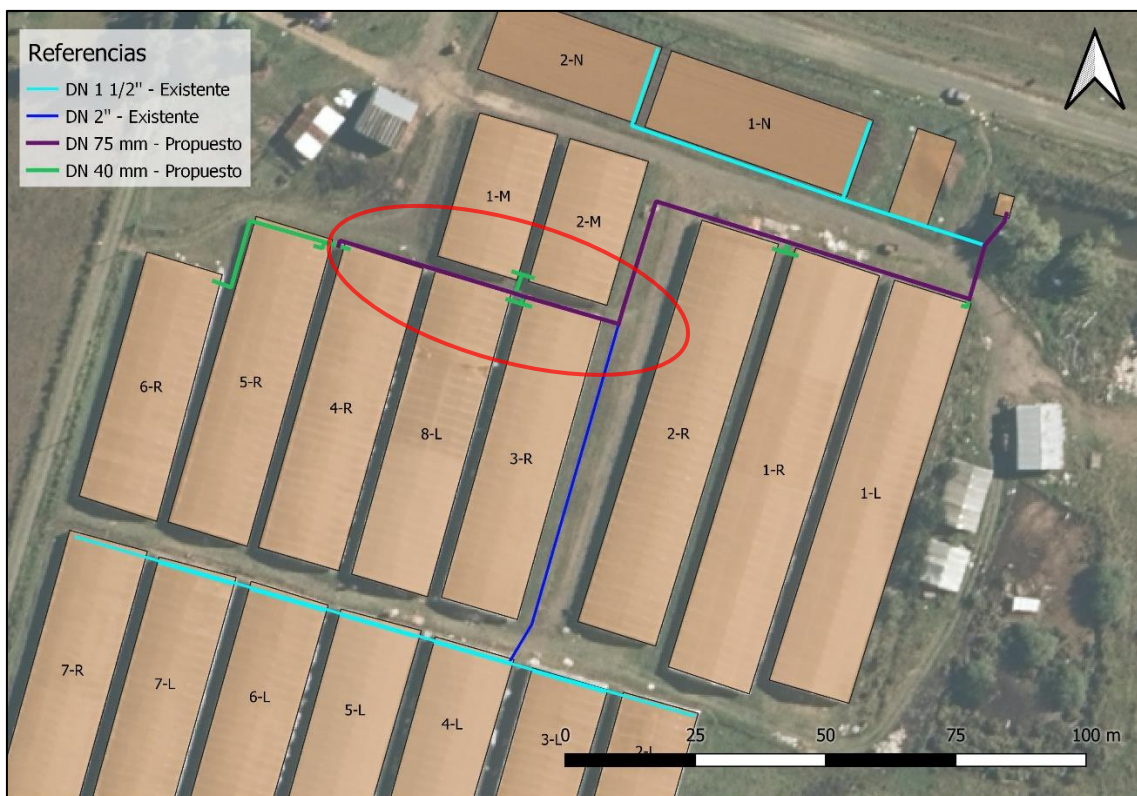


Figura 4.14: Propuesta de alternativa 2

4.5.5 Alternativa 3

Manteniendo la misma idea de orden progresivo de mejoras, la alternativa 3 propone mejorar el funcionamiento del sector inferior (40 % de las combinaciones) cambiando el trazado de la tubería 3, de 2" (50 mm) y el de las conexiones a los invernaderos para ganar en simetría en la distribución del agua de riego.

El concepto de simetría está estrechamente relacionado con el indicador de uniformidad del tiempo de riego. Debido a las características similares de los invernaderos del sector inferior, la simetría es fundamental para obtener tiempos de riego uniformes y mejorar la situación de la alternativa anterior.

Se plantean entonces dos opciones posibles para esta propuesta.

4.5.5.1 OPCIÓN A

La primera opción plantea el cambio del trazado de la tubería principal manteniendo el mismo diámetro. En la Figura 4.15 se presenta el cambio planteado.

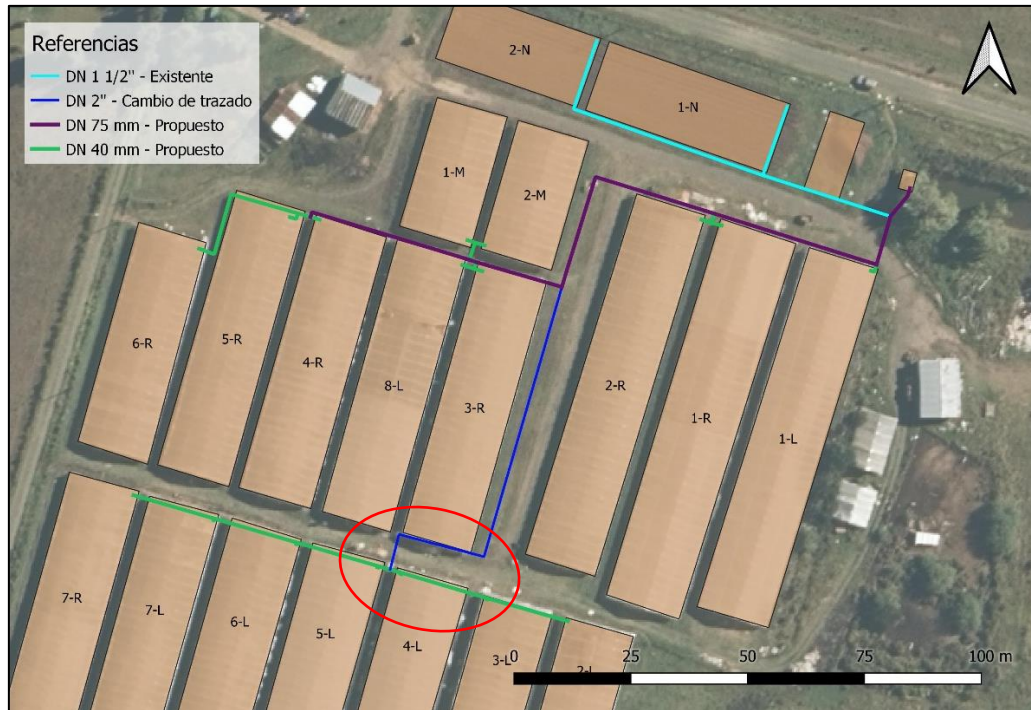


Figura 4.15: Propuesta de alternativa 3a.

4.5.5.2 OPCIÓN B

La segunda opción plantea el cambio del diámetro de la tubería principal a 75 mm, manteniendo la simetría de distribución. En la Figura 4.16 se presenta la propuesta planteada.

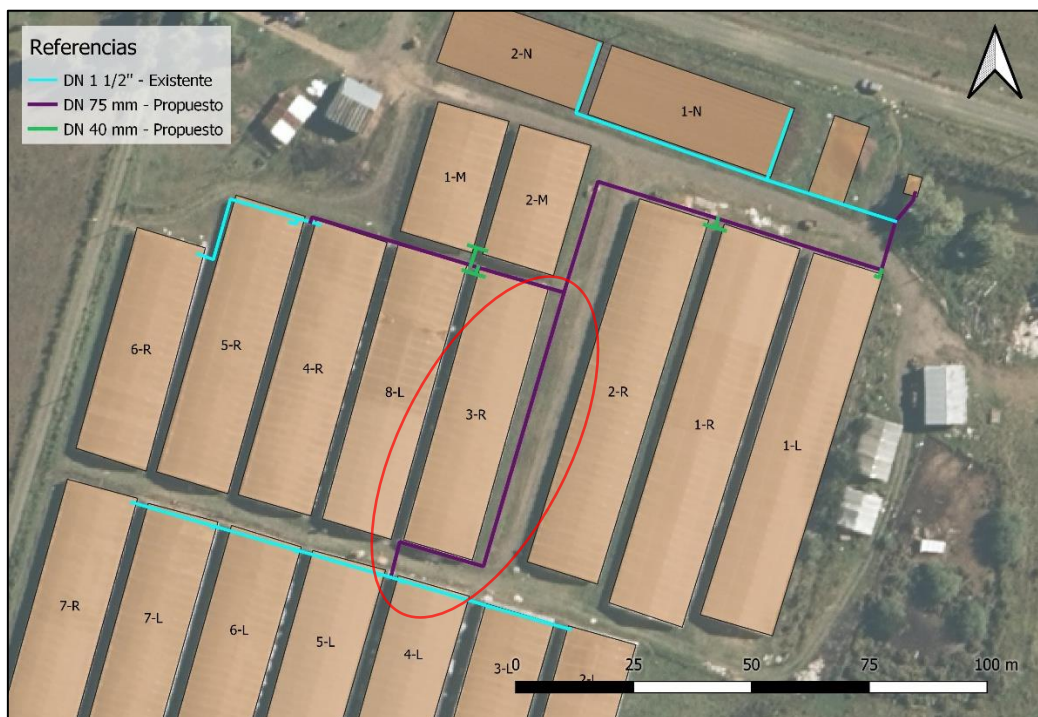


Figura 4.16: Propuesta de alternativa 3b.

4.6 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

La evaluación del desempeño de las alternativas se centra en la comparación de los indicadores de impacto definidos previamente en 4.4.2. El procedimiento de cálculo para la obtención de los puntos de funcionamiento del sistema se explica en 7.2 del ANEXO II.

A continuación, en la Tabla 4.13, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a los tiempos de riego necesarios para cubrir la demanda promedio de cada invernadero en función de la alternativa de diseño propuesta y las opciones de equipos de bombeo planteados.

Tabla 4.13: Comparación de tiempos de riego para cada invernadero en minutos.

Alternativa		1		2		3-a		3-b	
Comb.	Inv.	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	1-L	39	36	40	36	40	36	40	36
	8-L	40	37	37	36	37	36	37	36
2	2-L	48	43	48	43	54	48	43	39
	7-L	53	48	53	48	51	46	42	38
3	3-L	46	41	46	41	52	44	41	37
	6-L	51	46	51	46	49	43	40	37
4	4-L	45	40	45	40	49	44	39	38
	5-L	49	44	49	44	48	43	36	36
5	N-1	45	40	45	40	45	40	45	40
	N-2	46	41	46	41	46	41	46	41
	1-R	43	39	43	39	43	39	43	39
	2-R	43	39	43	39	43	39	43	39
6	1-M	37	36	37	36	37	36	38	36
	2-M	38	36	37	36	37	36	38	36
	3-R	37	36	36	36	37	36	37	36
	7-R	41	37	41	37	40	36	39	36
7	5-R	60	54	38	36	38	36	38	36
	6-R	60	54	39	36	39	36	39	36
	4-R	51	45	37	36	37	36	37	36

Como puede observarse en la tabla anterior, la uniformidad en los tiempos mejora conforme avanza la propuesta de diseño. Si bien la opción de bomba 2 posee tiempos de riego menores a la bomba 1, los resultados de la presión de funcionamiento de cada invernadero explican de mejor forma estos resultados.

Tabla 4.14: Comparación de presiones de funcionamiento para cada invernadero en bar.

Alternativa		1		2		3-a		3-b	
Comb.	Inv.	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	1-L	0,92	1,17	0,89	1,16	0,92	1,17	0,92	1,17
	8-L	0,88	1,10	1,05	1,34	0,88	1,10	0,88	1,10
2	2-L	0,65	0,78	0,65	0,78	0,54	0,65	0,77	0,94
	7-L	0,55	0,65	0,55	0,65	0,59	0,69	0,80	0,98
3	3-L	0,69	0,84	0,69	0,84	0,57	0,74	0,83	1,04
	6-L	0,58	0,69	0,58	0,69	0,62	0,79	0,88	1,10
4	4-L	0,72	0,88	0,72	0,88	0,63	0,75	0,96	0,98
	5-L	0,62	0,74	0,62	0,74	0,65	0,77	1,23	1,25
5	N-1	0,71	0,89	0,71	0,89	0,71	0,89	0,71	0,89
	N-2	0,68	0,83	0,68	0,83	0,68	0,83	0,68	0,83
	1-R	0,76	0,94	0,76	0,94	0,76	0,94	0,76	0,94
	2-R	0,77	0,94	0,77	0,94	0,77	0,94	0,77	0,94
6	1-M	1,04	1,37	1,06	1,40	1,05	1,39	1,04	1,38
	2-M	1,03	1,37	1,05	1,39	1,04	1,39	1,03	1,37
	3-R	1,13	1,48	1,14	1,49	1,14	1,49	1,12	1,48
	7-R	0,84	1,07	0,84	1,09	0,88	1,14	0,96	1,26
7	5-R	0,46	0,55	1,02	1,33	1,02	1,33	1,02	1,33
	6-R	0,46	0,53	0,95	1,26	0,95	1,26	0,95	1,26
	4-R	0,58	0,71	1,06	1,42	1,06	1,42	1,06	1,42

La Tabla 4.14 muestra que las presiones de funcionamiento para la bomba 2 son mayores que para la 1, llegando incluso a superar el rango de funcionamiento de las cintas de goteros. Nuevamente, para la resolución se utilizaron las válvulas completamente abiertas para mantener la simplicidad desde el punto de vista operativo. En la práctica, se debería forzar una pérdida de carga mediante una medida de control, ya sea general para toda la red o individualmente, como lo que se realiza en la situación actual.

Se observa que la bomba 2 se encuentra sobredimensionada para el protocolo de riego propuesto. Por lo tanto, se debería establecer un escenario en el que se rieguen más de 4 invernaderos en simultáneo para el Productor 1. Si bien esto teóricamente es posible, realizar esto en la práctica se dificulta debido a que implica mayor personal disponible en la operación de riego. A los efectos del diseño, se desestima la opción de implementar la bomba 2.

Continuando con la evaluación de alternativas, en la Tabla 4.15, se presenta el tiempo de riego diario. Para calcularlo, se utiliza el máximo dentro de los tiempos individuales de cada combinación. Si bien los tiempos individuales de cada invernadero no son exactamente los mismos, esto define dentro del protocolo propuesto la secuencia de apertura y/o cierre de las válvulas.

Tabla 4.15: Comparación de tiempos de riego total para la bomba 1.

Combinaciones	Alternativas			
	1	2	3-a	3-b
1	40	40	40	40
2	53	53	54	43
3	51	51	52	41
4	49	49	49	39
5	46	46	46	46
6	41	41	40	39
7	60	39	39	39
TR diario (hs)	5,69	5,33	5,32	4,78
Productor 1	2,46	2,10	2,09	2,06
Productor 2	3,23	3,23	3,24	2,72

Puede observarse que se obtiene una mejoría en cuanto a la disminución del tiempo de riego de la combinación, a medida que se realiza una mejora en la red de distribución que afecta la conexión a los invernaderos implicados. Sin embargo, para el caso de la alternativa 3-a, esto no sucede para las combinaciones 2, 3 y 4. Al extender el recorrido, aumentan las pérdidas de carga y consecuentemente disminuye la presión de funcionamiento (ver Tabla 4.14).

A partir de los tiempos diarios de cada combinación, se estiman los costos operativos anuales. Los mismos se presentan en la Tabla 4.16. Al igual que en la tabla anterior, los mejores resultados se presentan para la alternativa 3-b.

Tabla 4.16: Comparación de costos operativos anuales para la bomba 1, en pesos uruguayos.

Combinaciones	Alternativas			
	1	2	3-a	3-b
1	\$ 1.899	\$ 1.916	\$ 1.916	\$ 1.916
2	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.074	\$ 1.840
3	\$ 2.055	\$ 2.055	\$ 2.033	\$ 1.796
4	\$ 2.009	\$ 2.009	\$ 1.958	\$ 1.729
5	\$ 2.267	\$ 2.267	\$ 2.267	\$ 2.267
6	\$ 1.825	\$ 1.820	\$ 1.782	\$ 1.726
7	\$ 2.180	\$ 1.716	\$ 1.716	\$ 1.716
Total	\$ 14.322	\$ 13.870	\$ 13.745	\$ 12.991
Productor 1	\$ 6.272	\$ 5.802	\$ 5.765	\$ 5.709
Productor 2	\$ 8.050	\$ 8.068	\$ 7.981	\$ 7.282

Desde el punto de vista técnico, la alternativa que presenta los mejores indicadores de impacto es la 3-b. Partiendo por el primer indicador de impacto, la diferencia entre los tiempos de riego de los invernaderos de cada combinación es menor a 3 minutos, despreciable en comparación con el tiempo de riego total diario. En cuanto a este, la alternativa 3-b obtiene una reducción del 16 % con respecto la alternativa 1, y una reducción del 9 % para el costo operativo anual estimado.

4.6.1 Proyecto de inversión

En esta sección se presenta la cotización de la implementación de la Alternativa 3b como proyecto ejecutivo acompañado de gráfico que muestra la incidencia de cada rubro en el costo total de inversión, ver Figura 4.17.

Tabla 4.17: Planilla de venta para el cliente. Cotización dólar: \$ 43,90 (28/02/21).

Rubro	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Total (USD)
Instalación de tubería 75 mm	m	250	\$ 303	\$ 75.684	USD 1.724
Equipo de bombeo (EB)	Gl	1	\$ 72.303	\$ 72.303	USD 1.841
Instalación eléctrica	Gl	1	\$ 21.950	\$ 21.950	USD 500
Accesorios de tubería 75 mm	Gl	1	\$ 4.610	\$ 4.610	USD 105
Manómetro	U	1	\$ 1.098	\$ 1.098	USD 25
				\$ 184.161	USD 4.195

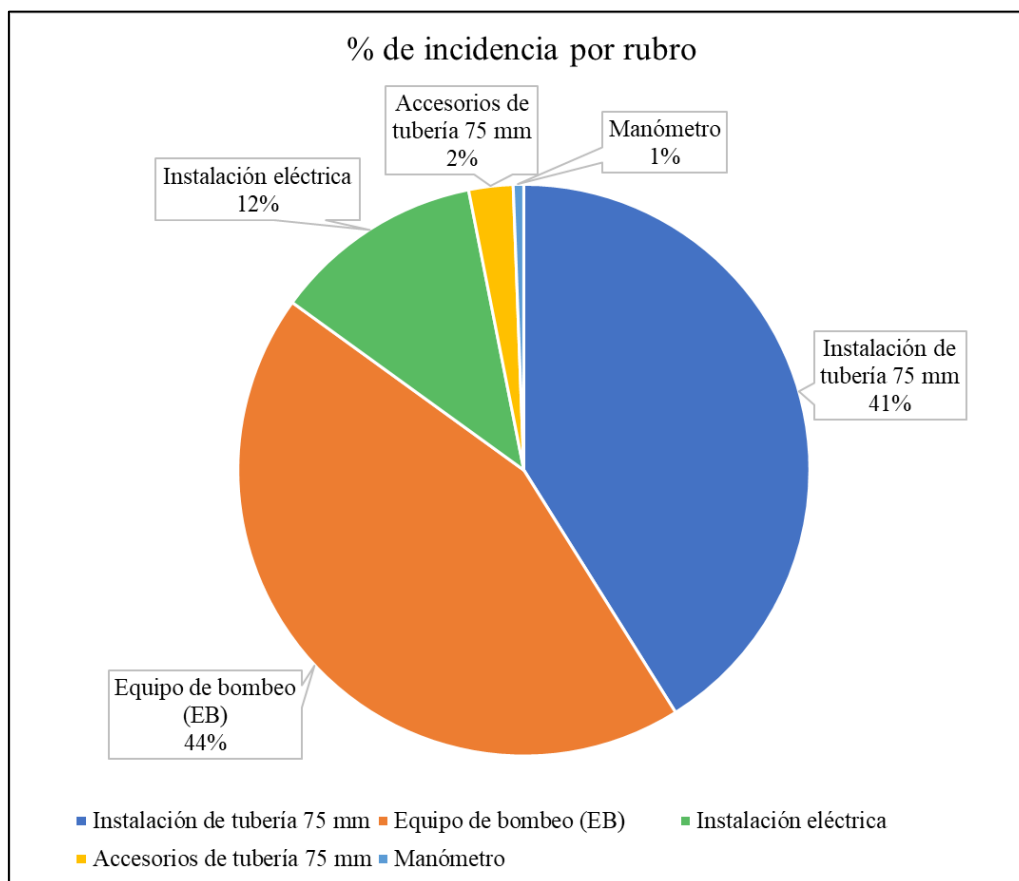


Figura 4.17: % de incidencia por rubro sobre costo total de inversión.

El despiece del diseño seleccionado se encuentra en 6.1 del ANEXO I.

4.7 ANÁLISIS COMPARATIVO Y AMORTIZACIÓN

Seleccionada la alternativa óptima de diseño, se evalúan los indicadores de impacto para el mismo y se comparan con la condición actual.

En la Tabla 4.18, se realiza una comparación del tiempo diario de riego total y el costo operativo anual de cada productor para ambas condiciones:

Tabla 4.18: Evaluación de indicadores de impacto.

	Costo operativo anual (\$)			Tiempo total de riego diario (hs)		
	Actual	Diseño	Ahorro	Actual	Diseño	Ahorro
Productor 1	\$ 8.582	\$ 5.709	33%	4,1	2,1	50%
Productor 2	\$ 10.437	\$ 7.282	30%	5,0	2,7	46%
TOTAL	\$ 19.020	\$ 12.991	32%	9,1	4,8	48%

En las figuras Figura 4.18 y Figura 4.19 se muestran los datos de la tabla anterior de forma gráfica.

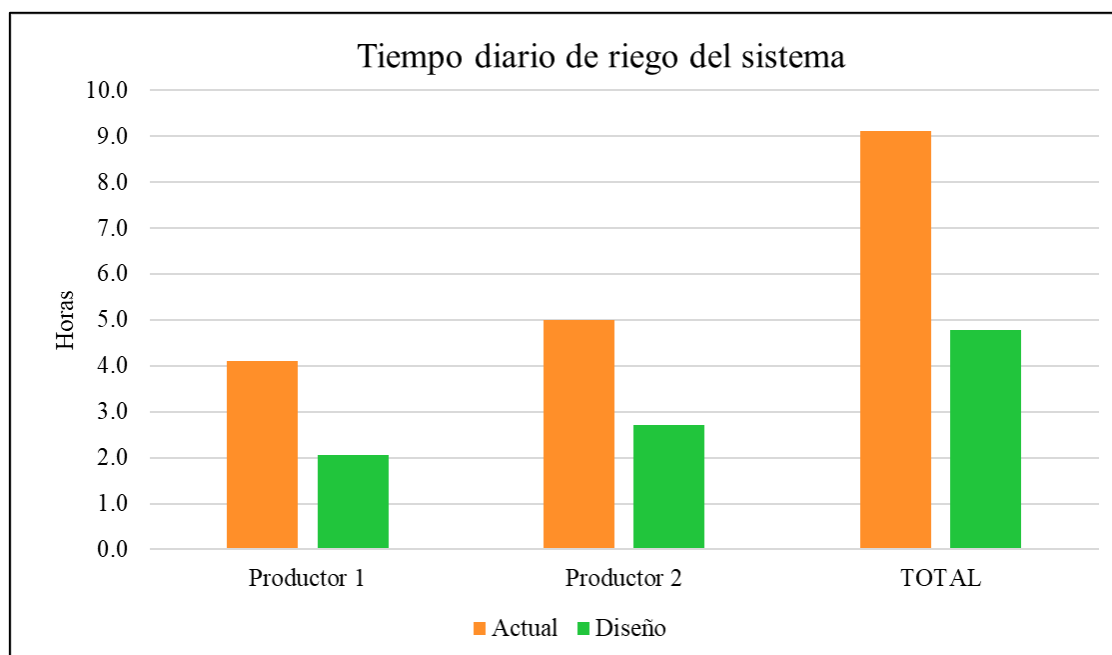


Figura 4.18: Comparación del tiempo total de riego diario.

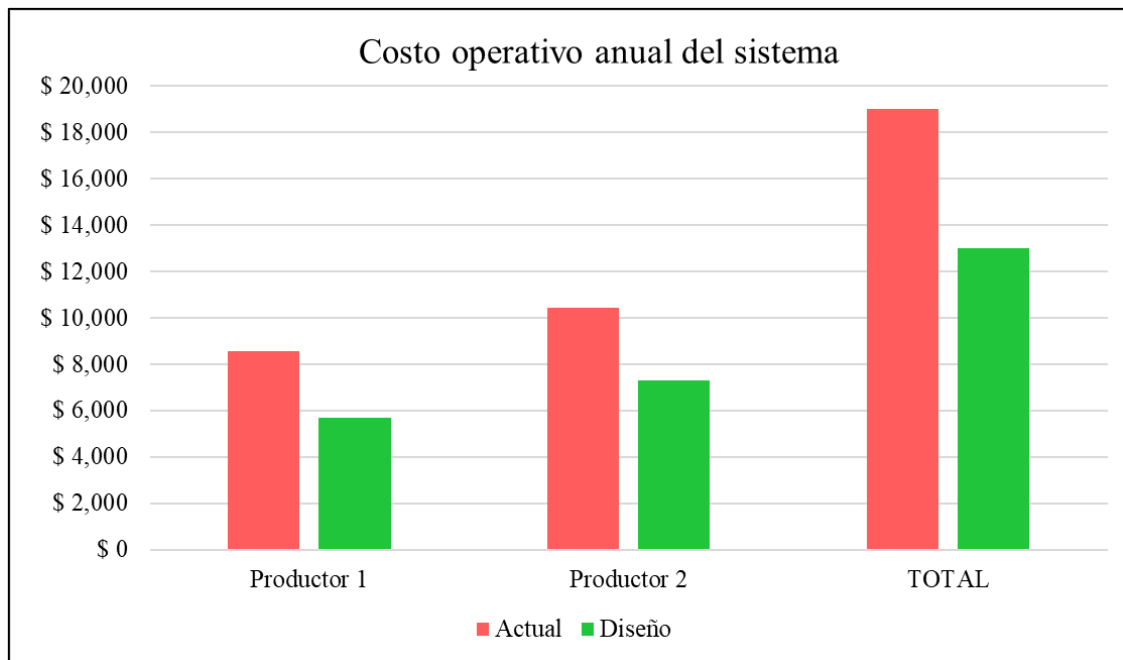


Figura 4.19: Comparación de costos operativos del sistema de riego.

A partir de los datos disponibles para este estudio, el costo horario del jornal de riego es conocido. Dado que es posible cuantificar cuantas horas de riego anuales se ahorran en promedio y la disminución del costo operativo anual, se realiza un análisis de la amortización de la inversión. Los resultados se muestran la Tabla 4.19.

Tabla 4.19: Tiempo de amortización de la inversión.

Ahorro en tiempo de riego	Jornal de riego (U\$S/hr)	4
	Horas diarias ahorradas	4,3
	Horass anuales ahorradas	1.579
	Costo anual ahorrado	USD 6.315
Ahorro operativo	Costo operativo anual ahorrado	USD 137
	Ahorro anual total	USD 6.452
	Costo de inversión	USD 4.195
	Tiempo de amortización (meses)	8

4.8 CONCLUSIONES

Realizar un procedimiento incremental hasta alcanzar la solución óptima de diseño del sistema de riego, hizo posible aprovechar gran parte de la red de tuberías existentes y reducir en un 48% el tiempo de riego y un 32% el costo operativo asociado, en comparación con la situación actual. Además, el sistema propuesto es robusto en cuanto a la operación ya que permite que el sistema trabaje dentro de los rangos de presión y caudal aceptables en condición libre, es decir, sin necesidad de utilizar medidas de control adicionales, siempre y cuando se respete el protocolo de riego establecido para dicho sistema. Todo esto atendiendo a la escala de producción del establecimiento, con un costo de inversión capaz de amortizarse en menos de un año. De este modo, se concluye que todos los objetivos planteados para este caso de estudio se cumplieron satisfactoriamente.

A modo general, en las visitas a campo no solo se interactuó con los productores del vivero en cuestión, sino que también con algunos de los productores pertenecientes al grupo “*La Escobilla*”. Todos dejaron entrever una problemática que este sector productivo padece: la merma en el relevo generacional. Esto repercute en múltiples dimensiones que no vienen al caso, pero lo que es claro, es que una de las causas de dicha problemática es lo sacrificado que resulta esta actividad para los productores. Este estudio resulta ser una pequeña demostración de que, con pequeños cambios de infraestructura y rutina en el vivero, es posible lograr mejoras significativas en las condiciones de trabajo, gestión del recurso agua y eficiencia energética.

5 CONCLUSIONES GENERALES

Los casos de estudio que forman parte de este proyecto, abordan el tema de la gestión del riego y la racionalización del uso del agua en viveros desde perspectivas muy diferentes: mientras que el primero se enfrenta a la necesidad de reducir drásticamente el volumen de agua, al punto de desarrollar una herramienta que permita conocer la variación de la humedad en las plantas de cultivo y, en base a esto, tomar decisiones en cuanto al volumen de agua a aplicar; el segundo, conociendo la demanda diaria de riego, se enfrenta a la necesidad de implementar un cambio en su sistema de riego que le permita reducir el tiempo de esta práctica, ya que su sostenibilidad se encuentra comprometida sensiblemente por esta causa.

Sin embargo, los métodos de resolución de ambas problemáticas adquieren un carácter complementario a la hora de abordar la temática de los viveros en general. El estudio inicia en conocer las variables climáticas, del medio y método de cultivo que inciden en la variación de humedad en el sustrato en el que se desarrolla la planta, lo que permite construir y validar un modelo que determina el momento exacto de aplicación de agua de acuerdo a un protocolo de riego establecido; y finaliza en el diseño de un sistema de riego para cubrir la demanda de las plantas de forma precisa, ya que el caudal suministrado a cada una es conocido. Además, estas aristas permiten conocer diferentes variables que son de gran utilidad para la gestión de un vivero, por ejemplo, volumen de agua requerido considerando las condiciones climáticas, tiempos de riego y energía requerida.

6 ANEXO I

6.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En este apartado, se identifican elementos que componen el diseño de la alternativa seleccionada y la cantidad necesaria de cada uno.

Tabla 6.1: Especificaciones técnicas para el diseño propuesto.

<i>Cantidad</i>	<i>Detalle</i>
1	Bomba KSB Megabloc 050-032-125 Ø120
1	tablero de encendido para bomba
1	manómetro de 0 a 6 bar con glicerina
23	metros tubo PEAD 40 mm, PN 8 Kg/cm ² según norma ISO 4427
250	metros tubo PEAD 75 mm, PN 8 Kg/cm ² según norma ISO 4427
5	unión acople rápido PE 75 mm
1	unión de reducción 32 x 75
7	unión de reducción 75 x 40
1	codo 90° acople rápido PEAD 50 x 50
6	codo 90° acople rápido PEAD 75 x 75
15	tee acople rápido PEAD 75 x 75 x 75
1	tee acople rápido PEAD 50 x 1 1/2" x 50
4	tee acople rápido PEAD 40
1	válvula PEAD 50 x 50
2	válvula compuerta bronce 75 x 75
1	filtro para arena de tipo malla 2''

6.2 FERTIRRIGACIÓN

En esta sección se define una posibilidad de media de control que permite la irrigación cualquier invernadero por separado para que la presión en los goteros se encuentre entre dentro de rangos aceptables (0,5 y 1 *bar* que se corresponde con un caudal de 0,7 y 1 *L/h* en los goteros). La misma consiste en una válvula compuerta instalada aguas abajo del dispositivo Venturi y una desviación tee con un acople rápido para un manómetro instalado aguas arriba. Esta medida puede ser utilizada para la fertirrigación o solarización⁶ de los invernaderos.

La Tabla 6.2 muestra el rango de presión en que se debe encontrar la presión medida en el manómetro.

Tabla 6.2: Rango de presiones en medida de presión en medida de control para cada invernadero.

	Pmin (bar)	Pmax (bar)
1-R	0,56	1,16
2-R	0,55	1,15
3-R	0,54	1,10
4-R	0,54	1,10
5-R	0,55	1,13
6-R	0,60	1,27
7-R	0,65	1,40
1-L	0,60	1,29
2-L	0,82	1,85
3-L	0,73	1,61
4-L	0,61	1,30
5-L	0,61	1,31
6-L	0,72	1,60
7-L	0,84	1,90
8-L	0,59	1,24
1-M	0,51	1,03
2-M	0,51	1,03
N-1	0,55	1,13
N-2	0,63	1,35

⁶ La solarización de un invernadero se realiza cuando el mismo no se encuentra cultivado y consiste en su completo sellado con nylon con el fin de aumentar su temperatura para la destrucción de patógenos y hongos. Se deben mantener determinadas condiciones de humedad en el mismo.

7 ANEXO II

7.1 CÁLCULOS DE PÉRDIDAS DE CARGA

7.1.1 Pérdida de carga distribuida

Las pérdidas de carga distribuidas se calculan con el coeficiente de fricción de *Darcy-Waisbach* (f). El mismo se determina a partir del *ábaco de Moody*, pero para facilitar los cálculos se utiliza la expresión explícita de Zigrang (Zigrang & Sylvester, 1982) ya que al comparar los resultados con el método tradicional de cálculo se obtuvieron buenas aproximaciones. La expresión es la siguiente:

$$f = \left\{ -2,0 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3,7} - \frac{5,02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} - \frac{5,02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{13}{Re} \right) \right) \right] \right\}^{-2}$$

Siendo:

- ε = rugosidad absoluta (PEAD, 0,0015 mm)
- D = diámetro interno de la tubería (mm)
- Re = número de Reynolds

La fórmula de pérdida de carga distribuida (HL_f) es la siguiente:

$$HL_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- L = longitud de la tubería (m).
- g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
- v = velocidad de fluido en el tramo (m/s)

7.1.2 Pérdidas de carga localizada

En la Tabla 7.1 se presentan los coeficientes (k) utilizados para el cálculo de pérdida de carga localizada de los artefactos identificados en la red (existente y diseñada), cuyos valores fueron recabados de diferentes proveedores.

Tabla 7.1: Coeficientes de pérdida de carga localizada para distintos accesorios.

DN (pulgadas)	Codo 90°	T en línea	T en lateral	T ambas direcciones	Válvula esférica	válvula compuerta	válvula de pie
1 ½	0,63	0,42	1,26	1,50	2,50	0,15	2,10
2	0,57	0,38	1,14	1,50	2,50	0,15	1,90
2 ½ y 3	0,54	0,36	1,08	1,50	2,50	0,14	1,80

Para el caso del filtro de arena, se determina el coeficiente a partir de la siguiente información (ver Figura 7.1).

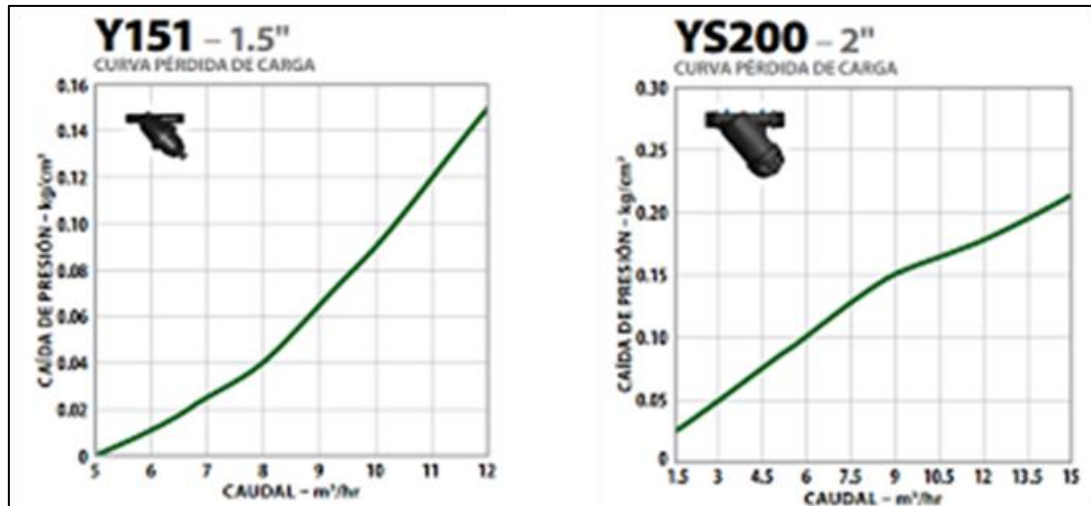


Figura 7.1: Curva de pérdida de carga para filtros en función del caudal (Wade Rain, 2020).

La fórmula de pérdida de carga localizada (HL_s) es la siguiente:

$$HL_s = k \frac{v^2}{2g}$$

7.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

En esta sección se detallan los procedimientos de cálculo para determinar los puntos de funcionamiento del sistema según la cantidad de invernaderos que se rieguen en simultáneo. Para el cálculo se utiliza la formulación de *Darcy-Weisbach*, donde la carga hidráulica entre dos puntos (1 y 2), unidos por una tubería a presión, queda determinada por:

$$h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} - k \frac{v^2}{2g}$$

Siendo:

- h_i = cota geométrica (m)
- p_i = presión en la tubería (Pa)
- γ = peso específico del fluido (Kg/m^3)

7.2.1 Un invernadero

En la Figura 7.2 se muestra de forma esquemática la situación al regar un solo invernadero.

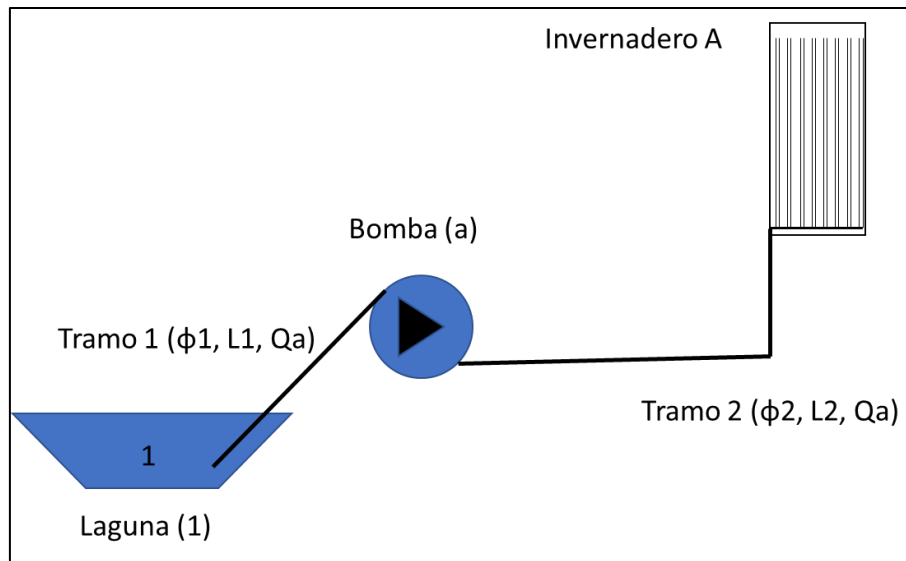


Figura 7.2: Situación de riego con un invernadero.

Para este caso, se procede de la siguiente manera:

1. Se supone presión de funcionamiento en el invernadero (p_A).
2. Con la presión de funcionamiento, se determina el caudal del gotero y se multiplica por el número de goteros del invernadero para determinar su caudal de demanda (en este caso, igual al caudal de la bomba, Q_a).
3. Se itera en el valor de presión de funcionamiento de modo que la carga en el invernadero se iguale con la calculada a partir del punto de funcionamiento de la bomba ($Q_a - H_a$) y la cota geométrica promedio de la laguna (h_1).

$$h_1 - HL_S^{(1)} - HL_f^{(1)} + H_a - HL_S^{(2)} - HL_f^{(2)} = h_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

7.2.2 Dos invernaderos

La situación al regar 2 invernaderos al mismo tiempo se plasma en la Figura 7.3.

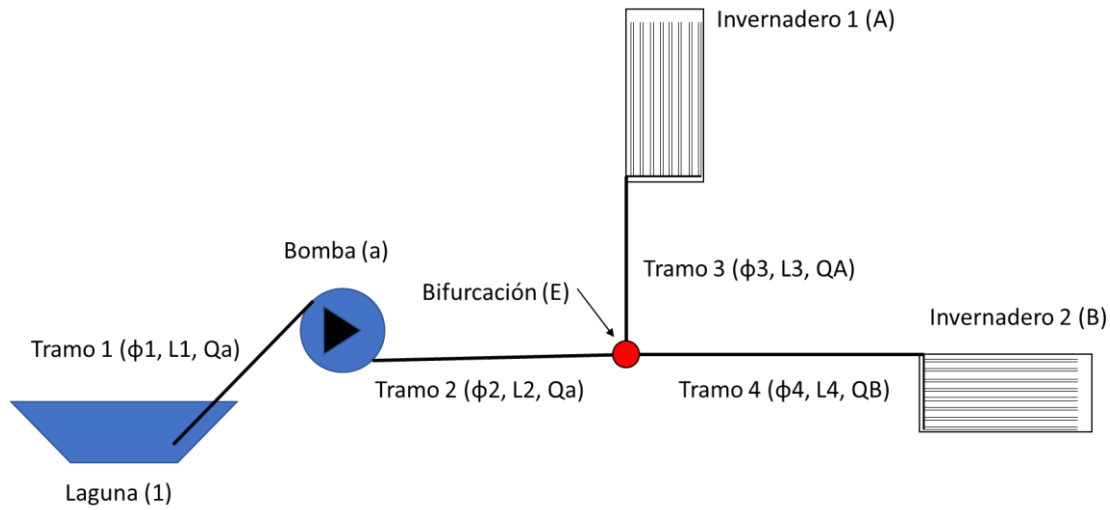


Figura 7.3: Situación de riego con dos invernaderos en simultáneo.

El procedimiento para determinar el punto de funcionamiento de la bomba es el siguiente:

1. Se impone un valor carga en el nodo de bifurcación (H_E).
2. Se supone una presión de funcionamiento en cada invernadero (p_A y p_B).
3. Con la presión de funcionamiento, se determina el caudal del gotero y se multiplica por el número de goteros del invernadero para determinar el caudal de cada tramo (Q_A y Q_B).
4. Se itera en el valor de presión de funcionamiento de modo que la carga en el invernadero se iguale a la carga en el nodo de bifurcación menos las pérdidas de carga del tramo.

$$H_E - k_i \frac{v_i^2}{2g} - f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{v_i^2}{2g} = h_j + \frac{p_j}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g}$$

Siendo j el subíndice referido al invernadero e i el subíndice referido al tramo que llega al invernadero j .

5. Se resuelve balance de masa en E y se obtiene el caudal Q_a .
6. Se halla la carga hidráulica en la bifurcación a partir del punto de funcionamiento de la bomba ($Q_a - H_a$) y la cota geométrica promedio de la laguna.

$$h_1 - HL_S^{(1)} - HL_f^{(1)} + H_a - HL_S^{(2)} - HL_f^{(2)} = H_E$$

7. Se itera en la carga de la bifurcación hasta que la carga calculada y supuesta se igualen.

7.2.3 Tres invernaderos

De forma esquemática, en la Figura 7.4 se presenta la situación de regarse tres invernaderos en simultáneo.

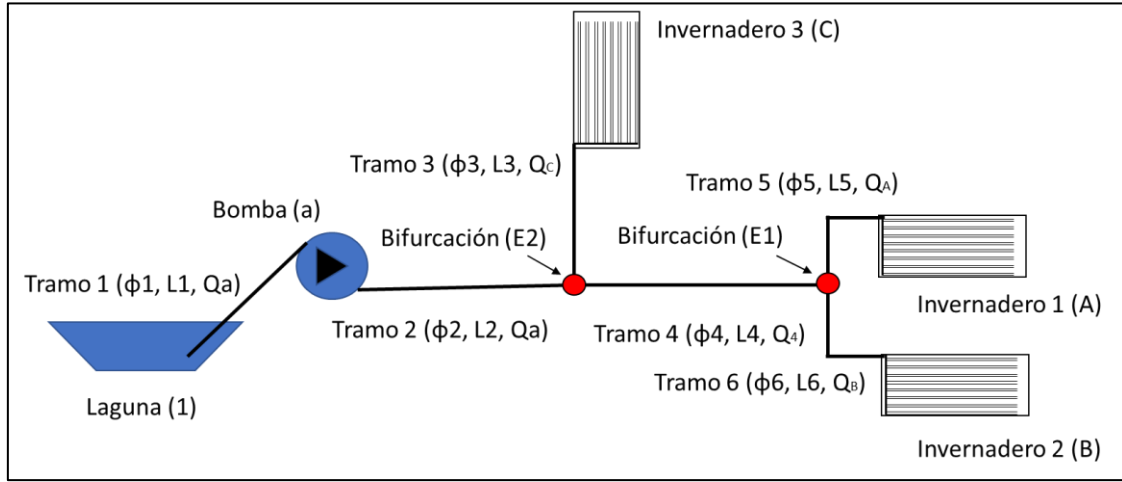


Figura 7.4: Situación de riego con tres invernaderos en simultáneo.

El procedimiento para determinar el punto de funcionamiento es el siguiente:

1. Se impone un valor carga en el nodo de bifurcación 2 (H_{E2}).
2. Se supone una presión de funcionamiento en cada invernadero (p_A , p_B y p_C).
3. Con la presión de funcionamiento, se determina el caudal del gotero y se multiplica por el número de goteros del invernadero para determinar el caudal de cada tramo (Q_A , Q_B y Q_C).
4. A partir de la carga en E_2 y el caudal en el tramo 4 (balance de masa en E_1), se determina la carga en E_1 .

$$H_{E1} = H_{E2} - HL_S^{(4)} - HL_f^{(4)}$$

5. Se itera en el valor de presión de funcionamiento (p_A y p_B) de modo que la carga en el invernadero se iguale a la carga en el nodo de bifurcación (E_1) menos las pérdidas de carga de cada tramo. De igual modo se procede con el invernadero 3 (p_B y E_2).

$$H_{Ex} - k_i \frac{v_i^2}{2g} - f_i \frac{L_i v_i^2}{D_i 2g} = h_j + \frac{p_j}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g}$$

Siendo los subíndices: j el referido al invernadero, i referido al tramo que llega al invernadero j y x referido al nodo de bifurcación según sea el caso.

6. Se resuelve balance de masa en E_2 y se obtiene el caudal Q_a .
7. Se halla la carga hidráulica en la bifurcación a partir del punto de funcionamiento de la bomba ($Q_a - H_a$) y la cota geométrica promedio de la laguna.
8. Se itera en la carga de la bifurcación hasta que la carga calculada y supuesta se igualen.

Observación: Si el invernadero 3 se conecta al mismo nodo que el 1 y 2, el caso es análogo al caso de dos invernaderos con la salvedad de tener tres demandas en simultáneo.

7.2.4 Cuatro invernaderos

Para este caso, se distinguen dos posibles escenarios: dos bloques en paralelo o en serie. La Figura 7.5 muestra el esquema general para el primer escenario y la Figura 7.6 para el segundo.

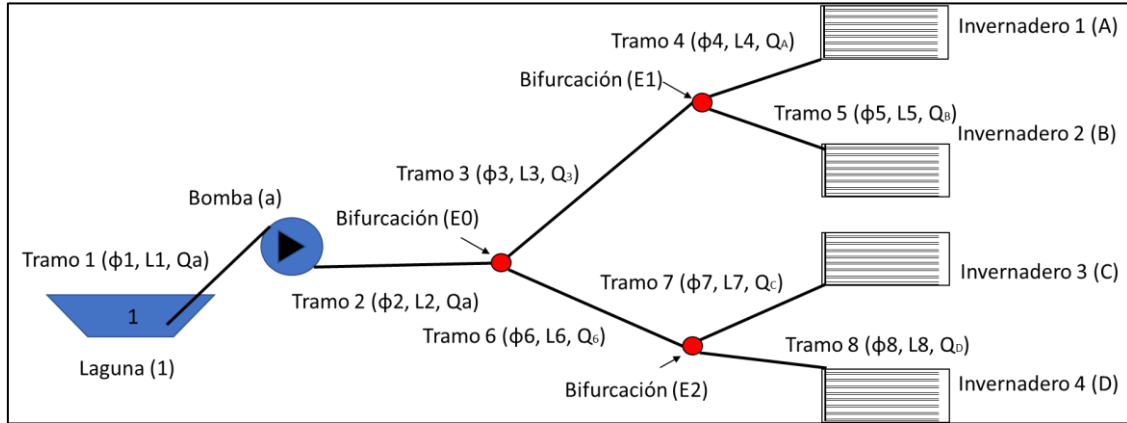


Figura 7.5: Situación de riego con cuatro invernaderos en simultáneo, 2 bloques en paralelo.

Para resolver el primer caso, se procede de la siguiente manera:

1. Se impone un valor carga en el nodo de bifurcación 0 (H_{E0}).
2. Se supone una presión de funcionamiento en cada invernadero (p_A , p_B , p_C y p_D).
3. Con la presión de funcionamiento, se determina el caudal del gotero y se multiplica por el número de goteros del invernadero para determinar el caudal de cada tramo (Q_A , Q_B , Q_C y Q_D).

Los siguientes pasos se aplicarán por igual a cada bloque, a modo de ejemplo, se aplica el razonamiento al bloque 1 (invernaderos A y B).

4. A partir de la carga en E_0 y el caudal en el tramo 3 (balance de masa en E_1), se determina la carga en E_1 .

$$H_{E1} = H_{E0} - HL_S^{(3)} - HL_f^{(3)}$$

5. Se itera en el valor de presión de funcionamiento (p_A y p_B) de modo que la carga en el invernadero se iguale a la carga en el nodo de bifurcación (E_1) menos las pérdidas de carga del tramo.

$$H_{Ex} - k_i \frac{v_i^2}{2g} - f_i \frac{L_i v_i^2}{D_i 2g} = h_j + \frac{p_j}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g}$$

Siendo los subíndices: j el referido al invernadero, i referido al tramo que llega al invernadero j y x referido al nodo de bifurcación según el nodo.

Una vez resueltos ambos bloques, se continúa con los siguientes pasos.

6. Se resuelve balance de masa en E_0 y se obtiene el caudal Q_a .
7. Se halla la carga hidráulica en la bifurcación a partir del punto de funcionamiento de la bomba ($Q_a - H_a$) y la cota geométrica promedio de la laguna.
8. Se itera en la carga de la bifurcación hasta que la carga calculada y supuesta se igualen.

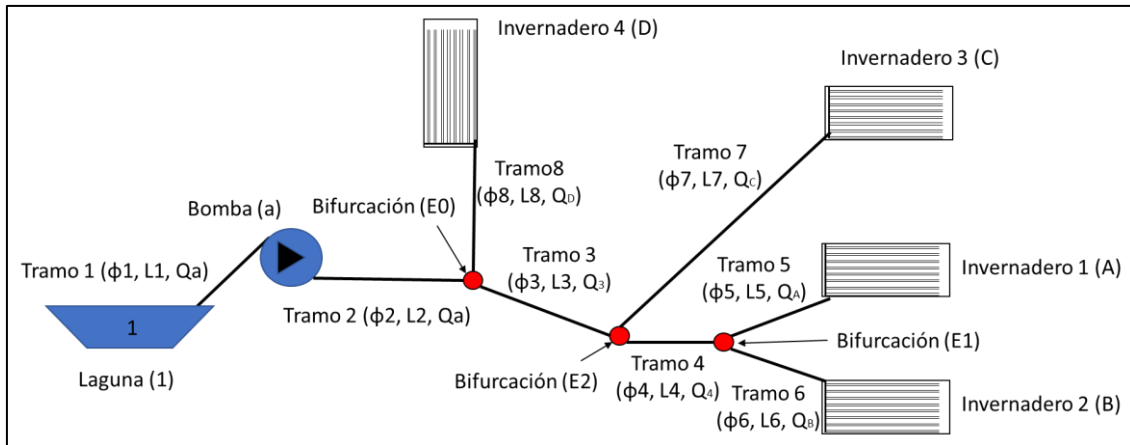


Figura 7.6: Situación de riego con cuatro invernaderos en simultáneo, 2 bloques en serie.

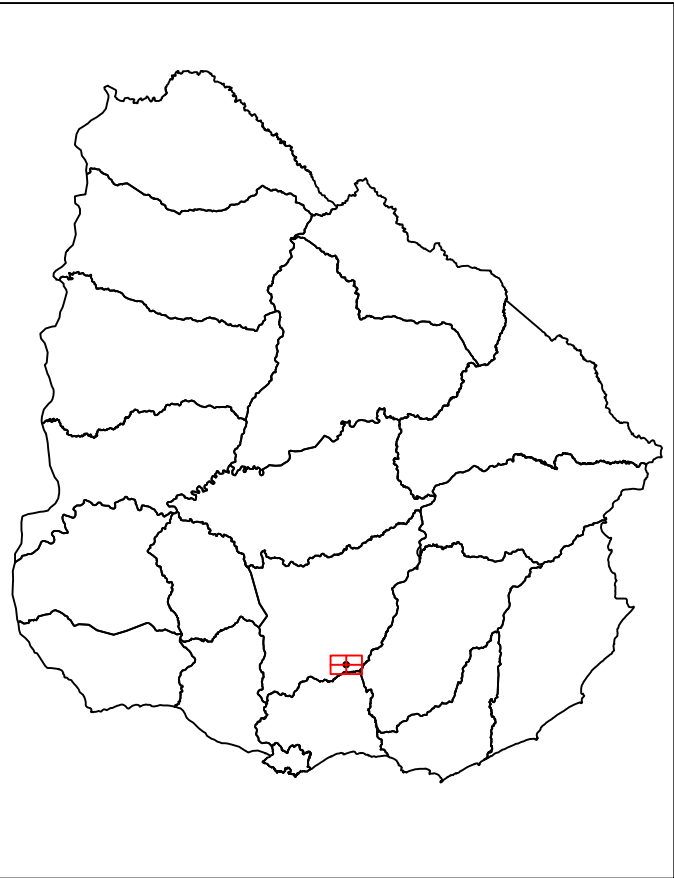
Para el segundo caso, puede observarse que es una situación similar al caso de tres invernaderos en simultáneo previamente expuesto. El procedimiento de cálculo es análogo al caso mencionado.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Baek, S. S., Ligaray, M., Pyo, J., Park, J. P., Kang, J. H., Pachepsky, Y., . . . Cho, K. H. (2020). A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds. *Journal of Hydrology*, 586. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124886
- Bisht, D. S., Chatterjee, C., Kalakoti, S., Upadhyay, P., Sahoo, M., & Panda, A. (2016). Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. *Nat Hazards*, 84, 749-776. doi:https://doi.org/10.1007/s11069-016-2455-1
- Gorgoglione, A., Bombardelli, F., Pitton, B. J., Oki, L. R., Haver, D. L., & Young, T. M. (2019). Uncertainty in the parameterization of sediment build-up and wash-off processes in the simulation of sediment transport in urban areas. *Environ. Model. Softw.*, 111, 170-181. doi:https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.022
- Kumar, V., Gerrero, F., Tansel, B., & Savabi, R. (2010). Hydro-physical characteristics of selected media used for containerized agriculture systems. doi:https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.023
- Lee, S. B., Yoon, C. G., Jung, K. W., & Hwang, H. S. (2010). Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM. *Water Sci. Technol.*, 62(6). doi:https://doi.org/10.2166/wst.2010.302
- Pitton, B., Johnson, G., Haver, D., & Oki, L. (2018). *Water use and estimated evapotranspiration at a California container plant nursery*. California.
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory-Office of Research and Development. Cincinnati, OH, USA: EPA/600/R-14/413b.
- Rossman, L. A. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I - Hydrology (Revised)*. U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory-Office of Research and Development, Cincinnati, OH, USA.
- Rossman, L. A. (2017). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*. U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Laboratory-Office of Research and Development. Cincinnati, OH, USA: EPA/600/R-17/111.
- Wade Rain. (2020, Diciembre). Retrieved from Filtros de arena: www.waderain.com
- Yazdi, M. N., Sample, D. J., Scott, D., & Owen, J. S. (2018). Water quality characterization of irrigation and storm runoff for a nursery. International Conference on Urban Drainage Modelling. *UDM2018: New Trends in Urban Drainage Modelling*, 788-793. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1_136
- Yazdi, M. N., Sample, D. J., Scott, D., Owen, J. S., Ketabachy, M., & Alamadari, N. (2019). Water quality characterization of storm and irrigation runoff from a container nursery. *Sci. Tot. Env.*, 667, 166-178. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.326

Zigrang, D. J., & Sylvester, N. D. (1982). *Explicit approximations to the solution of Colebrook's friction factor equation*. Tulsa: College of Engineering and Physical Sciences.

PLANTA GENERAL ESCALA 1:500



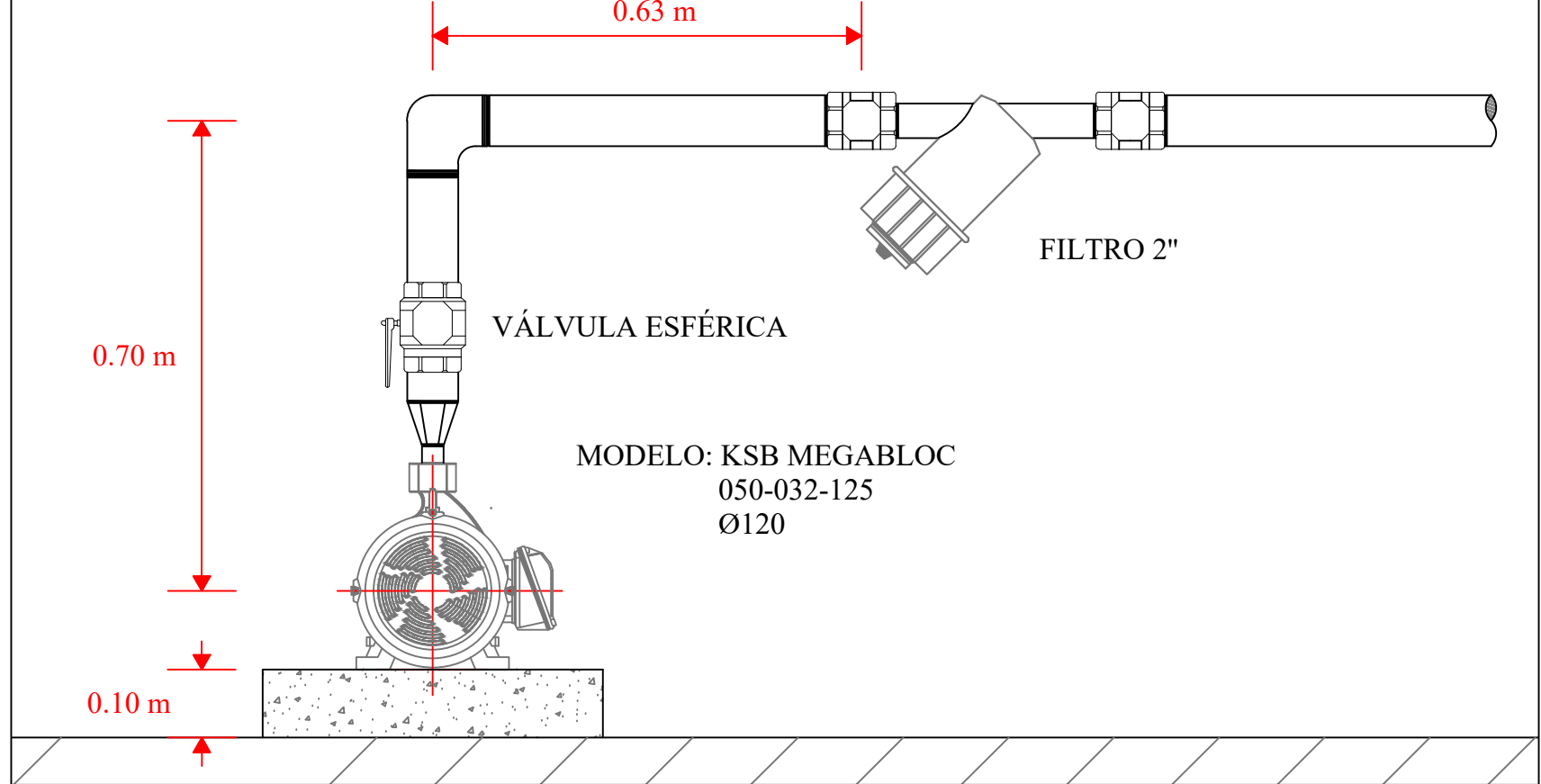
REFERENCIAS DE PLANTA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Tubería proyectada 75 mm
	Tubería proyectada 40 mm
	Tubería existente
	Codo 90°
	Tee
	Cambio de diámetro
	Válvula esférica
	Válvula de compuerta
	Tubería para limpieza
	Dispositivo Venturi
	Manómetro

NOTAS

- En planta general se muestra el esquema constructivo de la tubería de distribución de agua para riego.
- Se presenta el detalle esquemático en planta y corte del equipo de bombeo propuesto.
- La obra implica la instalación de 250 metros de tubería principal de PEAD 75 mm.
- La tubería principal estará enterrada con una tapada de 20 cm. En la entrada de cada invernadero estará al descubierto.
- Se reutilizarán los tramos de tubería secundaria de PEAD 40 mm existentes para la propuesta realizada.
- Se reutilizarán los artefactos de la tubería secundarias para la propuesta realizada.
- Se reutilizarán las cintas de goteros para todos los invernaderos.
- Para la fertirrigación de cada invernadero, se ajustará la válvula compuerta en el tramo principal según la tabla adjunta en el Anexo del documento del proyecto.

CORTE - EQUIPO DE BOMBEO ESCALA 1:10



PLANTA - EQUIPO DE BOMBEO ESCALA 1:10

